



PROYECTO DE GRADO

INVESTIGACIÓN OPERATIVA

Optimización de Estrategias de Inversión Agropecuaria en Uruguay

Un Modelo de Optimización Lineal para la Toma de Decisiones en Forestación,
Ganadería y Silvopastoreo

Autores:

Juan Martín AZADIAN QUAGLIATA

Baltasar CARRASCO IEWDIUKOW

Nicolás César MAUTONE ESTAPÉ

Supervisores:

Dr. Ing. Franco ROBLEDO

MSc. Ing. Agustín LÓPEZ DE LACALLE

Informe de Proyecto de Grado presentado al Tribunal Evaluador como requisito
de graduación de la carrera Ingeniería en Computación
Montevideo - Agosto 2023

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Ing. Pablo REBUFELLO

MSc. Ing. Bruno RIENZI

Dr. Roberto SCOZ

Dr. Pablo SARTOR

Agradecimientos

Quisiéramos aprovechar esta ocasión para expresar nuestro agradecimiento a todos los que participaron en la elaboración de este documento. Especialmente, nos gustaría reconocer la guía invaluable de nuestros tutores, Dr. Ing. Franco Robledo y MSc. Ing. Agustín López de Lacalle.

Además, nos gustaría expresar nuestra gratitud hacia José Dutra y Roberto Scoz, cuyas contribuciones han sido cruciales para la realización de este trabajo.

No podemos dejar de agradecer también a nuestros familiares y amigos, cuyo apoyo incondicional a lo largo de nuestra carrera ha sido un pilar fundamental. Un reconocimiento igualmente importante va para todos los docentes que nos asistieron con su conocimiento.

Es con gran orgullo que entregamos este documento final a la Facultad de Ingeniería, esperando que pueda ser de utilidad tanto en la aplicación práctica como en futuras investigaciones.

Abstract

The main objective of this thesis is to develop a model that considers the Uruguayan reality regarding forestry, livestock, and silvopasture, capable of selecting the most profitable investment given a specific field, a budget, and a desired investment term. Through the creation of test cases and sensitivity analysis on different parameters, the impacts of each one were explored and how they favor the choice of specific investment strategies. The obtained results align with the utilized literature and are corroborated by various existing studies.

Among the conclusions, it is highlighted that the proposed model performs adequately, carrying out quick and efficient calculations that reflect the industry's reality. This thesis paves the way for future research in this field, as there is currently a scarcity of clear analysis on the economic profitability of livestock, forestry, and silvopasture in Uruguay. Moreover, this model can serve as a useful tool for individuals interested in investing in the agricultural sector without prior knowledge, laying the groundwork for expanding the model to consider new strategies in future investigations.

Keywords: Linear optimization model, Agricultural investments, Uruguayan agriculture, Forestry, Livestock, Silvopasture, Economic profitability, Sensitivity analysis, Investment strategies, Decision-making tool.

Resumen

La presente tesis tiene como objetivo principal desarrollar un modelo que tenga en cuenta la realidad uruguaya en cuanto a la forestación, ganadería y silvopastoreo, capaz de elegir la inversión más rentable dado un campo específico, un presupuesto y un plazo de inversión deseado. A través de la creación de casos de prueba y el análisis de sensibilidad sobre distintos parámetros, se exploraron los impactos de cada uno y cómo favorecen la elección de determinadas estrategias de inversión. Los resultados obtenidos se ajustan a la bibliografía utilizada y se corroboran con diferentes estudios existentes.

Entre las conclusiones, se destaca que el modelo propuesto funciona de manera adecuada, realizando cálculos rápidos y eficientes que reflejan la realidad de la industria. La tesis abre el camino a futuras investigaciones en este ámbito, ya que actualmente existe una escasez de análisis claros sobre la rentabilidad económica de la ganadería, la forestación y el silvopastoreo en Uruguay. Esta sienta las bases para expandir el modelo a nuevas estrategias a considerar en futuras investigaciones.

Palabras clave: Modelo de optimización lineal, Inversiones agropecuarias, Uruguay, Herramienta de toma de decisiones, Forestación, Ganadería, Silvopastoreo, Análisis de sensibilidad, Rentabilidad, Estrategias de inversión

Índice

1. Plan de trabajo	8
2. Introducción	10
2.1. Descripción del problema	10
2.2. Forestación	11
2.2.1. Forestación de aserrado	11
2.2.2. Forestación orientada a celulosa	12
2.2.3. Generalidades	13
2.3. Ganadería	14
2.3.1. Ganadería de cría	15
2.3.2. Ganadería de engorde	16
2.4. Silvopastoreo	16
2.4.1. Definición	16
2.4.2. Productividad	17
2.4.3. Sustentabilidad	18
2.4.4. Consideraciones técnicas	18
2.4.5. En la región	19
2.4.6. En Uruguay	20
2.5. Programación Lineal Entera	22
2.6. Modelado	22
2.7. CPLEX	23
2.7.1. Solución	23
2.8. Antecedentes	24
3. Modelado del problema	26
3.1. Proceso de construcción	26
3.1.1. Ideas Iniciales	26
3.1.2. Refinación de las matrices	27
3.1.3. Complejización	28
3.1.4. Desafíos en la obtención de datos	30
3.2. Descripción del modelo	30
3.2.1. Constantes	31
3.2.2. Parámetros	33

3.2.3.	Consideraciones y limitaciones	34
3.2.4.	Selección de estrategias viables	35
3.2.5.	VARIABLES DE DECISIÓN	36
3.2.6.	Función objetivo	36
3.2.7.	Restricciones	36
3.2.8.	Solución	37
3.3.	Metodología de uso del modelo	38
4.	Formulación del problema	39
4.1.	Parámetros	39
4.2.	Desglose de matrices de costos y retornos	40
4.2.1.	Matriz de <i>Retornos_{ij}</i>	40
4.2.2.	Matriz de <i>Costos_{ij}</i>	41
4.3.	VARIABLES DE DECISIÓN	42
4.4.	Formulación Matemática	42
5.	Análisis experimental	43
5.1.	Metodología generación de casos de pruebas	43
5.1.1.	Parámetros variables	43
5.1.2.	Ejecución de casos de prueba presentados	46
5.2.	Hardware utilizado	46
5.3.	Resultados generales	47
5.3.1.	Tiempos de ejecución	47
5.3.2.	Estado de las soluciones	47
5.3.3.	Gap relativo	48
5.4.	Resultados por escenarios específicos	48
5.4.1.	Lejanos a planta de celulosa y prioridad forestal	49
5.4.2.	Inversiones a largo plazo, presupuestos altos y prioridad fo- restal	49
5.4.3.	Largos plazos de inversión, presupuestos bajos y prioridad forestal	50
5.4.4.	Cortos plazos de inversión y prioridad forestal	52
5.4.5.	Plazos medios de inversión y prioridad forestal	53
5.4.6.	Altos índices de CONEAT y sin prioridad forestal	54

5.5.	Escenarios favorables para cada estrategia	54
5.5.1.	Ganadería para cría	55
5.5.2.	Ganadería para engorde	55
5.5.3.	Forestación para pulpa	56
5.5.4.	Forestación para aserradero	56
5.5.5.	Silvopastoreo	56
6.	Análisis de sensibilidad	58
6.1.	Definición del caso base	58
6.2.	Selección de parámetros y rangos de variación	58
6.3.	Ejecución del modelo y recopilación de resultados	59
6.4.	Visualización de resultados	59
6.5.	Análisis por parámetro	59
6.5.1.	Hectáreas	60
6.5.2.	Tipo de suelo	63
6.5.3.	Índice de CONEAT	68
6.5.4.	Plazo de inversión	72
6.5.5.	Presupuesto	75
6.5.6.	Ubicación	77
7.	Conclusiones	82
7.1.	Trabajo realizado	82
7.2.	Trabajo a futuro	83
8.	Referencias bibliográficas	85
	Apéndices	89
A.	Mapas	89
B.	Entrevista a José Dutra	90
C.	Casos de prueba	94
C.1.	Casos de prueba lejanos a planta de celulosa y con suelos de prioridad forestal	96
C.2.	Casos de prueba con un largo plazo de inversión, presupuesto alto y suelos de prioridad forestal	98

C.3.	Casos largo plazo de inversión, presupuesto bajo y suelos de prioridad forestal	99
C.4.	Casos corto plazo de inversión y suelos de prioridad forestal	101
C.5.	Casos plazo medio de inversión y suelos de prioridad forestal	103
C.6.	Casos con suelos sin prioridad forestal e índice de CONEAT alto	105
D.	Casos de escenarios favorables para cada estrategia	106
D.1.	Ganadería para cría	107
D.2.	Ganadería para engorde	108
D.3.	Forestación para pulpa	109
D.4.	Forestación para aserradero	110
D.5.	Silvopastoreo	110
E.	Análisis de sensibilidad	110
E.1.	Hectáreas	112
E.2.	Tipo de suelo	114
E.3.	Índice de CONEAT	115
E.4.	Plazo de Inversión	117
E.5.	Presupuesto	120
E.6.	Ubicación	123
F.	Código	124
F.1.	OPL	124
F.2.	Python	125

1. Plan de trabajo

Periodo	Semana	Actividad
Abril - Mayo		Estudio previo y recopilación de información
	1-4 de Abril	Estudiar y comprender la forestación, la ganadería, y el silvopastoreo. Entender las generalidades y las especificidades para cada uno de ellos.
	1-2 de Mayo	Profundizar acerca del estado del arte del Silvopastoreo en Uruguay y la región.
	3-4 de Mayo	Revisar los antecedentes y los trabajos relacionados para identificar las mejores prácticas y las áreas de oportunidad. Profundizar en la programación lineal entera, el modelado y el uso de CPLEX.
Junio - Julio		Modelado del problema
	1-2 de Junio	Trabajar en el proceso de construcción del modelo, comenzando con las ideas iniciales y avanzando hacia la refinación de los datos.
	3-4 de Junio	Continuar con la complejización del modelo y abordar los desafíos en la obtención de datos.
	1era de Julio	Describir el modelo, identificar constantes y parámetros, y explicar la metodología de uso del modelo.
	2-4 de Julio	Desarrollar y refinar las variables de decisión, la función objetivo, las restricciones y la solución.
Agosto - Septiembre		Formulación del problema y análisis experimental
	1era de Agosto	Formular matemáticamente el problema e interpretar las matrices de costos y retornos.
	2-4 de Agosto	Diseñar y generar casos de pruebas.
	1-2 de Septiembre	Ejecutar los casos de prueba y recopilar los resultados.

Periodo	Semana	Actividad
	3-4 de Septiembre	Analizar los resultados y ajustar el modelo según sea necesario.
Octubre - Noviembre		Análisis de sensibilidad y revisión
	1-3 de Octubre	Definir los casos bases, seleccionar los parámetros y rangos de variación, y ejecutar el modelo.
	4ta de Octubre - 1era de Noviembre	Visualizar y analizar los resultados del modelo.
	2-3 de Noviembre	Revisar y ajustar el análisis y los resultados según sea necesario.
	4ta de Noviembre	Preparar y organizar los hallazgos para la presentación final.
Diciembre		Conclusiones y presentación final
	1 de Diciembre	Redactar las conclusiones del trabajo realizado y las posibles líneas de investigación futura.
	2-3 de Diciembre	Revisar y finalizar la tesis, prestando especial atención a la coherencia del argumento y la claridad de la presentación.
	4ta de Diciembre	Presentar y defender la tesis.

2. Introducción

2.1. Descripción del problema

En Uruguay, el sector agropecuario representa un pilar fundamental en la economía del país, abarcando entre el 6 % y el 7 % del PIB en Uruguay (2015-2019) [1]. Dada la importancia de este sector, es esencial contar con herramientas eficientes y confiables que permitan a los inversores tomar decisiones informadas a la hora de invertir en el campo.

Encontrar el modelo de inversión óptimo en términos productivos, económicos y medioambientales ha sido y es un problema que enfrentan los productores agropecuarios en Uruguay y gran parte de América Latina.

La motivación para estudiar y resolver este problema radica en su relevancia tanto económica como ambiental. El sector agropecuario se encuentra en un punto crítico donde debe equilibrar la necesidad de producir con la de conservar los recursos naturales. Uruguay cuenta con 16,4 millones de hectáreas para uso agropecuario, lo que representa más del 90 % de la superficie terrestre del país [1]. Sin embargo, la diversificación de las prácticas agropecuarias y la inclusión de actividades forestales podrían no solo aumentar la rentabilidad de los productores, sino también tener un impacto positivo en la sostenibilidad del sector.

Por otro lado, el país ha mostrado un crecimiento sostenido en las áreas de forestación, alcanzando en 2019 cerca de un millón de hectáreas, lo que supone un incremento de más del 40 % respecto a 2005 [2]. Por lo tanto, la integración de estas dos prácticas puede resultar muy interesante como una alternativa que acompañe a este crecimiento forestal en el país. Con la amplia variedad de opciones de inversión disponibles, tomar una decisión fundada e inteligente se ha vuelto cada vez más complejo.

Esta tesis ofrece una solución a este problema, aportando una herramienta objetiva y basada en datos que pueda ayudar a los inversores a tomar decisiones informadas. Al comprender y optimizar el rendimiento de las diferentes estrategias de inversión, podemos contribuir a mejorar el sector agropecuario uruguayo y, al mismo tiempo, garantizar la sostenibilidad y la conservación de los recursos naturales. Este estudio es, por lo tanto, crucial para fomentar la inversión inteligente en el sector agropecuario y promover prácticas sostenibles y rentables.

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar un modelo de optimización lineal para analizar y seleccionar las inversiones más rentables en el campo uruguayo, teniendo en cuenta las características y necesidades específicas de un inversor.

El modelo propuesto considera diferentes estrategias de inversión, tales como la ganadería, la forestación y el silvopastoreo, y busca obtener la cantidad óptima de hectáreas a dedicar a cada práctica, con el objetivo de maximizar la ganancia bajo diversas restricciones y condiciones.

Para alcanzar este objetivo, se han realizado investigaciones exhaustivas sobre la realidad uruguaya en términos de forestación, ganadería y silvopastoreo, así como el análisis de casos de prueba y la sensibilidad de distintos parámetros en el modelo. Esta tesis presenta los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de estos análisis, proporcionando una visión integral de cómo cada parámetro influye en la rentabilidad de las inversiones y en la elección de las estrategias óptimas.

Se empezará por definir forestación y ganadería como prácticas tradicionales de inversión. Luego estas serán vinculadas en la definición, usos y beneficios del silvopastoreo.

2.2. Forestación

El objetivo de esta sección es presentar una introducción breve sobre la forestación, aclarar qué es, identificar sus variantes principales y describir cómo puede ser modelada.

Para comenzar, el término Forestación proviene del verbo “forestar”, que se refiere a plantar especies forestales en un terreno [3]. En Uruguay, se pueden distinguir dos tipos de forestación: aquella enfocada en el aserrado para la utilización de la madera como material y aquella destinada a la obtención de pulpa de celulosa. Es importante tener en cuenta que, según el enfoque o variante, existen considerables diferencias en cuanto al sistema a aplicar y las variables involucradas.

2.2.1. Forestación de aserrado

La forestación orientada al aserrado tiene como objetivo principal generar troncos de buena calidad, sin nudos y con un buen diámetro en su punta. Cuando se mencionan nudos, se hace referencia a ramas que no fueron podadas a tiempo y, al crecer el grosor del árbol, estas quedan dentro del tronco dejando marcas en la

madera. Para evitar este inconveniente, la poda de los árboles es de fundamental importancia. La altura de poda depende de cada productor, pero varía entre los 10 y 20 metros. Además, cabe destacar que el diámetro de la punta del árbol es el de mayor importancia, ya que al llegar a un aserradero, se extrae el cilindro de mayor largo y grosor posible, y este es limitado por el diámetro de la punta del árbol.

Como se expresó anteriormente, el enfoque principal de esta práctica es maximizar la calidad del árbol; por lo tanto, a medida que pasan los años, resulta importante llevar a cabo raleos¹. Esta práctica es relevante en estos casos, dado que los árboles tienen la particularidad de competir entre sí. Esto implica que si dos árboles se encuentran plantados a una corta distancia, ambos consumirán de los mismos recursos (sol, minerales, agua, etc.). Los raleos pueden reducir la población de árboles desde 800 hasta 200 por hectárea.

Los ciclos de vida de estos árboles varían según el productor, aunque generalmente suelen durar entre 18 y 25 años. Esta variabilidad puede deberse al hecho de no querer esperar 25 años para obtener el retorno económico, lo cual es la principal “desventaja” de este enfoque, aunque eso queda sujeto a las condiciones del productor. [4]

En conclusión, para modelar la forestación orientada al aserradero, es fundamental considerar aspectos clave como la poda y la realización de raleos periódicos para evitar la competencia excesiva entre los árboles y mantener la calidad del producto. Estos dos factores implicarán costos sostenidos a lo largo de la inversión, además de la plantación inicial. También, se debe tener en cuenta la variabilidad en los ciclos de vida de estos árboles, que generalmente oscilan entre 18 y 25 años, dependiendo de las condiciones y objetivos del productor.

2.2.2. Forestación orientada a celulosa

La forestación orientada a celulosa, en contraste a aquella destinada a aserradero, tiene como principal objetivo obtener un elevado volumen de madera, ya que el precio que las plantas de celulosa están dispuestas a pagar depende exclusivamente de la cantidad de metros cúbicos sólidos. Dado este objetivo, la densidad de árboles por hectárea es significativamente mayor en comparación con la forestación

¹Tala de árboles que se cree que no alcanzarán un nivel mínimo de calidad

destinada al aserradero. Además, los ciclos de vida de estos árboles suelen ser más cortos, oscilando entre 10 y 12 años para brindar un retorno económico.

Es importante señalar que, aunque también se llevan a cabo raleos en este caso, los estándares de calidad son considerablemente más bajos. No obstante, la gestión adecuada de la densidad de árboles y los raleos contribuye al éxito de la producción de madera para celulosa.

En conclusión, al modelar la forestación orientada a la producción de celulosa, es esencial enfocarse en la maximización del volumen de madera. Es importante destacar el plazo más corto de la inversión, entre 10 y 12 años, lo cual puede resultar atractivo para los productores. Además, al no ser necesarias las podas y al tener un menor impacto los raleos en la calidad de la madera, los costos sostenidos a lo largo de la inversión se reducen significativamente. [4] [5]

2.2.3. Generalidades

De esta forma, se han presentado las dos variantes principales de la forestación llevadas a cabo en el país. A pesar de las diferencias entre ambas, hay ciertas generalidades a considerar.

Como primer factor a tener en cuenta, en Uruguay existe una ley de prioridad forestal [6] que define ciertos tipos de suelo a los que se les da prioridad para la realización de forestación. Aunque la ley no limita la producción forestal únicamente a estos suelos, es necesario presentar un proyecto formal ante la DINASEA en caso de querer forestar un área mayor a 40 hectáreas. En la práctica, los proyectos aprobados por este organismo suelen ser aquellos en los que el tipo de suelo a forestar pertenece a los grupos de prioridad forestal. Por lo tanto, esta ley restringe de manera indirecta la práctica forestal en el país. [7]

Otro factor fundamental que afecta a todas las prácticas forestales en términos de producción y rendimiento es el flete, es decir, el costo de transporte de la madera. El flete hace referencia al costo asociado con el traslado de la madera desde su lugar de origen hasta el sitio de procesamiento. Este costo tiene un impacto significativo en la rentabilidad de un negocio forestal, dado que transportar grandes volúmenes de madera resulta costoso. Por lo tanto, al evaluar las ganancias potenciales de una plantación de árboles, es fundamental tener en cuenta su ubicación y destino. En consecuencia, se establece una división geográfica según el tipo de forestación y su

rentabilidad, determinando las zonas en las que es viable vender a establecimientos como plantas de celulosa o aserraderos.

Existen prácticas que contribuyen a reducir el costo de transporte de los troncos. En el caso de la madera para celulosa, es común secarla previamente al transporte, dejándola “orear” durante al menos 3 meses. Este proceso permite que la madera repose y pierda el agua contenida en su interior, reduciendo su peso. Esto se traduce en un beneficio económico, ya que el costo de transporte se reduce al transportar una carga menor, mientras que el precio de los árboles permanece constante.

Con este panorama general del funcionamiento de la forestación en el país, se cuenta con información suficiente para comenzar a idear el modelado de un sistema forestal.

2.3. Ganadería

En esta sección se realizará una introducción análoga a la realizada para forestación, la idea es presentar sus principales características, variantes e información que pueda resultar útil para su posterior modelado.

Cuando se habla de ganadería, se hace referencia a toda “actividad que consiste en el manejo y explotación de animales domesticables con fines de producción” [8]. Es importante señalar que, en esta tesis, se considerará únicamente la ganadería bovina, cuyo objetivo es la obtención de carne como producto final.

A diferencia de la forestación, que cuenta con límites impuestos por leyes, para la actividad ganadera no existen restricciones de este tipo que limiten su realización.

La cadena de producción ganadera, que va desde el nacimiento al frigorífico, puede dividirse en dos fases: Cría y Engorde. La cría se desarrolla sobre campo natural o nativo mientras que el engorde se realiza mayoritariamente sobre pasturas sembradas y fertilizadas o incluso como se mencionará, en base a una alimentación a grano.

Respecto a las pasturas sobre las cuales se desarrollan estas fases, se encuentra por lo general una diferencia en la calidad de suelos, correspondiendo a la cría aquellos de menor calidad o genéricamente “no arables”, mientras que en los de calidad superior se desarrollan los engordes con pasturas sembradas.

Para cuantificar la capacidad productiva de los suelos de Uruguay, existe el índice de productividad CONEAT. Este índice engloba todas las características productivas de un campo. Fue creado con la intención de clasificar áreas homogéneas de suelo en el país por su capacidad productiva en términos de carne bovina, ovina y lana. Este es relativo a la capacidad productiva media del país, a la que corresponde el índice 100. Existe un servicio de consulta CONEAT en línea a través de la carta de suelos [9].

2.3.1. Ganadería de cría

La ganadería de cría consiste en producir terneros de 7 meses de vida, que por su edad, pueden desarrollarse de forma autónoma y sirven como producto de venta. Los animales que producen los terneros son llamados vientres, estos son, hembras desarrolladas reproductivamente capaces de proporcionar un ternero por año. Estas hembras tienen una vida útil de aproximadamente 7 años por lo que requieren una reposición y una salida del sistema. La salida, en general, se da como vaca gorda a un frigorífico o, en su defecto, como vaca flaca vendida para ser engordada por un tercero.

La reposición implica la retención de hembras en la misma cantidad que egresan vientres y, por lo tanto, las categorías de hembras conviven durante dos años creciendo con las vacas productivas.

A pesar de que el ternero sea el producto de venta, los kilos vendidos de las vacas de descarte superan a los kg de terneros. La importancia de este ítem en la facturación del criador hace que el paradigma de conseguir la mayor cantidad de terneros se vea disminuido por el atractivo económico de tener vacas disponibles para ser vendidas.

La cría es un negocio ineficiente desde el punto de vista insumo-producto, por lo que su razón de ser es la de no ser superado por otras actividades en suelos de baja calidad. Su baja eficiencia es un producto de su extrema rigidez biológica, esto es, la gestación del ternero dura 9 meses, la cría del ternero tarda 7 meses y no existen mellizos en esta especie, es decir, solo es posible la gestación de un solo ternero.

Como resulta previsible para un negocio ineficiente y rígido, los niveles de inversión e intensificación son mínimos. A pesar de que los tiempos en los que se

generan retornos son de 16 meses, sumado con la eventual venta de vacas de descarte, los retornos en este análisis serán expresados por año, tomando un promedio de los mismos.

El producto final de la ganadería de cría (el ternero) es el insumo de la ganadería de engorde [7]. A continuación, se detallan las características de esta fase.

2.3.2. Ganadería de engorde

En esta fase, se busca engordar al ternero para luego venderlo al frigorífico. Este proceso generalmente dura hasta dos años y a diferencia de la cría, la eficiencia biológica y económica de esta producción es proporcional a la intensificación del proceso. Por intensificación se refiere a la mejora de la calidad del alimento, y a dicha mejora como reflejo de los niveles de inversión.

Es por esta razón que el engorde tiende a desarrollarse en suelos mejores que la cría. Como se ha mencionado para la Subsección de Ganadería de cría, los retornos y costos también serán expresados de forma anual a modo de facilitar el modelado.

2.4. Silvopastoreo

El objetivo de esta sección es presentar una introducción al modelo de sistemas silvopastoriles. Se profundizará en los siguientes conceptos: qué es, cuáles son las principales variantes del sistema, cómo se está utilizando en Uruguay y en la región, así como también cuáles son los beneficios del mismo, entre otros aspectos relevantes.

2.4.1. Definición

Para definir el silvopastoreo o sistema silvopastoril (SSP), se utilizará la definición brindada por la SUSilvo² en el acto de fundación, la cual expresa lo siguiente: “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” [10].

En muchas ocasiones, se confunde la ganadería en la forestación con un sistema silvopastoril, lo cual es un error común que vale la pena aclarar. Algunos productos-

²Sociedad Uruguaya de Silvopastoreo

res optan por forestar un predio y luego, tras un tiempo, deciden introducir cierta cantidad de ganado para aprovechar el abrigo de la forestación y así aumentar el bienestar animal y la productividad. Sin embargo, esto no constituye un sistema silvopastoril, y es importante distinguir entre ambos para evitar errores de análisis.

Los SSP apuntan a aumentar la productividad animal y forestal, integrándolos en un sistema con un sentido lógico integral [11]. Respecto a los componentes que integran el mismo, no hay limitantes teóricas en los sistemas silvopastoriles. De hecho, el silvopastoreo como modelo tiene muchas variantes tanto en ganado como en pasturas o forestación objetivo.

Por ejemplo, el ganado puede ser tanto bovino, ovino o caprino dependiendo de la preferencia del productor. Luego, en términos del componente arbóreo, existe una numerosa cantidad de especies de árboles que se pueden integrar al sistema.

En Uruguay la mayoría de los sistemas silvopastoriles integran forestación con *Eucalyptus grandis*, que puede ser pensada tanto para la venta de madera a aserradero como para la producción de pulpa de celulosa. En cambio, en países de la región tropical de Sudamérica, se han visto ejemplos de silvopastoreo aplicado en la fruticultura o con leguminosos. Es decir, el sistema en sí admite muchas variantes pero sí hay algo que se debe respetar en todos los casos, los SSP siempre deben pensarse desde un principio como tal.[11].

2.4.2. Productividad

La implementación de un sistema silvopastoril implica una inversión inicial y una organización adecuada, sus características ofrecen beneficios económicos y ambientales a largo plazo. La inversión inicial incluye la adquisición de especies arbóreas y forrajeras adecuadas, capacitación en manejo y monitoreo del sistema, la organización del terreno, y los costos ganaderos iniciales. Aunque estos costos iniciales pueden ser mayores en comparación con los sistemas tradicionales, la inversión en silvopastoreo se amortiza a lo largo del tiempo debido a la mayor productividad y sostenibilidad del sistema.

En general, se pueden identificar tres periodos de flujo de caja en la implementación de sistemas silvopastoriles. Primero, un periodo negativo inicial de flujo de caja, debido a la situación negativa de la línea base y/o al periodo de inversiones iniciales. Segundo, un período de flujo de caja de estabilización caracterizado por

un incremento gradual de los ingresos, debido a los incrementos en la productividad de la tierra y del ganado. Y tercero, un flujo de caja altamente positivo comparado con la línea base. Al final del periodo de análisis los ingresos suelen ser mayores que los costos, lo que resulta en ganancias significativas por hectárea.

Entonces, un aspecto a tener en cuenta es que el primer período de inversión puede resultar en valores negativos y pérdidas temporales. Para sobrepasar este período inicial de pérdidas y retorno negativo, es importante tener las consideraciones financieras pertinentes. Los beneficios económicos y ambientales que se obtienen en el tiempo justifican esta inversión, posicionándolo como una opción sostenible y rentable para la producción agropecuaria. [12]

2.4.3. Sustentabilidad

Los SSP ofrecen beneficios sustentables en términos de conservación y mejora de la calidad del suelo, biodiversidad y mitigación del cambio climático. La combinación de elementos vegetales y animales en un solo sistema favorece la fertilidad del suelo, la diversidad biológica y la captura de carbono, lo que a su vez reduce la concentración de gases de efecto invernadero.

Este sistema también mejora el bienestar animal al proporcionar un entorno más adecuado y confortable para el ganado. La presencia de árboles y arbustos ofrece sombra y protección contra condiciones climáticas adversas, reduciendo el estrés térmico y mejorando la salud y productividad del ganado.

El silvopastoreo representa una opción viable y atractiva para la producción agropecuaria sustentable. Al combinar la producción ganadera y forestal en un solo sistema se logra una producción más sostenible y rentable a largo plazo.

2.4.4. Consideraciones técnicas

Implantar un SSP, es una tarea compleja, hay muchos aspectos técnicos a tener en cuenta, y en esta subsección se detallarán los principales.

Uno de los aspectos más importantes es cómo se debe ajustar el componente forestal para el manejo del sombreado. Los árboles son posicionados generalmente en filas, pero existen distintas formaciones de árboles que pueden ser implementadas. La distancia entre estas puede variar generalmente entre los 10 y 20 metros. Los árboles de cada fila presentan por lo general una separación de 2 a

5 metros. Las filas pueden ser dobles o simples, las dobles tienen una separación entre ellas desde 3 a 5 metros.

Existen varios modelos, el más clásico es el de $5 \times 3 + 20$, que resulta en 250 árboles por hectárea. Este número “ $5 \times 3 + 20$ ”, significa que la parcela en la que se realizará silvopastoreo contará con filas dobles de árboles con una separación entre ellas de 20 metros. Cada par de filas, tiene una separación en los árboles de 5 metros a lo ancho y 3 a lo largo.

Las especies de árboles son variadas y no hay ninguna restricción en este aspecto. Las filas pueden consistir de una única especie de árbol pero la recomendación general es plantar diferentes especies que pueden tener varios objetivos para la parcela, tales como producción de madera, producción de forraje, contribuir a la fertilidad del suelo, etc. Un sistema conformado por distintas especies de árboles tiene el valor agregado de promover la biodiversidad.[13]

2.4.5. En la región

En este capítulo, se explorará sobre el estado actual y la adopción del silvopastoreo en la región sudamericana, con especial énfasis en países como Argentina, Brasil, Colombia y Paraguay.

Argentina: En Argentina, la adopción de los SSP ha sido impulsada principalmente por la industria maderera en las provincias de Misiones y Corrientes. Estas empresas están incorporando la producción de carne en sus plantaciones forestales a través del silvopastoreo, lo que les permite diversificar sus ingresos y mejorar la sostenibilidad de sus operaciones. Además, el gobierno argentino ha promovido la adopción de los SSP mediante programas de incentivos y la promoción de la investigación de esta estrategia.

Brasil: Brasil es uno de los principales productores de carne en el mundo pero enfrenta desafíos ambientales significativos, incluyendo la deforestación y la degradación del suelo. El silvopastoreo como estrategia ha sido identificado como una solución potencial para mejorar la sostenibilidad de la producción ganadera en el país. Los agricultores brasileños han mostrado interés en el silvopastoreo y se han realizado investigaciones y proyectos piloto en varias regiones, incluyendo la Amazonia

y el Cerrado³.

Colombia: Colombia ha mostrado un fuerte compromiso con la adopción del silvopastoreo como una estrategia para mejorar la sostenibilidad de la producción ganadera y restaurar ecosistemas degradados. El gobierno colombiano ha establecido metas ambiciosas para aumentar la cobertura regional del silvopastoreo en la producción ganadera, y se han llevado a cabo proyectos de investigación y desarrollo en diversas regiones del país.

Paraguay: Aunque Paraguay aún se encuentra en las primeras etapas de adopción del silvopastoreo, ha habido un creciente interés en este sistema por parte de los agricultores y la comunidad científica. El gobierno paraguayo ha reconocido la necesidad de mejorar la sostenibilidad en la producción ganadera y ha comenzado a promover la investigación y la adopción de los SSP.

En conclusión, el silvopastoreo está ganando terreno en la región sudamericana, con diferentes niveles de adopción en cada país. Este se presenta como una solución prometedora para enfrentar los desafíos ambientales y mejorar la sostenibilidad en la producción ganadera en la región. [14]

2.4.6. En Uruguay

El silvopastoreo en Uruguay es un fenómeno reciente que ha evolucionado en los últimos años. Los primeros sistemas silvopastoriles en el país, ubicados en la zona de Florida, no se remontan a más de diez años. Desde entonces, la cantidad de productores ha ido incrementando, al igual que la investigación en el área.

Diversos productores se han especializado en el silvopastoreo en Uruguay, destacándose entre ellos José Dutra, actual Presidente de la Sociedad Uruguaya de Silvopastoreo (SUSILVO). Dutra ha sido considerado un referente esencial en el desarrollo de este proyecto de investigación debido a su vasto conocimiento en el área y su experiencia con los sistemas silvopastoriles, siendo uno de los pioneros en la incorporación de estas técnicas en el año 2015. Se decide entrevistar a José para profundizar en el conocimiento del silvopastoreo.

³El Cerrado es una amplia ecorregión de sabana tropical de Brasil.

En cuanto a las investigaciones, desde hace cuatro años se han llevado a cabo estudios al respecto en diferentes centros de investigación, entre los que se encuentra el Polo Agroforestal de Melo. En este, como menciona José Dutra en la entrevista adjunta en el Apéndice B, se están investigando los tres factores principales involucrados en el silvopastoreo: la pastura, la ganadería y la forestación.

La comunidad de productores en este rubro está cada vez más unida, y la necesidad de compartir información y fomentar el crecimiento llevó a la fundación de la Asociación de Silvopastoreo del Uruguay. Esto se consolidó mediante un evento de fundación en diciembre de 2021, en Batoví, al que se convocaron alrededor de 250 personas. El objetivo del mismo fue el intercambio técnico entre productores, la presentación de investigaciones recientes al respecto y dejar en claro los objetivos de esta asociación. Entre los objetivos de la misma se encuentra la promoción del buen uso de los recursos naturales, la asociatividad entre productores y la difusión de la información al respecto. [16]



Figura 1: Establecimiento Abuelita de José Dutra, Tacuarembó, Uruguay

En lo que respecta a los sistemas implementados en el país, se han desarrollado distintos modelos, entre ellos, José Dutra nos comentó en la entrevista B que en su campo actualmente cuenta con 14 ordenamientos distintos de distancias y filas.

Se encuentra actualmente experimentando en la búsqueda de encontrar el mejor ordenamiento posible, por lo que no hay un modelo predominante que se tome como referencia.

En la Figura 1 se observa uno de los modelos $5x3+20$ de SSP implantados por el productor José Dutra en su estancia en Tacuarembó.

A continuación, se procede a presentar los distintos conceptos teóricos que se utilizarán posteriormente para el desarrollo del modelo.

2.5. Programación Lineal Entera

La Programación Lineal es un modelo de Programación Matemática ampliamente estudiado y utilizado para la optimización de problemas. La Programación Lineal Entera, por otro lado, es un enfoque de modelado y resolución de problemas de optimización en el que las variables son discretas, es decir, enteras (para garantizar la indivisibilidad) o binarias (para representar decisiones).[17]

Características de este tipo de problemas:

1. Formulación representativa y flexibles del problema
2. Explosión combinatoria de soluciones factibles
3. Resolución más difícil que la programación lineal debido a que no se conoce método eficiente general de resolución

2.6. Modelado

La utilización de modelos posibilita tanto la comprensión como la solución de problemas complejos. Dichos modelos se basan en abstracciones que reflejan de manera precisa las interacciones más relevantes entre las diferentes entidades involucradas en un problema.

Estas abstracciones deben tener la medida justa de simplificación debido a que: Una simplificación insuficiente puede implicar costos extras o incapacidad de resolución y una excesiva puede conllevar inviabilidad debido a que se aleja a la realidad. [17]

Para modelar un problema determinado, es necesario identificar cuatro elementos clave:

1. Datos (parámetros del problema)
2. Decisiones (variables)
3. Restricciones (sobre las variables)
4. Función objetivo

En el caso específico de la programación entera, la identificación de las variables a utilizar puede resultar un proceso más complejo y elaborado en comparación con la programación lineal.

2.7. CPLEX

Se comienza por desarrollar el modelo en la herramienta IBM ILOG CPLEX Optimization Studio [18]. Esta herramienta cuenta con un ambiente de desarrollo en el cual puede ser implementado cualquier problema de programación Lineal. Luego, para más libertad en la implementación y el ingreso de datos, se decide utilizar la librería de *python* CPLEX la cual permite utilizar la herramienta CPLEX desde un programa *python*. [19]

CPLEX es un software de optimización comercial desarrollado por IBM, diseñado para resolver problemas de programación lineal entera y programación lineal entera mixta.

Utiliza algoritmos avanzados y técnicas de optimización, incluidos los métodos Simplex y Barrier, para proporcionar soluciones rápidas y eficientes a problemas de optimización complejos.

CPLEX proporciona una interfaz fácil de usar y una API de programación para modelar y resolver problemas de optimización, con configuraciones personalizables para optimizar el rendimiento y la precisión.

CPLEX ha sido ampliamente utilizado en varias industrias y puede manejar problemas con millones de variables y restricciones.

2.7.1. Solución

CPLEX proporciona información relevante luego de cada ejecución del modelo. En este siempre se incluye un status (estado) y un “gap” de la solución.

Status: Indica el estado final del proceso de optimización y puede tomar distintos valores. Algunos de los valores comunes de estado incluidos en el output de CPLEX son:

1. Óptimo: Indica que la solución óptima al problema de programación lineal fue encontrada.
2. Infactible: Indica que no se ha encontrado solución factible para el problema debido a las restricciones.
3. Ilimitado: Indica que el problema de programación lineal no tiene límite, dado que la función objetivo puede ser incrementada infinitamente sin violar las restricciones.
4. Límite de tiempo excedido: Indica que el proceso de optimización ha llegado al límite de tiempo especificado antes de encontrar una solución.

Gap: El “gap” representa la diferencia entre la mejor solución encontrada por CPLEX y la solución óptima. Es calculado como el porcentaje de la diferencia absoluta entre la mejor solución encontrada y la óptima. Este gap es una medida de que tan cerca estuvo CPLEX de encontrar la solución óptima. Por lo tanto, cuando el gap es 0, quiere decir que la solución óptima fue encontrada. También existe una tolerancia fijada por el usuario, por lo que para aquellas soluciones con un gap menor a esta tolerancia, se considera a la misma como óptima.

2.8. Antecedentes

En lo que respecta a antecedentes en la temática, han habido investigaciones a nivel regional, de los cuales se hará uso para realizar el análisis comparativo buscado.

Comenzando por un estudio de rentabilidad realizado en 2014 por Grzebieluckas y da Silva Santos [20]. Los mismos son dos investigadores de la Universidad de Mato Grosso, que realizaron un análisis económico de la integración de la ganadería en sistemas forestales en dicha región. Dicho estudio concluye que la integración de la ganadería en estos sistemas disminuye la rentabilidad del sistema. Este resultado,

es reafirmado por otra investigación realizada en 2016 por Lacorte en la zona de Corrientes. [21]

Asimismo, Bussoni, investigadora de la Facultad de Agronomía de la UdelaR, llevó a cabo una investigación que continuó sus estudios previos de 2016 y 2019. Realizó un análisis comparativo entre cuatro sistemas silvopastoriles diferentes, obteniendo como resultado una tasa de retorno del 11 % anual para el sistema más rentable. Este fue el sistema con la menor densidad de árboles. [22]

Finalmente, Simeone, Beretta y Caorsi (investigadores de la Facultad de Agronomía, UdelaR) realizaron una investigación con el objetivo de encontrar coeficientes técnicos para cuantificar el potencial en la integración de la forestación y la ganadería. Los resultados muestran hasta un 50 % de mejora en el peso de los animales gracias al efecto de la sombra. En dicho estudio no se encuentra una mejora en la pérdida de peso por el efecto del “abrigo” generado por los árboles. [23]

Cabe resaltar que si bien estas investigaciones abordan estudios cuantitativos y de rentabilidad, ninguna de ellas se enfoca en modelar inversiones ni implementar un modelo comparativo al respecto. La diferencia fundamental radica en la aplicación de modelos matemáticos en nuestra investigación, lo que permite abordar el problema con una metodología más precisa y objetiva.

3. Modelado del problema

La idea central del trabajo monográfico consiste en construir un modelo que, dado un productor con intenciones de realizar una inversión en un determinado campo con ciertas características, retorne la combinación óptima de estrategias agroforestales a realizar para la obtención del mayor retorno.

En este capítulo, se presenta el modelo realizado y las decisiones tomadas en la implementación del mismo. A su vez, se habla sobre los obstáculos encontrados en el proceso y de qué manera se decide solucionarlos.

3.1. Proceso de construcción

Para comenzar, se describe en detalle el proceso de elaboración del modelo de programación lineal entera implementado. Partiendo de un conjunto de ideas iniciales, que modelan la realidad de forma muy general, para luego presentar complejizaciones que se ajusten a los distintos casos específicos.

3.1.1. Ideas Iniciales

En su versión inicial, el modelo contempla únicamente tres estrategias de inversión posibles: ganadería, forestación y silvopastoreo. Es importante destacar esto, ya que, durante el desarrollo y complejización del modelo, se decide incorporar subestrategias específicas para la ganadería y la forestación. Esto se realiza con el objetivo de reflejar con mayor precisión las características de la realidad y hacer el modelo más verosímil.

A continuación, se asume que, independientemente de la estrategia de inversión considerada, es posible definir retornos y costos anuales por hectárea a lo largo de su duración. Inicialmente, esto se modela mediante matrices de costos y retornos, donde las filas representan cada estrategia de inversión y las columnas representan los años. De esta manera, según la estrategia, cada celda indica el costo o retorno por hectárea anual.

Una vez definidas las matrices de costos y retornos por estrategia e inicializadas con datos razonables (en futuras secciones se proporcionarán las fuentes específicas de los datos finales del modelo), se establecen las variables de decisión del modelo, junto con la función objetivo.

En cuanto a las variables de decisión, se consideran tantas como estrategias posibles, en un principio serán las 3 mencionadas anteriormente, las cuales representarán la cantidad de hectáreas dedicadas a cada estrategia.

La función objetivo, a maximizar, consistirá en el cálculo de la ganancia al final de la inversión, sumando la totalidad de retornos año tras año y restando los costos. La misma se calcula de forma sencilla utilizando las matrices de costos y retornos y la cantidad de hectáreas dedicadas a cada una de las estrategias (las variables de decisión). En secciones siguientes se presenta en detalle la formulación matemática de la misma.

En cuanto a las restricciones del modelo inicial, se consideran solamente las relacionadas con el tamaño del campo y el presupuesto total. La suma de las hectáreas dedicadas a cada estrategia no debe superar la cantidad de hectáreas totales disponibles, y los costos totales no deben superar el presupuesto total.

El modelo hasta el momento retorna resultados interesantes, pero muy lineales. Por ejemplo, para plazos de inversión largos, siempre opta por dedicar todas las hectáreas a la forestación, sin importar el tipo de campo, ya que en ningún momento se hace referencia a las características del mismo en el modelado.

Por lo explicado anteriormente, este primer modelo inicial está lejos de reflejar la realidad. En las próximas secciones, se expandirá en el proceso de complejizar el modelo para representar más acertadamente la realidad y así lograr que el mismo sea aplicable.

3.1.2. Refinación de las matrices

El primer aspecto en el que se pone énfasis para perfeccionar el modelo es en las matrices de costos y retornos. Estas constituyen un elemento fundamental en el modelo propuesto, dado que son la base del cálculo de funciones objetivo y restricciones. Es necesario asegurarse de que los datos ingresados en ellas reflejen de la manera más precisa posible la realidad.

Durante este proceso, se descubre que, para obtener costos o retornos anuales por hectárea para cada estrategia de forma precisa, se debería considerar subestrategias dentro de las ya existentes. Los gastos y retornos de diferentes tipos de estrategias dentro de un mismo rubro presentan variaciones considerables.

En este momento, se toma la decisión de aumentar la cantidad de estrategias

de inversión consideradas en el modelo, dividiendo la ganadería y forestación en subestrategias más específicas, a partir de las cuales se pueden obtener costos y retornos anuales con mayor precisión.

Finalmente, las estrategias de inversión que se considerarán son las siguientes:

1. Silvopastoreo
2. Forestación para pulpa
3. Forestación para aserradero
4. Ganadería de cría
5. Ganadería de engorde

Hasta el momento, los valores de la matriz de retornos consistían de un único número. A partir de este punto del desarrollo, se decide considerar un cálculo más específico.

Entonces, los retornos se obtendrán a partir de multiplicar las toneladas producidas por hectárea por el valor de una tonelada del producto en cuestión. Por ejemplo, para ganadería, se considerarán las toneladas de carne producidas por hectárea y se multiplicarán por el valor de una tonelada de carne. Para el caso del silvopastoreo, se tiene que considerar el componente forestal y ganadero por separado, pero dada esta decisión, es fácil de aplicar y obtener los retornos por hectárea por año.

Con las matrices descritas anteriormente, se decide finalizar una primera versión del modelo. Se considera que con el avance mencionado, se logra una base sólida, aunque aún no tan aplicable a la realidad del negocio, ya que no se contemplan características particulares del campo del inversor. A partir de aquí, se empieza a profundizar en diversos factores que se incorporarán al modelo para que sea lo más aplicable posible.

3.1.3. Complejización

La idea principal al momento de complejizar el modelo, como se mencionó en secciones anteriores, es la de considerar factores específicos del campo del inversor. La aplicabilidad y productividad de cierta estrategia de inversión está altamente

relacionada a las características del campo, y hasta este punto, únicamente se referenciaba a la cantidad de hectáreas del mismo.

Respecto a las características del campo que influyen en la práctica forestal, se recaba información con distintos productores y expertos, y se interpreta que la ubicación del campo es un factor determinante en este tipo de inversiones. En lo que respecta a la forestación para pulpa, la distancia del campo a la planta de celulosa puede determinar si una inversión es rentable o no. Por esto, se incorpora al modelo la ubicación del campo, y su distancia a las principales plantas de celulosa del país.

Asimismo, junto con la ubicación del terreno, se decide incluir como nueva variable el grupo de suelo CONEAT del mismo, para determinar si este pertenece a los grupos de prioridad forestal. Este factor determinará la viabilidad de las estrategias de inversión que incluyan forestación. En siguientes secciones, se explica al detalle cómo esto impacta en las estrategias aplicables a cierto campo.

Luego, en relación a los aspectos del campo que influyen en los resultados de las inversiones ganaderas, se considerará el índice de productividad CONEAT como un factor importante en dichas inversiones, dado que engloba todos los factores productivos del mismo.

La idea inicial consistía en incorporar este índice dentro de los cálculos de las matrices de costos y retornos, de manera que se incrementara el costo o se redujera el retorno para campos con índices de CONEAT bajos, y viceversa para índices altos. Así, se obtendrían resultados cercanos al valor de retorno real.

No obstante, tras consultar con expertos, se decide utilizar el índice para definir las estrategias de inversión viables en un campo determinado y no para modificar los costos/retornos en todas las estrategias. Esta decisión se toma debido a que resultó inviable obtener datos referentes a inversiones realizadas en lugares donde no fuera fructífero llevarlas a cabo. Es decir, no se cuenta con registro de una inversión completa de, por ejemplo, forestación de numerosas hectáreas en suelo altamente rocoso, o ganadería de engorde en un campo de bajo índice de productividad CONEAT. Se pueden plantear hipótesis sobre los resultados de estas inversiones, pero lo cierto es que no existe evidencia empírica de las mismas. Por lo tanto, el uso del índice de CONEAT servirá para descartar estrategias que requieran de un campo con alto índice de productividad, como, por ejemplo, la ganadería para engorde.

De este modo, quedan incorporados los factores del campo del inversor al mode-

lo, de forma que se refleje con mayor precisión los retornos y costos de las distintas estrategias de inversión consideradas.

3.1.4. Desafíos en la obtención de datos

En esta subsección, se aborda el principal desafío enfrentado en el desarrollo del modelo: la escasez de datos disponibles para las prácticas de forestación y silvopastoreo en Uruguay.

En cuanto a la ganadería, se utilizarán los datos proporcionados por la Federación Uruguaya de Centros Regionales de Experimentación Agropecuaria (FUCREA). Esta federación tiene distintos grupos a lo largo del territorio nacional (grupos CREA). Estos grupos tienen como objetivo principal ayudar a los productores a mejorar sustancialmente los resultados económicos y financieros de sus empresas, a partir de los recursos disponibles en sus establecimientos.

Respecto a la forestación, existe cierto hermetismo entre los productores en cuanto a los retornos de inversión que se obtienen. Además, no se han realizado trabajos de obtención de datos precisos que faciliten la creación de un modelo similar al deseado en este trabajo de investigación.

En el caso del silvopastoreo, la información de retorno es prácticamente inexistente, debido a que no hay un solo productor en Uruguay que haya podido completar el ciclo de inversión, ya que esta práctica se comenzó a aplicar muy recientemente y por escasos productores.

Por lo tanto, para estas 2 estrategias, se opta por obtener información de referencia aproximada, proporcionada por diversos productores contactados para la realización de la tesis. A partir de estos datos, se ajustan las distintas matrices del modelo. Los datos obtenidos y la justificación de los mismos serán presentados posteriormente.

3.2. Descripción del modelo

En esta sección se describirá el modelo de programación lineal implementado para el problema planteado. Se incluirán todas las partes relevantes que lo componen.

3.2.1. Constantes

En esta subsección se justificarán las constantes utilizadas en el modelo, estos son la base de los cálculos de costos y retornos explicados anteriormente.

A continuación, se presenta una lista de estas, las cuales han sido calculadas y ajustadas al día de la fecha de elaboración de este informe, junto con su fuente y justificación.

- **Costo de transporte (por Km) de una tonelada de madera:** Dato consultado con especialista en el rubro, quien trabaja en una de las principales empresas de producción forestal en Uruguay, María Otegui [24]. Este dato será utilizado en el cálculo de costos de forestación para pulpa, teniendo en cuenta la distancia desde el campo hasta la planta más cercana.
- **Suelos de prioridad forestal:** Consultados al día de realización del proyecto, basándose en el artículo de la Ley Forestal N° 15.939 [6]. Este dato será utilizado para el estudio de estrategias viables en el modelo, más en concreto, permitir la actividad forestal si el tipo de suelo del campo en cuestión es de prioridad forestal.
- **Ubicación de las plantas de celulosa (UPM, UPM2, Montes del Plata):** Coordenadas de las 3 plantas de celulosa al día de realización del proyecto, calculadas utilizando Google Maps. Como ya se mencionó anteriormente, estas coordenadas son utilizadas para calcular los costos de forestación para pulpa.
- **Costo de cosecha por tonelada de madera:** Dato obtenido de informe presentado por MADELUR, redactado por Ingeniero Agrónomo Bernardo Riet [25]. Utilizado para calcular costos de los distintos tipos de forestación, tanto como para pulpa, aserradero o el componente arboreo de Silvopastoreo.
- **Costo fijo por hectárea de realizar forestación para pulpa y forestación para aserradero, año a año:** Este dato fue obtenido luego de consultar con el especialista en el tema José Dutra [5]. Se trata del costo fijo sostenido que implica realizar la forestación para pulpa y aserradero año a año.

- **Costo fijo por hectárea de realizar ganadería para cría y ganadería para engorde, año a año:** Dato obtenido de taller realizado por CREA Uruguay. Este dato en particular se trata del costo fijo sostenido que implica realizar ganadería para cría y engorde año a año. [26]
- **IMA (Incrementos Medios Anuales):** Este dato fue obtenido de Alberto Parodi [27], especialista en el tema. Es utilizado para calcular la cantidad de toneladas de madera que se generan por hectárea, año a año.
- **Cantidad de toneladas producidas de madera por hectárea por año en forestación para pulpa:** Utilizado para calcular retornos y costos de forestación para pulpa. Este dato fue obtenido luego de consultar con el especialista en el tema José Dutra [5].
- **Cantidad de toneladas producidas de madera (madera de calidad podada con destino aserrado) por hectárea por año en forestación para aserradero:** Utilizado para calcular retornos y costos de forestación para Aserradero. Dato obtenido con los especialistas en forestación: José Dutra [5] y Danny de Armas. [28]
- **Cantidad de toneladas de carne producidas por hectárea por año en ganadería para cría y en ganadería para engorde:** Utilizado para calcular retornos y costos de ganadería para cría y engorde. Dato obtenido de taller realizado por CREA Uruguay. [26]
- **Valor de tonelada de carne en ganadería para cría y ganadería para engorde:** Utilizado para calcular retornos año a año de ganadería para cría y engorde. Dato obtenido de taller realizado por CREA Uruguay. [26]
- **Cantidad de toneladas producidas de madera y carne por hectárea por año en Silvopastoreo:** Utilizado para calcular retornos y costos de silvopastoreo. Este dato fue obtenido luego de consultar con el especialista en el tema José Dutra. [5]

Cabe destacar que estos valores se pueden ajustar fácilmente si los mismos sufren cambios considerables o si se encontrara alguna inconsistencia a la hora de evaluar resultados. Lo importante aquí, como ya se mencionó en otras secciones,

es la fundamentación de los cálculos realizados y la estructura base del modelo, así como la justificación de los datos ingresados.

3.2.2. Parámetros

En esta subsección se presentarán los valores que debe ingresar el usuario para utilizar el modelo. Estos valores, son las características individuales de cada inversión, que van a variar dependiendo de la situación particular que plantee el usuario.

A continuación, se presenta un listado de los distintos inputs que debe ingresar el usuario:

- **Hectáreas totales:** Cantidad de hectáreas totales disponibles para la inversión.
- **Presupuesto:** Presupuesto en dólares disponible para la inversión.
- **Plazo de la inversión:** Tiempo durante el cual se desarrollará la inversión.
- **Ubicación del campo:** Coordenadas del campo. Expresadas en latitud y longitud.
- **Índice CONEAT:** Índice de productividad CONEAT del campo en cuestión.
- **Grupo de suelo CONEAT:** Grupo de suelo CONEAT del campo en cuestión [9]. A lo largo del análisis este parámetro también es referenciado como tipo de suelo.
- **Cotas inferiores para la cantidad de hectáreas dedicadas a cada una de las estrategias:** Restricciones adicionales que puede agregar el usuario si tiene preferencias por alguna estrategia en particular.
- **Cotas superiores para la cantidad de hectáreas dedicadas a cada una de las estrategias:** Restricciones adicionales que puede agregar el usuario si desea limitar la realización de alguna estrategia.

Estas distintas variables serán sometidas a un análisis detallado en el Capítulo de Análisis de sensibilidad, con el objetivo de comprender en profundidad cómo los principales factores de entrada del modelo influyen en sus resultados y desempeño. De esta manera, se podrá identificar cuáles de estos elementos son críticos o de mayor importancia para el modelo final presentado.

3.2.3. Consideraciones y limitaciones

A lo largo del desarrollo del modelo se han tomado consideraciones e identificado limitaciones las cuales serán enumeradas a continuación. Estas son de vital importancia para la comprensión del modelo y su contexto.

1. La información sobre los suelos de prioridad forestal sobre los cuales se decide si un campo es apto o no para la forestación ha sido extraída de la página oficial del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca del Uruguay [6].
2. La ubicación de las plantas de celulosa del Uruguay, tomadas por sus coordenadas (latitud y longitud) tiene un alto impacto en los costos de forestación para pulpa. La construcción de nuevas plantas en el futuro requeriría actualizar el modelo.
3. Se asume siempre posible la venta de los productos obtenidos en la inversión.
4. Respecto al silvopastoreo, se fija una sub-estrategia tanto para su componente forestal como el ganadero por la completa duración de la inversión. Estas serán forestación para aserradero y ganadería de cría. No se consideran distintas combinaciones de estas. Se podría variar las sub-estrategias de silvopastoreo dependiendo del tipo de campo sobre el que se realiza la inversión, dado que el silvopastoreo es una práctica bastante versátil.
5. Para la ganadería, se asume la posibilidad de obtener retornos en plazos de 12 meses. A pesar de que estos ciclos pueden llevar más tiempo, los retornos están expresados de forma anual para facilitar el modelado del problema.
6. A pesar de las distintas variantes en duración que se pueden encontrar en la práctica de forestación para aserradero, se decide considerar un mínimo de 18 años para la cosecha.

7. Lo mismo ocurre con la forestación para pulpa, se decide considerar un mínimo de 10 años para la cosecha.
8. Los precios del kilo de carne y la tonelada de madera varían constantemente según el mercado. Se han tomado valores aproximados y válidos actualmente para la realización del modelo. Estos valores pueden variar en un futuro y se deberán ajustar.
9. La exactitud de los resultados depende en gran parte de los datos en las matrices y las constantes de precios. Se necesita de un buen conjunto de datos y actualizado para la correctitud del modelo.
10. Como se ha explicado anteriormente, el tipo de suelo del campo es utilizado únicamente para la filtración de estrategias viables. Los retornos y costos de realizar la inversión no varían según el tipo de suelo. Se explicará esta metodología con detalle en la Subsección 3.2.4.
11. Se asume que el plazo de inversión para cada estrategia es el ingresado por el usuario. Es decir, no se puede tener una composición de inversiones dentro de un mismo plazo. Por ejemplo, si se tiene un plazo de inversión de 15 años, no es posible realizar forestación para pulpa en los primeros 10 años de inversión, y ganadería de cría para los últimos 5. Si se quisiera hacer esto, se deberían realizar dos ejecuciones del modelo, con los datos correspondientes en cada caso (10 y 5 años de inversión).
12. Los parámetros ingresados por el usuario se mantienen fijos durante la duración de la inversión. Es decir, el modelo no considera opciones de inversión con las ganancias obtenidas durante la ejecución. Por ejemplo, no se podría aumentar el número de hectáreas totales durante la inversión.
13. Se consideran únicamente las subestrategias de ganadería y forestación presentadas anteriormente. No son tenidas en cuenta diferentes variantes de las mismas ni otras posibles subestrategias.

3.2.4. Selección de estrategias viables

La metodología para la selección de estrategias viables es la siguiente:

Se asume como no viable la realización de forestación en cualquier suelo que no esté catalogado como suelo de prioridad forestal [6]. A su vez, se asume como no viable la realización de ganadería de engorde en cualquier suelo con índice de productividad CONEAT menor a 93.

De este modo, en suelos que no pertenecen a los grupos de prioridad forestal, podrán realizar únicamente prácticas ganaderas viables, las cuales serán determinadas por el índice de productividad CONEAT.

3.2.5. Variables de decisión

Se tendrá una variable de decisión por cada estrategia. Estas representarán la cantidad de hectáreas a dedicar de la estrategia en cuestión. La cantidad de variables está ligada a la selección de estrategias viables explicada en la subsección anterior. Dependiendo de las características del campo sobre el que se aplique, el modelo puede contar con 1, 2, 4 o 5 variables de decisión. Estas variables serán de tipo entero y mayores a cero.

3.2.6. Función objetivo

La función objetivo consistirá en el cálculo de la ganancia al final de la inversión. Este será calculado sumando la totalidad de retornos anuales y restando los costos año tras año.

En este contexto, el objetivo de la función es maximizar la ganancia. Considerando que la cantidad de hectáreas asignadas a cada una de las estrategias está definida por la variable de decisión x_i , en la que i representa el índice de la estrategia. El índice j varía según todos los años incluidos, en función del plazo de inversión. La función puede describirse a través de la fórmula siguiente:

$$\text{máx} \quad \sum_i^{\text{Estrategias}} x_i * \left(\sum_j^{\text{Años}} \text{Retornos}_{ij} - \text{Costos}_{ij} \right)$$

3.2.7. Restricciones

A continuación, se enumera y explica cada restricción del modelo, detallando su propósito y cómo afecta las variables de decisión. En esta subsección, se realizará

una descripción en lenguaje natural de las mismas, y más adelante se las presentará en su formulación matemática correspondiente.

- **Cantidad mínima de hectáreas a dedicar para cada estrategia:** Se puede configurar un valor mínimo a utilizar de hectáreas para cada estrategia. Esto puede ser útil para los casos en que el usuario tenga preferencias por alguna estrategia en particular. Estos valores son ingresados por el usuario al utilizar el modelo, como ya se mencionó en la subsección 3.2.2. La restricción es simple en su formulación, por cada variable de decisión hay una restricción tal que su valor tiene que superar o ser igual al valor fijo ingresado por el usuario para cada estrategia.
- **Cantidad máxima de hectáreas a dedicar para cada estrategia:** Análoga a la restricción explicada anteriormente, pero en este caso se puede configurar una cantidad máxima de hectáreas a dedicar por estrategia. Esto puede ser útil si se desea diversificar las inversiones o limitar el riesgo en una estrategia en particular. La restricción es similar a la anterior, por cada variable de decisión se restringe su valor tal que sea menor o igual al valor fijo ingresado por el usuario para cada estrategia.
- **Presupuesto total disponible:** Para que la inversión sea factible dentro del presupuesto establecido por el usuario, es importante asegurarse de que se puedan cubrir los costos asociados a la inversión hasta el momento en que cada inversión comience a generar rentabilidad de forma anual e independiente. En otras palabras, es crucial poder sostener los gastos relacionados con la inversión inicial (necesaria para la puesta en marcha del sistema) hasta que dicho sistema alcance una rentabilidad sostenible año tras año. Al plazo hasta que se llega a dicha rentabilidad se lo referenciará como años en déficit.
- **Hectáreas totales disponibles:** Suma de cantidad de hectáreas dedicadas a cada estrategia, debe ser menor a la cantidad de hectáreas totales disponibles en el campo.

3.2.8. Solución

Para calcular la solución óptima, se recurrió al software de optimización CPLEX, ampliamente reconocido en el ámbito académico y profesional.

Se utilizó la librería de Python específica para CPLEX, que facilitó la integración con el lenguaje de programación Python y permitió una interacción eficiente con el solucionador. La API proporcionada por dicha librería simplificó el proceso de definición del modelo, configuración de parámetros y obtención de resultados.

El solucionador CPLEX permitió obtener soluciones óptimas en tiempos razonables, asegurando la calidad y exactitud de los resultados obtenidos.

3.3. Metodología de uso del modelo

El modelo está diseñado para ser utilizado en hectáreas con características similares, ya que los parámetros empleados para describir el campo se aplican a todas las hectáreas en su totalidad. No obstante, no todas las hectáreas de un campo presentan las mismas características.

Por lo tanto, para obtener resultados más precisos, es recomendable dividir el campo en grupos de hectáreas similares y aplicar el modelo en cada uno de estos grupos. Al hacer esto, se conseguirán resultados más exactos y cercanos al óptimo para el campo en estudio.

4. Formulación del problema

Este capítulo presenta la formulación matemática del problema, incluyendo la función objetivo, las restricciones, los parámetros utilizados y las variables de decisión del modelo.

4.1. Parámetros

1. *cantHectareasTotales*: la cantidad total de hectáreas del campo a considerar en el modelo.
Valor entero, $cantHectareasTotales > 0$.
2. *plazoInversion*: la duración total de la inversión.
Valor entero, $plazoInversion > 0$
3. *añosDeficit_i*: años en los que la estrategia de inversión i está en déficit económico. Valor entero, $añosDeficit_i \geq 0$.
4. *Años* : 1..*plazoInversion* los años de la inversión. Valores enteros.
5. *estrategiasInversion*: las estrategias de inversión a considerar en el modelo.
6. *Presupuesto*: el presupuesto total de la inversión.
Valor entero, $Presupuesto > 0$.
7. *cantMinimaHectareasEstrategia_i*: la cantidad mínima de hectáreas a considerar en la inversión.
Valor entero,
 $cantHectareasTotales \geq cantMinimaHectareasEstrategia_i \geq 0$.
8. *cantMaximaHectareasEstrategia_i*: la cantidad máxima de hectáreas a considerar en la inversión.
Valor entero,
 $cantHectareasTotales \geq cantMaximaHectareasEstrategia_i \geq 0$.
9. $Costos_{ij} \geq 0$: el costo de mantener la estrategia de inversión i en el año j .
10. $Retornos_{ij} \geq 0$: el retorno obtenido por la estrategia de inversión i en el año j .

4.2. Desglose de matrices de costos y retornos

Antes de abordar la formulación del problema, resulta conveniente analizar cómo se calculan las matrices de costos y retornos, puesto que son fundamentales para la mayoría de los cálculos que se efectúan. Estas matrices se obtienen a partir de los cálculos previos que serán explicados a continuación:

1. Sea *Plantas* el conjunto de plantas de celulosa consideradas. Incluye: *UPM*, *UPM2* y *MontesDelPlata*.
2. Sea *precioFleteKm* el precio de transportar 1 tonelada de madera por 1 km.
3. Sea *costoCosechaTonelada* el costo de cosechar 1 tonelada de madera.
4. Sea *toneladasPorHectarea_{ij}* la cantidad de producto bruto, en toneladas, obtenido en la estrategia de inversión *i* en el año *j*.
5. Sea *retornoTonelada_i* el precio que se paga en dólares por 1 tonelada de producto bruto obtenido en la estrategia de inversión *i*.
6. Sea *costosFijos_{ij}* el costo fijo que se tiene al realizar la estrategia de inversión *i* en el año *j*.

Cabe aclarar que para el silvopastoreo, se ha separado en un principio los retornos y costos para sus 2 producciones. Luego estos serán unificados en las matrices finales.

4.2.1. Matriz de Retornos_{ij}

Para cada año *j*, donde $j \in 1..plazoInversion$, y para cada estrategia *i*, con $i \in estrategiasInversion$, el retorno es calculado con la siguiente fórmula:

$$toneladasPorHectarea_{ij} * retornoTonelada_i$$

Esto aplica para todas las estrategias excepto para el caso del silvopastoreo, en el que se suman los retornos obtenidos por la parte forestal del mismo a los retornos obtenidos por la parte ganadera.

4.2.2. Matriz de $Costos_{ij}$

Aquí, es conveniente separar el desglose de costos por estrategias debido a que los mismos son calculados de distinta forma para cada una de ellas.

Ganadería de cría y ganadería de engorde:

Para cada estrategia i , con $i \in [ganaderiaCria, ganaderiaEngorde]$.

Para cada año j , con $j \in 1..plazoInversion$, el costo es expresado de la siguiente manera:

$$costosFijos_{ij}$$

Forestación para pulpa:

Para la estrategia $i = forestacionPulpa$.

Sea $minimaDistancia$ la distancia en km a la *planta* más cercana al campo, $planta \in Plantas$.

Para cada año j , con $j \in 1..plazoInversion$, el costo es calculado con la siguiente fórmula:

$$costosFijos_{ij} + \\ minimaDistancia * precioFleteKm * toneladasPorHectarea_{ij} + \\ toneladasPorHectarea_{ij} * costoCosechaTonelada$$

Forestación para aserradero:

Para la estrategia $i = forestacionAserradero$.

Para cada año j , con $j \in 1..plazoInversion$, el costo es calculado con la siguiente fórmula:

$$costosFijos_{ij} + \\ toneladasPorHectarea_{ij} * costoCosechaTonelada$$

Silvopastoreo:

En este caso, se separan los costos asociados a la ganadería y la forestación en el silvopastoreo.

Para calcular los costos de la ganadería, se utiliza la fórmula descrita previamente. Por otro lado, para determinar los costos de la parte forestal, se emplea la

fórmula del costo de forestación de aserradero. Posteriormente, se suman ambos costos a fin de obtener los costos finales del silvopastoreo.

4.3. Variables de decisión

Sea $cantHectareas_i$ la cantidad de hectáreas a dedicar a la estrategia de inversión i . Valor entero, $cantHectareasTotales \geq cantHectareas_i \geq 0$.

Habrán tantas variables, como estrategias de inversión viables para el caso particular del campo del inversor. Como se ha explicado anteriormente en 3.2.4.

4.4. Formulación Matemática

A continuación y en base a los parámetros y variables de decisión mencionados anteriormente, se muestra la formulación del problema.

$$\text{máx} \quad \sum_i^{estrategiasInversion} cantHectareas_i * \left(\sum_j^{Años} Retornos_{ij} - Costos_{ij} \right)$$

s.a.

$$\sum_i^{estrategiasInversion} cantHectareas_i \leq cantHectareasTotales$$

$$\sum_i^{estrategiasInversion} (cantHectareas_i * \left(\sum_j^{añosDeficit_i} Costos_{ij} \right)) \leq Presupuesto$$

para cada estrategia i en estrategiasInversion:

$$cantHectareas_i \geq cantMinimaHectareasEstrategia_i$$

$$cantHectareas_i \leq cantMaximaHectareasEstrategia_i$$

5. Análisis experimental

En este capítulo, se presenta la metodología utilizada para generar casos de prueba con el objetivo de evaluar el modelo propuesto, así como la ejecución y análisis de los resultados obtenidos. Todo esto se lleva a cabo para determinar la viabilidad y efectividad del modelo desarrollado.

Para comenzar, se analizarán los resultados de todas las ejecuciones en general, extrayendo estadísticas relevantes de cada caso. Después, se segmentarán los casos de prueba según diferentes criterios, con el propósito de obtener conclusiones que generen valor y justifiquen la aplicabilidad del modelo. Por último, se identificarán escenarios favorables para cada estrategia de inversión.

5.1. Metodología generación de casos de pruebas

En esta sección, se describe la metodología de pruebas empleada para evaluar el modelo presentado. Se aborda la elaboración de casos de prueba, justificando la elección de estos y proporcionando un método para generarlos.

A modo de evaluar el desempeño del modelo bajo diferentes escenarios, se variarán los parámetros de entrada. De este modo, es posible analizar cómo el modelo se adapta a diferentes instancias del problema y su capacidad de brindar soluciones óptimas en ellos.

5.1.1. Parámetros variables

A continuación, se presenta un listado de las entradas a variar para generar los casos de prueba. Se presentan los valores que toma cada una, junto con una explicación que fundamenta los valores elegidos.

- **Ubicación, tipo de suelo e índice de CONEAT:** Estos parámetros se combinan para representar las condiciones específicas de cada campo. Cada ubicación geográfica, tipo de suelo e índice de CONEAT implicará diferentes oportunidades y limitaciones para la inversión en actividades agropecuarias y forestales. Estos parámetros definen las diferentes estrategias de inversión que serán consideradas por el modelo. También la ubicación define el costo de flete, un factor de gran importancia en el negocio de forestación para pulpa. Los diferentes escenarios a considerar son los siguientes:

Ubicación	Tipo de suelo	Índice de CONEAT	Descripción
A[14]	9.1	61	Suelo forestable y no apto para engorde (cerca de planta)
B[14]	S09.10	18	Suelo forestable y no apto para engorde (lejos de planta)
C[14]	8.5	105	Suelo forestable y apto para engorde (lejos de planta)
D[14]	8.10	94	Suelo forestable y apto para engorde (cerca de planta)
E[14]	5.5	158	Suelo no forestable y apto para engorde
F[14]	3.5	35	Suelo no forestable y no apto para engorde

Tabla 1: Escenarios de ubicación, tipo de suelo e índice de CONEAT

En la primera columna, se observa la ubicación de los escenarios considerados. Cada letra se mapea a una ubicación específica en el mapa adjuntado en el Apéndice [14]. Posteriormente, en la segunda columna, se presenta la información sobre el tipo de suelo de cada escenario. La tercera columna contiene el índice CONEAT y, finalmente, la última columna proporciona una breve descripción en lenguaje natural del contexto que representa cada escenario.

- Plazo:** El plazo de inversión es un factor crítico en la toma de decisiones en el sector agropecuario. Los productores pueden estar interesados en maximizar sus beneficios a corto, mediano o largo plazo. Al variar el plazo en los casos de prueba, se puede evaluar si el modelo es capaz de adaptarse a distintos contextos de inversión, proporcionando soluciones adecuadas para cada situación. A continuación se listan los plazos a considerar y un breve contexto sobre las inversiones en estos plazos:
 - 8 años: Las inversiones de tipo forestal no generan retornos debido a que el plazo de inversión no es suficiente para cosechar los árboles. Se verán

favorecidas únicamente las estrategias de inversión de tipo ganadero ya que son las únicas capaces de generar retornos en este plazo.

- 12 años: Se alcanza el tiempo necesario para la realización de forestación de pulpa, aunque no es suficiente para llevar a cabo la forestación para aserradero.
 - 18 años: En este contexto, considerando únicamente plazo, es posible obtener retornos de todas las estrategias posibles.
 - 28 años: Al igual que en el caso anterior, en este plazo de inversión es posible obtener retornos de todas las estrategias posibles. En esta ocasión, se podrá evaluar cómo se desempeñan las estrategias en contextos de inversión que se sostienen durante un período prolongado de tiempo.
- **Hectáreas y presupuesto:** Las hectáreas disponibles para la inversión y el presupuesto que se dispone para los costos iniciales son variables determinantes a la hora de considerar diferentes opciones de inversión. Por ejemplo, puede que sea más rentable realizar una determinada estrategia, pero que el presupuesto disponible impida llevarla a cabo. A continuación se listan los diferentes valores a considerar para estos parámetros, junto con un breve contexto sobre el comportamiento a evaluar de las inversiones dados dichos valores:
- 200 hectáreas y 2.5 millones de dólares: Contempla un campo de tamaño mediano, con un presupuesto alto, a modo de darle una mayor libertad al modelo.
 - 200 hectáreas y 1 millón de dólares: Este escenario contempla un campo de tamaño mediano, con un presupuesto moderado, a modo de ver como el modelo maneja escenarios restringidos.
 - 500 hectáreas y 1.5 millones de dólares: Este escenario contempla un campo grande con un presupuesto reducido. Similar al caso anterior, en

este se restringe el presupuesto para observar cómo el modelo maneja una gran disponibilidad de hectáreas con un presupuesto escaso.

- 500 hectáreas y 4 millones de dólares: Este escenario contempla un campo grande con un presupuesto moderado/alto. De forma similar al primer caso, este contexto permite estudiar como se comporta el modelo con libertad de presupuesto y tamaño.

5.1.2. Ejecución de casos de prueba presentados

Se generan 96 casos de prueba combinando todos los valores posibles de los parámetros mencionados en la subsección anterior.

Se ejecuta el modelo para cada caso de prueba. Los resultados incluyen información sobre los parámetros utilizados y las métricas de desempeño, como la ganancia, el presupuesto gastado, el tiempo de ejecución y las hectáreas dedicadas a cada práctica.

Estos son almacenados para su posterior análisis y comparación.

5.2. Hardware utilizado

Los casos de prueba fueron ejecutados en un equipo de características estándar, dado que el modelo no implica tiempos de ejecución excesivamente largos. Por lo tanto, esto no fue una limitante para realizar múltiples pruebas y analizar los resultados. A continuación, se detallan las características específicas del ordenador utilizado en el estudio:

- Sistema operativo: Windows 11 Pro
- Arquitectura: Sistema operativo de 64 bits
- Procesador: Intel(R) Core(TM) i5-8365U
- Memoria RAM: 16GB
- Software y lenguaje de programación utilizado: Python 3.10.9, junto a CPLEX en su versión para Python 3.10

5.3. Resultados generales

A continuación, se examinarán los resultados generales de todas las ejecuciones, obteniendo estadísticas significativas de cada caso.

5.3.1. Tiempos de ejecución

Se presentan resultados estadísticos de los tiempos de ejecución:

Estadística	Tiempo de ejecución (segundos)
Media	0.0187
Máximo	0.1041
Mínimo	0.0075

Tabla 2: Tiempos de ejecución

Como se puede observar en la Tabla 2, el modelo presenta un rendimiento muy eficiente para cada caso de uso ejecutado. Incluso el tiempo máximo de ejecución es de aproximadamente 0.1041 segundos, lo que sugiere que aún en los casos más difíciles, el modelo es capaz de encontrar una solución en un tiempo aceptable.

5.3.2. Estado de las soluciones

Se presentan los estados de las 96 ejecuciones correspondientes a cada caso de prueba:

Status	Valor
Integer optimal solution	91
Integer optimal, tolerance	5

Tabla 3: Estados y sus resultados

Como se puede apreciar en la tabla presentada, en la mayoría de las soluciones se alcanza un valor óptimo, aproximadamente del 94.8%. En los 5 casos restantes, se encontraron soluciones que cumplen con la tolerancia establecida⁴. Estos resul-

⁴la tolerancia de optimalidad por defecto es de 0.0001

tados indican que el modelo es efectivo en la resolución de problemas de este tipo en la mayoría de los casos.

5.3.3. Gap relativo

A continuación, se presentan resultados del gap relativo. Este representa la diferencia entre la mejor solución encontrada por CPLEX y la solución óptima del problema planteado. Es calculado como el porcentaje de la diferencia absoluta entre la mejor solución encontrada y la óptima.

El gap es una medida de qué tan cerca estuvo CPLEX de encontrar la solución óptima. Por lo tanto, cuando el gap es 0, significa que la solución óptima fue encontrada.

Estadística	Gap Relativo
Media	$3,55 \times 10^{-6}$
Máximo	$9,33 \times 10^{-5}$
Mínimo	0.0

Tabla 4: Estadísticas del gap relativo

Gap	Frecuencia
0.000000	91
0.000033	2
0.000090	2
0.000093	1

Tabla 5: Conteo de valores de gap

Como se puede observar, son 5 las soluciones en las que el gap no es cero, y 91 en las que si. Esto concuerda con lo presentado anteriormente en la Subsección 5.3.2, donde se analizó el estado de las 96 soluciones.

5.4. Resultados por escenarios específicos

En la siguiente sección se dividirán los casos de prueba conforme a distintos criterios, con el objetivo de alcanzar conclusiones que aporten valor y respalden la

aplicabilidad del modelo.

5.4.1. Lejanos a planta de celulosa y prioridad forestal

A continuación, se presentarán los resultados de los casos de uso lejanos a las plantas de celulosa y que cuentan con suelos de prioridad forestal. Por lo tanto, se pueden aplicar estrategias de forestación. En el Apéndice, en la Tabla 25, se adjuntan los casos de prueba que corresponden a esta categorización. Además, en el Apéndice, en la Tabla 26, se pueden encontrar los resultados de la ejecución.

Estrategia	Hectáreas
Hectáreas forestación pulpa	0
Hectáreas forestación aserradero	2888
Hectáreas ganadería cría	2800
Hectáreas ganadería engorde	4154
Hectáreas silvopastoreo	1355

Tabla 6: Distribución total de hectáreas para caso: lejanos a plantas y forestables

En la Tabla 6 se muestra la cantidad total de hectáreas dedicadas a cada estrategia, con el objetivo de brindar una estadística general del rendimiento del modelo para los casos de prueba en la presente subsección.

Como se puede observar, en los casos de prueba en los que el campo está ubicado lejos de las plantas de celulosa, aunque tenga la opción de realizar forestación para pulpa por estar ubicado en un suelo de prioridad forestal, nunca se opta por esta opción.

Esto se debe a que el costo de transporte por km de distancia entre el campo en cuestión y la planta pasa a tener un rol importante, y la estrategia deja de ser rentable en comparación con las otras opciones. En ninguno de los casos presentados se dedica ni siquiera una hectárea a la misma.

5.4.2. Inversiones a largo plazo, presupuestos altos y prioridad forestal

A continuación se presentarán los resultados de los casos de uso de inversiones a largo plazo, con alto presupuesto en relación a la cantidad de hectáreas totales, y que presentan suelos de prioridad forestal. Se adjuntarán los casos de prueba que

corresponden a esta categorización en el Apéndice, en la Tabla 27. Los resultados de ejecución se pueden encontrar en el Apéndice, en la Tabla 28.

Estrategia	Hectáreas
Hectáreas forestación pulpa	0
Hectáreas forestación aserradero	1596
Hectáreas ganadería cria	0
Hectáreas ganadería engorde	2
Hectáreas silvopastoreo	2

Tabla 7: Distribución total de hectáreas para caso: largo plazo, presupuesto alto y prioridad forestal

En la Tabla 7 se puede observar la cantidad total de hectáreas dedicadas a cada estrategia. Esta resume los resultados de los casos de prueba para este contexto específico (largo plazo, presupuesto alto y prioridad forestal).

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que en este contexto de inversión, la forestación para aserradero es la opción predominante sobre las demás.

Es importante destacar que en este caso se cuenta con un presupuesto alto, factor determinante para que casi la totalidad de las hectáreas se dediquen a esta estrategia. Como se verá más adelante, no siempre se opta por esta opción en contextos de inversión con presupuesto más limitado.

5.4.3. Largos plazos de inversión, presupuestos bajos y prioridad forestal

A continuación, se presentarán los resultados de los casos de uso categorizados como de largo plazo de inversión, con bajo presupuesto en relación a la cantidad de hectáreas totales y suelo de prioridad forestal. Se adjuntan los casos de prueba que aplican a esta categorización en el Apéndice, en la Tabla 29. Los resultados de ejecución también se pueden encontrar en el Apéndice, en la Tabla 30.

Nuevamente, como en las demás subsecciones de este análisis de resultados, se presenta la Tabla 8 con información acerca de la cantidad total de hectáreas dedicadas a cada estrategia luego de la ejecución de los casos de uso.

Estrategia	Hectáreas
Hectáreas forestación pulpa	0
Hectáreas forestación aserradero	1228
Hectáreas ganadería cria	0
Hectáreas ganadería engorde	2182
Hectáreas silvopastoreo	2187

Tabla 8: Distribución total de hectáreas para caso: largo plazo, presupuesto bajo y prioridad forestal

Las características de estos casos son muy similares a los de la Subsección 5.4.2, pero se reduce solo el presupuesto inicial considerado. Sin embargo, se pueden evidenciar grandes cambios respecto a los resultados obtenidos en la distribución de hectáreas promedio para los casos considerados, y se puede concluir que la ganadería para cría y la forestación para pulpa continúan sin competir ante las otras opciones.

Esto puede explicarse a partir de que el plazo de inversión considerado es largo (18 y 28 años), por lo que una estrategia de inversión forestal orientada a pulpa o una estrategia ganadera orientada a cría no logran competir con las ganancias de una inversión de forestación para aserradero.

Algo interesante a destacar es que, por primera vez, se observan hectáreas dedicadas a silvopastoreo, específicamente en los casos en los que se tiene un plazo de inversión largo y en los que el índice de CONEAT no es el suficiente como para la realización de ganadería de engorde. Se puede observar en estos casos una distribución de hectáreas en la inversión que considera una mezcla entre forestación para aserradero y silvopastoreo, con predominancia de hectáreas dedicadas a silvopastoreo.

Algo interesante para analizar es que el modelo, al tener un presupuesto más limitado que en la Subsección 5.4.2, no puede dedicar el 100% de las hectáreas a aserradero y opta por realizar cierta cantidad de ésta y luego dedicar el resto a silvopastoreo o ganadería para engorde, dependiendo del índice CONEAT del campo. Aplicando ganadería para engorde en los casos en que el CONEAT sea superior a 93 y silvopastoreo en los demás.

5.4.4. Cortos plazos de inversión y prioridad forestal

A continuación se presentarán los resultados de los casos de uso que podemos categorizar como de corto plazo de inversión, que tienen un campo de prioridad forestal por su tipo de suelo CONEAT. Se adjuntan los casos de prueba que aplican a esta categorización en el Apéndice, en la Tabla 31. Los resultados de ejecución también se pueden encontrar en el Apéndice, en la Tabla 32.

Se muestra a continuación, en la Tabla 9, la cantidad total de hectáreas dedicadas a cada estrategia:

Estrategia	Hectáreas
Hectáreas forestación pulpa	0
Hectáreas forestación aserradero	0
Hectáreas ganadería cría	2800
Hectáreas ganadería engorde	2800
Hectáreas silvopastoreo	0

Tabla 9: Distribución total de hectáreas para caso: corto plazo y prioridad forestal

El caso presentado en esta ocasión tiene la particularidad de que, al tratarse de inversiones de 8 años únicamente, las estrategias que incluyen forestación no compiten debido a que no es posible obtener retornos en ese plazo.

Es interesante destacar que, en promedio, la mitad de las hectáreas fue dedicada a ganadería para cría y la otra mitad en ganadería para engorde. Esto puede justificarse directamente por el índice de productividad CONEAT del campo en cada caso. En los campos con índice superior al umbral definido anteriormente⁵, se realiza ganadería para engorde en su totalidad. Para los casos en que el índice es menor que este umbral, la única estrategia aplicable, según nuestro modelado de la realidad, es ganadería para cría, aplicándose la totalidad de las hectáreas a esta.

⁵El umbral para la realización de ganadería de engorde es 93, es decir, campos con índice CONEAT superior a 93 pueden realizar ganadería de engorde.

5.4.5. Plazos medios de inversión y prioridad forestal

En esta subsección se presentarán resultados de casos de uso de mediano plazo de inversión (12 años) con suelo de prioridad forestal. Se adjuntan los casos de prueba que aplican a esta categorización en el Apéndice, en la Tabla 33.

Los resultados de ejecución también pueden ser encontrados en el Apéndice, en la Tabla 34.

Se presenta la distribución total de hectáreas dedicadas a cada estrategia en la Tabla 10. Se observa que, en este tipo de inversiones de mediano plazo, el modelo no elige la forestación para aserradero como una opción, ya que el plazo mínimo para obtener retornos con esta estrategia es de 18 años.

Estrategia	Hectáreas
Hectáreas forestación pulpa	1102
Hectáreas forestación aserradero	0
Hectáreas ganadería cria	1402
Hectáreas ganadería engorde	2800
Hectáreas silvopastoreo	0

Tabla 10: Distribución total de hectáreas dedicadas para casos de plazo medio y prioridad forestal

También se puede observar que, en resumen, la actividad que tuvo la mayor cantidad de hectáreas dedicadas fue la ganadería para engorde. Puede surgir la interrogante de por qué esta estrategia no fue realizada en la totalidad de los casos. Al examinar estos casos en los que la ganadería para engorde no prevaleció, se encuentra que son aquellos campos que no tienen un índice de CONEAT alto, lo que imposibilita la realización de esta estrategia.

Luego, se puede observar que en los casos de campos con índice CONEAT bajo, lo que determina la estrategia más rentable es la distancia a la planta de celulosa. Se elige realizar forestación para pulpa siempre y cuando el campo este ubicado cercano a las plantas de celulosa y ganadería para cría en el caso contrario. Para estos casos particulares se puede observar en la Tabla 33 presente en el Apéndice, que los campos cercanos son aquellos con ubicación A, y los lejanos con ubicación B.

5.4.6. Altos índices de CONEAT y sin prioridad forestal

A continuación, se presenta la clasificación de casos de prueba que se consideran como de índice de productividad CONEAT alto (158), pero que no cuentan con prioridad forestal dado su tipo de suelo. Como en los casos anteriores, se adjuntan los casos de prueba que aplican a esta categorización en el Apéndice, en la Tabla 35. Los resultados de ejecución también se pueden encontrar en el Apéndice, en la Tabla 36.

Estrategia	Hectáreas
Hectáreas forestación pulpa	0
Hectáreas forestación aserradero	0
Hectáreas ganadería cria	0
Hectáreas ganadería engorde	5600
Hectáreas silvopastoreo	0

Tabla 11: Distribución total de hectáreas para caso: índice CONEAT alto y no prioridad forestal

En la Tabla 11 se puede observar la cantidad total de hectáreas dedicadas a cada estrategia. Se evidencia claramente como se destaca la ganadería de engorde en un escenario en el que el índice de CONEAT es alto y las estrategias de inversión forestales no son consideradas. Estas últimas no son consideradas debido a que dichos escenarios no presentan suelos de prioridad forestal 3.2.4. En este contexto, la ganadería de engorde es aquella que brinda mayores retornos.

5.5. Escenarios favorables para cada estrategia

En la presente sección, se discutirán los escenarios favorables para la realización de cada estrategia. Esto se ha podido concluir a partir del análisis de los resultados del modelo.

Se considera como caso favorable para realizar cierta estrategia a aquellos casos en los que más del 75 % de las hectáreas totales se dedicaron a la estrategia en cuestión.

5.5.1. Ganadería para cría

A continuación, se presentarán las características identificadas como favorables para la realización de ganadería para cría. Estas se han identificado a partir de un análisis de los casos de prueba favorables a esta estrategia, presentados en el Apéndice en la Tabla 37.

Como característica general, se puede destacar que los casos en los que se realiza ganadería para cría como estrategia principal o única son en campos con índice de productividad CONEAT bajo. Esto se justifica porque para CONEAT superiores, se optará por la ganadería para engorde, como se explicará más adelante.

Otra característica que se cumple para que sea elegida esta estrategia en su totalidad, es que los campos no tengan prioridad forestal o sean contextos de inversión con plazos menores a 10 años.

Además, existe un último escenario en el que esta estrategia resulta ser la elegida. Este se presenta cuando el plazo de inversión es de 12 años, el campo tiene prioridad forestal, índice de productividad CONEAT bajo, pero su ubicación se encuentra muy lejos de las plantas de celulosa. En estas circunstancias, la estrategia de forestación para pulpa sigue sin ser más rentable que la ganadería para cría.

5.5.2. Ganadería para engorde

En esta subsección, se describirán las características que se han identificado como favorables para la realización de ganadería de engorde como estrategia de inversión. Estas características se han obtenido a partir de un análisis de casos de prueba exitosos de esta estrategia, los cuales se presentan en el Apéndice en la Tabla 38.

La primera característica que se observa, como era de esperar, es que todos los campos tienen índices de CONEAT altos: 94, 105 y 158. Esto se debe a que se planteó como supuesto que esta estrategia solo puede ser realizada en campos con índices de CONEAT mayores a 93.

Además, se puede observar que otra característica en común que comparten los casos en que prevalece la ganadería para engorde es que el campo no presenta suelo de prioridad forestal, o bien, era campo de prioridad forestal pero el plazo era menor a 18 años. Dado que en plazos iguales o superiores 18 años la estrategia de forestación para aserradero comienza a competir con esta.

5.5.3. Forestación para pulpa

A continuación se presentan las características identificadas como favorables para la realización de forestación para pulpa. Estas se han identificado a partir de un análisis de los casos de prueba favorables a esta estrategia, presentados en el Apéndice en la Tabla 39.

En esta ocasión, las características que se pueden destacar incluyen: plazo de 12 años, ubicación cercana a plantas de celulosa y suelos de prioridad forestal.

Esto resalta nuevamente la importancia de la distancia a las plantas de celulosa cuando se desea realizar forestación para pulpa. Además reafirma que, para plazos de inversión más largos, aunque se esté cerca de plantas de celulosa, estrategias como la de forestación para aserradero resultan más rentables, como se verá en la siguiente subsección.

5.5.4. Forestación para aserradero

En la Tabla 40 del Apéndice se presentan los casos de prueba favorables a la forestación para aserradero, a continuación se expondrán las características generales de estos casos.

En este caso, las situaciones favorables presentan las siguientes características: campos con prioridad forestal, inversiones a largo plazo y un alto presupuesto por hectárea.

Estas características concuerdan con lo estudiado inicialmente, dado que es una estrategia de inversión pensada para inversiones a largo plazo ⁶.

Además, es importante destacar el factor del presupuesto por hectárea, que en este caso debe ser alto para que esta estrategia sea la más rentable. Más adelante, se verá como en las mismas características pero con menos presupuesto por hectárea disponible, las estrategias que prevalecen son otras.

5.5.5. Silvopastoreo

En esta subsección, se describirán las características que se han identificado como favorables para la realización de silvopastoreo como estrategia de inversión.

⁶el mínimo plazo de inversión considerado para obtener retornos es de unos 18 años

Estas características se han obtenido a partir analizar casos de prueba en los que esta estrategia prevalece, los cuales se presentan en el Apéndice en la Tabla 41.

La primera característica común, como en todas las estrategias que incluyen un componente arbóreo, es que el campo debe contar con suelo de prioridad forestal. Debido a la simplificación considerada⁷, esto es un requisito necesario.

Además, podemos observar en los resultados que los campos favorables para el silvopastoreo presentan índices de CONEAT bajos. Esto se justifica, ya que si el campo tuviera un índice mayor, la ganadería para engorde pasaría a ser la estrategia preferida.

Asimismo, los plazos de inversión deben ser largos, puesto que se requieren al menos 18 años desde la inversión inicial para obtener el retorno del componente arbóreo.

Por último, estos casos cuentan con un presupuesto relativamente bajo en relación a la cantidad de hectáreas. A diferencia de la subsección anterior, donde la forestación para aserradero era la estrategia predominante, en este caso no se necesita un presupuesto elevado para llevar a cabo el silvopastoreo en grandes extensiones.

⁷Sólo se podrá realizar estrategias forestales en campos que cuenten con suelo de prioridad forestal

6. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una técnica ampliamente utilizada para evaluar cómo las variaciones en los valores de los parámetros de entrada de un modelo afectan sus resultados. Esta técnica es especialmente útil en la toma de decisiones, ya que permite identificar qué parámetros tienen el mayor impacto en las salidas del modelo y, por lo tanto, en la rentabilidad de una inversión.

A continuación, se presentan las distintas etapas para la construcción del análisis, junto con sus respectivos resultados.

6.1. Definición del caso base

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad, se definió un caso base específico para cada parámetro, dado que no existe un caso base genérico que refleje la importancia de todos los parámetros. Estos casos base serán presentados en el análisis de resultados específico para cada parámetro.

6.2. Selección de parámetros y rangos de variación

Una vez definido los caso base, se deben seleccionar los parámetros que se desean analizar y definir los rangos de variación para cada uno de ellos. En el modelo presentado, los parámetros seleccionados y sus respectivos rangos de variación son los siguientes:

- Índice de CONEAT: Toma como valores desde 20 a 140, variando de a 10. El rango elegido representa una amplia variedad de condiciones de suelo que se pueden encontrar en el país.
- Plazo de inversión: Toma valores desde 3 a 28 años, variando de a 1 año. Este rango proporciona una visión exhaustiva de las inversiones a corto y largo plazo.
- Hectáreas: Toma valores desde 20 hectáreas hasta 900, variando de a 40 hectáreas. Se selecciona este rango para reflejar una variedad de tamaños de campos que se pueden encontrar en Uruguay.

- Presupuesto: Toma valores desde 100.000 dólares hasta 4.900.000, variando de a 100.000 dólares. El rango elegido busca cubrir una amplia gama de posibilidades financieras.
- Tipo de Suelo: Toma como valores 8.5, 8.10, 9.1, S09.10, 5.5, 3.5, 3.6 y 8.9. Los tipos de suelo seleccionados son representativos de las diferentes condiciones que se pueden encontrar en Uruguay. Se consideran tipos de suelo pertenecientes a los grupos de prioridad forestal, tanto como algunos que no.
- Ubicación: Toma distintas ubicaciones, variando la distancia a plantas de celulosa. Las distancias consideradas varían desde 6 km hasta 264 km, variando de a 25 km. Las distintas ubicaciones utilizadas se pueden ver en la Tabla 42.

6.3. Ejecución del modelo y recopilación de resultados

Con el caso base y los rangos de variación establecidos, se procede a ejecutar el modelo para cada valor del parámetro variable, manteniendo los demás parámetros fijos en sus valores predeterminados. Para cada ejecución, se almacenan los resultados, que incluyen la ganancia y los valores de los parámetros empleados.

6.4. Visualización de resultados

Una vez recopilados los resultados de todas las ejecuciones del modelo, se genera un gráfico de barras para cada parámetro variable, mostrando la evolución de la ganancia con respecto a dicho parámetro. Estos gráficos permiten visualizar el impacto de la variación de cada parámetro en la rentabilidad de la inversión y, por lo tanto, identificar qué parámetros tienen el mayor impacto en el resultado del modelo.

6.5. Análisis por parámetro

Esta sección se centra en el análisis detallado de los resultados del análisis de sensibilidad para cada parámetro de manera individual. Se explora cómo la

variación en cada uno de estos parámetros incide en la ganancia de la inversión y se discuten las implicancias que estos resultados tienen en la toma de decisiones.

Al examinar cada parámetro por separado, se puede obtener una perspectiva más completa sobre la influencia de cada factor en el modelo. Esta información resulta de gran utilidad para identificar aquellos parámetros que requieren mayor consideración en el proceso de planificación y optimización de la inversión.

6.5.1. Hectáreas

En esta subsección, se analiza el impacto de la cantidad de hectáreas en la ganancia de las inversiones. Dicho parámetro representa la cantidad de tierra disponible para aplicar las diferentes estrategias de inversión. La variación en este parámetro puede tener un impacto importante en la rentabilidad del proyecto, debido a que afecta el presupuesto a utilizar, considerando la gran escala que puede tomar la inversión.

Para llevar a cabo este análisis, se ha utilizado un caso base específico, cuyos valores se detallan en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Tipo de suelo	8.5
Plazo de inversión	8
Ubicación	C[14]
Presupuesto	2000000

Tabla 12: Caso base para el parámetro *Hectáreas*

En el caso base seleccionado, se considera un plazo corto, un suelo adecuado para la forestación, un buen índice de CONEAT, una ubicación lejana a las plantas de celulosa y un presupuesto moderado. Es importante destacar que un plazo de 8 años limita la inversión en forestación, ya que no permite obtener retornos significativos en ese período.

Además, al contar con un buen índice de CONEAT, ambas estrategias ganaderas (cría y engorde) son factibles; sin embargo, la ganadería de cría presenta una desventaja en cuanto a rentabilidad en comparación con la de engorde.

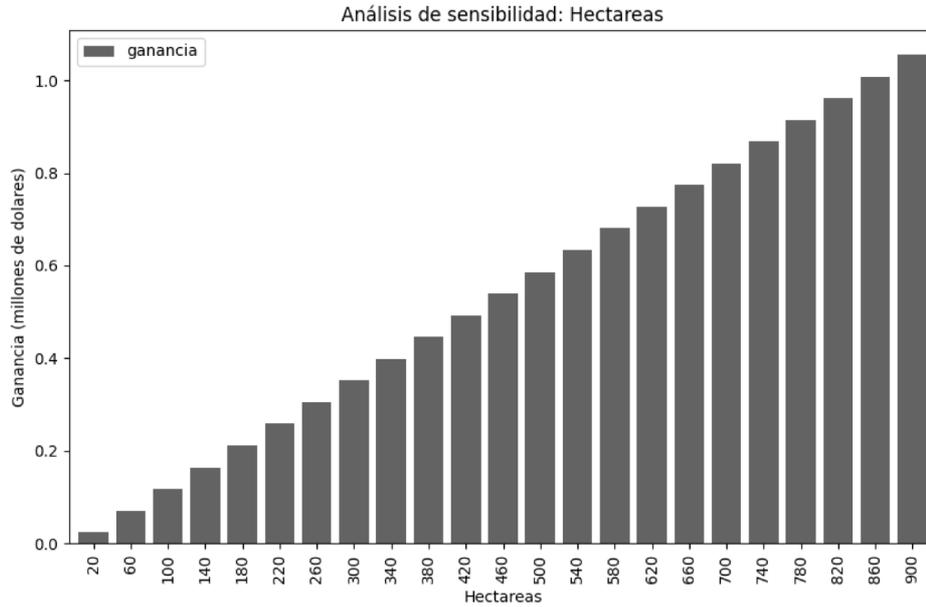


Figura 2: Ganancia en función de la cantidad de hectáreas para el caso base de la Tabla 12

A partir de la Figura 2, se observa que la ganancia aumenta de manera lineal a medida que aumenta la cantidad de hectáreas. Esto tiene sentido, ya que todos los costos y retornos del modelo están expresados por hectárea, y de este modo, la ganancia se calcula por hectárea. Por lo tanto, dado que la relación presupuesto-hectárea es suficiente para realizar ganadería cómodamente en todos los casos, el presupuesto no limita al modelo en este aspecto.

Considerando esto y analizando la Tabla 44 adjunta en el Apéndice, se nota que el modelo opta por realizar ganadería de engorde en todas las hectáreas del campo. Dado que se utiliza una sola estrategia, la ganancia siempre es la misma y, como está expresada por hectárea, se explica la linealidad del gráfico.

Es fundamental resaltar este punto, ya que la linealidad dejaría de existir si, al incrementarse la cantidad de hectáreas, la distribución de estrategias variara. Esto se puede ver reflejado en la Figura 3, en la que se ajusta el caso base de la siguiente manera:

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Tipo de suelo	8.5
Plazo de inversión	20
Ubicación	C[14]
Presupuesto	1000000

Tabla 13: Caso base para el parámetro *Hectáreas* cambiando su plazo y presupuesto

Se aumenta el plazo de 8 a 20 años y se reduce el presupuesto de 2 millones a 1, haciendo que el mismo limite la elección de estrategias a medida que aumenta la cantidad de hectáreas. Se aumenta el plazo ya que permite una mayor variabilidad en las estrategias y, a su vez, influye en el presupuesto a utilizar.

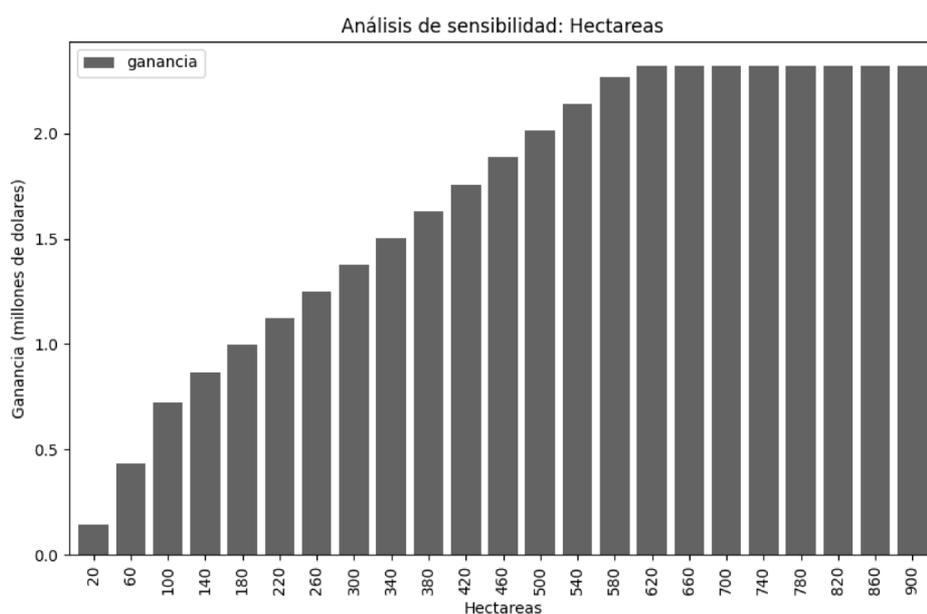


Figura 3: Ganancia en función de la cantidad de hectáreas para el caso base de la Tabla 13

Se puede observar cómo la ganancia deja de tener una forma lineal y, en cambio, la pendiente positiva varía, así como también llega a un estancamiento hacia el final. Esto ocurre porque, al aumentar la cantidad de hectáreas, el presupuesto

deja de ser suficiente para cubrir todas las hectáreas disponibles; por lo tanto, no se llega a invertir en todo el campo. Esto se puede ver reflejado en la Tabla 43 adjuntada en el Apéndice.

Estos resultados sugieren que, en general, invertir en más hectáreas puede ser beneficioso para el proyecto, ya que aumentaría las ganancias obtenidas. No obstante, es importante tener en cuenta que el presupuesto a utilizar es mayor a medida que aumentan las hectáreas, por lo tanto, es conveniente analizar la rentabilidad en cada caso. Dado que con un presupuesto limitado, la rentabilidad podría disminuir a medida que las hectáreas aumentan.

6.5.2. Tipo de suelo

En esta subsección, analizaremos el impacto del tipo de suelo en la ganancia de las inversiones. El parámetro tipo de suelo representa a qué grupo de suelo CONEAT corresponde el campo sobre el que se realizará la inversión. La variación en este parámetro puede tener un impacto importante en las estrategias seleccionadas por el modelo, ya que este determina la posibilidad de realizar forestación como una estrategia de inversión. En esta subsección, investigaremos cómo la variación en el tipo de suelo influye en la ganancia de la inversión.

Para realizar este análisis, hemos utilizado un caso base específico, cuyos valores se detallan en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Plazo de inversión	25
Ubicación	C[14]
Hectáreas	400
Presupuesto	4.000.000

Tabla 14: Caso base para el parámetro *Tipo de suelo*

El caso base seleccionado describe adecuadamente una situación en la que el análisis de sensibilidad del tipo de suelo arroja resultados interesantes.

Este presenta una inversión a largo plazo (25 años), una ubicación lejana a las plantas de celulosa y un presupuesto elevado para la cantidad de hectáreas

consideradas, lo que significa que el presupuesto no debería ser una limitante en este caso. Además, presenta un buen índice de productividad CONEAT, lo que habilitaría la realización de la ganadería de engorde.

Cabe destacar que, debido al largo plazo de inversión, las estrategias de forestación tomarán mayor relevancia debido a sus altas tasas de retorno, y será interesante observar cómo se comporta el modelo con la variación del tipo de suelo.

A continuación, se presenta una gráfica que muestra la ganancia en función del tipo de suelo. Es importante aclarar que los primeros cuatro suelos que se observan son suelos de prioridad forestal y los últimos tres no. Es decir, los primeros cuatro tipos de suelo presentes en la gráfica son suelos en los que las inversiones forestales serán consideradas por el modelo, mientras que en los últimos tres no.

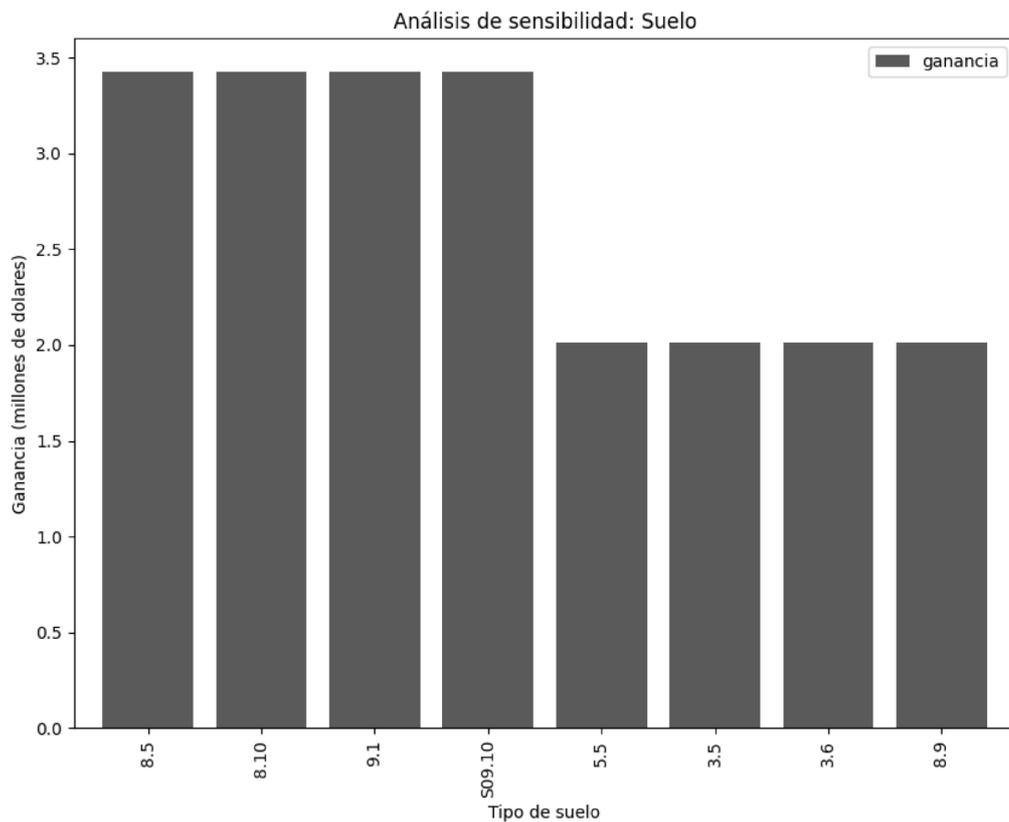


Figura 4: Ganancia en función del tipo de suelo para el caso base de la Tabla 14

Como se puede observar en la Figura 4, y tal como se ha descrito anteriormente, los suelos de prioridad forestal presentan una gran diferencia en ganancias en comparación con el resto. Siempre que la estrategia de forestación para aserradero sea viable, esta presenta una gran diferencia en ganancia frente al resto.

Como se puede observar en los resultados para este caso base presentes en el Apéndice Tabla 45, siempre que el presupuesto lo permitió, el modelo opta por la realización de forestación para aserradero debido a que es lo más rentable. La diferencia sería mayor incluso si el caso base contemplara un campo en el que no es viable la realización de ganadería de engorde.

En conclusión, al variar el tipo de suelo y plantear una inversión a largo plazo, se pueden obtener resultados con una diferencia sustancial si se trata de un suelo forestable.

Puede resultar interesante evaluar el caso en el que se trata de una inversión a mediano plazo. Se puede intuir que el tipo de suelo ya no será tan determinante en la ganancia en este tipo de casos.

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Plazo de inversión	15
Ubicación	C[14]
Hectáreas	400
Presupuesto	4.000.000

Tabla 15: Caso base para el parámetro *Tipo de suelo* disminuyendo el plazo de inversión

Se presenta entonces en la Tabla 15 el segundo caso considerado en este análisis. Respecto al primer caso de estudio, lo único modificado fue el plazo de inversión. El escenario pasa de considerar una inversión a largo plazo (25 años) a una de mediano plazo (15 años).

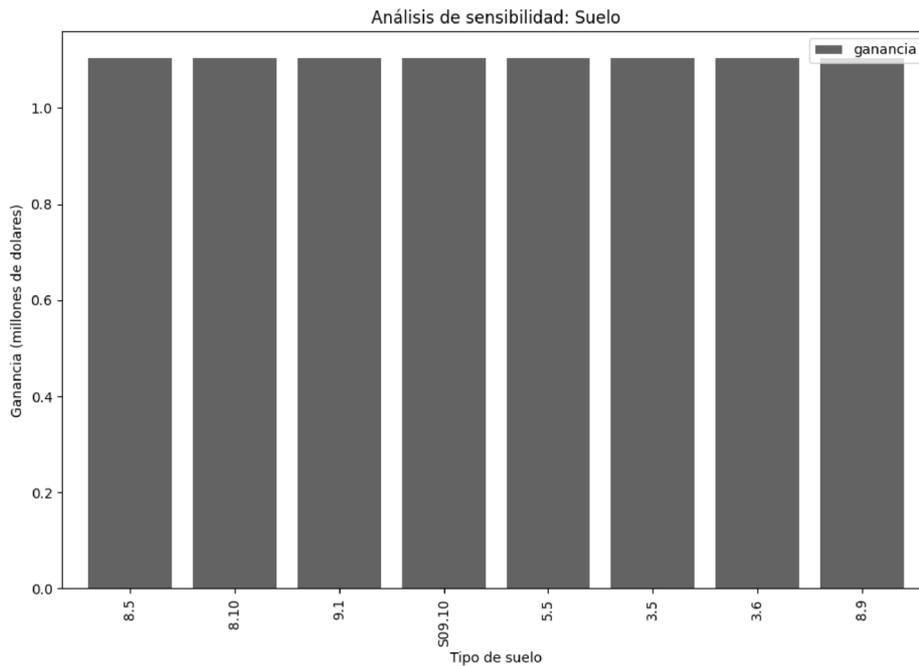


Figura 5: Ganancia en función del tipo de suelo para el caso base de la Tabla 15

Como se puede observar en la Figura 5, en inversiones a mediano plazo ⁸ con características similares a las descritas en este segundo caso, el tipo de suelo deja de ser determinante. Esto es debido a que, como se ha explicado anteriormente, la estrategia que saca mayor diferencia frente al resto, siempre que sea aplicable, es la de forestación para aserradero y esta es únicamente rentable en inversiones a largo plazo (>18 años), contando con un buen presupuesto y un tipo de suelo forestable.

Se puede observar en la Tabla 46, adjunta en el Apéndice, que la estrategia elegida es la de ganadería de engorde en todos los casos. Esto tiene sentido debido a que el caso base considerado es un campo con posibilidad de realización de esta estrategia.

Puede resultar interesante evaluar un tercer caso base en el que el campo esté ubicado cercano a la planta para ver cómo compite la ganadería de engorde frente a la forestación para pulpa.

⁸Se puede asumir que en corto plazo también

Se realiza entonces el mismo análisis, pero variando la ubicación a F[14]. Por lo tanto, se considera ahora un campo cercano a la planta de celulosa. Es en estos casos que la forestación para pulpa se convierte en una inversión altamente rentable. El caso base quedaría ahora de la siguiente manera:

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Plazo de inversión	15
Ubicación	F[14]
Hectáreas	400
Presupuesto	4.000.000

Tabla 16: Caso base para el parámetro *tipo de suelo* disminuyendo el plazo de inversión y variando la ubicación

Como se puede observar en la Figura 6, se evidencia nuevamente que la ganancia es mayor en suelos forestables. Sin embargo, es importante mencionar que la diferencia es mucho menos significativa que en el caso de inversiones a largo plazo.

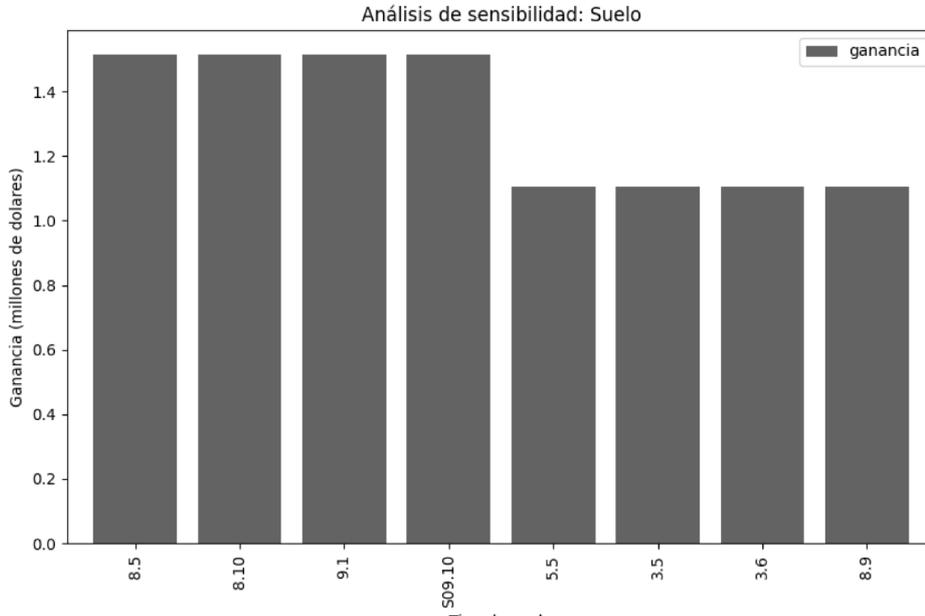


Figura 6: Ganancia en función del tipo de suelo para el caso base de la Tabla 16

Se pueden ver los resultados presentados en la Tabla 47, en los que se comprueba que para suelos forestables, la estrategia elegida fue la de forestación para pulpa.

En conclusión, se puede afirmar que el tipo de suelo está estrechamente relacionado con la ganancia obtenida, pero solamente en ciertos contextos. Como se ha observado en este análisis, estos contextos incluyen inversiones a largo plazo o inversiones a mediano plazo con una ubicación cercana a la planta. En cualquier otro contexto de inversión, el tipo de suelo no resulta ser un factor determinante en la ganancia.

6.5.3. Índice de CONEAT

En esta subsección, analizaremos el impacto del índice de CONEAT en la ganancia de las inversiones. El índice de CONEAT es una medida que refleja la productividad y potencial agropecuario de un terreno en Uruguay. Este índice es crucial para evaluar la viabilidad de diferentes estrategias de inversión en el sector, ya que brinda información sobre la fertilidad, características del suelo y rendimiento esperado.

Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad respecto a este parámetro, se considerará un caso base que represente condiciones típicas de inversión en el sector agropecuario. Este parámetro se variará dentro de un rango realista y se estudiará cómo afecta a la ganancia y a las decisiones de inversión en las distintas estrategias. De esta manera, se podrá identificar la relación entre el índice de CONEAT y la rentabilidad de la inversión, y determinar su relevancia en el proceso de toma de decisiones en el ámbito agropecuario.

Para realizar este análisis, hemos utilizado un caso base cuyos valores se detallan en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Tipo de suelo	8.5
Plazo de inversión	8
Ubicación	C[14]
Hectáreas	400
Presupuesto	2000000

Tabla 17: Caso base para el parámetro *índice de CONEAT*

Se considera que este caso representa adecuadamente una situación en la cual se observan resultados interesantes al variar este parámetro. El mismo presenta una inversión a corto plazo y un presupuesto elevado en relación a la cantidad de hectáreas consideradas. Cabe mencionar que, a pesar de tratarse de un escenario con un tipo de suelo forestable, se espera que las inversiones forestales no estén presentes en los resultados debido al corto plazo establecido.

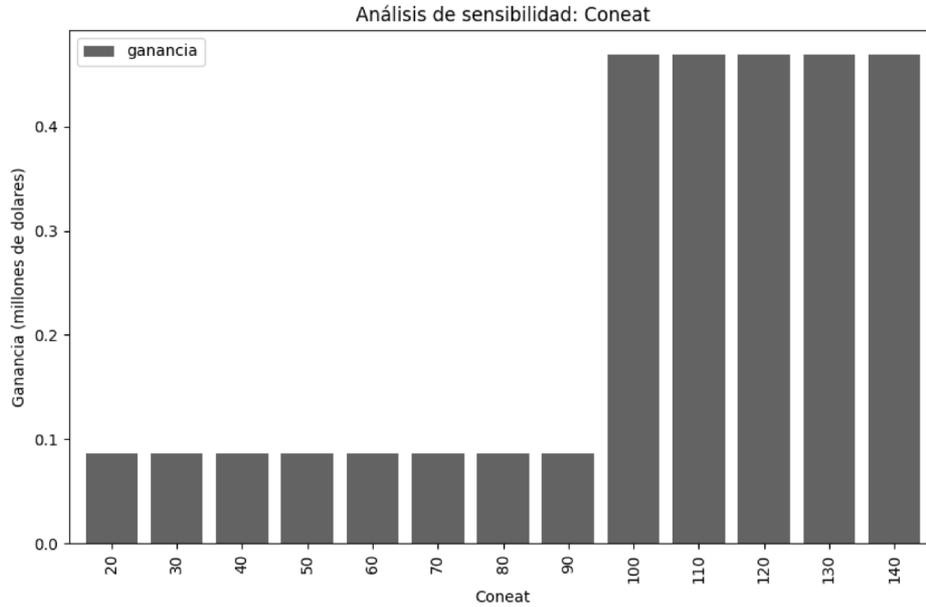


Figura 7: Ganancia en función del índice de productividad CONEAT para el caso base de la Tabla 17

Tal como se ha enfatizado anteriormente, el índice de CONEAT define qué escenarios son aptos para considerar ganadería de engorde como una posible inversión. Esta decisión esta basada en un umbral, fijado en el valor 93. Valores mayores a este indicarán escenarios en los cuales será posible realizar ambos tipos de ganadería.

Como se puede observar en la Figura 7, existe una gran diferencia en la ganancia a partir del umbral mencionado anteriormente. Esto se debe a que la ganadería de engorde empieza a ser aplicable, y el modelo opta por esta estrategia. Lo mencionado puede ser verificado en la Tabla 48, presentada en el Apéndice.

Sería interesante analizar un escenario en el que más estrategias puedan ser consideradas. Para ello, se examinan los resultados para un caso base en una ubicación cercana a la planta, y aumentando el plazo, con el objetivo de favorecer la inclusión de la forestación para pulpa.

Parámetro	Valor
Tipo de suelo	8.5
Plazo de inversión	12
Ubicación	F[14]
Hectáreas	400
Presupuesto	2000000

Tabla 18: Caso base para el parámetro *Índice de CONEAT*

Se presenta entonces en la Tabla 18 el segundo caso base considerado en este análisis. A continuación se presenta la gráfica con los resultados obtenidos en este caso base:

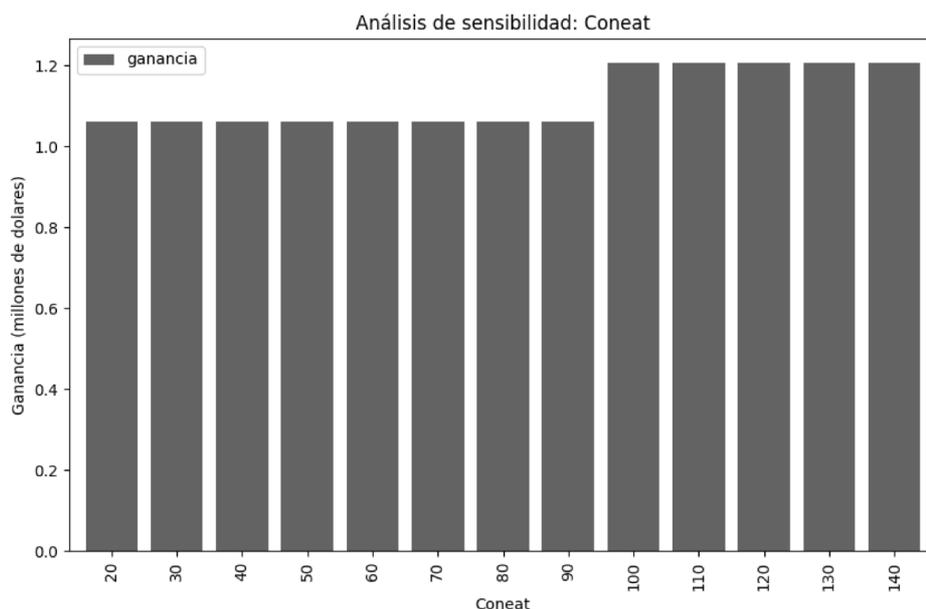


Figura 8: Ganancia en función del índice de productividad CONEAT para el caso base de la Tabla 18

Como se puede observar en la Figura 8, el índice de productividad CONEAT pierde influencia en las ganancias de la inversión. Se observa como la diferencia en ganancias es menor a medida que varia este índice. Esto se puede explicar ya que

en escenarios con un bajo índice, la forestación para pulpa es una inversión con una ganancia comparable a la de la ganadería de engorde.

Esto se puede observar en los resultados presentados en la Tabla 49, adjunta en el Apéndice, en los que el modelo opta por incluir inversiones forestales a modo de maximizar la ganancia.

En conclusión, el índice de productividad CONEAT es un factor determinante en la ganancia de la inversión pero su grado de importancia depende del contexto. Como se ha observado en este análisis, en escenarios favorables a inversiones forestales, un índice de productividad alto no resulta tan determinante.

6.5.4. Plazo de inversión

En esta subsección, se llevará a cabo el análisis del parámetro plazo de inversión, el cual es fundamental al momento de evaluar las diferentes estrategias de inversión. El plazo de inversión se refiere al período de tiempo durante el cual se espera que la inversión termine de dar retornos. Dependiendo de la duración del mismo, distintas estrategias pueden ser más o menos viables, y su rentabilidad puede variar significativamente.

El objetivo de este análisis es estudiar cómo la variación en el plazo de inversión puede afectar la ganancia de las diferentes estrategias consideradas en el modelo, y cómo estas variaciones pueden influir en la toma de decisiones. Para llevar a cabo este análisis, se evaluarán diferentes casos base modificando el plazo de inversión y observando cómo se comportan las ganancias y las estrategias seleccionadas por el modelo en cada situación.

Para realizar este análisis, se ha utilizado un caso base cuyos valores se detallan en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Tipo de suelo	8.5
Ubicación	C[14]
Hectáreas	400
Presupuesto	10.000.000

Tabla 19: Caso base para el parámetro *plazo de inversión*

Este escenario considera un índice de CONEAT lo suficientemente alto como para incluir la ganadería de engorde entre las estrategias posibles y además, se utiliza con un tipo de suelo de prioridad forestal, por lo tanto, todas las estrategias serán consideradas por el modelo. Se dispone de un presupuesto considerablemente alto. Esta elección se realizó para no restringir al modelo en la selección de estrategias y así poder observar realmente la elección óptima, sujeta a restricciones menos exigentes.

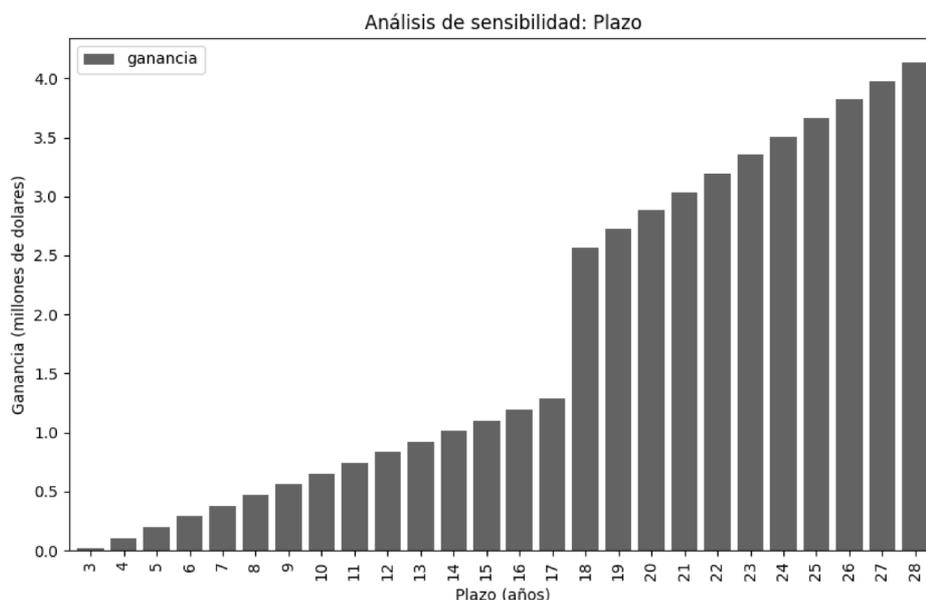


Figura 9: Ganancia en función del plazo para el caso base de la Tabla 19

Se puede observar cómo la ganancia aumenta a medida que se incrementa el plazo. Esto tiene sentido, ya que la ganadería genera retornos anuales y en el caso de la forestación los retornos de la cosecha son mayores a medida que aumenta el plazo. Se puede ver un salto en la ganancia en el año 18, esto se debe a que a partir de ese año, es posible obtener retornos de forestación para aserradero, así como de silvopastoreo. Los retornos de la forestación para aserradero son significativamente mayores a los del resto de las estrategias, por lo que una vez que es posible utilizar esta estrategia, las ganancias se disparan.

Esto se puede ver reflejado en los resultados para el caso base, presentes en

la Tabla 50 adjunta en el Apéndice. En esta se aprecia que hasta el año 17, se realiza ganadería de engorde. Esto tiene sentido ya que, sin ser por forestación de aserradero, esta es la segunda estrategia con mayor retorno. Se observa que a partir del año 18 se realiza forestación para aserradero en todas las hectáreas, eligiendo la estrategia óptima sin limitarse por el presupuesto.

La influencia del presupuesto se puede ver observando la Tabla 51, adjunta en el Apéndice, en la que se muestran los resultados de otra ejecución utilizando un menor presupuesto (2.000.000 millones de dólares). Se puede apreciar cómo el presupuesto limita las elecciones del modelo, y este debe compensar los gastos optando por ganadería de engorde en algunas hectáreas.

Debe destacarse que, dado que la ubicación utilizada es lejana a planta, la forestación para pulpa no es una opción rentable. En caso de considerar una ubicación cercana a planta, como podría ser la A[14], la forestación para pulpa podría tomar protagonismo en las inversiones a mediano plazo. Se modifica el caso base de la siguiente manera para el análisis de lo mencionado:

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Tipo de suelo	8.5
Ubicación	A[14]
Hectáreas	400
Presupuesto	1.000.0000

Tabla 20: Caso base para el parámetro *plazo de inversión* cambiando su ubicación

En la Figura 10, se pueden ver los resultados, donde se aprecia cómo la ubicación afecta la ganancia en este caso, generando un salto extra en la ganancia para plazos medios. Como se puede ver en los resultados para este caso base, presentes en la Tabla 52, adjunta en el Apéndice, el modelo opta en cada plazo por la estrategia más rentable, sea ganadería de engorde (hasta el año 9), forestación para pulpa (entre los años 10 y 17) o de aserradero (desde el año 18 en adelante). Nuevamente, el modelo elige únicamente la estrategia más rentable debido al alto presupuesto utilizado.

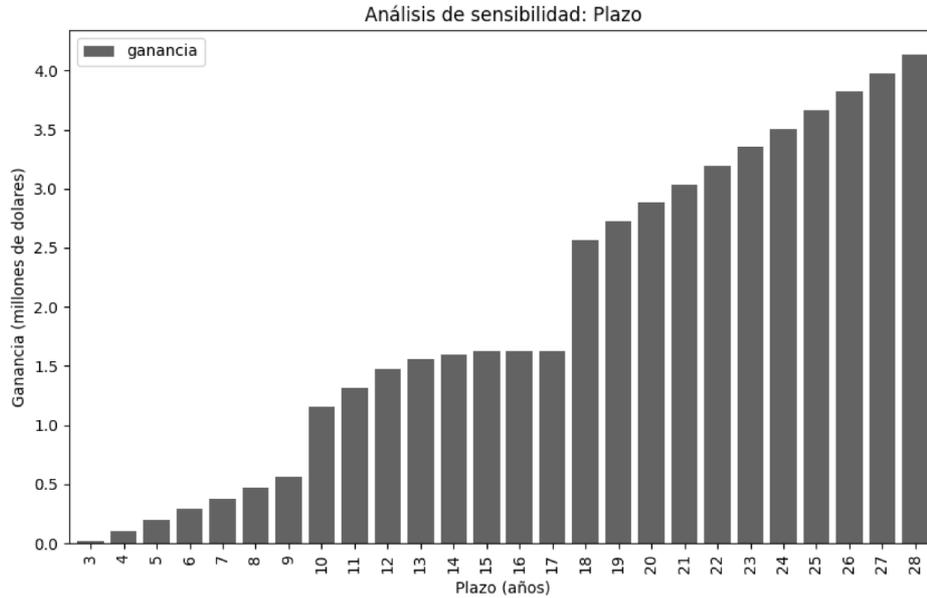


Figura 10: Ganancia en función del plazo para el caso base de la Tabla 20

En conclusión, se puede observar un aumento en la ganancia a medida que aumenta el plazo, como es esperable en una inversión. También es interesante destacar que pueden haber grandes saltos en la ganancia en determinados plazos. Estos generalmente son determinados por un cambio en las estrategias viables para una inversión, por lo que resulta interesante considerar casos cercanos a estos límites y analizar si no sería conveniente extender el plazo para obtener un incremento adicional de ganancia.

6.5.5. Presupuesto

En este análisis, nos enfocaremos en estudiar el impacto del parámetro presupuesto en el modelo de inversión. Por presupuesto se entiende a la cantidad de dinero dedicada a la inversión, previo a que la inversión comience a ser rentable. El objetivo es comprender cómo las variaciones en el presupuesto afectan las decisiones de inversión y, en última instancia, las ganancias obtenidas.

Para realizar el análisis de sensibilidad de este parámetro, se utiliza el caso base descrito en la Tabla 21.

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Tipo de suelo	8.5
Plazo de inversión	25
Ubicación	D[14]
Hectáreas	400

Tabla 21: Caso base para el parámetro *presupuesto*

Se toma en cuenta una inversión a largo plazo (25 años), suelo forestable y un buen índice de CONEAT (mayor a 93). De este modo, se presenta un caso en el que todas las estrategias de inversión consideradas son viables. En cuanto a la ubicación, se encuentra cerca de una planta de celulosa, lo que favorece la forestación para pulpa al minimizar sus costos.

A continuación se presenta la Figura 11 con los resultados obtenidos en ganancia en la ejecución de este caso.

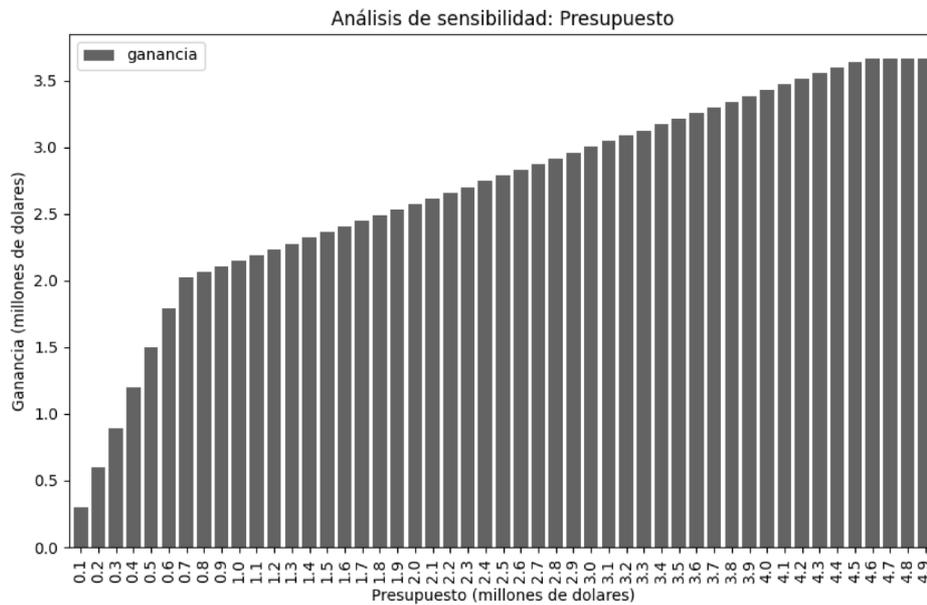


Figura 11: Ganancia en función del presupuesto para el caso base de la Tabla 21

Como era de esperarse, la ganancia depende directamente del presupuesto utili-

zado para la inversión. Algo interesante a notar es que se diferencian dos pendientes en la gráfica, el punto de quiebre se da cuando el presupuesto toma el valor de 700.000 dólares. Como se puede observar en los resultados presentados en la Tabla 53 y la Tabla 54, presentadas en el Apéndice, es en ese punto que se logra utilizar la totalidad de las hectáreas en la inversión, dado que antes el presupuesto no era suficiente.

También, en este punto de quiebre el presupuesto comienza a ser suficiente para dedicar hectáreas a la forestación de aserradero; hasta entonces, solo se estaba considerando la ganadería de engorde como opción. Esto es debido a que la forestación para aserradero es de las estrategias más costosas de realizar, pero que más rédito da.

Por último, es importante destacar que se llega a un estancamiento al tener un presupuesto muy elevado, ya que se pueden dedicar todas las hectáreas a la estrategia de inversión que da más retorno (forestación para aserradero), y no existe oportunidad de mejora.

Puede resultar interesante evaluar este mismo caso base pero en una inversión a mediano plazo. Se realiza entonces el mismo análisis pero variando el plazo a 15 años, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 55, adjuntas en el Apéndice.

No se presentan los resultados en forma de gráfica debido a que no difieren en gran manera de los obtenidos en el primer caso.

Como ocurrió en el primer caso, se obtienen grandes saltos en ganancia para presupuestos bajos, pero una vez que se alcanza el presupuesto para incluir la totalidad de las hectáreas consideradas en la inversión, se detiene el crecimiento.

En conclusión, el presupuesto está directamente ligado con la ganancia de la inversión. Se puede ver como al aumentar el presupuesto, la ganancia es mayor, siempre y cuando no se haya llegado a un estancamiento por completar todas las hectáreas con la estrategia más rentable. Cabe destacar que pueden haber distintos niveles de rentabilidad según el presupuesto considerado.

6.5.6. Ubicación

Este análisis se centra en el estudio del parámetro ubicación. La ubicación del campo es un factor determinante debido a su impacto en los costos de transporte,

especialmente en la producción de pulpa de celulosa. El factor que impacta en los costos es la distancia del campo hacia la planta de celulosa más cercana.

Para realizar el análisis de sensibilidad del parámetro mencionado, se utiliza el caso base descrito en la Tabla 22.

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	61
Tipo de suelo	9.1
Plazo de inversión	12
Presupuesto	1.000.000
Hectáreas	400

Tabla 22: Caso base para el parámetro *ubicación*

Este caso base plantea una situación ideal para la realización de forestación para pulpa. Para esto, se considera una inversión a mediano plazo (12 años), un índice de productividad CONEAT bajo (61), un suelo forestable y un buen presupuesto.

Se lleva a cabo la ejecución del modelo para cada valor a considerar del parámetro ubicación, mientras que el resto de los parámetros se mantienen constantes.

Posteriormente, se registran los resultados de cada ejecución, que comprenden la ganancia obtenida y los valores específicos de los parámetros utilizados, para obtener la siguiente figura:

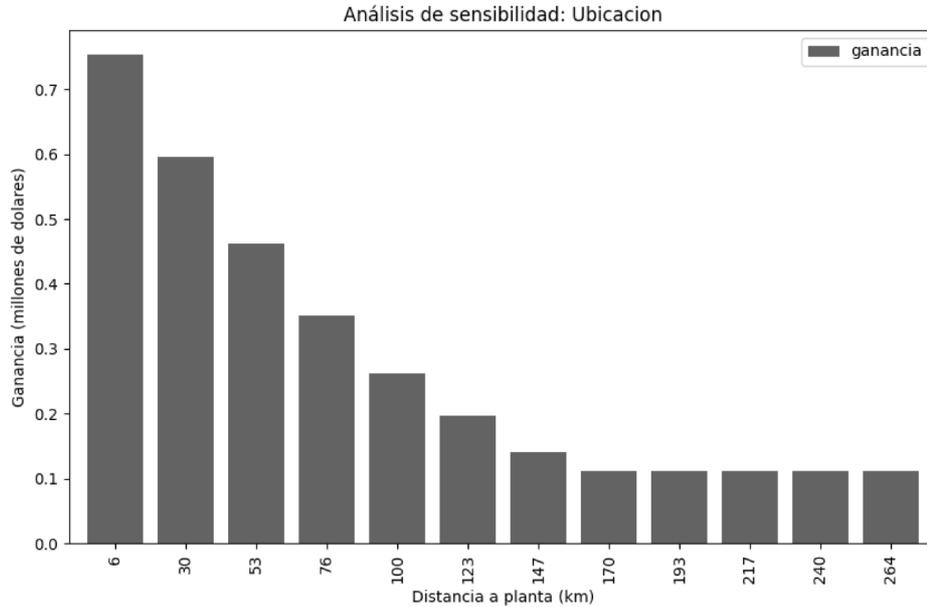


Figura 12: Ganancia en función de ubicación para el caso base de la Tabla 22

Como se puede observar en la Figura 12, la ubicación influye en gran medida en la ganancia obtenida por la inversión. Esta distancia a planta es determinante en la rentabilidad de la inversión.

En la Tabla 56 se pueden observar las estrategias elegidas por el modelo en cada caso. Se puede notar cómo a medida que la distancia aumenta, la forestación para pulpa deja de ser rentable y progresivamente el modelo se inclina hacia la ganadería de cría como elección.

También, resulta interesante analizar como se comporta el modelo ante la variación de la ubicación en un escenario donde participen todas las estrategias de inversión, no solo ganadería para cría y forestación para pulpa. Para esto se plantea el siguiente caso base:

Parámetro	Valor
Índice de CONEAT	105
Tipo de suelo	9.1
Plazo de inversión	20
Presupuesto	1.000.000
Hectáreas	400

Tabla 23: Segundo caso base para el parámetro *ubicación*

En este nuevo caso base, se cuenta con un índice de CONEAT elevado (105), lo que hace que ambas estrategias de ganadería sean consideradas. Además, se extiende el plazo de inversión para que la estrategia de forestación para aserradero pueda comenzar a ser rentable. Por lo tanto, todas las estrategias serán consideradas.

A continuación se presenta la Figura 13 con los resultados obtenidos en ganancia en función de la ubicación, para este caso:

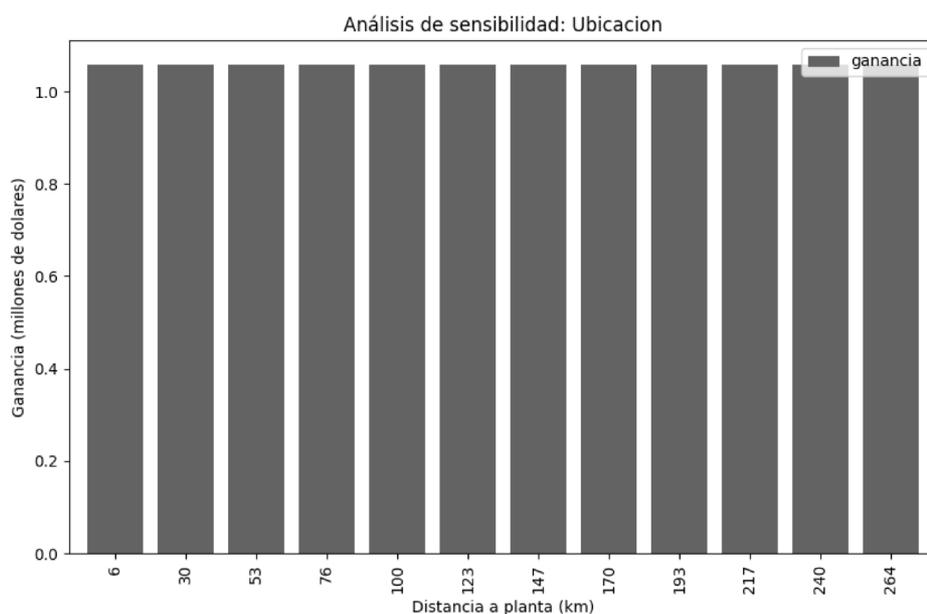


Figura 13: Ganancia en función de ubicación para el caso base de la Tabla 23

Se puede observar como la ubicación deja de ser un factor determinante para la ganancia, dado que a medida que varía la misma, la ganancia se mantiene. Esto

puede explicarse dado que las estrategias elegidas por el modelo son la ganadería de engorde y forestación de aserradero, pueden corroborarse estos resultados en la Tabla 57 adjunta en el Apéndice. Ambas estrategias no se ven afectadas por la ubicación del campo, por lo tanto, la ganancia se mantiene fija.

En conclusión, la ubicación es determinante en la ganancia obtenida al realizar forestación para pulpa. Sin embargo, para otros escenarios en los que la estrategia más rentable es otra, puede no tener ningún impacto visible en la ganancia.

7. Conclusiones

En este capítulo, se realizará una evaluación de los resultados alcanzados y aspectos relevantes a destacar del trabajo realizado. Además, se analizarán los objetivos planteados inicialmente y lo que se logró concretar. Luego, se propondrán posibles mejoras del trabajo, las cuales no se pudieron abordar debido a diversas limitaciones, principalmente de tiempo.

7.1. Trabajo realizado

La finalidad del trabajo ha sido proporcionar una primera herramienta para inversores agropecuarios basada en un modelo de programación lineal entera, que determine la combinación óptima de estrategias a realizar con el fin de maximizar el retorno. Los usuarios podrían ser inversores con diversos grados de conocimiento del sector (ya sea un experto que necesita una segunda opinión o alguien nuevo en el rubro que necesita una dirección inicial).

Luego de un análisis de resultados exhaustivo basado en diversos casos de prueba razonables, presentado en profundidad en el Capítulo 5, se puede afirmar que el modelo ofrece salidas coherentes con lo estudiado y concuerda con lo expresado por expertos en el rubro. Este es un aspecto a destacar del modelo final estudiado, ya que una de las primeras intenciones era que el modelo fuera aplicable, o al menos brindara resultados con sentido.

Asimismo, uno de los aspectos más relevantes a tener en cuenta es la alta configurabilidad del modelo. Esto significa que si el modelo queda desactualizado con el correr del tiempo, ya sea por cambios significativos en los precios relacionados a las estrategias consideradas, nuevas plantas de celulosa que afecten los costos de transporte o cualquier otro tipo de variable que pueda existir, la idea base de la solución modelada como un problema de programación lineal entera seguirá siendo aplicable, ajustando algunas constantes externas en el código.

Otro tema importante a destacar es que este trabajo contribuye significativamente a la aplicación de modelos de investigación operativa en el ámbito agropecuario, al ser uno de los primeros estudios en abordar este enfoque. Hasta el día de elaboración del proyecto, dicha metodología no ha sido ampliamente explorada en este sector.

Sin embargo, el desarrollo de este trabajo de tesis no estuvo exempto de dificultades. Particularmente, el estudio previo y la recopilación de la información pertinente representaron un desafío considerable que afectó la planificación original. La escasez de documentación en el área y la falta de conocimiento sobre el tema implicó una complejidad inesperada que condujo a retrasos en el cronograma establecido. Por este motivo, se requirió de un gran esfuerzo por parte del equipo.

A su vez, la constante evolución del modelo, que requería continuas modificaciones y ajustes para reflejar de forma más confiable la realidad del sector, supuso también una demora adicional en el desarrollo del proyecto. No obstante, se cree firmemente que estos desafíos han enriquecido la formación y han reforzado la calidad y aplicabilidad del modelo en el ámbito de estudio.

Como resumen final, este trabajo de tesis representa una valiosa convergencia de disciplinas y técnicas. El modelo presentado, con su robustez y adaptabilidad, asienta las bases para investigaciones futuras y ofrece un novedoso enfoque para tomar decisiones de inversión en el sector.

7.2. Trabajo a futuro

En esta sección, se presentan algunas ideas futuras identificadas por el equipo que, debido a restricciones de tiempo, no se pudieron abordar. Estas ideas podrían enriquecer el trabajo realizado.

Una posible mejora consiste en actualizar la interfaz de interacción con el modelo, mejorando así la experiencia del usuario. Se podría desarrollar una página web con una entrada de datos más interactiva y resultados visuales atractivos. Dada la rapidez de ejecución del modelo, se podrían realizar varias ejecuciones variando algunos parámetros para encontrar mejores soluciones. Por ejemplo, mostrar salidas en una ventana de 2 años menores y mayores al plazo de inversión ingresado por el usuario, proporcionando más información para tomar decisiones. Si se crea una página web, se podrían generar gráficas y tablas de interés para el usuario.

En relación con el modelo, se podría añadir un bono por toneladas de carbono secuestrado en las estrategias con componente forestal, simulando así los bonos de carbono⁹. Además, se podría considerar la sustentabilidad a largo plazo de

⁹Los bonos de carbono son certificados que representan la reducción o eliminación de una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) u otros gases de efecto invernadero. Tienen un valor

la inversión, penalizando estrategias como la forestación pura, que tiene efectos negativos en el suelo. La erosión de nutrientes y el daño al suelo durante la cosecha son aspectos importantes a incluir en el modelo.

Con respecto a los datos del campo solicitados al usuario, se podría simplificar el proceso ingresando solo la ubicación del campo, ya sea mediante coordenadas o seleccionándolo en un mapa interactivo, y calcular automáticamente los demás valores.

También a modo de enriquecer el modelo y ofrecer más opciones al usuario, se podrían incorporar nuevas estrategias de inversión, como la agricultura o el arrendamiento del campo a cambio de un retorno fijo.

Dentro de los planes futuros, está la aspiración de realizar una publicación de los resultados preliminares obtenidos hasta ahora, en el marco del grupo de trabajo conformado. Se reconoce la importancia de compartir el progreso y los hallazgos iniciales con la comunidad académica y profesional, lo que podría generar retroalimentaciones valiosas y potenciales colaboraciones.

Además, se buscará establecer sinergias con otras partes interesadas en el tema. Se cree firmemente en el poder de la colaboración para profundizar la investigación y enriquecer el alcance de el modelo desarrollado. El equipo se presenta receptivo a críticas constructivas y nuevas ideas para mejorar aún más el trabajo realizado hasta la fecha. La interacción con otros expertos en el campo y partes interesadas relevantes será fundamental para llevar esta investigación al siguiente nivel.

monetario de comercialización.

8. Referencias bibliográficas

Referencias

- [1] Informe “SECTOR AGRÍCOLA EN URUGUAY”. Uruguay XXI. Julio 2022 En: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/informe-agricola/?download=es> (2022).
- [2] Resultados Cartografía Forestal 2021. En: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos/resultados-cartografia-forestal2021#:~:text=Resultados-,La%20cartograf%C3%ADa%20cuantific%C3%B3%20una%20superficie%20forestada%20de%201.048.228%20de,efectivas%20destinadas%20al%20uso%20forestal.> (2021)
- [3] Pérez Porto, J., Gardey, A. (29 de noviembre de 2017). Forestación - Qué es, definición y concepto. Definicion.de. En: <https://definicion.de/forestacion> (2017).
- [4] Javier Otegui. Director General de URUFOR/COFUSA.
- [5] José Dutra. Presidente de la sociedad uruguaya de Silvopastoreo (SUSILVO).
- [6] Suelos CONEAT de prioridad forestal a nivel nacional. En: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/suelos-prioridad-forestal> (2021)
- [7] Ing. Agr. Msc. Pablo CARRASCO. Director general de Conexión Ganadera. <https://conexionganadera.com/quienes-somos/> (2023)
- [8] Definición de ganadería. En: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ganader%C3%ADa> (2023)
- [9] Dirección General de Recursos Naturales. CONEAT, carta de suelos y cartografía de campo natural. En: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/coneat> y <http://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/> (2020)

- [10] “Acto de fundación de Sociedad Urugaya de Silvopastoreo SUSilvo”. En: <https://todoelcampo.com.uy/2021/11/exitoso-acto-de-fundacion-de-sociedad-uruguay-de-silvopastoreo/> (2021).
- [11] Charla “La ganadería en la forestación y el silvopastoreo: oportunidades y desafíos”. En: <https://www.planagropecuario.org.uy/web/337/plantv/charla-la-ganader%C3%ADa-en-la-forestaci%C3%B3n-y-el-silvopastoreo%3A-oportunidades-y-desaf%C3%ADos.html> (2019).
- [12] Chará J., Reyes E., Peri P., Otte J., Arce E., Schneider F. (2020). Sistemas silvopastoriles y su contribución al uso eficiente de los recursos y a los objetivos de desarrollo sostenible: Evidencia desde América Latina. CIPAV, FAO & Agri Benchmark, Editorial CIPAV, Cali, 60 pp. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0.
- [13] Zapata Cadavid A. & Silva Tapasco B.E. (2020). Sistemas silvopastoriles: aspectos teóricos y prácticos. CARDER, CIPAV. Editorial CIPAV. Segunda edición. Cali, Colombia. 242p.
- [14] Ibrahim, M., Villanueva, C., & Mora, J. (2007). Silvopastoral systems and climate change mitigation in Latin America. *Tropical Grasslands*, 41, 1-6. https://www.researchgate.net/publication/286770717_Silvopastoral_systems_and_climate_change_mitigation_in_Latin_America
- [15] “La conservación de la biodiversidad en sistemas silvopastoriles”. En: <https://agroforesteria.wordpress.com/2011/10/04/la-conservacion-de-la-biodiversidad-en-sistemas-silvopastoriles/> (2011).
- [16] “Exitoso acto de fundación de Sociedad Urugaya de Silvopastoreo”. En: <https://todoelcampo.com.uy/2021/11/exitoso-acto-de-fundacion-de-sociedad-uruguay-de-silvopastoreo/> (2021)
- [17] Carlos Testuri – Fernando Islas. Fundamentos de Programación Entera. Facultad de Ingeniería – Universidad de la República.

- [18] IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. En: <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio> (2023)
- [19] A Python interface to the CPLEX Callable Library. En: <https://pypi.org/project/cplex/> (2023)
- [20] Da Silva Santos, Sibleli, y Cleci Grzebieluckas. Silvopastoral system with eucalyptus and beef cattle: An economic feasibility analysis on a farm in Mato Grosso/Brazil. En: https://www.researchgate.net/publication/296835291_Silvopastoral_system_with_eucalyptus_and_beef_cattle_An_economic_feasibility_analysis_on_a_farm_in_Mato_GrossoBrazil (2014)
- [21] Lacorte, Santiago et al. 2016. "Silvopastoral Systems Developed in Misiones and Corrientes, Argentina" In *Silvopastoral Systems in Southern South America*, eds. Pablo Peri, Francis Dube, and Alexandre Varella. Río Gallegos, Argentina, 1039.
- [22] Ing. Agr. Msc. Andrea Bussoni. Resultados productivos y economico financieros en sistemas integrados de ganaderia y forestacion en Uruguay. En: <http://www.poloagroforestal.edu.uy/wp-content/uploads/2020/02/REVISTA.pdf> Pág: 26. (2020)
- [23] A. Simeone, V. Beretta, C.J. Caorsi Coeficientes técnicos para cuantificar el potencial de la integración forestación-ganadería ¿qué datos tenemos para presupuestar una ganadería entre los montes? En: <http://www.poloagroforestal.edu.uy/wp-content/uploads/2020/02/Revista-I-Integraci%C3%B3n-Ganader%C3%ADa-Forestaci%C3%B3n.pdf> Pág: 73. (2020)
- [24] María Otegui. Asesora en FrayLog, empresa uruguaya dedicada al transporte de carga.
- [25] Resumen público de monitoreo 2022 MADELUR S.A. Redactado por Ingeniero Agrónomo Bernardo Riet.
- [26] Presentación base Taller de Gestión Ganadero 2022 de los grupos de empresas CREA. Base de la información 2022-2023. 22 grupos CREA ganaderos.

- [27] Alberto Parodi. Coordinador de Agro-Forestación en Montes del Plata. 13 años de experiencia en el área comercial de Montes del Plata.
- [28] Danny de Armas. Dueño de Aserradero DESALEO SAS.
- [29] Contreras-Santos, J, L. Martinez-Atencia, J. Raghavan, B. Lopez-Rebolledo, L. Garrido-Pineda , J. (2021) Sistemas silvopastoriles: mitigación de gases de efecto invernadero, bosque seco tropical - Colombia.
- [30] Dra. Stella Huertas, presentación “Silvopastoreo y Bienestar Animal” en Jornada “El Silvopastoreo avanza en Uruguay”, organizada por Plan Agropecuario. En: https://www.youtube.com/watch?v=9H7LCNgQWXQ&ab_channel=PlanAgropecuario (2019).
- [31] Ing. Agr. Hernán J. Bueno. Visión productiva del silvopastoreo y el rol del pasto en jornada “El Silvopastoreo avanza en Uruguay”, organizada por Plan Agropecuario. En: https://www.youtube.com/watch?v=9H7LCNgQWXQ&ab_channel=PlanAgropecuario (2019).

Apéndices

A. Mapas

Esta sección del apéndice presenta un mapa que detalla la ubicación geográfica de los casos de prueba considerados y las plantas de celulosa existentes al día de la fecha en Uruguay. Es una visualización gráfica que ayuda a entender la distribución espacial de los casos de estudio.

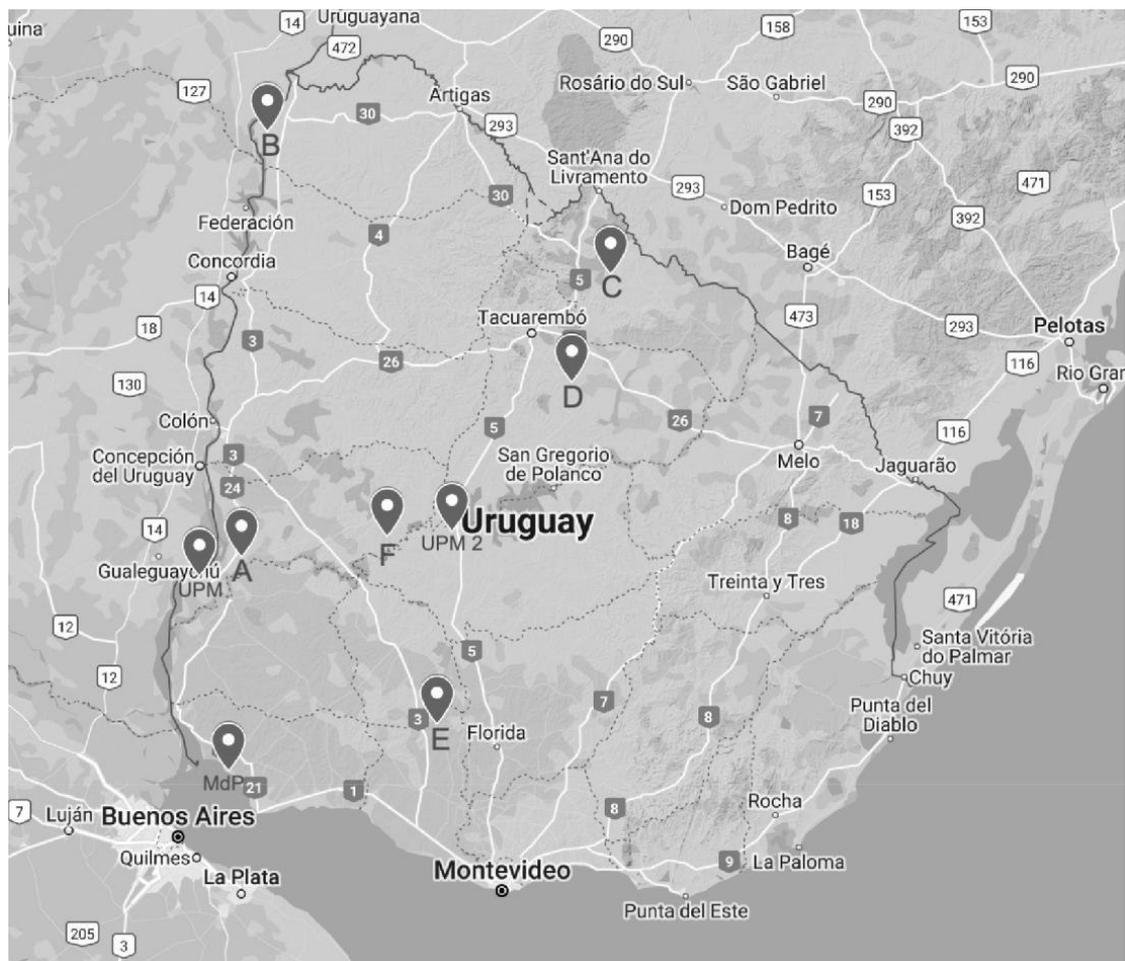


Figura 14: Mapa de las ubicaciones utilizadas y las plantas de celulosa consideradas

Ubicación	Clave
(-33.004951, -57.961957)	A
(-30.533289, -57.788904)	B
(-31.376464, -55.456992)	C
(-31.995577, -55.726038)	D
(-33.965580, -56.631833)	E
(-32.888815, -56.972987)	F

Tabla 24: Coordenadas de las ubicaciones presentadas en la Figura 14

B. Entrevista a José Dutra

José Dutra, fundador de la Sociedad Uruguaya de Silvopastoreo, ha sido una influencia clave en la realización de este proyecto. Esta sección contiene una transcripción de una entrevista realizada con José, proporcionando valiosos conocimientos y perspectivas que influyeron en la investigación y el análisis.

¿Hace cuántos años que viene el silvopastoreo en Uruguay y cómo ves su evolución?

En Uruguay no lo tengo tan claro, el silvopastoreo no debe tener más de 10-12 años desde la primera plantación. Comenzó en algún lugar de Florida, puntualmente en mi caso, fue hace 6 años y medio en 2015. El silvopastoreo aún es muy poco conocido aquí, pero en Argentina, Brasil y Paraguay, especialmente en Argentina en Corrientes, se utiliza mucho. Hay un referente llamado Jorge Esquivel, argentino, que integra la Sociedad de Silvopastoreo aquí en Uruguay. A pesar de ser poco conocido en Uruguay, lo veo con un potencial enorme. Está claro que no es para empresas forestales, ya que las mismas tienen que abastecer una industria y se desea obtener el máximo de ese producto. Pero por el lado ganadero, puede aportar sombra, abrigo y potenciar la ganadería y el confort de los animales, además de variar el producto. En mi caso, es *Eucalyptus grandis*, pero puede ser con cualquier producto forestal. Desde la fundación de SuSilvo se busca tener más repercusión y que los productores vean experiencias haciendo jornadas de campo, contactos y difundir el tema para que el Silvopastoreo sea una opción más. No es que sea mejor, aunque nosotros lo adoptamos por algún motivo, pero la idea es que sea una alternativa más.

¿Qué te parece que puede llegar a faltar para que el silvopastoreo se expanda masivamente en el país?

Sobre todo, es importante tener información clara acerca del silvopastoreo y darle una mirada diferente a la incorporación de árboles en la ganadería, en una densidad muy baja y con un ordenamiento adecuado, incluso siguiendo los puntos cardinales. También es necesario desarrollar los proyectos que ya están en curso.

¿Quizás los productores son muy tradicionales?

El productor ganadero suele desconocer el silvopastoreo. En mi experiencia, recibo muchas visitas y me dicen que su idea del silvopastoreo era otra y que nunca lo habían visto puesto en práctica.

¿Cómo ves a Uruguay respecto a la región en cuanto a silvopastoreo?

Desde los años 80, Argentina ha desarrollado el silvopastoreo, al igual que Brasil, donde también se investiga. Afortunadamente, aquí en Uruguay, desde hace 4-5 años, comenzaron las investigaciones, por ejemplo en el Polo Forestal de Melo. Se está investigando en las tres áreas clave: forestación, ganadería y pastura. En la pastura se estudia cómo crece entre los árboles, si tiene más proteínas o menos. En la ganadería se mide cómo se desarrolla el ganado bajo el efecto de la sombra, cómo responde a la pastura y, finalmente, en la forestación se observa el comportamiento del árbol, su diámetro y altura.

¿Ves posible que en Uruguay se haga un cambio, y que la principal practica sea el silvopastoreo?

Todo este crecimiento tiene que tener árboles, el árbol es el primer captador de dióxido de carbono. Llegar a ser la principal práctica no lo se, cada productor tiene que conocer y luego adoptarlo.

¿Qué características debe tener un terreno para ser apto para silvopastoreo?

El escenario en países más tropicales es diferente, ya que allí se comienza con el árbol ya nacido y se busca limpiar los terrenos para formar pasturas. En nuestro caso, la vaca ya está presente y se busca cómo incorporar los árboles para beneficiar a la ganadería sin dañar la pastura. También se debe considerar la aptitud del suelo para plantar árboles, la variedad de árboles a plantar puede variar según la

zona. Normalmente, un árbol necesita profundidad de suelo, y en zonas con suelo más rocoso, es más complejo, aunque es posible hacerlo y requiere un trabajo adicional.

¿Hay estudios o investigaciones que muestren una mayor rentabilidad en la práctica del silvopastoreo respecto a la ganadería, o forestación?

En cuanto a la ganadería, es fácil obtener datos acerca de la rentabilidad obtenida. Sin embargo, en el caso de la forestación, es un sector bastante cerrado y no se dispone de tanta información. Además, dado el poco tiempo del silvopastoreo en el país, no se ha llegado a las etapas finales, ya que estimamos cortar los árboles entre 13 y 15 años, y el silvopastoreo más antiguo aquí tiene solo 6 años y medio. Hay proyecciones, pero no hay datos reales. Esa es una debilidad, aunque estimamos que será muy rentable. Se espera obtener una madera de mayor calidad al final del proceso, dado que el árbol tiene más espacio y menos competencia que en una forestación tradicional, aunque aún no se sabe si terminará siendo más rentable. También se deben medir otros potenciales, como los términos ambientales y el estado del suelo.

¿Es aplicable a pequeña escala, es decir a pequeños productores a modo de expandirse? ¿O es una alternativa para productores de mayor tamaño?

Para ambos, los pequeños productores pueden adoptar el silvopastoreo de manera muy artesanal, por ejemplo, sin plantación, lo cual es muy económico. Jorge Esquivel dice que en el silvopastoreo, la ganadería es la caja chica y la caja de ahorro es la forestación. A los 14-15 años, se generaría casi lo mismo que el valor de la tierra y así se puede seguir creciendo. En esta zona forestal, no todos los campos quieren plantar o venderse para forestación debido a temas sociales, ya que no quieren salirse de la ganadería. El silvopastoreo es un híbrido que ofrece una buena opción para introducir árboles en estos pequeños productores.

¿En cuanto a la producción silvopastoril, hay distintas etapas o fases?

Sí, el proceso va desde la plantación hasta la cosecha. Primero se elige el sitio, se eliminan las hormigas y se prepara el suelo (lo menos agresivamente posible) para luego plantar. A continuación, se deben cuidar las plantas durante al menos el primer año y medio, y luego se realizan podas. Las podas evitan la formación

de nudos, que reducen la calidad de la madera. Después de los 6-7 años, lo que importa es el diámetro. Se espera que llegue a al menos 30 cm en la punta. Muchos de estos árboles se exportan a Vietnam.

¿Qué plazo de retorno de la inversión se maneja?

El turno final de la forestación es de 18 años, pero como se maneja la ganadería al mismo tiempo, se obtienen retornos de la ganadería a corto plazo. El hecho de tener árboles también permite un mejor desarrollo de la ganadería, ya que la sombra y las temperaturas hacen que el ambiente sea más agradable para el animal y, como resultado, se produce más. Mi idea, y sigo insistiendo en ello, es poder sacarle la estacionalidad a la forestación, hacer que sea algo líquido. La forestación genera dinero a los 14 años, pero ¿por qué no se nos permite vender el árbol en un punto intermedio? Cualquier producto tiene esta capacidad, excepto los árboles. Esto permitiría retornos a un plazo menor. Para esta venta intermedia, aparecería la figura del inversor, a partir de un contrato, dejando el beneficio de la sombra al productor para continuar con su ganadería, pero sin la responsabilidad de tener que atarse a los 18 años del árbol.

¿En tu caso particular, se sigue la distancia entre los arboles de forma estricta?

Acá tenemos 14 ordenamientos diferentes, de distancias y filas, en búsqueda del mejor. Hay varios modelos, el más clasico es de $5 \times 3 + 20$, esto resulta en 250 árboles por hectárea, en la forestación clásica se llega a 800 o incluso 1400.

¿Qué beneficios hay para el animal respecto a un sistema tradicional? El silvopastoreo ofrece confort y regulación de la temperatura a través de la sombra. Se están llevando a cabo ensayos y modelos sobre los beneficios del silvopastoreo en la gestación de la vaca, el aumento de peso y los primeros resultados son favorables al silvopastoreo. Se obtienen más kilos y, por lo tanto, hay un mayor retorno.

¿Existen casos en los que sea más conveniente aplicar sistemas tradicionales en vez del silvopastoril?

Las opciones siempre están, pero es importante ver lo que el productor quiere. Los suelos son finitos y cada vez son menos productivos debido al crecimiento de las ciudades. Por lo tanto, aquellos que poseemos tierra tenemos la responsabilidad de producir de manera responsable. Los bonos de carbono están empezando a tener

importancia, ya que el bienestar animal y el cuidado del medio ambiente están empezando a tener valor económico. Por lo tanto, los retornos están aumentando para los sistemas amigables con el medio ambiente.

C. Casos de prueba

Esta sección del apéndice incluye los distintos casos de prueba considerados para el análisis experimental del modelo. A su vez, se presenta en forma de tablas los resultados obtenidos en los mismos. Estas tablas de resultados indican cómo fueron distribuidas las hectáreas en las distintas estrategias de inversión.

C.1. Casos de prueba lejanos a planta de celulosa y con suelos de prioridad forestal

ID	CONCAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Ganancia
16	18	S09.10	8	B[14]	200	2.500.000	42.928
17	18	S09.10	8	B[14]	200	1.000.000	42.928
18	18	S09.10	8	B[14]	500	1.500.000	107.320
19	18	S09.10	8	B[14]	500	4.000.000	107.320
20	18	S09.10	12	B[14]	200	2.500.000	111.792
21	18	S09.10	12	B[14]	200	1.000.000	111.792
22	18	S09.10	12	B[14]	500	1.500.000	279.480
23	18	S09.10	12	B[14]	500	4.000.000	279.480
24	18	S09.10	18	B[14]	200	2.500.000	1.284.320
25	18	S09.10	18	B[14]	200	1.000.000	929.283
26	18	S09.10	18	B[14]	500	1.500.000	1.853.911
27	18	S09.10	18	B[14]	500	4.000.000	3.031.837
28	18	S09.10	28	B[14]	200	2.500.000	2.062.306
29	18	S09.10	28	B[14]	200	1.000.000	1.337.774
30	18	S09.10	28	B[14]	500	1.500.000	2.869.822
31	18	S09.10	28	B[14]	500	4.000.000	4.079.262
32	105	8.5	8	C[14]	200	2.500.000	234.616
33	105	8.5	8	C[14]	200	1.000.000	234.616
34	105	8.5	8	C[14]	500	1.500.000	586.540
35	105	8.5	8	C[14]	500	4.000.000	586.540
36	105	8.5	12	C[14]	200	2.500.000	416.024
37	105	8.5	12	C[14]	200	1.000.000	416.024
38	105	8.5	12	C[14]	500	1.500.000	1.040.060
39	105	8.5	12	C[14]	500	4.000.000	1.040.060
40	105	8.5	18	C[14]	200	2.500.000	1.284.320
41	105	8.5	18	C[14]	200	1.000.000	968.342
42	105	8.5	18	C[14]	500	1.500.000	1.997.565
43	105	8.5	18	C[14]	500	4.000.000	3.052.811
44	105	8.5	28	C[14]	200	2.500.000	2.062.890
45	105	8.5	28	C[14]	200	1.000.000	1.424.044
46	105	8.5	28	C[14]	500	1.500.000	3.136.528
47	105	8.5	28	C[14]	500	4.000.000	4.201.272

Tabla 25: Casos de prueba para campos ⁹⁶lejanos a planta de celulosa y con suelos de prioridad forestal

ID	Fores. pulpa	Fores. aserradero	Ganad. cría	Ganad. engorde	Silvopastoreo
16	0	0	200	0	0
17	0	0	200	0	0
18	0	0	500	0	0
19	0	0	500	0	0
20	0	0	200	0	0
21	0	0	200	0	0
22	0	0	500	0	0
23	0	0	500	0	0
24	0	200	0	0	0
25	0	93	0	0	107
26	0	92	0	0	407
27	0	447	0	0	52
28	0	199	0	0	1
29	0	61	0	0	138
30	0	59	0	0	441
31	0	291	0	0	209
32	0	0	0	200	0
33	0	0	0	200	0
34	0	0	0	500	0
35	0	0	0	500	0
36	0	0	0	200	0
37	0	0	0	200	0
38	0	0	0	500	0
39	0	0	0	500	0
40	0	200	0	0	0
41	0	94	0	106	0
42	0	93	0	407	0
43	0	447	0	53	0
44	0	199	0	1	0
45	0	61	0	139	0
46	0	61	0	439	0
47	0	291	0	209	0

Tabla 26: Distribución de hectáreas para campos lejanos a planta de celulosa y suelos de prioridad forestal

C.2. Casos de prueba con un largo plazo de inversión, presupuesto alto y suelos de prioridad forestal

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Ganancia
8	61	9.1	18	A[14]	200	2.500.000	1.284.320
12	61	9.1	28	A[14]	200	2.500.000	2.062.306
24	18	S09.10	18	B[14]	200	2.500.000	1.284.320
28	18	S09.10	28	B[14]	200	2.500.000	2.062.306
40	105	8.5	18	C[14]	200	2.500.000	1.284.320
44	105	8.5	28	C[14]	200	2.500.000	2.062.891
56	94	8.10	18	D[14]	200	2.500.000	1.284.320
60	94	8.10	28	D[14]	200	2.500.000	2.062.891

Tabla 27: Casos de prueba largo plazo de inversión, presupuesto alto y suelos de prioridad forestal

ID	Fores. pulpa	Fores. aserradero	Ganad. cría	Ganad. engorde	Silvopastoreo
8	0	200	0	0	0
12	0	199	0	0	1
24	0	200	0	0	0
28	0	199	0	0	1
40	0	200	0	0	0
44	0	199	0	1	0
56	0	200	0	0	0
60	0	199	0	1	0

Tabla 28: Distribución de hectáreas para largo plazo de inversión, presupuesto alto y prioridad forestal

C.3. Casos largo plazo de inversión, presupuesto bajo y suelos de prioridad forestal

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Ganancia
9	61	9.1	18	A[14]	200	1.000.000	929.283
10	61	9.1	18	A[14]	500	1.500.000	1.854.667
13	61	9.1	28	A[14]	200	1.000.000	1.337.775
14	61	9.1	28	A[14]	500	1.500.000	2.869.823
25	18	S09.10	18	B[14]	200	1.000.000	929.283
26	18	S09.10	18	B[14]	500	1.500.000	1.853.912
29	18	S09.10	28	B[14]	200	1.000.000	1.337.775
30	18	S09.10	28	B[14]	500	1.500.000	2.869.823
41	105	8.5	18	C[14]	200	1.000.000	968.342
42	105	8.5	18	C[14]	500	1.500.000	1.997.566
45	105	8.5	28	C[14]	200	1.000.000	1.424.045
46	105	8.5	28	C[14]	500	1.500.000	3.136.529
57	94	8.10	18	D[14]	200	1.000.000	968.342
58	94	8.10	18	D[14]	500	1.500.000	1.997.566
61	94	8.10	28	D[14]	200	1.000.000	1.424.045
62	94	8.10	28	D[14]	500	1.500.000	3.136.529

Tabla 29: Casos de prueba largo plazo de inversión, presupuesto bajo y suelos de prioridad forestal

ID	Fores. pulpa	Fores. aserradero	Ganad. cría	Ganad. engorde	Silvopastoreo
9	0	93	0	0	107
10	0	92	0	0	408
13	0	61	0	0	138
14	0	59	0	0	441
25	0	93	0	0	107
26	0	92	0	0	407
29	0	61	0	0	138
30	0	59	0	0	441
41	0	94	0	106	0
42	0	93	0	407	0
45	0	61	0	139	0
46	0	61	0	439	0
57	0	94	0	106	0
58	0	93	0	407	0
61	0	61	0	139	0
62	0	61	0	439	0

Tabla 30: Distribución de hectáreas para largo plazo de inversión, presupuesto bajo y prioridad forestal

C.4. Casos corto plazo de inversión y suelos de prioridad forestal

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Ganancia
0	61	9.1	8	A[14]	200	2.500.000	42.928
1	61	9.1	8	A[14]	200	1.000.000	42.928
2	61	9.1	8	A[14]	500	1.500.000	107.320
3	61	9.1	8	A[14]	500	4.000.000	107.320
16	18	S09.10	8	B[14]	200	2.500.000	42.928
17	18	S09.10	8	B[14]	200	1.000.000	42.928
18	18	S09.10	8	B[14]	500	1.500.000	107.320
19	18	S09.10	8	B[14]	500	4.000.000	107.320
32	105	8.5	8	C[14]	200	2.500.000	234.616
33	105	8.5	8	C[14]	200	1.000.000	234.616
34	105	8.5	8	C[14]	500	1.500.000	586.540
35	105	8.5	8	C[14]	500	4.000.000	586.540
48	94	8.10	8	D[14]	200	2.500.000	234.616
49	94	8.10	8	D[14]	200	1.000.000	234.616
50	94	8.10	8	D[14]	500	1.500.000	586.540
51	94	8.10	8	D[14]	500	4.000.000	586.540

Tabla 31: Casos de prueba corto plazo de inversión y suelos de prioridad forestal

ID	Fores. pulpa	Fores. aserradero	Ganad. cría	Ganad. engorde	Silvopastoreo
0	0	0	200	0	0
1	0	0	200	0	0
2	0	0	500	0	0
3	0	0	500	0	0
16	0	0	200	0	0
17	0	0	200	0	0
18	0	0	500	0	0
19	0	0	500	0	0
32	0	0	0	200	0
33	0	0	0	200	0
34	0	0	0	500	0
35	0	0	0	500	0
48	0	0	0	200	0
49	0	0	0	200	0
50	0	0	0	500	0
51	0	0	0	500	0

Tabla 32: Distribución de hectáreas para corto plazo de inversión y suelos de prioridad forestal

C.5. Casos plazo medio de inversión y suelos de prioridad forestal

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Ganancia
4	61	9.1	12	A[14]	200	2.500.000	739.843
5	61	9.1	12	A[14]	200	1.000.000	595.573
6	61	9.1	12	A[14]	500	1.500.000	893.002
7	61	9.1	12	A[14]	500	4.000.000	1.849.608
20	18	S09.10	12	B[14]	200	2.500.000	111.792
21	18	S09.10	12	B[14]	200	1.000.000	111.792
22	18	S09.10	12	B[14]	500	1.500.000	279.480
23	18	S09.10	12	B[14]	500	4.000.000	279.480
36	105	8.5	12	C[14]	200	2.500.000	416.024
37	105	8.5	12	C[14]	200	1.000.000	416.024
38	105	8.5	12	C[14]	500	1.500.000	1.040.060
39	105	8.5	12	C[14]	500	4.000.000	1.040.060
52	94	8.10	12	D[14]	200	2.500.000	416.024
53	94	8.10	12	D[14]	200	1.000.000	416.024
54	94	8.10	12	D[14]	500	1.500.000	1.040.060
55	94	8.10	12	D[14]	500	4.000.000	1.040.060

Tabla 33: Casos de prueba plazo medio de inversión y suelos de prioridad forestal

ID	Fores. pulpa	Fores. aserradero	Ganad. cría	Ganad. engorde	Silvopastoreo
4	200	0	0	0	0
5	161	0	0	0	0
6	241	0	2	0	0
7	500	0	0	0	0
20	0	0	200	0	0
21	0	0	200	0	0
22	0	0	500	0	0
23	0	0	500	0	0
36	0	0	0	200	0
37	0	0	0	200	0
38	0	0	0	500	0
39	0	0	0	500	0
52	0	0	0	200	0
53	0	0	0	200	0
54	0	0	0	500	0
55	0	0	0	500	0

Tabla 34: Distribución de hectáreas para plazo medio de inversión y suelos de prioridad forestal

C.6. Casos con suelos sin prioridad forestal e índice de CONEAT alto

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Ganancia
64	158	5.5	8	E[14]	200	2.500.000	234.616
65	158	5.5	8	E[14]	200	1.000.000	234.616
66	158	5.5	8	E[14]	500	1.500.000	586.540
67	158	5.5	8	E[14]	500	4.000.000	586.540
68	158	5.5	12	E[14]	200	2.500.000	416.024
69	158	5.5	12	E[14]	200	1.000.000	416.024
70	158	5.5	12	E[14]	500	1.500.000	1.040.060
71	158	5.5	12	E[14]	500	4.000.000	1.040.060
72	158	5.5	18	E[14]	200	2.500.000	688.136
73	158	5.5	18	E[14]	200	1.000.000	688.136
74	158	5.5	18	E[14]	500	1.500.000	1.720.340
75	158	5.5	18	E[14]	500	4.000.000	1.720.340
76	158	5.5	28	E[14]	200	2.500.000	1.141.656
77	158	5.5	28	E[14]	200	1.000.000	1.141.656
78	158	5.5	28	E[14]	500	1.500.000	2.854.140
79	158	5.5	28	E[14]	500	4.000.000	2.854.140

Tabla 35: Casos de prueba con suelos de prioridad forestal y índice de CONEAT alto

ID	Fores. pulpa	Fores. aserradero	Ganad. cría	Ganad. engorde	Silvopastoreo
64	0	0	0	200	0
65	0	0	0	200	0
66	0	0	0	500	0
67	0	0	0	500	0
68	0	0	0	200	0
69	0	0	0	200	0
70	0	0	0	500	0
71	0	0	0	500	0
72	0	0	0	200	0
73	0	0	0	200	0
74	0	0	0	500	0
75	0	0	0	500	0
76	0	0	0	200	0
77	0	0	0	200	0
78	0	0	0	500	0
79	0	0	0	500	0

Tabla 36: Distribución de hectáreas para casos con suelo de prioridad forestal y un índice de CONEAT alto

D. Casos de escenarios favorables para cada estrategia

En esta sección del apéndice se presentan los casos de prueba identificados como favorables para cada una de las estrategias de inversión.

D.1. Ganadería para cría

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Hect.Ganad.Cría
0	61	9.1	8	A[14]	200	2.500.000	200
1	61	9.1	8	A[14]	200	1.000.000	200
2	61	9.1	8	A[14]	500	1.500.000	500
3	61	9.1	8	A[14]	500	4.000.000	500
16	18	S09.10	8	B[14]	200	2.500.000	200
17	18	S09.10	8	B[14]	200	1.000.000	200
18	18	S09.10	8	B[14]	500	1.500.000	500
19	18	S09.10	8	B[14]	500	4.000.000	500
20	18	S09.10	12	B[14]	200	2.500.000	200
21	18	S09.10	12	B[14]	200	1.000.000	200
22	18	S09.10	12	B[14]	500	1.500.000	500
23	18	S09.10	12	B[14]	500	4.000.000	500
80	35	3.5	8	F[14]	200	2.500.000	200
81	35	3.5	8	F[14]	200	1.000.000	200
82	35	3.5	8	F[14]	500	1.500.000	500
83	35	3.5	8	F[14]	500	4.000.000	500
84	35	3.5	12	F[14]	200	2.500.000	200
85	35	3.5	12	F[14]	200	1.000.000	200
86	35	3.5	12	F[14]	500	1.500.000	500
87	35	3.5	12	F[14]	500	4.000.000	500
88	35	3.5	18	F[14]	200	2.500.000	200
89	35	3.5	18	F[14]	200	1.000.000	200
90	35	3.5	18	F[14]	500	1.500.000	500
91	35	3.5	18	F[14]	500	4.000.000	500
92	35	3.5	28	F[14]	200	2.500.000	200
93	35	3.5	28	F[14]	200	1.000.000	200
94	35	3.5	28	F[14]	500	1.500.000	500
95	35	3.5	28	F[14]	500	4.000.000	500

Tabla 37: Casos de favorables para ganadería cría

D.2. Ganadería para engorde

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Hect.Ganad.Eng
32	105	8.5	8	C[14]	200	2.500.000	200
33	105	8.5	8	C[14]	200	1.000.000	200
34	105	8.5	8	C[14]	500	1.500.000	500
35	105	8.5	8	C[14]	500	4.000.000	500
36	105	8.5	12	C[14]	200	2.500.000	200
37	105	8.5	12	C[14]	200	1.000.000	200
38	105	8.5	12	C[14]	500	1.500.000	500
39	105	8.5	12	C[14]	500	4.000.000	500
42	105	8.5	18	C[14]	500	1.500.000	407
46	105	8.5	28	C[14]	500	1.500.000	439
48	94	8.10	8	D[14]	200	2.500.000	200
49	94	8.10	8	D[14]	200	1.000.000	200
50	94	8.10	8	D[14]	500	1.500.000	500
51	94	8.10	8	D[14]	500	4.000.000	500
52	94	8.10	12	D[14]	200	2.500.000	200
53	94	8.10	12	D[14]	200	1.000.000	200
54	94	8.10	12	D[14]	500	1.500.000	500
55	94	8.10	12	D[14]	500	4.000.000	500
58	94	8.10	18	D[14]	500	1.500.000	407
62	94	8.10	28	D[14]	500	1.500.000	439
64	158	5.5	8	E[14]	200	2.500.000	200
65	158	5.5	8	E[14]	200	1.000.000	200
66	158	5.5	8	E[14]	500	1.500.000	500
67	158	5.5	8	E[14]	500	4.000.000	500
68	158	5.5	12	E[14]	200	2.500.000	200
69	158	5.5	12	E[14]	200	1.000.000	200

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Hect.Ganad.Eng
70	158	5.5	12	E[14]	500	1.500.000	500
71	158	5.5	12	E[14]	500	4.000.000	500
72	158	5.5	18	E[14]	200	2.500.000	200
73	158	5.5	18	E[14]	200	1.000.000	200
74	158	5.5	18	E[14]	500	1.500.000	500
75	158	5.5	18	E[14]	500	4.000.000	500
76	158	5.5	28	E[14]	200	2.500.000	200
77	158	5.5	28	E[14]	200	1.000.000	200
78	158	5.5	28	E[14]	500	1.500.000	500
79	158	5.5	28	E[14]	500	4.000.000	500

Tabla 38: Casos favorables para ganadería para engorde

D.3. Forestación para pulpa

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Hect.Forest.Pulpa
4	61	9.1	12	A[14]	200	2.500.000	200
5	61	9.1	12	A[14]	200	1.000.000	161
7	61	9.1	12	A[14]	500	4.000.000	500

Tabla 39: Casos favorables para forestación para pulpa

D.4. Forestación para aserradero

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Hect.Forest.Aserr
8	61	9.1	18	A[14]	200	2.500.000	200
11	61	9.1	18	A[14]	500	4.000.000	446
12	61	9.1	28	A[14]	200	2.500.000	199
24	18	S09.10	18	B[14]	200	2.500.000	200
27	18	S09.10	18	B[14]	500	4.000.000	447
28	18	S09.10	28	B[14]	200	2.500.000	199
40	105	8.5	18	C[14]	200	2.500.000	200
43	105	8.5	18	C[14]	500	4.000.000	447
44	105	8.5	28	C[14]	200	2.500.000	199
56	94	8.10	18	D[14]	200	2.500.000	200
59	94	8.10	18	D[14]	500	4.000.000	447
60	94	8.10	28	D[14]	200	2.500.000	199

Tabla 40: Casos favorables para forestación de aserradero

D.5. Silvopastoreo

ID	CONEAT	Suelo	Plazo	Ubicación	Hectáreas	Presupuesto	Hect.Silvo.
10	61	9.1	18	A[14]	500	1.500.000	408
14	61	9.1	28	A[14]	500	1.500.000	441
26	18	S09.10	18	B[14]	500	1.500.000	407
30	18	S09.10	28	B[14]	500	1.500.000	441

Tabla 41: Casos favorables para silvopastoreo

E. Análisis de sensibilidad

Esta sección del apéndice incluye tablas con los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de los parámetros. Principalmente, las tablas presentadas indican cómo fueron distribuidas las hectáreas en las distintas estrategias de inversión.

Latitud	Longitud
-32.858188	-56.461764
-32.858188	-56.211764
-32.858188	-55.961764
-32.858188	-55.711764
-32.858188	-55.461764
-32.858188	-55.211764
-32.858188	-54.961764
-32.858188	-54.711764
-32.858188	-54.461764
-32.858188	-54.211764
-32.858188	-53.961764
-32.858188	-53.711764

Tabla 42: Ubicaciones utilizadas para variar el parámetro ubicación en su respectivo análisis de sensibilidad

E.1. Hectáreas

Hectáreas totales	Hectáreas utilizadas	Porcentaje utilizado
20	20	100
60	60	100
100	100	100
140	140	100
180	180	100
220	220	100
260	260	100
300	300	100
340	340	100
380	380	100
420	420	100
460	460	100
500	500	100
540	540	100
580	580	100
620	596	96
660	596	90
700	596	85
740	596	80
780	596	76
820	596	72
860	596	69
900	596	66

Tabla 43: Hectáreas utilizadas para un bajo presupuesto en el análisis de sensibilidad de hectáreas

Hectáreas	Hectáreas ganadería de cría	Hectáreas ganadería de engorde
20	0	20
60	0	60
100	0	100
140	0	140
180	0	180
220	0	220
260	0	260
300	0	300
340	0	340
380	0	380
420	0	420
460	0	460
500	0	500
540	0	540
580	0	580
620	0	620
660	0	660
700	0	700
740	0	740
780	0	780
820	0	820
860	0	860
900	0	900

Tabla 44: Hectáreas dedicadas a ganadería en el análisis de sensibilidad de hectáreas para el caso base de la Tabla 12

E.2. Tipo de suelo

Tipo de Suelo	Hectáreas Forestacion Aserradero	Hectáreas Ganaderia Engorde
8.5	343	57
8.10	343	57
9.1	343	57
S09.10	343	57
5.5	0	400
3.5	0	400
3.6	0	400
8.9	0	400

Tabla 45: Hectáreas dedicadas a las estrategias en el análisis de sensibilidad de tipo de suelo para el caso base de la Tabla 14

Tipo de suelo	Hectáreas Forestación Aserradero	Hectáreas Ganadería Engorde
8	0	400
8.10	0	400
9.1	0	400
S09.10	0	400
5.5	0	400
3.5	0	400
3.6	0	400
8.9	0	400

Tabla 46: Hectáreas dedicadas a las estrategias en el análisis de sensibilidad de tipo de suelo para el caso base de la Tabla 15

Tipo de suelo	Hectáreas Forestación Pulpa	Hectáreas Ganadería Engorde
8.5	400	0
8.10	400	0
9.1	400	0
S09.10	400	0
5.5	0	400
3.5	0	400
3.6	0	400
8.9	0	400

Tabla 47: Hectáreas dedicadas a las estrategias en el análisis de sensibilidad para el parámetro tipo de suelo considerando el caso base de la Tabla 16

E.3. Índice de CONEAT

Índice de CONEAT	Hectáreas Ganadería Cría	Hectáreas Ganadería Engorde
20	400	0
30	400	0
40	400	0
50	400	0
60	400	0
70	400	0
80	400	0
90	400	0
100	0	400
110	0	400
120	0	400
130	0	400
140	0	400

Tabla 48: Hectáreas dedicadas a las estrategias en el análisis de sensibilidad del parámetro índice de CONEAT para el caso base de la Tabla 17

Índice de Coneat	Hectáreas Forestación Pulpa	Hectáreas Ganadería Engorde
20	309	0
30	309	0
40	309	0
50	309	0
60	309	0
70	309	0
80	309	0
90	309	0
100	277	123
110	277	123
120	277	123
130	277	123
140	277	123

Tabla 49: Hectáreas dedicadas a las estrategias en el análisis de sensibilidad del parámetro índice de CONEAT utilizando el caso base de la Tabla 18

E.4. Plazo de Inversión

Plazo	Hectáreas	Hectáreas Forestación Aserradero	Hectáreas Ganadería Engorde
3	400	0	400
4	400	0	400
5	400	0	400
6	400	0	400
7	400	0	400
8	400	0	400
9	400	0	400
10	400	0	400
11	400	0	400
12	400	0	400
13	400	0	400
14	400	0	400
15	400	0	400
16	400	0	400
17	400	0	400
18	400	400	0
19	400	400	0
20	400	400	0
21	400	400	0
22	400	400	0
23	400	400	0
24	400	400	0
25	400	400	0
26	400	400	0
27	400	400	0
28	400	400	0

Tabla 50: Hectáreas dedicadas por estrategia en el análisis de sensibilidad del parámetro plazo de inversión utilizando el caso base de la Tabla 19

Plazo	Hectáreas	Hectáreas Forestación Aserradero	Hectáreas Ganadería Engorde
3	400	0	400
4	400	0	400
5	400	0	400
6	400	0	400
7	400	0	400
8	400	0	400
9	400	0	400
10	400	0	400
11	400	0	400
12	400	0	400
13	400	0	400
14	400	0	400
15	400	0	400
16	400	0	400
17	400	0	400
18	400	188	212
19	400	178	222
20	400	169	231
21	400	162	238
22	400	155	245
23	400	148	252
24	400	142	258
25	400	136	264
26	400	131	269
27	400	127	273
28	400	122	278

Tabla 51: Hectáreas dedicadas por estrategia en el análisis de sensibilidad del parámetro plazo restringiendo el presupuesto

Plazo	Hectáreas	Forestación Pulpa	Forestación Aserradero	Ganadería Engorde
3	400	0	0	400
4	400	0	0	400
5	400	0	0	400
6	400	0	0	400
7	400	0	0	400
8	400	0	0	400
9	400	0	0	400
10	400	400	0	0
11	400	400	0	0
12	400	400	0	0
13	400	400	0	0
14	400	400	0	0
15	400	400	0	0
16	400	400	0	0
17	400	400	0	0
18	400	0	400	0
19	400	0	400	0
20	400	0	400	0
21	400	0	400	0
22	400	0	400	0
23	400	0	400	0
24	400	0	400	0
25	400	0	400	0
26	400	0	400	0
27	400	0	400	0
28	400	0	400	0

Tabla 52: Hectáreas análisis de sensibilidad para parámetro plazo de inversión, utilizando el caso base 20

E.5. Presupuesto

Presupuesto	Hectáreas Forestación Aserradero	Hectáreas Ganadería Engorde
100.000	0	59
200.000	0	119
300.000	0	178
400.000	0	238
500.000	0	298
600.000	0	357
700.000	3	397
800.000	13	387
900.000	23	377
1.000.000	33	367
1.100.000	44	356
1.200.000	54	346
1.300.000	64	336
1.400.000	75	325
1.500.000	85	315
1.600.000	95	305
1.700.000	106	294
1.800.000	116	284
1.900.000	126	274
2.000.000	136	264
2.100.000	147	253
2.200.000	157	243

Tabla 53: Hectáreas dedicadas a cada estrategia en análisis de sensibilidad para parámetro presupuesto utilizando el caso base 21

Presupuesto	Hectáreas Forestación Aserradero	Hectáreas Ganadería Engorde
2.300.000	167	233
2.400.000	178	222
2.500.000	188	212
2.600.000	198	202
2.700.000	209	191
2.800.000	219	181
2.900.000	229	171
3.000.000	240	160
3.100.000	250	150
3.200.000	260	140
3.300.000	270	130
3.400.000	281	119
3.500.000	291	109
3.600.000	301	99
3.700.000	312	88
3.800.000	322	78
3.900.000	332	68
4.000.000	343.0	57.0
4.100.000	353.0	47.0
4.200.000	363.0	37.0
4.300.000	373.0	27.0
4.400.000	384.0	16.0
4.500.000	394.0	6.0
4.600.000	400.0	0.0
4.700.000	400.0	0.0
4.800.000	400.0	0.0
4.900.000	400.0	0.0

Tabla 54: Hectáreas dedicadas a cada estrategia en análisis de sensibilidad para parámetro presupuesto utilizando el caso base 21

Presupuesto	Hectáreas Ganadería Engorde
100.000	59
200.000	119
300.000	178
400.000	238
500.000	298
600.000	357
700.000	400
800.000	400
900.000	400
1.000.000	400
1.100.000	400
1.200.000	400
1.300.000	400
1.400.000	400
1.500.000	400
1.600.000	400
1.700.000	400
1.800.000	400
1.900.000	400
2.000.000	400

Tabla 55: Hectáreas dedicadas a cada estrategia en análisis de sensibilidad para el parámetro presupuesto reduciendo el plazo de inversión, las demás estrategias no presentaban hectáreas dedicadas. Se trunca la tabla a partir de 2.000.000 debido a que no presentaba modificaciones luego.

E.6. Ubicación

Distancia en km	Hectáreas Forestación Pulpa	Hectáreas Ganadería Cría
6	177	0
30	161	0
53	147	3
76	136	1
100	104	95
123	95	103
147	87	113
170	0	200
193	0	200
217	0	200
240	0	200
264	0	200

Tabla 56: Hectáreas dedicadas a cada estrategia en el análisis de sensibilidad del parámetro ubicación, utilizando el caso base 22

Distancia en km	Hectáreas Forestación Aserradero	Hectáreas Ganadería Engorde
6	84	116
30	84	116
53	84	116
76	84	116
100	84	116
123	84	116
147	84	116
170	84	116
193	84	116
217	84	116
240	84	116
264	84	116

Tabla 57: Hectáreas dedicadas a cada estrategia en el análisis de sensibilidad del parámetro ubicación, utilizando el caso base 23

F. Código

En esta sección, se presentan dos fragmentos de código utilizados en el desarrollo del modelo propuesto en el proyecto. El primero muestra el planteamiento del problema de programación lineal entera, expresado en el lenguaje OPL (Optimization Programming Language). Es importante mencionar que, la versión presentada en OPL, no representa la versión final del modelo de optimización utilizado para obtener los resultados y análisis presentados. Este cambio se debe a que, posteriormente, se continuó con la implementación utilizando Python y una biblioteca para interactuar con CPLEX a través de su API.

En segundo lugar, se proporciona el código en Python asociado a la implementación del modelo presentado.

F.1. OPL

```
/******  
* OPL 22.1.0.0 Model  
* Author: Luneso S.A  
* Creation Date: 18 oct. 2022 at 18:50:48  
*****/  
  
// Parametros  
int CantidadHectareasTotales = ...;  
int PlazoInversion = ...;  
range AniosInversion = 1..PlazoInversion;  
int Presupuesto = ...;  
{string} EstrategiaInversion = {"Silvopastoreo", "Ganaderia",  
↪ "Forestacion"};  
int Retorno[EstrategiaInversion][AniosInversion] = ...;  
int Costos[EstrategiaInversion][AniosInversion] = ...;  
  
// Variables de decision.  
dvar int HectareasDedicadas[EstrategiaInversion] in  
↪ 0..CantidadHectareasTotales;
```

```

// Funcion Objetivo
maximize
  sum(estrategia in EstrategiaInversion)
    ↪ (HectareasDedicadas[estrategia] * sum(anio in AniosInversion)
    ↪ (Retorno[estrategia][anio] - Costos[estrategia][anio]));

// Restricciones
subject to {
  sum( estrategia in EstrategiaInversion )
    HectareasDedicadas[estrategia] <= CantidadHectareasTotales;

  sum( estrategia in EstrategiaInversion)
    (HectareasDedicadas[estrategia] * sum(anio in AniosInversion)
    ↪ Costos[estrategia][anio]) <= Presupuesto;
}

```

F.2. Python

```

import cplex
import time

def create_and_execute_model(cantidad_hectareas_totales,
  ↪ plazo_inversion, presupuesto, cotas, retornos, costos,
  ↪ estrategias_inversion = [
    'forestacion_aserradero',
    'forestacion_pulpa',
    'silvopastoreo_forestacion',
    'ganaderia_cria',
    'ganaderia_engorde'
  ], anios_deficit = [0, 0, 0, 0, 0]):

  start_time = time.time() # Record the start time
  print('cantidad hectareas totales', cantidad_hectareas_totales)
  print('plazo_inversion', plazo_inversion)

```

```

print('presupuesto', presupuesto)
print('cotas', cotas)
print('retornos', retornos)
print('costos', costos)
print('estrategias_inversion', estrategias_inversion)

cant_estrategias = len(estrategias_inversion)
if cotas is None:
    cotas = [[0 for _ in range(cant_estrategias)],
             ↪ [cantidad_hectareas_totales for _ in
             ↪ range(cant_estrategias)]]
# Create the modeler/solver.
cpx = cplex.Cplex()
cpx.objective.set_sense(cpx.objective.sense.maximize)

print("Tolerancia de optimalidad actual es:",
      ↪ cpx.parameters.mip.tolerances.mipgap.get())

for estrategia_index in range(cant_estrategias):
    ganancia_anio_hectarea = 0
    for anio in range(plazo_inversion):
        ganancia_anio_hectarea +=
            ↪ (retornos[estrategia_index][anio] -
            ↪ costos[estrategia_index][anio])
    cpx.variables.add(
        obj = [ganancia_anio_hectarea],
        lb = [cotas[0][estrategia_index]],
        ub = [cotas[1][estrategia_index]],
        types = ["I"]
    )

# Constraint: Each client i must be assigned to exactly one
↪ location:

```

```

# sum(j in nbLocations) supply[i][j] == 1 for each i in
↳ nbClients

constraint_names = ['C1', 'C2']
# C1 --> first constraint

indices_estrategias = [i for i in range(cant_estrategias)]

first_constraint = [indices_estrategias, [1 for _ in
↳ range(cant_estrategias)]]

costos_totales = []
for estrategia_index in range(cant_estrategias):
    costos_totales_estrategia = 0
    for anio in range(
↳ min(plazo_inversion, anios_deficit[estrategia_index]) ):
        costos_totales_estrategia +=
↳ costos[estrategia_index][anio]
    costos_totales.append(costos_totales_estrategia)

second_constraint = [indices_estrategias, costos_totales]

constraints = [first_constraint, second_constraint] # list of
↳ constraints

# list of corresponding RHS values
rhs = [cantidad_hectareas_totales, presupuesto]

constraint_senses = ["L", "L"] # list of constraint senses
↳ (types)
# We can also use the single string "LL"

# All arguments are created: Add the constraints
cpx.linear_constraints.add(

```

```

        lin_expr = constraints,
        senses = constraint_senses,
        rhs = rhs,
        names = constraint_names
    )

    # Solve and display solution
    cpx.solve()

    print("Solution status =", cpx.solution.get_status_string())
    print("Retornos totales de la inversion:",
        ↪ cpx.solution.get_objective_value())
    tol = cpx.parameters.mip.tolerances.integrality.get()
    values = cpx.solution.get_values()
    end_time = time.time() # Record the end time
    execution_time = end_time - start_time

    presupuesto_gastado = 0
    for value in range(len(values)):
        presupuesto_gastado += values[value] *
        ↪ costos_totales[value]

    print("Presupuesto gastado: ", presupuesto_gastado)

    for value in range(len(values)):
        print("Estrategia de inversion: ",
            ↪ estrategias_inversion[value], " Cantidad de hectareas:
            ↪ ", values[value])

    results = {
        'ganancia': cpx.solution.get_objective_value(),
        'presupuesto_gastado': presupuesto_gastado,
        'hectareas_dedicadas': values,
        'estrategias_posibles': estrategias_inversion,
    }

```

```
    'tiempo de ejecucion': execution_time,  
    'gap_relativo': cpx.solution.MIP.get_mip_relative_gap(),  
    'status': cpx.solution.get_status_string(),  
}  
  
print('results: ', results)  
  
return results
```