



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

Logística de la recolección y tratamiento de residuos de cosecha forestal

Lucía Larrosa Gaso
Virginia Amor Delfino

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad
de la República
en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título
de Ingeniero de Producción.

Tutor
Victor Viana

Tribunal
Lorena Silvera
Milton Vázquez
Victor Viana

Montevideo, Uruguay
Noviembre de 2023

Agradecimientos

Queremos agradecer a nuestro tutor Victor Viana por su gran profesionalismo y su innegable humanidad, con la cual nos supo acompañar, orientar y motivar durante todo el proceso. A nuestros amigos por alentarnos en los momentos difíciles y acompañarnos en los momentos buenos. Y por último a nuestras familias, por incentivarnos a cumplir nuestros objetivos, muchas veces comprendiendo y respetando nuestras ausencias.

Resumen

Uruguay es un país con un sector forestal en continuo y notorio crecimiento. La instalación de nuevas plantas de celulosa en los últimos diez años ha derivado en la necesidad de darle al sector la importancia que merece. Hoy en día los residuos generados en la cosecha no son un problema, ya que son utilizados como fuente de nutrientes para el suelo forestado. A pesar de ello, una perspectiva interesante es aprovechar parte de ese residuo forestal para generar valor agregado. Con el proceso de pirólisis rápida se halló una opción conveniente y sobre todo innovadora para el procesamiento de los residuos. Pero incluso, resultó aún más atractiva la posibilidad de generar el procesamiento en los mismos frentes de cosecha, atacando directamente el problema de los altos costos de traslado. De esta manera, este proyecto de grado, plantea un modelo matemático que establece la secuencia óptima de visita a los frentes de cosecha para procesar su correspondiente residuo *in situ*". A su vez, se evaluó la rentabilidad económica y financiera de su aplicación. En la actualidad resulta vital la concientización del aprovechamiento de los recursos que se tienen disponibles. Con este proyecto se busca aportar una tecnología nueva al espectro del procesamiento de residuos. Si bien se centra en residuos forestal, se pueden utilizar diversas clases de residuos como materia prima del proceso.

Palabras claves: Cosecha forestal, biomasa, pirólisis rápida móvil, programación matemática, TSP.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	9
2. CONTEXTO	13
2.1. Utilización de biomasa para la producción de energía	14
2.2. Biomasa	16
2.3. Plantaciones forestales en Uruguay	18
2.4. Residuos forestales	19
2.5. Sistemas de cosecha forestal	21
2.5.1. Métodos para el procesamiento de los residuos forestales	23
3. PIRÓLISIS	29
3.1. Etapas del proceso de pirólisis rápida	31

3.2. Productos de la pirólisis rápida	31
3.3. Pirólisis rápida móvil	33
3.4. Estudios asociados a la pirólisis	33
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	36
4.1. Optimización en la logística de recolección de biomasa	37
4.2. Aplicación del TSP a nuestro caso de estudio	41
4.3. Elección de la metodología de optimización	45
5. CASO DE ESTUDIO	46
5.1. Presentación del modelo matemático	47
5.1.1. Descripción del modelo	47
5.1.2. Conjuntos	47
5.1.3. Parámetros	47
5.1.4. Variables de decisión	48
5.1.5. Función objetivo	49
5.1.6. Restricciones	50
5.2. Aplicación del modelo matemático	52
5.2.1. Máquina de pirólisis móvil a utilizar	52
5.2.2. Localización de lugares de cosecha	53
5.2.3. Cálculo madera cosechada y residuo a procesar	56
5.2.4. Tiempo de cosecha	58

5.2.5. Plan de cosecha	60
5.2.6. Tiempo de pirólisis	60
5.2.7. Costos asociados	61
5.3. Análisis de resultados	62
5.4. Validación del modelo	66
5.5. Análisis de sensibilidad	70
5.6. Análisis de costos	77
6. CONCLUSIONES	86
A. Modelo matemático	96
B. Análisis de costos	101

Índice de figuras

2.1. Generación de energía por fuente en el período comprendido entre 2006-2021. Elaboración propia con información proporcionada por UTE [3]	15
2.2. Exportación e importación de energía por UTE en el período comprendido entre 2006-2021. Elaboración propia con información proporcionada por UTE [3]	16
2.3. División de materias orgánicas utilizadas como biomasa	17
2.4. Extracción de Madera en Rollo 2000-2020 en miles de m^3 . Elaboración propia con información proporcionada por las autoridades gubernamentales [10]	21
2.5. Residuos siendo chipeados y cargados para su transporte [16] .	25
2.6. Arreglo de paquetes para ser almacenados [15]	26
2.7. Maquinaria cargando residuos [15]	27

3.1. Diagrama de propia autoría de productos de la pirólisis rápida	32
3.2. Distribución de sitios truncada (a) y radial (b) para planta móvil y centralizada (c) para planta fija [24]	35
4.1. Estructura de la cadena de suministro de biomasa a biocombustible [30]	40
5.1. Máquina de pirólisis comercializada por Nettenenergy. [38]	53
5.2. Geoportal web de MGAP [40]	54
5.3. Localización de lugares de cosecha	55
5.4. Especificación de número de árboles por hectárea según fin comercial [41].	57
5.5. Traslado de máquina de pirólisis	63
5.6. Variación del número de variables, restricciones e iteraciones para un horizonte de estudio de 18 períodos, dos máquinas y un lugar de acopio	68
5.7. Variación de la función objetivo a lo largo de todas las instancias estudiadas.	69
5.8. Análisis de impacto por la variación en la cantidad de máquinas en un horizonte de 12 períodos con un único lugar de acopio	71
5.9. Análisis de impacto por la variación en la cantidad de períodos que componen el horizonte de estudio para un número fijo de lugares de cosecha y de máquinas.	74
5.10. Recorrido de una máquina por 8 lugares de cosecha en un horizonte de 18 períodos, priorizando la finalización temprana	77

Índice de tablas

2.1. Participación por fuente en la generación total de energía eléctrica[2]	14
2.2. Peso de las fracciones de Pinus y Eucalyptus para aserrío y pulpa. Elaboración propia con información proporcionada por las autoridades gubernamentales [10]	20
5.1. Coordenadas y hectáreas plantadas en cada lugar de cosecha .	55
5.2. Matriz de distancias en km de lugares de cosecha	56
5.3. Valores finales de madera cosechada y residuo procesable	58
5.4. Cantidad de producto terminado según lugar de cosecha, en kg	58
5.5. Meses que se necesitan para cosechar el lugar de cosecha	59
5.6. Plan de cosecha de elaboración propia	60

5.7. Meses que se necesitan para procesar el residuo del lugar de cosecha	61
5.8. Costos asociados	62
5.9. Resultado de variable x	63
5.10. Resultado de variables s y u	64
5.11. Períodos donde se realiza pirólisis en cada lugar de cosecha	65
5.12. Comparación de recorridos	65
5.13. Detalle de instancias de iteración	67
5.14. Conjuntos fijos en el caso de sensibilidad	70
5.15. Períodos donde se realiza pirólisis en cada lugar de cosecha por una máquina	72
5.16. Períodos donde se realiza pirólisis en cada lugar de cosecha por dos máquinas	72
5.17. Conjuntos fijos en el caso de sensibilidad	73
5.18. Períodos donde se realiza pirólisis por cada máquina en 14 períodos definidos como horizonte de estudio	75
5.19. Períodos donde se realiza pirólisis por cada máquina en 18 períodos definidos como horizonte de estudio	75
5.20. Períodos donde se realiza pirólisis por cada máquina en 24 períodos definidos como horizonte de estudio	76
5.21. Períodos donde se realiza pirólisis en cada lugar de cosecha	77
5.22. Costo de la compra de maquinaria	78
5.23. Costos del proyecto	79

5.24. Precios de venta de productos de pirólisis	79
5.25. Depreciación de la inversión	80
5.26. Flujo de fondos del proyecto	81
5.27. Resultados financieros del flujo de fondos	82
5.28. Escenario 1 - Afectación del VAN variando el precio de venta y la inversión inicial	83
5.29. Escenario 2 - Afectación del VAN variando el de precio de venta y los gastos operativos	84
5.30. Escenario 3 - Afectación del VAN variando la tasa de descuento y la inversión inicial	85
5.31. Escenario 4 - Afectación del VAN variando la cantidad de ma- teria prima y la inversión inicial	85
A.1. Parámetros utilizados en el modelo	99
A.2. Análisis de costos	100
B.1. Análisis de costos	102

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, la creciente preocupación por la preservación del medio ambiente y la búsqueda de alternativas sostenibles para la producción agrícola, ha impulsado la investigación y el desarrollo fuertemente en esa área. Dentro de este marco, la planificación en la gestión de las operaciones de producción desempeña un papel fundamental para abordar desafíos relacionados con la eficiencia, optimización y aprovechamiento de los recursos en distintos sectores de la industria.

La industria forestal como fuente importante de recursos naturales renovables, ha evolucionado hacia enfoques más responsables y sostenibles en la explotación de sus materias primas. En este contexto, el aprovechamiento de residuos de cosecha forestal, un subproducto valioso pero a menudo subutilizado, ha ganado interés como una posible fuente de materia prima para procesos de conversión termoquímica, como la pirólisis. La pirólisis es un proceso que involucra la descomposición térmica de materiales orgánicos

en ausencia de oxígeno, lo que puede dar lugar a la obtención de productos gaseosos, líquidos y sólidos, con aplicaciones en la producción de energía, productos químicos y materiales.

En esta tesis de grado en Ingeniería en Producción, se abordará la problemática de la recolección de residuos de cosecha forestal en diferentes frentes de cosecha y su potencial utilización como materia prima para la pirólisis. Se explorarán aspectos relacionados con la caracterización de los residuos de cosecha, los métodos de recolección y clasificación, así como los parámetros clave en el proceso de pirólisis para obtener productos de alto valor añadido. A través de un enfoque multidisciplinario que combina conocimientos de ingeniería forestal, tecnología de procesos y química, se pretende contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles que maximicen la utilización de los recursos forestales y reduzcan el impacto ambiental de la industria.

La tesis se originó a partir de la siguiente pregunta: ¿Es factible mejorar la recolección de biomasa resultante de la cosecha forestal y emplearla como un producto de valor añadido? Con el propósito de abordar esta cuestión, se establecieron múltiples objetivos y pasos que nos condujeron hacia su resolución. El punto de partida consistió en una exhaustiva revisión de la literatura con el objetivo de examinar las diversas metodologías, herramientas y procedimientos utilizados en distintos países para aprovechar los residuos forestales. Existe poca bibliografía académica que hable sobre pirólisis rápida móvil e incluso menos que la utilice para el procesamiento de biomasa forestal. Sin embargo, esta herramienta innovadora nos abrió la puerta a intentar resolver la problemática desde otro ángulo. A partir de este hallazgo se amplió la revisión bibliográfica para poder obtener una comprensión más profunda del proceso de pirólisis rápida y de la viabilidad de una planta móvil.

A lo largo de este estudio, se profundiza en el proceso de pirólisis, diferenciando la pirólisis rápida y explorando las posibilidades de aprovechamiento de la biomasa dentro de este contexto. Al definir la tecnología que se utilizará, otro objetivo crucial de esta investigación es la optimización de la ruta de la máquina de pirólisis a través de los distintos frentes de cosecha. Esto

se logrará mediante la formulación de un modelo matemático en el que puedan intervenir una función objetivo, parámetros y restricciones, las cuales se detallarán en los próximos capítulos. Otro objetivo del proyecto es el estudio de viabilidad económica de la implementación en Uruguay, para lo cual se implementó un análisis de flujo de fondos y una evaluación según el Valor Actual Neto.

El alcance de esta tesis es la realización de un modelo matemático que permita la optimización del recorrido de la máquina de pirólisis rápida, un estudio simplificado de viabilidad económica para su implementación y una revisión bibliográfica exhaustiva sobre las temáticas abordadas. Queda fuera del alcance la profundización en el proceso químico de pirólisis y los mecanismos de cosecha forestal.

La motivación principal para la realización de esta tesis es poder agregar valor a un bien que hoy no se aprovecha. Se halló en los residuos forestales una materia prima con varias posibilidades de aprovechamiento en un contexto donde solo es utilizada para brindar nutrientes al suelo luego de la cosecha. El enfoque fue direccionado hacia tecnologías poco desarrolladas localmente, lo que motivó a aportar una solución diferente que de impulso a nuevas aplicaciones en los diferentes sectores industriales.

Organización de la tesis

El presente trabajo se estructura en cuatro grandes capítulos. El capítulo uno, da una visión general del uso de biomasa en la actualidad del país para luego adentrarse a un enfoque más detallado de varios temas que giran al rededor de la misma. Se profundiza en temas como: las plantaciones forestales, los residuos que estas generan y los sistemas de cosecha forestal. En el segundo capítulo, se describen varios aspectos de la pirólisis, presentando las características de la pirólisis rápida y la pirólisis rápida móvil, así como también algunos trabajos publicados sobre el uso de ella. Luego, en el capítulo tres se plantea la revisión bibliográfica, la cual tuvo como núcleo la aplicación

del Problema del Vendedor Viajero (TSP por sus siglas en inglés travelling salesman problem) para modelar los problemas de ruteo. El capítulo cuatro presenta el caso de estudio del proyecto. Se divide en cuatro secciones. Por un lado, la presentación del modelo matemático donde se detallan los conjuntos, parámetros, variables y restricciones establecidos en el modelo, junto con la función objetivo a optimizar. Se plantea la aplicación del modelo matemático para un caso específico, detallando los valores utilizados, continuando con el análisis de resultados, el alcance del modelo y los análisis de sensibilidad. Como última sección del capítulo cuatro se propone un análisis económico y financiero del caso para estudiar la rentabilidad del proyecto. Culminada esta sección se presenta el último capítulo donde se aportan conclusiones y recomendaciones del proyecto.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO

Este capítulo se sumerge en el ámbito forestal, específicamente en lo que concierne a la biomasa de residuos forestales y su utilización. Se comienza ofreciendo una visión general de la situación energética de Uruguay, con un enfoque particular en la biomasa como fuente de energía renovable. Se presenta un análisis detallado de las diversas fuentes de energía utilizadas en el país, así como la evolución de su matriz energética en los últimos años. Se destaca el papel crucial que desempeñan las plantaciones forestales en el desarrollo de una economía forestal sostenible en Uruguay. Se profundiza en los variados sistemas de cosecha forestal y en los diversos métodos de recolección de residuos. En resumen, este capítulo abarca cuestiones relacionadas con la gestión de residuos forestales, los sistemas de cosecha forestal y los enfoques de procesamiento de residuos.

2.1. Utilización de biomasa para la producción de energía

Uruguay apuesta desde hace ya varios años a la aplicación de energías renovables. En un informe presentado por la agencia gubernamental responsable de la promoción de exportaciones, inversiones e imagen país en 2019 [1], entre el año 2010 y 2016 se invirtieron USD 7.800 millones en infraestructura energética, comprometiéndose así con el cuidado del medio ambiente y la producción sostenible. Las políticas energéticas y la utilización de un esquema de incentivos hacen que Uruguay sea un país atractivo para la inversión del sector privado. Respecto a las energías utilizadas en el país, se utilizan cinco métodos de generación, así como también la posibilidad de importar o exportar energía de Argentina o Brasil, si la demanda lo amerita.

Según los valores acumulados en el año 2019 por la Administración del Mercado Eléctrico (ADME) la energía generada por biomasa se encuentra en cuarto lugar, aportando un 7.3 % del total [2]. La tabla 2.1 muestra el desglose de la participación por fuente en la generación total de energía eléctrica:

Energía	Generación Neta (GWh)	Porcentaje de participación (%)
Hidráulica	5,159	36.9
Térmica	2,401	17.2
Eólica	4,965	35.5
Solar	435	3.1
Biomasa	1,018	7.3
Total Generación	13978	100.0
Importación	55	-
Exportación	2,844	-

Tabla 2.1: Participación por fuente en la generación total de energía eléctrica[2]

Al observar el comportamiento de la matriz energética de Uruguay a lo largo de los últimos 15 años, según los datos aportados por UTE [3] se puede detectar un claro decrecimiento de MWh generados por fuentes tér-

micas y un pronunciado crecimiento de la utilización de todas las fuentes renovables. Concretamente la generación de electricidad por biomasa ha ido incrementando en forma constante y paulatina, en oposición, por ejemplo, a la generación de energía con molinos de viento que aumentó notoriamente luego de la instalación de los diferentes parques eólicos.

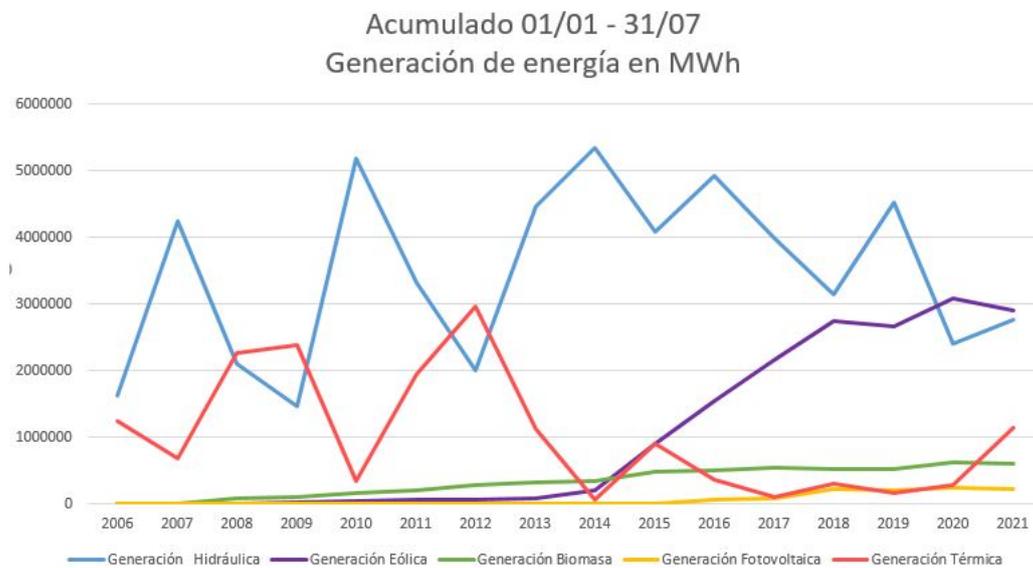


Figura 2.1: Generación de energía por fuente en el período comprendido entre 2006-2021. Elaboración propia con información proporcionada por UTE [3]

La apuesta a las energías renovables le ha permitido a Uruguay dejar de ser un país importador de energía y pasar a ser un país exportador. En la figura 2.2. se puede observar el cambio de tendencia mencionado anteriormente.

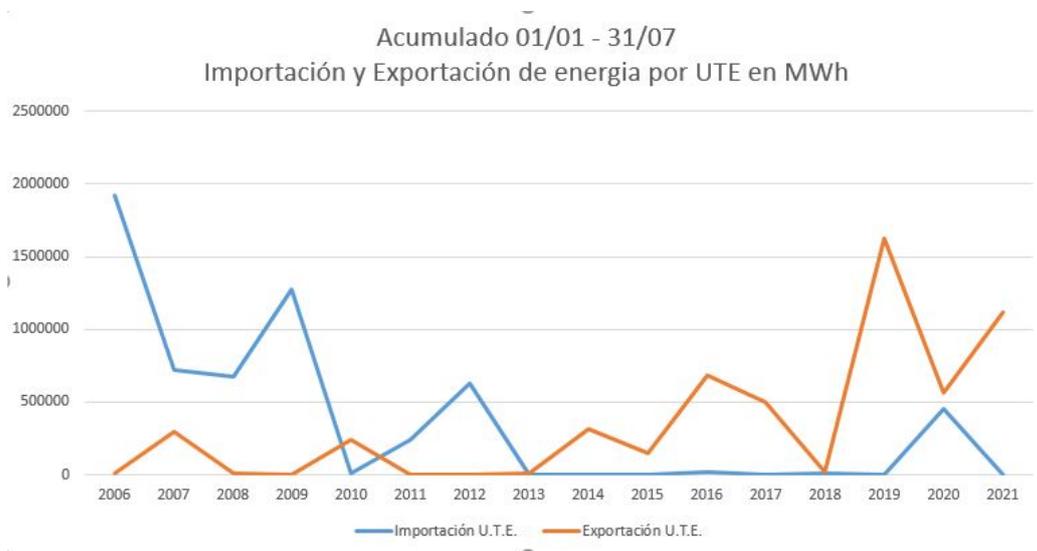


Figura 2.2: Exportación e importación de energía por UTE en el período comprendido entre 2006-2021. Elaboración propia con información proporcionada por UTE [3]

2.2. Biomasa

La biomasa es una fuente de energía renovable que proviene de materia orgánica. Dicha materia orgánica puede ser de origen animal o vegetal y es transformada en energía al aplicarle diferentes procesos químicos.

Se definen tres categorías para dividir los tipos de biomasa [4]:

- **Biomasa natural:** Se produce en la naturaleza sin ninguna intervención humana (ej: residuos forestales).
- **Biomasa residual:** Residuos producidos por actividades humanas (ej: residuos sólidos urbanos).
- **Biomasa producida:** Son cultivos energéticos, cosechados con la única finalidad de su aprovechamiento energético (ej: leña).

En la figura 2.3 se desglosan diferentes materias orgánicas utilizadas como biomasa.

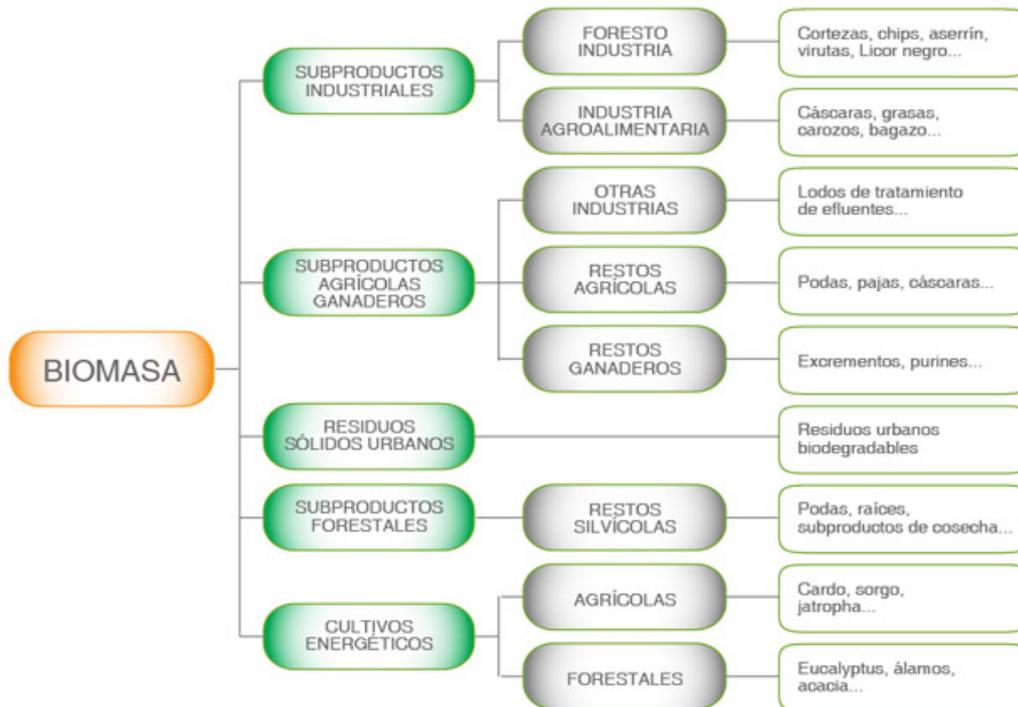


Figura 2.3: División de materias orgánicas utilizadas como biomasa [5]

Existen numerosos métodos para transformar la biomasa en energía aprovechable. Los más utilizados actualmente se dividen en métodos termoquímicos y métodos bioquímicos[4].

- **Métodos termoquímicos:** Se utiliza el calor para transformar la biomasa.
 - **Combustión:** Se quema la biomasa con mucho aire a una temperatura entre 600 y 1300°C. Es el modo más básico de generación de energía por biomasa, donde se generan gases calientes que se utilizan en casas, industrias y para generar electricidad.

- **Pirólisis:** Se descompone la biomasa utilizando calor sin presencia de oxígeno. A través de este proceso se obtienen gases formados por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos, líquidos hidrocarbonatos y residuos sólidos carbonosos.
 - **Gasificación:** Existe cuando hay una combustión en presencia de oxígeno o aire y se producen diferentes elementos químicos: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y metano, en cantidades diferentes.
 - **Co-combustión:** Consiste en la utilización de la biomasa como combustible de ayuda en la combustión de carbón en las calderas. Con este proceso se ayuda a reducir el consumo de carbón y se reducen las emisiones.
- **Métodos bioquímicos:** Para biomasa de alto nivel de humedad se utilizan diferentes microorganismos para degradar las moléculas y generar energía.
- **Fermentación alcohólica:** Consiste en la fermentación de hidratos de carbono que se encuentran en las plantas para conseguir alcohol (etanol) que se puede utilizar para la industria.
 - **Fermentación metánica:** Es la digestión anaerobia (sin oxígeno) de la biomasa, donde la materia orgánica se descompone (fermenta) y se crea el biogás.

2.3. Plantaciones forestales en Uruguay

El territorio uruguayo tiene una extensión de 17.622 millones de hectáreas, donde aproximadamente 11 % de la superficie total del país son bosques nativos o plantados. En la Ley forestal número 15939 publicada en 1988 se declara como interés nacional la defensa, el mejoramiento, la ampliación, la creación de los recursos forestales, el desarrollo de las industrias forestales y en general la economía forestal. El gobierno uruguayo ha otorgado a lo largo

de los años, múltiples beneficios a las empresas con el objetivo de desarrollar una economía forestal sostenible. En el marco de la misma ley quedó definido un terreno forestal, como *“aquel terreno arbolado o no, que por sus condiciones de suelo, aptitud, clima, ubicación y demás características, sean inadecuados para cualquier otra explotación o destino de carácter permanente y provechoso”*[6].

Según la Sociedad de Productores Forestales (SPF) [7] las especies más utilizadas para las plantaciones son:

- Eucalyptus grandis
- Eucalyptus dunnii
- Pinus elliotti
- Pinus taeda

Los datos presentados en el informe Resultados Cartografía forestal 2021 por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP)[8] fueron que Uruguay cuenta con una superficie forestada de 1.048.228 de hectáreas y 38.881 hectáreas cosechadas. Esto totaliza 1.087.109 hectáreas efectivas destinadas al uso forestal, aproximadamente un 6 % del territorio nacional.

2.4. Residuos forestales

Se define como residuo forestal a aquellos materiales generados en las plantaciones forestales, que no son extraídos habitualmente por no ser convertibles en subproductos pero que pueden ser utilizados como combustible orgánico. Hoy en día la mayor parte de estos residuos proceden de cortas finales. Habitualmente son utilizados en quema controlada o son amontonados

en el monte. En raras ocasiones se trituran o astillan, más bien son abandonadas en el monte para favorecer la rápida incorporación al suelo debido a que aprovecharlos para otros fines impone un costo adicional. [9]

En el marco del fortalecimiento de la estrategia Nacional Energética 2030, se realizó la “Evaluación de la disponibilidad de residuos o subproductos de biomasa a nivel nacional” [10]. Con los datos mencionados en dicha evaluación se puede afirmar que alrededor del un 23 % de un árbol talado se convierte en residuo forestal. En la Tabla 2.2 se detalla el porcentaje que se asigna a cada parte o producto del árbol.

Elemento	Pinus		Eucalyptus		Promedio
	Aserrío	Pulpa	Aserrío	Pulpa	
Madera	79 %	72 %	82 %	75 %	77 %
Corteza	7 %	10 %	6 %	8 %	8 %
Ramas	12 %	15 %	10 %	14 %	13 %
Hojas	3 %	4 %	3 %	4 %	3 %
Total residuo	21 %	28 %	19 %	25 %	23 %

Tabla 2.2: Peso de las fracciones de Pinus y Eucalyptus para aserrío y pulpa. Elaboración propia con información proporcionada por las autoridades gubernamentales [10]

Si se analiza el comportamiento de la extracción de madera a lo largo de los años en el país, es fácil deducir que las políticas aplicadas por el gobierno y la implantación de plantas de celulosa han logrado incrementar notoriamente la cantidad de madera extraída en suelo uruguayo.

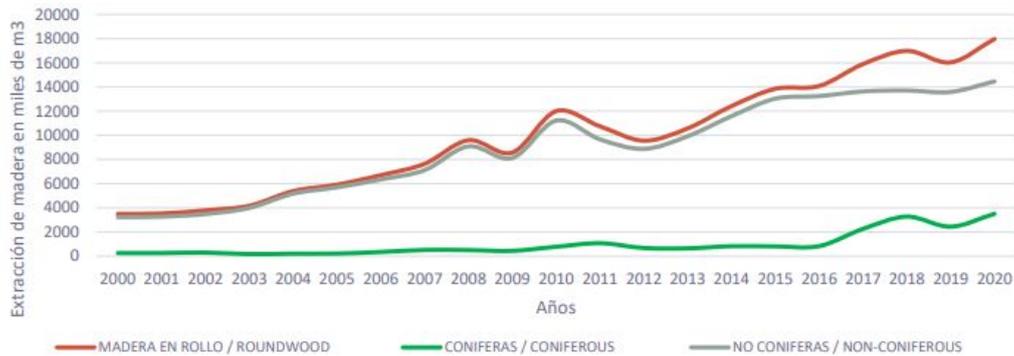


Figura 2.4: Extracción de Madera en Rollo 2000-2020 en miles de m^3 . Elaboración propia con información proporcionada por las autoridades gubernamentales [10]

Al año 2020, como se muestra en la Figura 2.4 la extracción de madera total fue de 17.975.000 metros cúbicos. Teniendo en cuenta que aproximadamente un tercio del árbol talado es considerado residuo, en grandes cifras en el año 2020 se habrían generado 4.140.000 metros cúbicos de residuos forestales.

Los residuos forestales son una fuente interesante de combustible, pero su recolección y transporte conllevan altos costos debido a que es un material muy voluminoso y de bajo valor térmico. Es importante implementar métodos que optimicen la recolección, reduzcan las distancias de transporte y el volumen de los residuos [11].

2.5. Sistemas de cosecha forestal

La cosecha forestal abarca varias operaciones, incluyendo: apeo o corta del árbol, desrame, troceado, descortezado, extracción del tronco, apilado y carga de madera para su transporte.

Dependiendo de la mano de obra y maquinaria empleada los sistemas de

cosecha pueden ser definidos como manuales, semi-mecanizados o mecanizados. La extracción de madera se puede hacer también de diferentes formas, siendo común el uso de tractores con zorra y grúas. En zonas de difícil acceso se emplean algunas veces animales (caballos, mulas, bueyes) con carros o equipos para arrastre de troncos, pero este método es lento y requiere precauciones para el cuidado de los animales [12].

El método de cosecha depende de cuál es la forma en que la madera es depositada en el camino de acceso, y de la cantidad de procesos que ocurren después del corte final del árbol. Es posible distinguir cinco sistemas de cosecha, los cuales se clasifican de acuerdo al largo de las trozas y a la forma como son extraídas hasta el punto de procesamiento:

- **Sistemas de árboles enteros (“full-tree”)**

El árbol es talado y arrastrado para afuera del terreno, el procesamiento completo es hecho en puntos previamente elegidos. Se requiere un elevado índice de mecanización y puede ser utilizado tanto en terrenos planos o accidentados. Este sistema permite obtener grandes cantidades de residuos forestales, ya que se retira del terreno el árbol con corteza, ramas y hojas. Sin embargo tiene grandes restricciones ambientales, en virtud de la extracción de gran parte de los potenciales nutrientes para futuras rotaciones. [13].

- **Sistema de árboles completos (“whole-tree”)**

Consiste en extraer el árbol con parte de las raíces y llevarlo al borde de la carretera o al patio temporal, donde será procesado. Es interesante, solo en los casos en que las raíces tengan valor comercial. [13].

- **Sistema de astillado-chipeado (“chipping”)**

En este sistema, los árboles son talados, desramados, descortezados y convertidos en astillas en el sitio de corte. Luego son extraídos y transportados a la planta industrial. En estos casos los residuos forestales quedan en el terreno. [13].

- **Sistema de trozas largas (“tree-length”)**

En el sistema de trozas largas, luego que el árbol es cortado se realiza el desrame y descortezado en el lugar. Está diseñado para terrenos accidentados, en comparación con el sistema de trozas cortas, se puede decir que presenta menores costos por tonelada de madera y que causa mayores daños sobre el terreno. [13].

- **Sistema de trozas cortas (“cut-to-length”)**

El sistema de cosecha de trozas cortas o cut to length (CTL), es el más utilizado en los países escandinavos y en Uruguay. Es caracterizado por la realización de todos los trabajos complementarios al corte, desramado, descortezado y troceado en el mismo lugar donde el árbol fue apeado. Entre las ventajas de este sistema, están la facilidad de desplazamiento y la baja agresividad al medio ambiente, principalmente con relación al reciclado de los nutrientes en el suelo y la menor compactación. Es un sistema que proporciona un producto final con mayor calidad que los sistemas mecanizados árboles enteros y trozas largas [13].

2.5.1. Métodos para el procesamiento de los residuos forestales

Existen varios métodos para la extracción, procesamiento y transporte de los residuos forestales. A continuación, se presentan algunos ejemplos:

- Utilización de un autocargador modificado: Este método implica el uso de un autocargador especialmente adaptado con un espacio de carga extendido y una pinza especializada. El autocargador permite la extracción eficiente de los residuos forestales, que luego son almacenados cerca del borde de la carretera para su posterior transporte. [14]
- Extracción de residuos con un tractor agrícola y remolque: En este método, se emplea un tractor agrícola junto con un remolque para

recolectar los residuos generados por la tala de árboles. Posteriormente, los residuos son procesados mediante una chipeadora montada en un transportador. Estos residuos chipeados se cargan en contenedores de alto volteo, listos para su transporte por carretera. [14]

- Extracción y transporte en forma suelta a una planta de procesamiento: Otra opción es extraer los residuos forestales en su forma suelta y transportarlos a una planta especializada para su procesamiento. En este caso, se puede utilizar una trituradora grande en la planta para reducir el tamaño de los residuos y facilitar su manejo y aprovechamiento posterior. [14]
- Agrupamiento de residuos con la tecnología Timberjack Fiberpack: Un enfoque innovador es la utilización de la tecnología Timberjack Fiberpack, desarrollada en Escandinavia. Esta tecnología permite el agrupamiento eficiente de los residuos forestales, creando paquetes compactos y fáciles de transportar. Después de ser procesados, los paquetes de residuos se pueden transportar a una planta de aprovechamiento energético o para otros fines. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este método puede resultar costoso debido a la necesidad de utilizar maquinaria especializada. [14]

El manejo de los residuos sin procesar o compactar resulta poco rentable dada la naturaleza voluminosa del material. Es posible dividir en dos grandes grupos los métodos utilizados para la recuperación de los residuos de la tala: chipeado y empaquetado.

Chipeado

La trituración o chipeado, es el método de procesamiento que consiste en convertir ramas y restos de madera en chips o astillas de un tamaño pequeño y uniforme y pueden utilizarse posteriormente para diversos fines, como la

producción de energía, la fabricación de productos de madera, etc. Aunque el chipeado es ampliamente utilizado por la mayoría de los operadores en América y Europa, presenta diversas desventajas a considerar. En primer lugar, se requiere maquinaria especializada para su producción y transporte, como se puede observar en la Figura 2.5 . Además, los residuos, muchas veces se encuentran contaminados por tierra o piedras lo que puede provocar daños en la trituradora. Por último, el almacenamiento puede resultar problemático si no se realiza en seco, debido al crecimiento de hongos. [15]



Figura 2.5: Residuos siendo chipeados y cargados para su transporte [16]

Empaquetado

El empaquetado es un proceso que permite facilitar el manejo, transporte y almacenamiento eficiente de los residuos forestales. Las máquinas empacadoras normalmente recogen los residuos de la tala directamente en el campo y producen los denominados “truncos compuestos de residuos”, que se pueden manipular con equipo de tala convencional. En cuanto al empaquetado, existen dos sistemas principales.

El primer sistema emplea un proceso paso a paso en el cual los residuos

son cargados en la máquina, posteriormente son empaquetados y finalmente expulsados. En general, estas máquinas suelen tener un tamaño compacto. El segundo sistema se basa en un proceso continuo que permite llevar a cabo la carga, el empaque y la expulsión de manera simultánea. Si bien estas máquinas que adoptan el sistema continuo tienden a ser más productivas que aquellas que utilizan el proceso paso a paso, suelen ser de mayor tamaño, lo que puede limitar su uso en ciertos escenarios. [17]

El impulsor fundamental del empaquetado es la reducción de la densidad del material a ser transportado. Se alcanza una reducción de 3:1 en el volumen del empaquetado. Al tratarse de paquetes compactos y uniformes los costos de transporte y almacenamiento se reducen considerablemente frente al método de chipeado. Se ha estudiado, además, que el almacenamiento de los residuos empaquetados conllevan a menores niveles de crecimiento de hongos y menor riesgo de autocombustión. En la figura 2.6 se pueden observar los paquetes de residuos esperando para ser almacenados. [15]



Figura 2.6: Arreglo de paquetes para ser almacenados [15]

El agrupamiento siempre debe realizarse poco después de la cosecha para que la madera conserve cierto grado de humedad, si está muy seca se parte al ejercer presión sobre ella lo que genera una pérdida de este residuo. Tres parámetros principales afectan la productividad de la agrupación: la cantidad

de residuo disponible en la superficie, el tamaño de residuo y la distribución del mismo. Los mejores resultados se obtienen cuando se agrupa una gran cantidad de residuos de gran tamaño, posiblemente concentrados en hileras o pilas. En la figura 2.7 se puede observar el traslado de los residuos para ser apilados. [17]



Figura 2.7: Maquinaria cargando residuos [15]

En este capítulo se abordó la importancia y el potencial de la biomasa como fuente de energía renovable en Uruguay, un país con una extensión considerable de bosques nativos y plantados. La utilización de la biomasa como combustible ofrece una alternativa sostenible para satisfacer las necesidades energéticas y reducir la dependencia de combustibles fósiles, al tiempo que contribuye a la mitigación del cambio climático al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Uruguay ha demostrado un compromiso significativo con el desarrollo de la economía forestal sostenible, la Ley forestal número 15939, publicada en 1988, refleja el interés nacional en la defensa, el mejoramiento y la ampliación de los recursos forestales. Gracias a esto, se ha logrado establecer una superficie forestada de más de un millón de hectáreas, representando alrededor del 11 % del territorio nacional. El manejo de los residuos forestales, aunque presenta desafíos logísticos y económicos, se presenta como una oportunidad interesante para aprovechar aún más los recursos de la biomasa. El chipeado y el empaquetado son dos métodos que

han sido estudiados y aplicados para optimizar la recolección, transporte y almacenamiento de estos residuos. El empaquetado, en particular, destaca por su eficiencia al reducir el volumen de los residuos y facilitar su manipulación y transporte. El avance en los sistemas de cosecha forestal, con enfoque en métodos mecanizados como el sistema de trozas cortas, ha permitido incrementar la extracción de madera y, por ende, la generación de residuos forestales. Sin embargo, es esencial seguir impulsando prácticas sostenibles que preserven la biodiversidad y los recursos naturales. La biomasa y su utilización en Uruguay refleja el compromiso del país con el desarrollo de una economía forestal sostenible y la adopción de prácticas responsables para aprovechar los recursos naturales. La promoción de la biomasa como fuente de energía renovable representa una oportunidad valiosa para avanzar hacia una matriz energética más limpia y respetuosa con el medio ambiente, contribuyendo así a un futuro más sustentable y resiliente.

CAPÍTULO 3

PIRÓLISIS

Existen diversos procesos para sumar valor agregado a la biomasa: mecánicos, termoquímicos y biológicos. Los principales procesos termoquímicos son la combustión, la gasificación y la pirólisis. [18]

La pirólisis convencional es un proceso termoquímico que descompone materiales orgánicos en ausencia de oxígeno a altas temperaturas, generalmente entre 400°C y 600°C. Durante la pirólisis, los materiales se descomponen en gases, líquidos y sólidos carbonosos. Es utilizada en diversas aplicaciones, como por ejemplo la producción de carbón vegetal, la eliminación de residuos, la producción de gases combustibles, la producción de aceites y combustibles líquidos, entre otros.

El proceso de pirólisis rápida utiliza temperaturas más altas que la pirólisis convencional, generalmente entre 600°C y 800°C, y se lleva a cabo en un ambiente restringido de oxígeno para evitar la combustión completa del material. Durante la pirólisis rápida, los materiales se descomponen rápida-

mente en gases y líquidos a través de un proceso de craqueo térmico, y los productos finales son aceites pirolíticos y gases combustibles.

La principal diferencia entre la pirólisis convencional y la pirólisis rápida es el tiempo que tarda en ocurrir el proceso. En la pirólisis convencional, los materiales se someten a las altas temperaturas durante un período de tiempo más prolongado, generalmente varias horas, mientras que en la pirólisis rápida, el proceso ocurre en unos pocos segundos o minutos.

La pirólisis convencional, por su parte, produce más carbón vegetal y menos aceites pirolíticos y gases, debido a su proceso de descomposición más lento. También puede requerir más energía y recursos para llevar a cabo. [19]

A continuación se mencionan algunas de las ventajas de las plantas de pirólisis [20] :

- Mediante un enfoque integral, se logra un aprovechamiento prácticamente total de los recursos materiales y energéticos presentes en los residuos sólidos, alcanzando una completa independencia energética en todo el ciclo tecnológico.
- Una característica fundamental de este proceso es que la descomposición térmica se produce sin acceso de aire, lo cual elimina cualquier posibilidad de formación de compuestos tóxicos como dioxina, furano, benzopireno, entre otros.
- La combinación de un circuito cerrado, equipos compactos y un fuerte compromiso con el cuidado del medio ambiente permiten considerar la factibilidad de ubicar una planta de pirólisis dentro de los límites de cualquier ciudad.

3.1. Etapas del proceso de pirólisis rápida

Para llevar a cabo la pirólisis, es necesario reducir los residuos forestales a las dimensiones adecuadas para la máquina de procesamiento y cargar el reactor con la materia prima. El proceso dentro del reactor se puede dividir en tres etapas bien definidas.

La primer etapa implica una descomposición que produce pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano. Esto se debe a la ruptura de los enlaces moleculares a altas temperaturas y a la liberación de gases retenidos en el carbón.

La segunda etapa, conocida como descomposición térmica activa, se caracteriza por un aumento de temperatura y una fragmentación más profunda de la molécula de carbón. Se forman hidrocarburos condensables y alquitranes en esta etapa, que comienza alrededor de los 360°C y termina a temperaturas de alrededor de 560°C.

En la última etapa, que ocurre a temperaturas superiores a los 600°C, se produce la eliminación gradual de hidrógeno y otros heteroátomos.[21]

3.2. Productos de la pirólisis rápida

La pirólisis rápida de biomasa puede generar varios productos útiles. En la figura 3.1 se observa un diagrama de los productos que son descritos a continuación [22]:

Bioaceite: es un líquido oscuro y espeso con una alta densidad energética. Es similar al petróleo crudo y puede ser refinado para producir una variedad de combustibles líquidos, como diesel y gasolina. Es el producto principal y se obtiene con rendimientos de hasta el 75 % en peso sobre una base de alimentación seca.

Vinagre de madera: Es un líquido ácido y oscuro que se produce al condensar los vapores y gases que se generan durante el proceso. El vinagre de madera se utiliza comúnmente como acondicionador del suelo y como aditivo alimentario.

Gas de síntesis: es un gas inflamable, compuesto principalmente de monóxido de carbono e hidrógeno. El gas de síntesis se puede utilizar como combustible para la generación de energía eléctrica y térmica. Es posible la recirculación del producto para abastecer de energía el proceso de pirólisis.

Biochar: es un carbón vegetal que se puede utilizar como fertilizante y como material para mejorar la calidad del suelo.

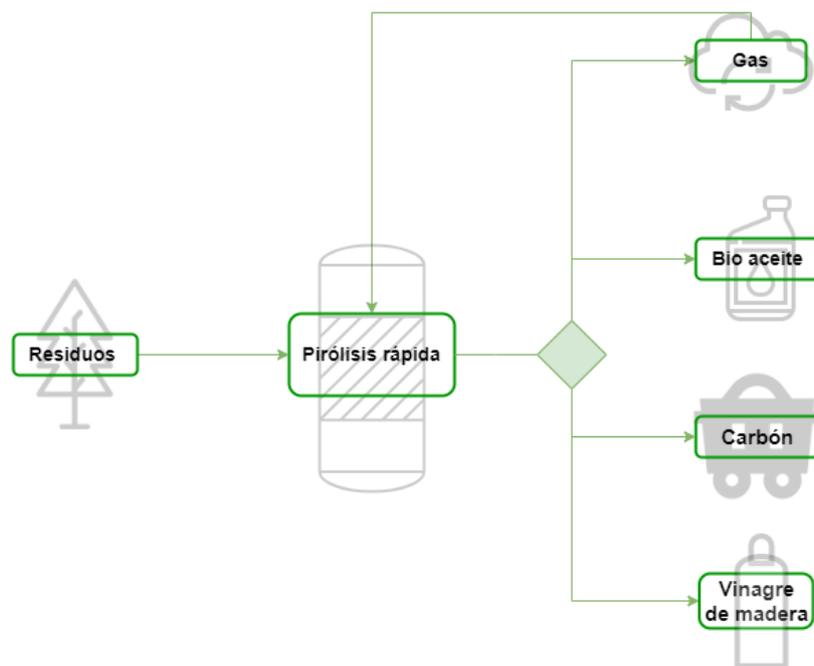


Figura 3.1: Diagrama de propia autoría de productos de la pirólisis rápida

3.3. Pirólisis rápida móvil

Como su nombre lo especifica, la pirólisis rápida móvil es una tecnología que combina la pirólisis rápida con la movilidad, lo que permite la producción de líquidos y gases pirolíticos en el mismo lugar donde se generan los residuos. En esta tecnología, las máquinas de pirólisis rápida se instalan en remolques o camiones y se llevan a las ubicaciones en donde se generan los residuos forestales para procesarlos in situ.

La ventaja de la pirólisis rápida móvil es que reduce los costos de transporte de los residuos y permite la producción de energía o combustibles a pequeña escala en áreas remotas o rurales. Además, el proceso de pirólisis rápida móvil es más eficiente en la producción de líquidos y gases pirolíticos que la pirólisis convencional, lo que lo hace más adecuado para la producción de biocombustibles y otros productos químicos a partir de residuos forestales.

Características clave de la planta de pirólisis móvil.

1. Fácil transporte con acceso a la mayoría de las áreas remotas.
2. El proceso de alimentación puede ser totalmente automatizado.
3. Existen diferentes tamaños de procesamiento, 2 toneladas o 10 toneladas diarias.
4. El tamaño de la maquinaria es reducido
5. Solo requieren de un operario para ser utilizadas.

3.4. Estudios asociados a la pirólisis

Se revisaron varios estudios enfocados en la aplicación del proceso de pirólisis en diferentes escenarios para tomar como punto de partida. A pesar

de que se lograron conseguir varios estudios interesantes se notó como es un campo del que aún no se habla demasiado en el ámbito de los residuos forestales como insumo.

Los autores [23] investigaron la viabilidad económica de una planta de pirólisis móvil en comparación con una planta fija. Utilizaron un modelo de simulación financiera Monte Carlo contemplando diferentes alternativas de materias primas, ubicación y frecuencia de reubicación de la planta. En términos generales, observaron que los costos promedio de producción aumentan a medida que se incrementa la frecuencia de reubicación de la planta. Los resultados de la simulación mostraron que los quince escenarios evaluados arrojaron un valor actual neto promedio negativo. Sin embargo, se encontró que el VAN mejoraba (es decir, se volvía menos negativo) a medida que se reducía el número de reubicaciones. Las plantas estacionarias presentaron valores actuales netos más altos debido al ahorro asociado con evitar el traslado de la planta, lo cual compensaba el costo adicional de transporte de las materias primas y el biochar desde y hacia el campo, a distancias más largas.

Otro estudio relevante fue el desarrollo de un modelo de costos para dos escenarios de la cadena de suministro, elaborado por los varios autores [24]. El objetivo de este estudio es desarrollar modelos de cadena de suministro y realizar una evaluación tecnoeconómica de la producción de bioaceite en un sistema centralizado (planta fija) y otro descentralizado (planta móvil). Se definieron varias casuísticas variando la capacidad de las plantas, los tiempos de reubicación y la configuración de sitios de cosecha (radial y truncada, representados en la figura 3.2) en el escenario descentralizado. Se observó como al reducir la capacidad de las plantas móviles los costos laborales aumentaban, debido a que se necesitaban más máquinas para cumplir con los volúmenes a procesar. En comparación, resultó más eficiente la distribución truncada frente a la radial para el procesamiento con sistema descentralizado, ya que las distancias de transporte de la biomasa a la máquina son menores y en consecuencia también son menores los costos asociados al transporte. Por otro lado, se observó que para capacidades de planta más altas, la planta centralizada funciona mejor debido a las economías de escala.

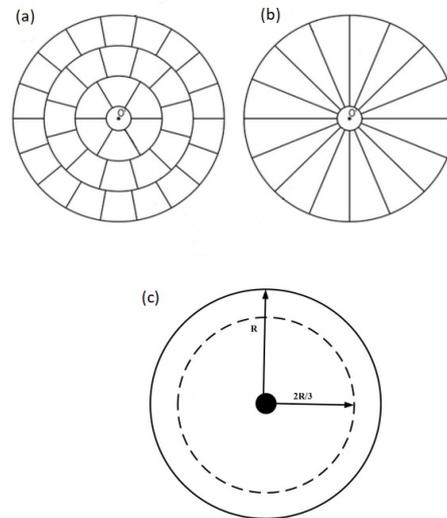


Figura 3.2: Distribución de sitios truncada (a) y radial (b) para planta móvil y centralizada (c) para planta fija [24]

En este capítulo, se han explorado con detalle los procesos termoquímicos de la pirólisis convencional y rápida. Se enfatizó en las ventajas significativas que ofrecen las plantas de pirólisis, destacando su eficiencia en la utilización de recursos y su capacidad para eliminar compuestos tóxicos del proceso.

Se presenta la pirólisis rápida móvil como una tecnología revolucionaria que permite el procesamiento de residuos en el mismo lugar donde se generan. Esto no solo reduce los costos de transporte, sino que también abre nuevas posibilidades para la valorización y aprovechamiento de la biomasa forestal. Esta innovadora tecnología tiene el potencial de transformar la forma en que se aborda la gestión de biomasa a nivel nacional e incluso global.

CAPÍTULO 4

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica de diferentes enfoques de resolución frente a la problemática presentada. La metodología utilizada consistió en una primera búsqueda en el portal Timbó utilizando palabras claves que tienen que ver con el tema de estudio (optimización, residuos forestales, cosecha, recolección, biomasa). El portal Timbó posibilita el acceso en línea a bibliografía y literatura científica-tecnológica de todo el mundo. La base de datos del portal dispone de acceso a miles de revistas especializadas y de libros electrónicos, actas de conferencias entre otros.

A continuación de la etapa de recolección, se listaron todos los artículos e investigaciones brindados por la plataforma y los ofrecidos por el tutor para poder realizar un filtro inicial.

El criterio de selección se basó en descartar aquellos artículos que tuvieran problemáticas muy alejadas al panorama a resolver en el proyecto, que utilizaran soluciones que no fueran basados en programación lineal y que

presentaran soluciones similares entre sí.

Un segundo filtro fue realizado luego de una revisión más profunda de los trabajos restante donde se aplicaron los mismos criterios mencionados anteriormente para descartar algunos trabajos.

El paso siguiente fue la clasificación de los artículos según el siguiente criterio:

- Optimización en la logística de recolección de biomasa
- Aplicación del TSP a nuestro caso de estudio

Finalmente se realizó una búsqueda direccionada para complementar las secciones en las que se quiso profundizar un poco más.

4.1. Optimización en la logística de recolección de biomasa

En esta parte de la revisión, se profundizó en la temática de la recolección de residuos forestales de manera genérica. Se seleccionaron trabajos enfocados en la optimización de la cadena de suministro y/o en diferentes alternativas de procesamiento de los residuos. A continuación se detallan algunos de ellos.

El estudio [25] se enfoca en la optimización de las cadenas de suministro de biomasa desde una perspectiva de Investigación Operativa donde se destaca que, a pesar del crecimiento en la producción de biomasa como fuente de energía renovable, se ha subestimado la importancia de la logística en este proceso. La cosecha de cultivos se limita a un corto período del año, mientras que las plantas de conversión deben funcionar de manera continua, lo que requiere una cadena de suministro eficiente para garantizar un suministro constante a estas instalaciones donde los costos logísticos son esenciales

para el éxito económico. El objetivo principal del estudio es introducir modelos de Investigación Operativa aplicados a estas cadenas de suministro. Para ello, se llevó a cabo una revisión exhaustiva que incluyó más de 170 artículos de investigación, donde se abordan modelos de evaluación de rendimiento y modelos de optimización basados en programas matemáticos como la optimización determinista, estocástica y de múltiples objetivos.

La investigación [26] también se centra en la optimización de la cadena de suministro de biomasa pero con un enfoque multidisciplinario que incorpora investigación de operaciones, sistemas de información geográfica, modelado matemático y análisis económico técnico. Se demuestra que la cadena de suministro de biomasa es rentable y sensible a cambios en, el costo de recolección, costos de transporte y en la demanda. Los autores resaltan la importancia de aprovechar las economías de escala para reducir los costos de suministro de biomasa y se sugiere coordinar diferentes aspectos de la cadena de suministro para un desarrollo más eficiente.

El estudio [27] explica como el diseño de cadenas de suministro eficientes de biomasa es un proceso complejo debido a la estacionalidad y especificidad de la producción de biomasa, que está influenciada por factores biológicos, climáticos y socioeconómicos. Una forma de mejorar la utilización de maquinaria es combinar el procesamiento de alimentos y/o piensos con el procesamiento de biomasa en la misma instalación, lo que se conoce como Centro Logístico Integrado de Biomasa (IBLC, por sus siglas en inglés). El IBLC es un concepto logístico que busca integrar operaciones de diferentes cadenas de suministro de biomasa (alimentos, piensos y energía) para mejorar la eficiencia en el uso de recursos como maquinaria y mano de obra. Este estudio presenta un modelo de programación mixta entera que optimiza la utilización de maquinaria mediante el concepto de IBLC, donde se combina el procesamiento de biomasa con la producción de alimentos y/o piensos. El objetivo es mejorar la eficiencia económica y ambiental de las cadenas de suministro de biomasa utilizando IBLCs. Se desarrolló un modelo de programación lineal

mixta (MILP) para optimizar las decisiones de asignación de recursos de un IBLC.

En este contexto, en [28] se presenta un modelo de optimización integral para la cadena de suministro. Dicho modelo abarca la producción integrada de bioenergía y biocombustibles a partir de una variedad de fuentes de residuos forestales y sobrantes de aserraderos. El estudio aborda la variabilidad temporal de varios factores críticos: las cantidades y costos de la biomasa disponible, los valores de demanda y los precios de los productos bioenergéticos y biocombustibles, así como los costos asociados al transporte y la operación. Se resuelve el problema a través de la formulación de un modelo matemático de programación lineal entera mixta (MILP) de múltiples períodos buscando optimizar el diseño estratégico de la cadena de suministro.

Siguiendo en esta línea, el artículo [29] refiere a un estudio enfocado en la misma problemática con la diferencia en que estudian una única tecnología de conversión de energía, pirólisis. En el artículo, se desarrolló un modelo lineal entero mixto por partes (MILP) para determinar el diseño y operación de la cadena de suministro bajo incertidumbre. La toma de decisiones contemplaba tres estrategias de producción diferentes:

1. Estrategia de procesamiento centralizado, donde la pirólisis de biomasa y la mejora se realizan en el mismo lugar.
2. Estrategia de procesamiento descentralizado, donde la pirólisis de biomasa se lleva a cabo en una planta de pirólisis separada y el aceite de pirólisis se traslada a los centros de mejora.
3. Estrategia de procesamiento remoto, donde el aceite de pirólisis producido por los pirólisis móviles se envía a los centros de mejora para la producción de biocombustibles.

Los resultados de la optimización sugieren que la combinación de pirólisis centralizada geográficamente y centros de mejora sería suficiente para la

cadena de suministro bajo condiciones deterministas.

El estudio [30] propone una metodología innovadora para optimizar el diseño de cadenas de suministro de biocombustibles. Se toman en cuenta aspectos como: la incertidumbre en la disponibilidad de biomasa, la estacionalidad y la dispersión geográfica, factores que impactan la viabilidad económica. La metodología se basa en una estructura de red descentralizada que combina instalaciones de procesamiento móviles y fijas.

La estructura de la cadena de suministro propuesta se ilustra en la figura 4.1 y consta de unidades de pirólisis rápida móvil (MFP), pirólisis rápida fija (FFP), mejora fija (FU) y entidades de almacenamiento.

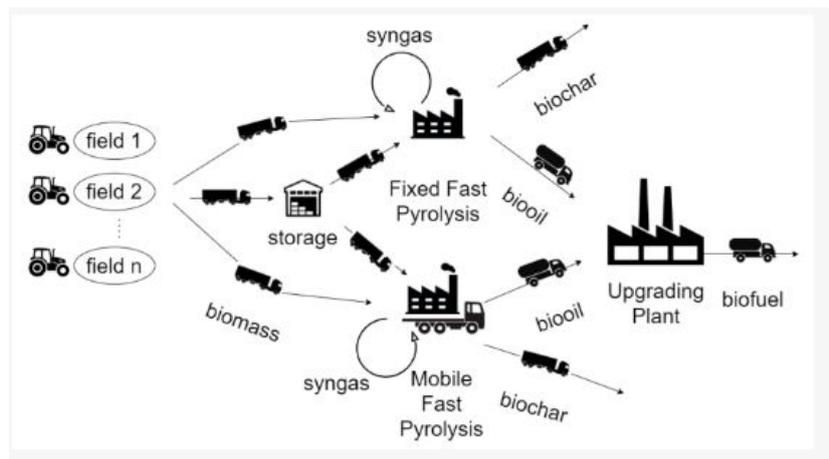


Figura 4.1: Estructura de la cadena de suministro de biomasa a biocombustible [30]

El objetivo del problema es determinar la combinación óptima de programación de cosecha de biomasa, número, capacidad y ubicación de las instalaciones de FFP, FU y MFP, flujos de materiales mensuales en la cadena de suministro, capacidad de almacenamiento y niveles de inventario para maximizar la ganancia total de la cadena de suministro.

El modelo demuestra que la inclusión de opciones de procesamiento móvil

y la conversión descentralizada de biomasa pueden mejorar el rendimiento económico de las cadenas de suministro de biomasa y permitir el uso de tierras que de otra manera permanecen inutilizadas.

4.2. Aplicación del TSP a nuestro caso de estudio

Al explorar la relación entre la literatura existente y el enfoque de la propuesta de resolución en esta tesis, se decidió orientar la revisión a estudios en los que se profundice en la metodología, ampliamente reconocida en optimización de rutas, referida como Problema del Viajante.

En la tesis de maestría [31] se desarrollan en detalle las definiciones de los Problemas del Viajante (TSP) y de Rutas de Vehículos (VRP). El primero implica encontrar la ruta más corta que un viajero debe seguir para visitar múltiples lugares. El segundo se centra en identificar las rutas más eficientes para que una empresa entregue productos a sus clientes. Estos problemas están interconectados, ya que el Problema de Rutas de Vehículos extiende el concepto del Problema del Viajante al incluir vehículos con limitaciones.

A pesar de su aparente simplicidad, estos problemas son altamente complejos desde una perspectiva computacional. Ambos caen en la categoría de problemas NP-hard, lo que implica que no existe un método eficiente para resolverlos rápidamente. A pesar de esto, su importancia radica en su aplicabilidad en situaciones prácticas, especialmente en áreas como la logística, distribución de productos, transporte y también en industrias y campos como la genética.

Este tipo de problemas es teóricamente abordable, ya que es posible calcular y comparar todas las soluciones posibles para elegir la de menor costo. Sin embargo, la dificultad radica en que el número de soluciones potenciales se incrementa de manera significativa a medida que aumenta la complejidad

del problema. Para comprender la magnitud se plantea la posibilidad de calcular el número de posibles rutas o ciclos de manera directa, obteniendo como solución $(n - 1)!$ soluciones distintas siendo n el número total de ciudades.

El TSP se basa en la teoría de grafos, se puede modelar como un problema de programación matemática del tipo MILP que involucra variables enteras y continuas. Existen diferentes variantes de problemas de rutas que surgen debido a restricciones específicas, algunas de ellas son [32]:

- **Problema del Viajante con Ventanas de Tiempo (TSPTW):** En esta variante, se agregan restricciones de tiempo a cada ciudad, lo que significa que las visitas a los clientes deben realizarse dentro de intervalos de tiempo específicos. Esto simula situaciones donde las entregas o visitas deben programarse en momentos específicos para cumplir con los horarios de los clientes.[32]
- **Problema del Viajante Múltiple (MTSP):** En lugar de un solo viajero, el MTSP involucra varios viajeros, cada uno con su propia ruta que debe ser recorrida. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida por todos los viajeros, lo que encuentra aplicaciones en la planificación de rutas para flotas de vehículos o equipos de servicio.[32]
- **TSP con Múltiples Depósitos (MDTSP):** En el MDTSP, se permiten múltiples depósitos desde los cuales los vehículos pueden iniciar y terminar sus rutas. Cada ciudad debe ser visitada exactamente una vez por uno de los viajeros, lo que agrega una capa adicional de complejidad.[32]
- **Problema del Vendedor Viajante Periódico (PTSP):** En esta variante, las visitas a los clientes deben realizarse en uno o más días dentro de un período planificado. Cada cliente tiene opciones de visitas factibles, y el objetivo es minimizar la distancia total recorrida durante el período de planificación.[32]

Para abordar estas variantes, se han desarrollado diversos métodos de

solución, como pueden ser solución exacta, Heurísticas y Metaheurísticas. Algunas de ellas son: Heurísticas de construcción y mejora, búsqueda tabú, búsqueda de vecindario variable, algoritmos genéticos y recocido simulado son enfoques populares que han demostrado ser eficientes para resolver instancias de tamaño moderado y producir soluciones cercanas a las óptimas. Aunque los problemas de TSP y sus variantes son NP-hard, se han propuesto enfoques de programación matemática exacta. Estos enfoques son especialmente valiosos para problemas pequeños y medianos, y han demostrado su utilidad en la exploración de la estructura del problema y la obtención de límites inferiores sólidos.[32].

En la tesis de maestría [33] se trató este tema en un proyecto donde aborda un problema de transporte comparando una solución hallada mediante la aplicación del Problema del Viajante con Ventanas de Tiempo (TSPTW) con la heurística secuencial denominada Heurístico de Inserción y así identificar el método más rentable y eficiente.

En la implementación de los métodos propuestos para resolver el problema, se encontró que el método exacto dio mejores soluciones que el heurístico, permitiendo hallar rutas más rentables en términos de la reducción de costos, distancias recorridas, tiempo en ruta, improductivo y de holgura.

De manera similar en el artículo [34] se aborda el problema de la recolección de biomasa aplicado al mencionado problema de enrutamiento de vehículos. Su objetivo es encontrar las rutas de costo mínimo para una flota de varios vehículos agrícolas. Utilizaron un enfoque híbrido en donde se combinan dos problemas, el problema de empaquetado (BPP) y el problema del viajante (TSP). El problema es encontrar el recorrido más corto que conecte todos los pueblos, resolviendo el BPP los puntos de recolección de biomasa se pueden asignar a los vehículos y resolviendo el TSP se puede establecer el orden del recorrido.

Mediante resultados experimentales se logró mostrar que al utilizar so-

luciones generadas por algoritmos genéricos se logran reducir las distancias totales recorridas significativamente en comparación a otras reglas de asignación comunes.

En el artículo [35] se plantea un MTSP para asignar tareas agrícolas a robots móviles y encontrar rutas óptimas. El objetivo es minimizar el tiempo total necesario para completar las tareas y los tiempos acumulativos de ejecución de los robots, considerando costos de viaje, maniobras y ejecución de tareas, así como la capacidad limitada de energía de los robots. El problema se formula como un problema de programación lineal entera (ILP) y se utiliza un grafo dirigido llamado "*grafo del campo*" para modelar campos de cultivo y un "*grafo de orientación*" para manejar los costos de giro en topologías de campo complejas. Se propone una formulación subóptima cuando el número de tareas agrícolas es mucho menor que el número de ubicaciones posibles en el campo, con lo que se logra reducir la complejidad computacional que ofrece un costo temporal cercano al óptimo en todos los casos, con la brecha de optimización relativa más baja en comparación con otros métodos.

El estudio [36] aborda la importancia de planificar rutas eficientes para vehículos en campos agrícolas. La distancia recorrida afecta directamente a aspectos como los costos de producción y la compactación del suelo debido al peso de la maquinaria agrícola. El objetivo es minimizar la distancia recorrida y, por lo tanto, el tiempo y el combustible consumido. Esto se asemeja al MTSP, donde se busca encontrar rutas más cortas que visiten ciertos puntos exactamente una vez. En la agricultura, se deben considerar otros factores, como el tamaño del tanque de agroquímicos, la cantidad de tratamiento necesaria según la infestación y la capacidad de los tanques. Esto convierte el problema en un Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidades (CVRP).

Finalmente en el artículo [37] se opta por un enfoque metaheurístico para resolver la planificación de rutas de vehículos con camiones llenos, en un contexto de retorno vacío. El modelo de resolución busca construir rutas óptimas

para los camioneros de regreso que sirvan a un subconjunto de productos disponibles en la red de transporte mientras aumentan las ganancias totales de los camioneros y respetan las limitaciones de disponibilidad y ventanas de tiempo. Para simplificar las complejas restricciones del problema, lo transformaron en una especie de am-TSPTW. Luego, en base a esta transformación, adaptaron una búsqueda tabú reactiva (RTS) para resolver instancias de gran tamaño del problema de manera eficiente.

4.3. Elección de la metodología de optimización

La problemática que se aborda en esta tesis se centra en optimizar el recorrido de una o más máquinas de pirólisis móvil dentro de un período de tiempo definido, teniendo en cuenta que estas máquinas no pueden ser trasladadas a ubicaciones donde no se haya realizado la cosecha. Después de analizar la revisión bibliográfica presentada previamente, se ha determinado que la metodología que mejor se adapta es la de plantear el problema como un Problema de Múltiples Viajantes con Ventanas de Tiempo (MTSPTW). El método de resolución que se desarrolla en el capítulo siguiente se basa en una Programación Lineal Entera Mixta (MILP, por sus siglas en inglés), ya que el problema es de pequeña escala. Como desafío adicional en la toma de decisiones, se debe definir el lugar al que se llevará el producto terminado del proceso de pirólisis.

CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDIO

El objetivo del modelo es minimizar los costos de traslado de la máquina de pirólisis, minimizando a su vez los costos de traslado del producto terminado. La zona de estudio fue el departamento de Rivera por ser una de las zonas de mayor área plantada. En este capítulo se engloba todo lo relacionado al modelado matemático del caso de estudio. Se presenta en detalle el objetivo, los parámetros y restricciones del modelo, así como una justificación de los datos utilizados. Finalmente se presentan los resultados obtenidos del mismo y se realiza un análisis de sensibilidad para comprender la estabilidad de los parámetros y un análisis de costos para estudiar la viabilidad de su implementación.

5.1. Presentación del modelo matemático

5.1.1. Descripción del modelo

Se utilizó un modelo matemático basado en TSP con algunos ajustes para la aplicación en la problemática planteada [31]. En la función objetivo se desprecian todos los costos fijos que no interfieren en la optimización del ruteo de la máquina. Dichos costos sí son tomados en cuenta en el análisis de costos detallado más adelante.

Se agrega una costo igual a la suma del período que se inicia la pirólisis en todos los lugares de cosecha para lograr que la máquina finalice su recorrido lo antes posible.

5.1.2. Conjuntos

En esta sección se definen los diferentes conjuntos utilizados en este modelo.

$I = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_1}\}$, sitios de cosecha donde se trasladará la máquina.

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_{n_2}\}$, horizonte de planificación, conjunto de períodos de tiempo donde cada p_i refiere a un mes.

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_{n_3}\}$, puntos de destino posibles para trasladar los productos obtenidos de la pirólisis.

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_{n_4}\}$, máquinas de pirólisis móvil.

5.1.3. Parámetros

En esta sección se definen los diferentes parámetros utilizados en este modelo.

- dl_{ij} : distancia entre los lugares de cosecha i y j , $i \in I$, $j \in I$
- dc_{ia} : distancia entre el lugar de cosecha i y el destino a , $i \in I$, $a \in A$
- pf_{ci} : período siguiente al que finaliza la cosecha del lugar de cosecha i , $i \in I$
- tp_i : tiempo de pirólisis en el lugar de cosecha i , $i \in I$
- $residuo_i$: cantidad de residuo en el lugar de cosecha i , $i \in I$
- $frac$: fracción de residuo que se transforma en producto comercializable
- cp : costo de realizar pirólisis en un período
- ctm : costo de traslado de la máquina de pirólisis
- $ctpt$: costo de traslado del producto terminado
- n : cantidad de lugares de cosecha
- maq : cantidad de máquinas disponibles para realizar pirólisis
- $periodo$: cantidad de períodos

5.1.4. Variables de decisión

x_{ijm} : variable binaria para indicar el traslado de la máquina de pirólisis m del lugar de cosecha i al lugar de cosecha j , $\{i, j\} \in I$, $m \in M$.

y_{im} : variable binaria para indicar la realización de pirólisis en el lugar de cosecha i con la máquina m , $i \in I$, $m \in M$.

s_i : variable entera positiva para indicar el período en que comienza la pirólisis en el lugar de cosecha i , $i \in I$.

z_{ia} : variable binaria utilizada para indicar el traslado del producto terminado del lugar de cosecha i al destino a , $i \in I$, $a \in A$.

u_{im} : variable entera positiva auxiliar que genera la secuencia de visita de la máquina m a los lugares de cosecha i , $i \in I$, $m \in M$.

5.1.5. Función objetivo

$$\begin{aligned} \min \sum_{m=1}^m \sum_{i=0}^i \left(\sum_{j=0}^j ctm \cdot dl_{ij} \cdot x_{ijm} + cp \cdot tp_i \right. \\ \left. + \sum_{a=1}^a ctpt \cdot dc_{ia} \cdot residuo_i \cdot frac \cdot z_{ia} \right) + \sum_{i=1}^i s_i \\ \forall i, j \in I, \forall a \in A. \end{aligned} \quad (5.1)$$

$\sum_{m=1}^m \sum_{i=0}^i \sum_{j=0}^j ctm \cdot dl_{ij} \cdot x_{ijm}$: costo de trasladar la máquina de pirólisis m del lugar de cosecha i al lugar de cosecha j .

$\sum_{m=1}^m \sum_{i=0}^i \sum_{j=0}^j cp \cdot tp_i$: costo de realizar pirólisis en el lugar de cosecha.

$\sum_{i=1}^i \sum_{a=1}^a ctpt \cdot dc_{ia} \cdot r_i \cdot frac \cdot z_{ia}$: costo de trasladar el producto terminado desde el lugar de cosecha i al destino a .

$\sum_{i=1}^i s_i$: penalización por demora en la finalización del recorrido de la máquina.

5.1.6. Restricciones

$$\sum_{i=1, i \neq j} \sum_m x_{ijm} = 1 \quad \forall j/j \neq 0 \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1, i \neq j} \sum_m x_{ijm} = 1 \quad \forall i/i \neq 0 \quad (5.3)$$

$$u_{im} - u_{jm} + n \cdot x_{ijm} \leq n - 1 \quad \forall i, j / i \neq j \quad i \geq 1 \quad j \geq 1 \quad (5.4)$$

$$\sum_{j \neq 0} x_{0jm} \leq 1 \quad \forall m \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \neq 0} x_{i0m} \leq 1 \quad \forall m \quad (5.6)$$

$$\sum_{i \neq j} x_{ijm} = \sum_{k \neq j} x_{jkm} \quad \forall m, j \quad (5.7)$$

$$s_i \geq pfc_i \quad \forall i \quad (5.8)$$

$$s_i + tp_i - H \cdot (1 - \sum_m x_{ijm}) \leq s_j \quad \forall i, j / j > 0 \quad i \neq 0 \quad j \neq i \quad (5.9)$$

$$s_i + tp_i \leq \text{periodo} \quad \forall i / i \neq 0 \quad (5.10)$$

$$\sum_{a=1} z_{ia} = 1 \quad \forall i \quad (5.11)$$

$$\sum_m y_{im} = 1 \quad \forall i/ i \neq 0 \quad (5.12)$$

$$\sum_{j \neq i} x_{ijm} = y_{im} \quad \forall m, i/ i \neq 0 \quad (5.13)$$

$$\sum_{i \neq j} x_{ijm} = y_{jm} \quad \forall m, j/ j \neq 0 \quad (5.14)$$

Las restricciones 5.2 y 5.3 imponen que una máquina puede trasladarse a un lugar de cosecha una única vez.

La restricción 5.4 asegura la ruptura de subcircuitos a través de una nueva variable de decisión u_i , que representan el orden de la secuencia en el que se visita el lugar de cosecha i .

Las restricciones 5.5, 5.6 imponen que cada máquina puede salir como máximo una vez del depósito.

La restricción 5.7 asegura que si una máquina llega al lugar de cosecha debe también salir de él.

La restricción 5.8 controla que la pirólisis se se realice a partir de un período posterior al fin de la cosecha en ese lugar.

La restricción 5.9 asegura que si la máquina se traslada del lugar i al lugar j ($x_{ijm} = 1$), el período en que se realiza pirólisis en el lugar i (s_i) más el tiempo en que se demora en hacer pirólisis allí (tp_i) sea menor al período en que se realiza pirólisis en el lugar j (s_j). Siendo H un parámetro auxiliar.

La restricción 5.10 impone que la pirólisis siempre se realice dentro del horizonte establecido.

La restricción 5.11 controla que todos los productos de pirólisis sean trasladados a un depósito.

La restricción 5.12 fuerza que todos los lugares de cosecha sean visitados por una única máquina.

Las restricciones 5.13, 5.14 obliga a que si la máquina m es trasladada del lugar de cosecha i al lugar de cosecha j ($x_{ijm} = 1$), en j se debe realizar pirólisis ($y_{jm} = 1$), excluyendo los depósitos.

5.2. Aplicación del modelo matemático

5.2.1. Máquina de pirólisis móvil a utilizar

Actualmente, el mercado de equipos móviles de pirólisis se encuentra en pleno desarrollo, lo cual implica que la oferta no sea demasiado amplia. Algunas de las opciones disponibles las proporciona la empresa holandesa Nettekenergy [38], que cuenta con propuestas de 2 y 10 toneladas de capacidad de procesamiento por día. Otra opción interesante es la presentada por la empresa asiática Beston [39]. Dicha máquina puede procesar entre 1 y 3 toneladas por día, pero no fue fabricada para utilizar residuos de cosecha forestal como materia prima, por lo que debió ser descartada. En última instancia se decidió utilizar el diseño propuesto por la empresa Nettekenergy para el estudio de caso, en su versión que procesa 10 toneladas de materia prima por día. El valor de capacidad se eligió tomando en cuenta los volúmenes calculados de residuo generado en los lugares de cosecha, estimando que se lograría más rentabilidad con una capacidad mayor.

Se trata de un diseño compacto y fácil de trasladar con un peso de 10 toneladas, como se puede ver en la figura 5.1. Incluye su propio sistema de enfriamiento y de alimentación, el cual requiere solamente de un operario que se encargue de llenar el silo de alimentación una vez al día. Trabaja en proceso continuo y no genera flujos de residuo.

La fracción generada de cada producto en peso del residuo procesado es la siguiente [38]:



Figura 5.1: Máquina de pirólisis comercializada por Nettenergy. [38]

- Biochar: 10 %
- Bioaceite: 25 %
- Vinagre de madera: 25 %
- Gas de síntesis: 40 %.

5.2.2. Localización de lugares de cosecha

Para la selección de los lugares de cosecha a utilizar se tomó como punto de partida el mapa forestal facilitado por el MGAP [8]. Allí se encuentra la distribución de las plantaciones de diferentes especies forestales en el territorio nacional, como se muestra en la figura 5.2.

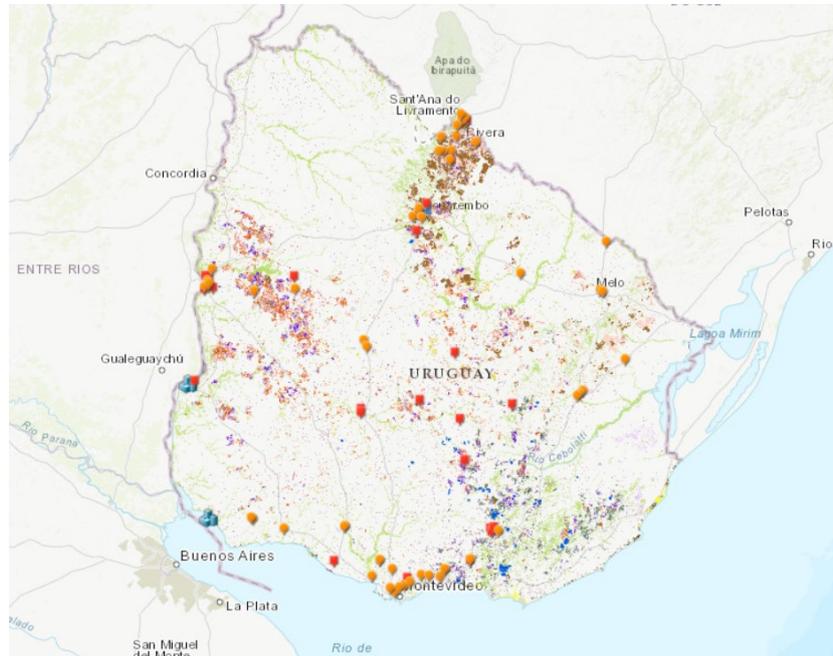


Figura 5.2: Geoportal web de MGAP [40]

Como un filtro inicial se seleccionaron como lugares de cosecha viables aquellas zonas donde las áreas plantadas promedian 1000 ha con el fin de asegurar una cantidad considerable de residuos forestales. Se seleccionaron al azar ocho lugares de cosecha situados en el departamento de Rivera, por ser el departamento con mayor superficie destinada a la actividad forestal. La cantidad de lugares de cosecha se determinó con el fin de mantener un equilibrio entre los tiempos de pirólisis en zonas de tanta forestación y el horizonte de estudio que es de 18 meses. Este proceso resultó en los datos plasmados en la tabla 5.1 donde se detallan las coordenadas de localización y el promedio de hectáreas plantadas. En la figura 5.3 muestra un diagrama de elaboración propia de la localización de los lugares de cosecha elegidos y la capital del departamento de Rivera.

Lugar de cosecha	Coordenadas	Hectáreas plantadas
1	-31.0923 , -55.768	418
2	-31.0873 , -55.3874	851
3	-31.2131, -55.5840	1.074
4	-31.2771 , -55.8554	737
5	-31.3119, -55.7177	631
6	-31.2753 , -55.4577	985
7	-31.2641, -55.3041	1.897
8	-31.4517 , -55.7408	787

Tabla 5.1: Coordenadas y hectáreas plantadas en cada lugar de cosecha

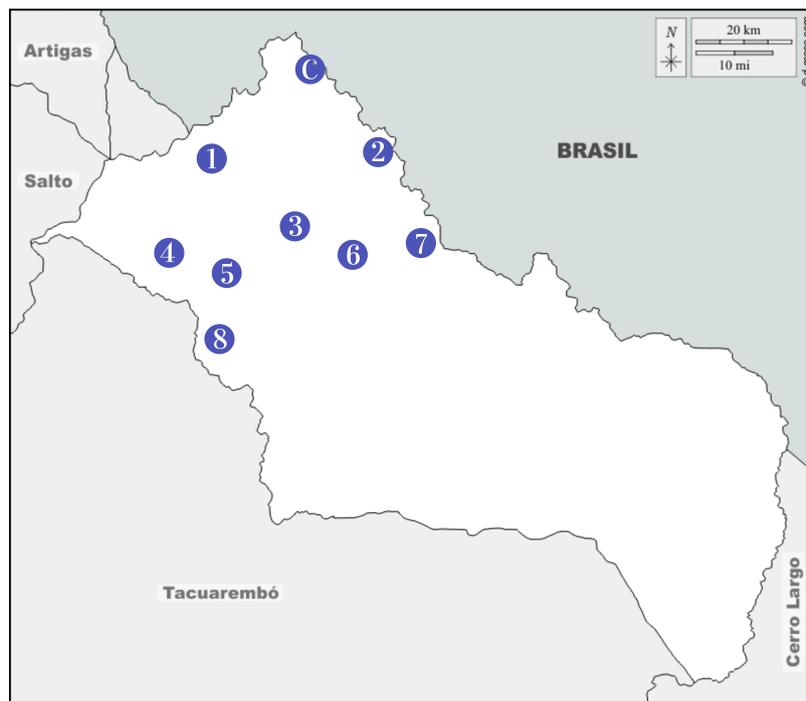


Figura 5.3: Localización de lugares de cosecha

Utilizando la herramienta de geolocalización de Google Maps se determinaron las distancias en km tanto de un lugar de cosecha a otro como de un lugar de cosecha a la capital. La matriz 5.2 muestra los valores obtenidos para cada par de lugares de cosecha.

	1	2	3	4	5	6	7	8	Rivera
1	0	79.2	34.1	29.3	37.6	63.1	89.6	83.6	37.9
2	79.2	0	75.7	103.6	81.9	54.8	27.4	114.1	36.5
3	34.1	75.7	0	41.9	20.2	41.7	86.1	65.0	44.9
4	29.3	103.6	41.9	0	43.1	80.7	114	65.9	72.7
5	37.6	81.9	20.2	43.1	0	40.8	92.3	53.1	51
6	63.1	54.8	41.7	80.7	40.8	0	43.3	76.1	74.4
7	89.6	27.4	86.1	114	92.3	43.3	0	103	47
8	83.6	114.1	65.0	65.9	53.1	76.1	103	0	103
Rivera	37.9	36.5	44.9	72.7	51	74.4	47	103	0

Tabla 5.2: Matriz de distancias en km de lugares de cosecha

5.2.3. Cálculo madera cosechada y residuo a procesar

La última cartografía entregada por MGAP [8] cuantificó una superficie forestada de 1.048.228 de hectáreas y 38.881 hectáreas cosechadas, en base a esta información se estimó que el 4% de las hectáreas forestadas es efectivamente cosechada en el año. La cantidad de hectáreas cosechadas en el caso de estudio es el producto de multiplicar la cantidad de hectáreas plantadas en cada lugar de cosecha 5.1 por el 4% calculado anteriormente.

Según los datos proporcionados por el INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) [41] en promedio se plantan 1000 árboles por hectárea para la producción de madera aserrada. Las plantaciones con destino aserrío requieren árboles de gran tamaño, por lo que es necesario realizar raleos para permitir su crecimiento. Finalmente al momento de la cosecha el promedio por hectárea es de 300 árboles, como se muestra en la imagen 5.4.

	Plantaciones para producir pulpa para papel	Plantaciones para producir madera aserrada	Plantaciones para producir energía
Número de árboles por hectárea (densidad)	1.300	1.000 al inicio 300 al momento de la cosecha	3.000
Trabajos de seguimiento en la plantación	Ninguno	Poda, Raleo	Ninguno
Edad de cosecha	10 años	25 años	8 -10 años

Figura 5.4: Especificación de número de árboles por hectárea según fin comercial [41].

El valor utilizado como peso promedio de un árbol fue de 678 kg resultado de la suma de los valores proporcionados por el MIEM (Ministerio de Industria Energía y Minería) de madera y residuos para a *Eucalyptus globulus* plantados para aserrío. [10].

En la tabla 5.3 se puede observar que el valor de madera cosechada en cada lugar es el resultado de multiplicar las hectáreas cosechadas, con la cantidad de árboles por hectáreas y el peso promedio de un árbol.

En este estudio se consideró como residuo potencialmente aprovechable las ramas y la corteza del árbol, que representan un 20 % en promedio del peso total del mismo (ver tabla 2.2). Debido a las podas realizadas previo a la cosecha, la imposibilidad física de recolectar el total del residuo y la necesidad de dejar en el terreno una parte del residuo para nutrir el suelo, se decidió utilizar un 10 % de este residuo aprovechable, lo que representa un 2 % del peso total del árbol. El valor final de residuo a procesar en la máquina de pirólisis es el resultado de multiplicar el peso de la madera cosechada por un 2 % , este resultado se desglosa por lugar de cosecha en la tabla 5.3.

En base a las cantidades finales de residuos a procesar se calculó la producción de los diferentes productos de pirólisis. Para este cálculo se utilizó el fraccionamiento mencionado en la sección 5.2.1. La fracción de gas no es tomada en cuenta ya que, como se mencionó anteriormente, es recirculada para alimentar a la máquina. Los valores finales se pueden ver detallados en

Lugar de cosecha	Hectáreas cosechadas	Madera cosechada (ton)	Residuos (ton)
1	17	3.401	68
2	34	6.926	139
3	43	8.735	175
4	29	5.999	120
5	25	5.137	103
6	39	8.014	160
7	76	15.434	309
8	31	6.400	128

Tabla 5.3: Valores finales de madera cosechada y residuo procesable

la tabla 5.4.

Lugar de cosecha	Biochar	Bioaceite	Vinagre de madera	Total
1	6.802	17.004	17.004	40.810
2	13.853	34.632	34.632	83.117
3	17.471	43.677	43.677	104.824
4	11.998	29.995	29.995	71.987
5	10.273	25.683	25.683	61.638
6	16.028	40.070	40.070	96.168
7	30.868	77.170	77.170	185.208
8	12.801	32.002	32.002	76.804

Tabla 5.4: Cantidad de producto terminado según lugar de cosecha, en kg

5.2.4. Tiempo de cosecha

Al tratarse de un estudio que no se basa en un problema particular, el plan de cosecha fue definido de forma aleatoria dentro de un rango preestablecido, en este caso de 1 a 12 períodos, donde cada período representa un mes. A cada lugar de cosecha se le asignó un número que representa el mes del año en que se realizará la cosecha. Si bien el horizonte de estudio es de 18 meses el plan de cosecha se redujo a 12 para que la pirólisis en todos los lugares definidos finalice dentro del período establecido.

Para definir el tiempo requerido de cosecha de cada lugar, se realizó un cálculo teniendo en cuenta el rendimiento de las máquinas cosechadores, la densidad y el volumen de madera. El rendimiento de una máquina cosechadora se estima en unos $5.000 \text{ m}^3/\text{mes}$. Por otro lado, la densidad de la madera cosechada varía según el tiempo que pasa desde el momento de la tala hasta el momento en que se la procesa. Para el valor de densidad se calculó el promedio entre 0 y 12 semanas, $0.717 \text{ ton}/\text{m}^3$ [42]. Obtenidos estos dos valores se pudo conseguir el valor de rendimiento de cosecha en unidades de masa, $3.585 \text{ ton}/\text{mes}$. Por último, se promedió que por plantación se utilizan dos máquinas para el proceso de cosecha.

A partir de estos datos se obtuvo el tiempo en meses que se debe dedicar en cada lugar de cosecha para cosechar la plantación 5.15, donde un mes equivale a 22 días laborales.

$$T_{\text{tiempo cosecha}} = \frac{\text{Madera cosechada}}{\text{Rendimiento} \cdot \text{Cant. máquinas}} \quad (5.15)$$

El detalle de los resultados de la ecuación 5.15 aplicada para cada lugar de cosecha se encuentra en la tabla 5.5. Todos los resultados fueron redondeados a números enteros.

Lugar de cosecha	Mes	Tiempo d cosecha
1	Abril	1
2	Agosto	1
3	Marzo	2
4	Mayo	1
5	Marzo	1
6	Enero	2
7	Mayo	3
8	Setiembre	1

Tabla 5.5: Meses que se necesitan para cosechar el lugar de cosecha

5.2.5. Plan de cosecha

Tanto la localización de lugares de cosecha como el cálculo de tiempo de cosecha sirvieron de base para construir el plan de cosecha. Se definió un escenario concreto para aplicar al modelo matemático y analizar los resultados del mismo. Sin embargo los lugares de cosecha y los tiempos pueden ser fácilmente modificados para ser aplicados en diferentes contextos.

Se definió un horizonte de estudio de 18 períodos. Cada lugar de cosecha está listo para cosechar al inicio del período y la pirólisis solo se puede iniciar una vez finalizada toda la cosecha del lugar. Se toma dentro de tiempo de cosecha también el tiempo de chipeado del residuo, despreciando el tiempo de traslado de la máquina de pirólisis entre los puntos de trabajo.

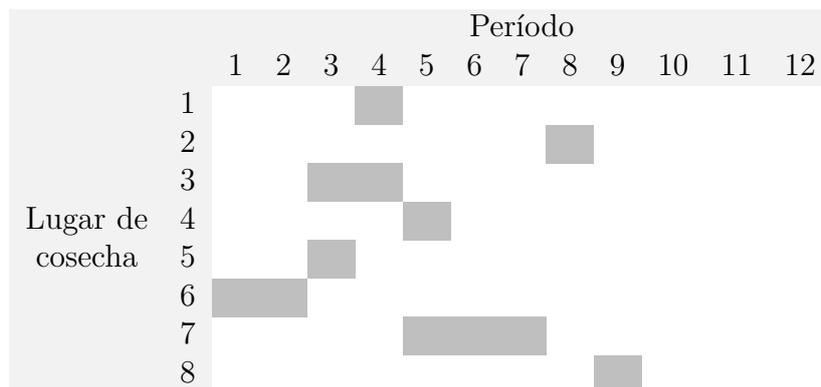


Tabla 5.6: Plan de cosecha de elaboración propia

El plan de cosecha se utilizó para establecer los valores del parámetro pf_{c_i} .

5.2.6. Tiempo de pirólisis

Se necesitó calcular cuánto tiempo le requeriría a la máquina de pirólisis procesar la cantidad de residuo calculada para cada lugar de cosecha.

Según el fabricante, la capacidad de la máquina seleccionada para realizar

pirólisis es de 10 ton/día [38]. Al igual que en el cálculo del tiempo de cosecha, para calcular el tiempo de pirólisis se consideran 22 días por mes.

De esta manera, el tiempo en meses que se necesita para realizar pirólisis en cada lugar de cosecha converge en la ecuación 5.16.

$$Tiempo\ pirólisis = \frac{Residuo}{Capacidad \cdot Días\ hábiles} \quad (5.16)$$

En la tabla 5.7 se detallan los resultados de la ecuación 5.16 aplicada para cada lugar de cosecha y su redondeo a mes completo:

Lugar de cosecha	Tiempo de pirólisis
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	2
8	1

Tabla 5.7: Meses que se necesitan para procesar el residuo del lugar de cosecha

Este resultado fue utilizado para definir los valores del parámetro anteriormente definido tp_i .

5.2.7. Costos asociados

Como se mencionó anteriormente se tomaron en cuenta tres costos a la hora de minimizar la función objetivo.

El costo de realizar la pirólisis refiere a la contratación de los dos empleados necesarios para manipular la máquina. Este costo abarca tanto el salario de cada uno, como los aportes patronales. Para el valor del salario se tomó el

monto de USD 550, tal como fue definido en el último consejo de salarios [43] para un peón especializado. En cuanto a los aportes patronales, se calcula un 7% del salario de cada empleado.

Por otro lado, los costos de traslado son los relacionados a traslados de producto terminado y de la maquinaria. Estos traslados son realizados por una empresa tercerizada que ofrece servicios de flete, cuyo costo se basa en la distancia recorrida y la cantidad de carga transportada, medida en toneladas. Los montos se tomaron de ITPC (Intergremial de Transporte Profesional de Carga Terrestre del Uruguay) [44].

La tabla 5.8 resume los costos utilizados en el modelo, los cuales representan las variables cp , ctm y $ctpt$, respectivamente.

Costos	Monto en USD	Unidad
Costos laborales	1.177	Mensual
Transporte máquina de pirólisis	0,44	ton/km
Transporte de producto terminado	0,30	ton/km

Tabla 5.8: Costos asociados

5.3. Análisis de resultados

Para la codificación del modelo se utilizó el lenguaje AMPL y se resolvió utilizando CPLEX Solver for AMPL, un aplicación de escritorio desarrollada por IBM. Se utilizó la versión 22.1.1. La aplicación fue instalada en un PC con sistema operativo Windows, un procesador AMD Ryzen 5 5600X 6-Core y un RAM de 32.0 GB.

Como se mencionó anteriormente, el modelo busca minimizar los costos de traslado de la máquina de pirólisis recorriendo todos los lugares de cosecha definidos una única vez. La minimización de los costos resultó en una solución óptima de USD 24.514. A efectos del proyecto el costo total del traslado de la máquina de pirólisis no es un valor clave, en contraparte, el orden de la secuencia de visita de la máquina a los diferentes lugares de cosecha es el

resultado fundamental para una correcta planificación.

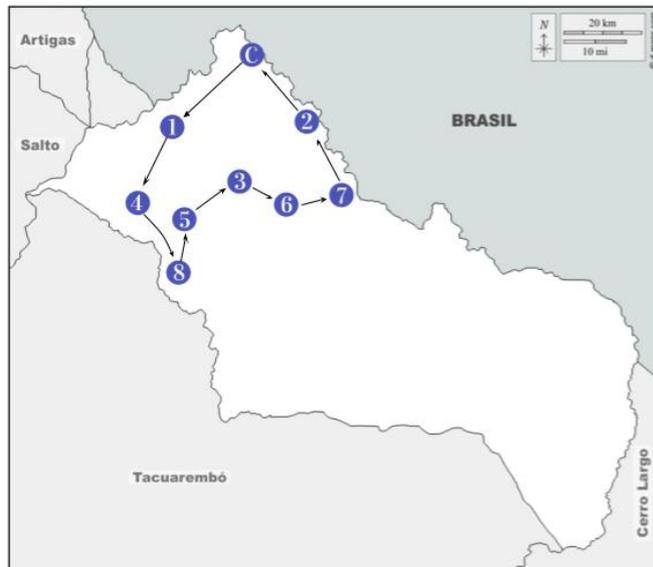


Figura 5.5: Traslado de máquina de pirólisis

La figura 5.5 es una representación simplificada del resultado obtenido del recorrido de la máquina, donde el nodo C representa el lugar 0, es decir, la capital Rivera. Dicho lugar es el origen y destino de la máquina de pirólisis y el lugar definido para el acopio del producto terminado. Esta información es brindada por la variable x_{ijm} como se muestra en la tabla 5.9

Variable x	Lugar de cosecha								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 5.9: Resultado de variable x

En este caso de estudio las variables z_{ia} e y_{im} siempre toman el valor 1 debido a que se trabaja con una única máquina y un solo lugar de destino de producto terminado. En las siguientes secciones se realizarán diferentes análisis donde se variarán estos parámetros. La variable s_{im} establece los períodos en los cuales se realiza pirólisis por la máquina para cada lugar de cosecha y la variable u_{im} el orden en que cada máquina recorre los lugares de cosecha. El resultado de las variables s_{im} y u_{im} se puede ver en detalle en la tabla 5.10. Para la presentación de estos resultados no se utilizó el subíndice m ya que resulta redundante al utilizarse una máquina.

Lugar de cosecha	Variable s	Variable u
0	0	1
1	5	1
2	16	8
3	12	5
4	6	2
5	11	4
6	13	6
7	14	7
8	10	3

Tabla 5.10: Resultado de variables s y u

La tabla 5.11 detalla el plan de cosecha junto con los períodos donde se realiza pirólisis. Al analizar la figura 5.3 se estima que los lugares de cosecha 1 y 2 serán los candidatos más probables para ser el inicio y el fin del recorrido, por ser los más cercanos al origen. La solución elige entonces, al punto 1 como inicio del recorrido debido a que es el primero que tiene el residuo disponible para procesar.

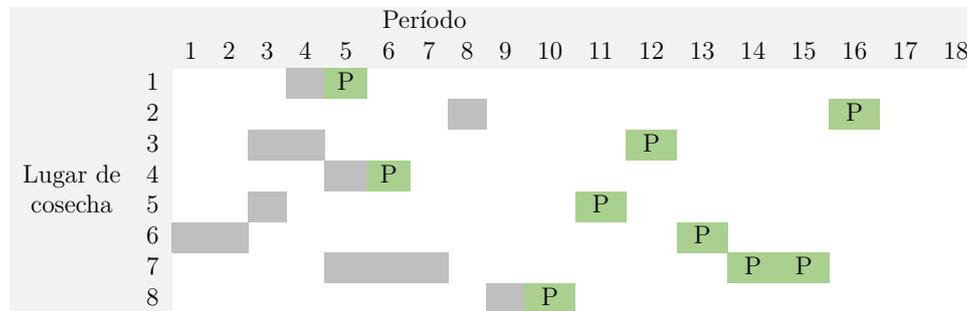


Tabla 5.11: Períodos donde se realiza pirólisis en cada lugar de cosecha

Se puede observar que un alto porcentaje de la pirólisis se realiza una vez que todos los puntos fueron cosechados, quedando 3 períodos libres una vez que la máquina comenzó a trabajar. En la función objetivo se adhirió un costo auxiliar para incentivar la finalización temprana del proyecto y conseguir que la máquina quede disponible lo antes posible para una nueva planificación. Sin embargo, es un costo mínimo en comparación a las decisiones de recorrido, es decir, el modelo va a priorizar la optimización de recorrido frente a realizar pirólisis más temprano. Esta prioridad se vió representada luego del período 6 en el lugar de cosecha 4, donde podría continuar haciendo pirólisis en los lugares 3, 5 y 6, pero opta por esperar la cosecha del lugar 8 con el fin de ahorrar en traslados posteriores. Los valores se pueden analizar con más detalle en la tabla 5.12, donde se puede ver que la diferencia en el costo de penalización es de apenas 5 dólares por tomar el primer recorrido, mientras que la opción 2 implica que la máquina se traslade 22 km extra, lo que genera un aumento en el costo de traslado de 52 dólares.

Recorrido	Costo de penalización por tiempo (USD)	Km recorridos	Costo de traslado (USD)
4-8-5-3	39	139	334
4-5-8-3	34	161	387
Diferencia	5	-22	-52,8

Tabla 5.12: Comparación de recorridos

En este modelo no se contempló la posibilidad de que la máquina salga del origen varias veces con el fin de minimizar los traslados de la misma y

evitar posibles daños, por tal motivo queda esperando en el próximo lugar de cosecha hasta tener materia prima disponible.

5.4. Validación del modelo

En esta sección se busca analizar el impacto en la factibilidad del modelo y en los tiempos de resolución al modificar la cantidad de las variables utilizadas en el mismo. Para poder ejecutar todas las instancias bajo las mismas condiciones se setearon los siguientes parámetros:

- Porcentaje de brecha de optimalidad (GAP) en el 1% lo que significa que el solver se detendrá cuando encuentre una solución que sea al menos de un 1% peor que la óptima conocida.
- TimeLimit=1800: se establece el límite de tiempo en segundos, en este caso, el tiempo máximo es de 1800 segundos, lo que equivale a 30 minutos.

Instancia	Lugares de cosecha	Máquinas	Períodos	Lugares de acopio	Iteraciones (MIP)	Variables	Restricciones	Función objetivo	Tiempo
1	5	1	12	1	19	40	67	18.819	0,046
2	5	1	18	1	50	41	68	18.746	0,047
3	10	1	18	1	96	131	233	62.901	0,062
4	10	1	18	2	96	151	243	48.580	0,062
5	10	2	12	1	88	219	341	134.636	0,046
6	10	2	12	2	88	239	351	105.994	0,062
7	10	2	18	1	84	271	366	134.661	0,062
8	10	2	18	2	84	291	376	105.421	0,062
9	10	3	12	1	158	324	464	201.442	0,078
10	10	3	12	2	158	344	474	158.478	0,062
11	10	3	18	1	106	401	489	200.600	0,063
12	10	3	18	2	106	421	499	157.636	0,047
13	15	1	24	1	230	271	498	79.788	0,094
14	15	1	24	2	1.808	301	513	59.705	0,250
15	15	2	12	1	1.164.830	534	760	160.738	9,687
16	15	2	12	2	504.233	564	775	120.435	4,906
17	15	2	18	1	317	556	771	160.258	0,172
18	15	2	18	2	147	586	786	129.584	0,125
19	15	2	24	1	164	556	771	157.504	0,079
20	15	2	24	2	292	586	786	117.884	0,078
21	15	3	12	1	30.025	741	1.001	254.250	1,438
22	15	3	12	2	12.697	771	1.016	193.654	0,610
23	15	3	18	1	195	826	1.029	252.975	0,110
24	15	3	18	2	195	856	1.044	193.545	0,094
25	15	3	24	1	325	826	1.029	252.742	0,093
26	15	3	24	2	325	856	1.044	193.313	0,109
27	20	2	18	1	594.870	941	1.326	199.261	8,657
28	20	2	18	2	209.713	981	1.346	157.113	5,813
29	20	2	24	1	770	941	1.326	198.638	0,156
30	20	2	24	2	770	981	1.346	156.894	0,141
31	20	3	18	1	1.343	1.401	1.769	296.993	0,219
32	20	3	18	2	1.343	1.441	1.789	234.377	0,219
33	20	3	24	1	987	1.401	1.769	296.910	0,172
34	20	3	24	2	987	1.441	1.789	234.294	0,156
35	30	2	18	1	-	-	-	No factible	-
36	30	2	18	2	-	-	-	No factible	-
37	30	2	24	1	628.110	2.011	2.886	256.435	25,906
38	30	2	24	2	1.001.090	2.071	2.916	208.867	31,640
39	30	3	18	1	719.970	3.001	3.849	383.774	97,360
40	30	3	18	2	1.907.170	3.061	3.879	311.589	793,860
41	30	3	24	1	1.944	3.001	3.849	382.028	0,406
42	30	3	24	2	1.944	3.061	3.879	310.398	0,390

Tabla 5.13: Detalle de instancias de iteración

Impacto del número de lugares de cosecha y máquinas: Cuando se aumenta el número de lugares de cosecha y máquinas en una instancia, se observa un aumento en la complejidad del problema. Esto se refleja en el número de variables y restricciones, así como en el tiempo necesario para resolverlo. Este aumento sugiere que la gestión de lugares de cosecha conlleva un impacto directo en la planificación y optimización. En la figura 5.6 se puede observar la tendencia para el caso concreto de un horizonte de 18 períodos, dos máquinas y un lugar de acopio.

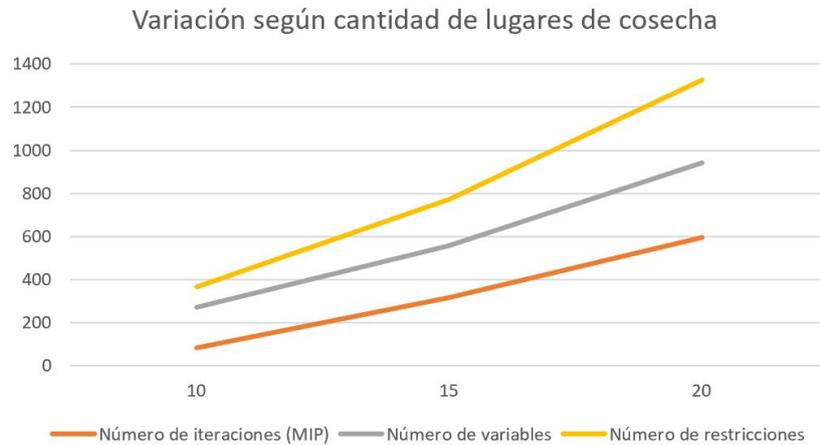


Figura 5.6: Variación del número de variables, restricciones e iteraciones para un horizonte de estudio de 18 períodos, dos máquinas y un lugar de acopio

Variación en la función objetivo: La variación en los valores de la función objetivo entre diferentes instancias sugiere que los resultados deseados pueden variar ampliamente según las circunstancias. Como se puede observar en la figura 5.7 la tendencia predominante de la función objetivo es a aumentar a medida que se incrementa la cantidad de lugares de cosecha. Se pueden observar mínimos locales debido a la incorporación de los segundos puntos de acopio, esto logra reducir los costos de traslado de producto terminado. También se observan reducciones de los costos cuando el horizonte de estudio es incrementado.



Figura 5.7: Variación de la función objetivo a lo largo de todas las instancias estudiadas.

Tiempo de ejecución: El tiempo requerido para resolver cada instancia puede variar significativamente. Instancias más complejas, con un mayor número de recursos o restricciones, generalmente requieren más tiempo para encontrar una solución óptima. Sin embargo se detecta un incremento en los tiempos de ejecución cuando la cantidad de períodos es menor al número de lugares de cosecha. Cuando la cantidad de caminos factibles son reducidos, los tiempos y la cantidad de iteraciones se incrementan notoriamente. Un mayor número de iteraciones sugiere que el algoritmo de optimización tuvo que realizar más cálculos para encontrar la solución óptima.

Factibilidad: Cuando se etiqueta una instancia como "No factible", significa que no se pudo encontrar una solución óptima dentro de los parámetros o restricciones establecidos. Estos casos suelen ser cuando el horizonte de estudio no es lo suficientemente amplio como para que las máquinas logren realizar el recorrido en el tiempo estipulado. Varias instancias se presentaron como no factible, por lo que se optó por incrementar el número de máquinas en casos donde la cantidad de lugares de cosecha eran grandes y los horizontes no muy amplios.

5.5. Análisis de sensibilidad

Para estudiar el comportamiento del modelo se variaron algunos de los parámetros según dos enfoques: uno referido a la cantidad de máquinas disponibles y otro a la cantidad de períodos que componen el horizonte de estudio, con el fin de investigar el comportamiento del modelo para realidades más ambiciosas. Además, se generó una nueva instancia con el caso inicial modificando la función objetivo para profundizar la explicación de la penalización por atrasar el inicio y el fin del recorrido.

Variación 1: cantidad de máquinas disponibles

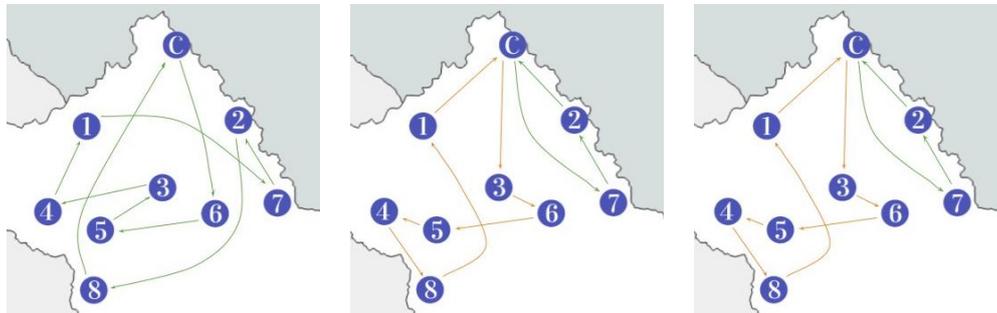
Se tomaron como conjuntos base: la cantidad de lugares de cosecha, el horizonte de estudio y los lugares de acopio, según se muestra en la tabla 5.14.

	Valor
Lugares de cosecha	8
Horizonte de estudio	12
Lugares de acopio	1

Tabla 5.14: Conjuntos fijos en el caso de sensibilidad

El modelo planteado en esta tesis permite incrementar la cantidad de máquinas que se pueden utilizar en el proceso. En la figura 5.8 se muestran los diferentes recorridos que devuelve el modelo según la cantidad de máquinas disponibles. La utilización de dos máquinas permite paralelizar el proceso de pirólisis, lo que le habilita comenzar el recorrido más tarde que el caso donde sólo se utiliza una máquina, como se puede observar en las tablas 5.15 y 5.16.

El incremento en el número de máquinas no es lineal con el ahorro, esto se puede observar en la figura 5.8(c). Se encontraban disponibles tres máquinas, sin embargo, el modelo dispone solamente de dos de ellas. A partir de esto se puede deducir que la utilización de maquinaria extra no siempre supone un



(a) Recorrido con una máquina (b) Recorrido con dos máquinas (c) Recorrido con tres máquinas

Figura 5.8: Análisis de impacto por la variación en la cantidad de máquinas en un horizonte de 12 períodos con un único lugar de acopio

ahorro en el costo final debido al costo de traslado desde la misma. A modo de ejemplo, trasladar la máquina del origen al punto 1 es más costoso que trasladarla desde el lugar 5 al lugar de cosecha número 1.

Se observó también con este escenario que la problemática planteada originalmente puede desarrollarse para un horizonte de 12 períodos en lugar de 18. Al comparar la figura 5.8(a) con el recorrido original (5.8) se puede ver como la holgura en el tiempo le permite al modelo en este último realizar un recorrido más óptimo en términos de minimización de distancias a recorrer. Logrando una costo minimizado de USD 25.334 el aumento es solamente un 3.3%. Esto podría resultar un punto a valorar según las prioridades de quien vaya a aplicar el modelo, según se prefiera completar el proceso antes o generar ahorros aunque sean bajos.

En las tablas 5.15 y 5.16 se puede deducir que al utilizar un número mayor de máquinas no solo se reducen los tiempos del proceso sino que también se compactan los períodos del recorrido. Cuando el modelo tiene 2 máquinas disponibles inicia el recorrido dos períodos más tarde lo que le permite optimizar las distancias recorridas.

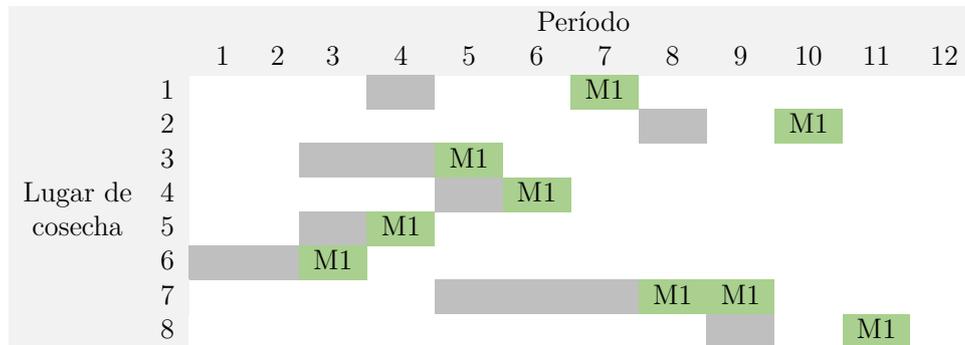


Tabla 5.15: Períodos donde se realiza pirólisis en cada lugar de cosecha por una máquina

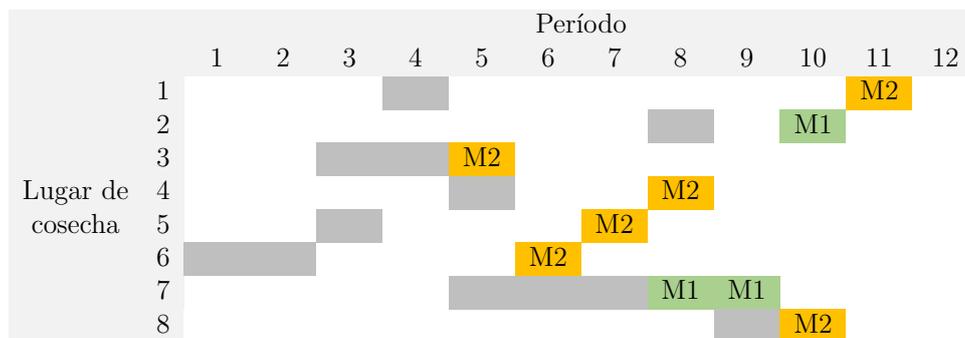


Tabla 5.16: Períodos donde se realiza pirólisis en cada lugar de cosecha por dos máquinas

Variación 2: cantidad de períodos que componen el horizonte de estudio

Aumentar los lugares de cosecha no solo conlleva un incremento en la cantidad de iteraciones necesarias para alcanzar una solución óptima. En varios casos también implica incrementar la cantidad de máquinas para poder obtener una solución factible. Por este motivo, para este análisis de sensibilidad se utilizan dos máquinas de pirólisis.

Se tomaron como conjuntos base: el número de máquinas, los lugares de cosecha y los lugares de acopio, según se muestra en la tabla 5.17.

	Valor
Número de máquinas	2
Lugares de cosecha	15
Lugares de acopio	1

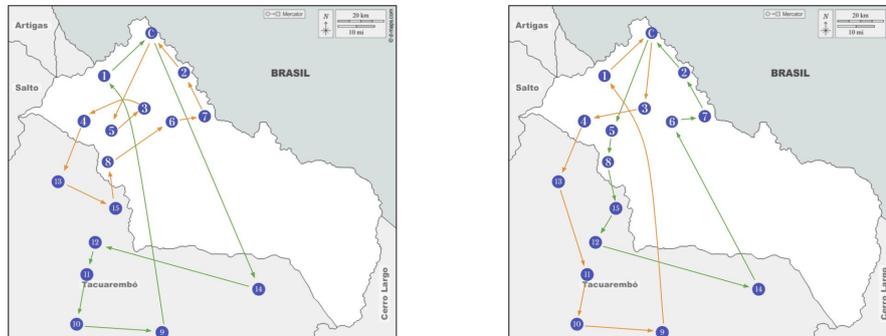
Tabla 5.17: Conjuntos fijos en el caso de sensibilidad

Previo a visualizar los resultados, se tenía como hipótesis que las máquinas realizarían dos sub-circuitos bastante independientes, donde una de ellas recorrería los puntos más alejados y la otra los más cercanos. Esto se puede observar claramente en la imagen 5.9(a), sin embargo, en la imagen 5.9(b) los recorridos que realizan no son tan seccionados pero de todas formas continua utilizando el criterio antes mencionado.

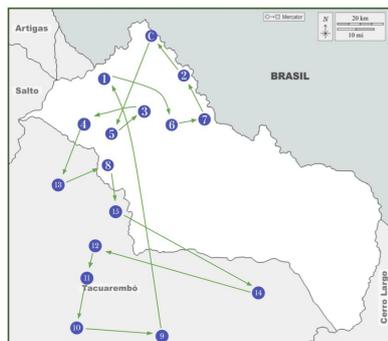
Al comparar las figuras 5.9(a) y 5.9(b) se puede notar como al contar con más tiempo disponible, el modelo realiza recorridos menos entrecruzados. Dicho de otra manera, al tener menos tiempo para culminar todas las visitas, el modelo no puede optar por esperar para continuar el recorrido con el lugar de cosechas más cercano, lo cual favorece a la culminación temprana pero no a la minimización de costos por distancias. Esto se visualiza claramente comparando las funciones objetivo, donde el costo final de 5.9(a) es USD 222.240 y de 5.9(b) es USD 222.093. En este caso el ahorro resulta insignificante, pero a efectos del modelo sigue siendo una solución optimizada.

Cuando los períodos se incrementan notoriamente, el modelo no considera necesario utilizar más de una máquina, ya que con el tiempo disponible logra recorrer todos los lugares de cosecha. Un ejemplo de esto se observa en la figura 5.9(c) donde la totalidad del circuito lo realiza una única máquina de pirólisis. Al analizar el resultado de la función objetivo se detecta nuevamente una reducción del costo a USD 221.854. La distribución en el tiempo de este caso se ve en la tabla 5.20.

En las tablas 5.18 , 5.19 y 5.20 se detallan los períodos en que se realiza pirólisis en los distintos lugares de cosecha. Al comparar las mismas se vuelve a detectar que el aumento en la cantidad de períodos permite al modelo optar



(a) Recorrido de 15 puntos con 2 máquinas en 14 períodos
 (b) Recorrido de 15 puntos con 2 máquinas en 18 períodos



(c) Recorrido de 15 puntos con 2 máquinas en 24 períodos

Figura 5.9: Análisis de impacto por la variación en la cantidad de períodos que componen el horizonte de estudio para un número fijo de lugares de cosecha y de máquinas.

por un camino más óptimo. Para el caso de 14 períodos ninguna máquina presenta tiempo ocioso. No obstante, incrementando 4 períodos el horizonte de estudio se finalizan los recorridos dos períodos más tarde pero la máquina 1 no opera durante dos períodos esperando poder trasladarse a un lugar más óptimo en relación a costos de distancia.

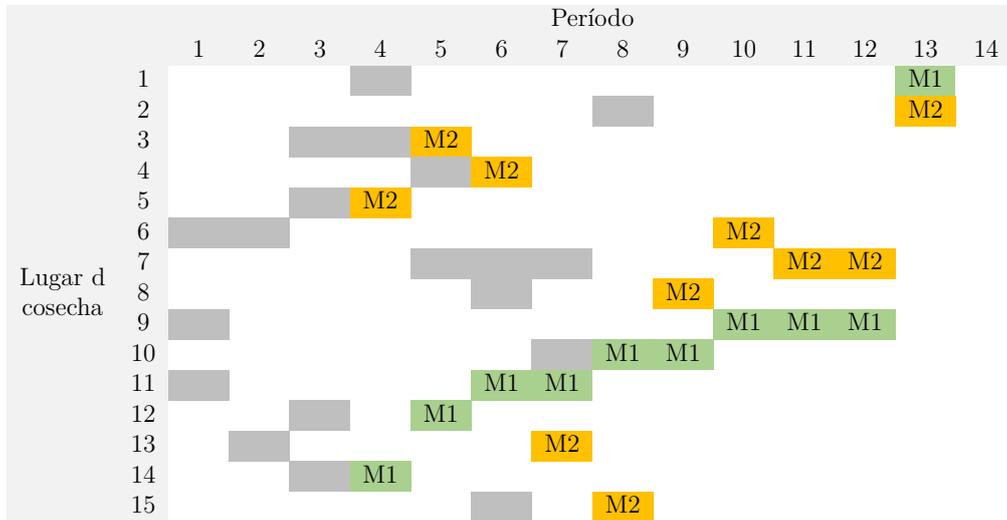


Tabla 5.18: Períodos donde se realiza pirólisis por cada máquina en 14 períodos definidos como horizonte de estudio

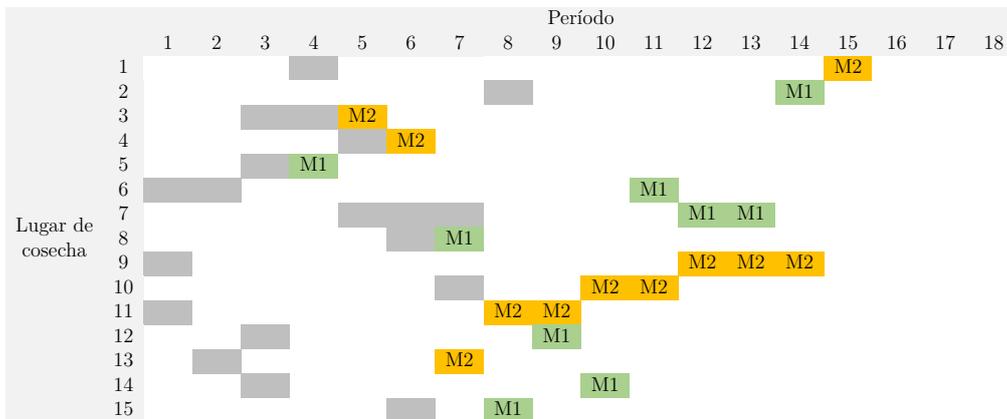


Tabla 5.19: Períodos donde se realiza pirólisis por cada máquina en 18 períodos definidos como horizonte de estudio

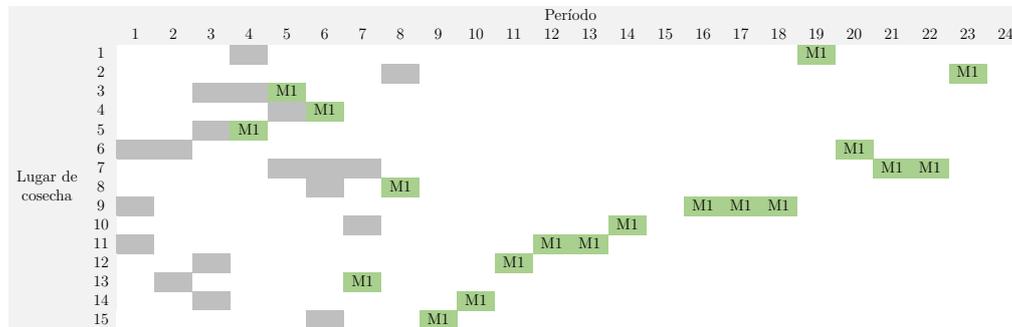


Tabla 5.20: Períodos donde se realiza pirólisis por cada máquina en 24 períodos definidos como horizonte de estudio

Variación 3: cambio de parámetros según objetivo final

El resultado que se pretende obtener del modelo se puede adaptar a los objetivos de quién lo utiliza. Como se mostró en la sección 5.3, por como está planteado el modelo, siempre se va a priorizar reducir las distancias recorridas frente a adelantar la visita de los lugares que quedan por recorrer, debido al peso que tiene cada uno en los costos. No obstante, esto se puede modificar si la penalización de tiempo se incrementa. En la figura 5.10 se muestra el recorrido de la máquina penalizando al retraso con un valor mayor al original. Esto se consigue multiplicando el último término de la función objetivo por el valor de la distancia más grande entre los lugares de cosecha, para que el costo de traslado sea menor al costo de realizar pirólisis en un período avanzado.

En la tabla 5.21 se detalla el plan de cosecha original junto con la nueva solución. Se puede observar que la máquina comienza su recorrido en el período 3, el primer período disponible para hacer pirólisis. Si lo se compara con el caso de estudio original, el mismo inicia en el período 5 porque prioriza minimizar distancias. Es notorio también, que la máquina en este caso logra finalizar todo el recorrido en el menor tiempo posible que son nueve períodos.

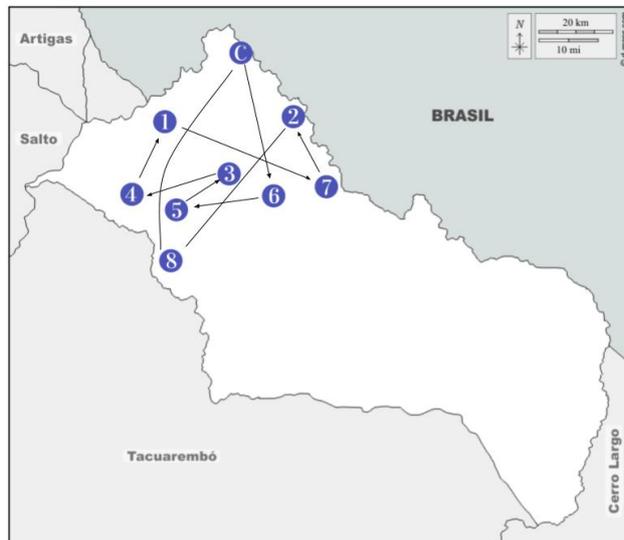


Figura 5.10: Recorrido de una máquina por 8 lugares de cosecha en un horizonte de 18 períodos, priorizando la finalización temprana

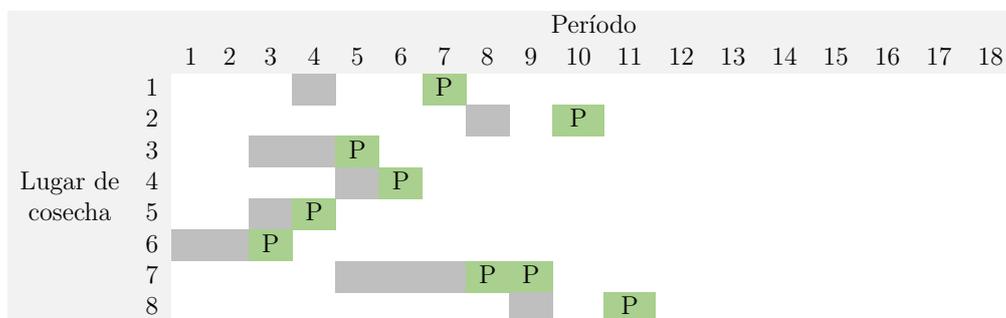


Tabla 5.21: Períodos donde se realiza pirólisis en cada lugar de cosecha

5.6. Análisis de costos

Para el caso de estudio se realizó un análisis de viabilidad y rentabilidad económica donde se pretende evaluar que tan factible es la utilización de la máquina en Uruguay. La recolección de datos se hizo mediante la consulta de páginas de compras web y consultas a fabricantes.

Los costos de inversión inicial detallados en la tabla 5.22 refieren a una máquina de pirólisis rápida móvil, una máquina chipeadora [45] que permita la reducción del residuo a los estándares requeridos y un generador de gas [46] que permitirá al proceso de pirólisis ser prácticamente autosuficiente.

Inversión	Monto en USD
Máquina pirólisis rápida	700.000
Chipeadora	2.600
Generador de gas	20.000
Total inversión	722.600

Tabla 5.22: Costo de la compra de maquinaria

Los costos relacionados al tratamiento del residuo y la venta de los productos obtenidos a través de la pirólisis fueron clasificados en tres categorías principales: arrendamiento, transporte y costos laborales, tal como se muestra en la tabla 5.23.

Por un lado, se toma en cuenta el arrendamiento de un depósito en la capital de Rivera, destinado al almacenamiento del producto terminado, este costo comienza a regir desde el primer mes en que se traslada producto terminado al almacén [47].

Por otro lado, dentro de los costos de transporte se incluyen los costos relacionados con los traslados del producto terminado y de la maquinaria, ya especificados en la sección 5.2.7.

Por último se encuentran los costos laborales, también detallados en la sección 5.2.7. A efectos del análisis de flujo de fondos los costos laborales solo se contemplaron en los meses en que la máquina de pirólisis se encontró en funcionamiento.

Costos	Monto en USD	Unidad
Arrendamiento de depósito	700	Mensual
Transporte de producto terminado	0,3	ton/km
Transporte máquina de pirólisis	0,44	ton/km
Costos laborales	1.177	Mensual

Tabla 5.23: Costos del proyecto

Es importante destacar que no se tuvieron en cuenta algunos costos complementarios, como la compra de tanques para el almacenamiento, el transporte del producto terminado a los puntos de venta, el combustible necesario para la máquina chipeadora o el arranque de la máquina de pirólisis, así como cualquier otro gasto imprevisto que pueda surgir. Estos aspectos quedan fuera del alcance de este proyecto de investigación.

Como beneficio del proyecto se contempla la venta de la totalidad de los productos de pirólisis. Para cada mes se calcula el total de ingresos como la cantidad de residuos del lugar de cosecha por la fracción del producto 5.2.1 y por el precio del mismo. El dato de precio de venta del biochar se obtuvo de [48] y los de bio-oil y vinagre de madera en [49] y se detallan en la tabla 5.24.

Producto	Monto en USD/kg
Biochar	1
Bio-oil	0,19
Vinagre de madera	1,27

Tabla 5.24: Precios de venta de productos de pirólisis

Se determinó la depreciación de la inversión de las tres máquinas, estimando que cuentan con una vida útil de 5 años siendo una aproximación conservadora. Fue calculada como el monto total que se paga por cada máquina dividido entre los 60 meses que componen los 5 años y, a partir de esto, se determinó la depreciación acumulada para cada período. Luego, para calcular el valor residual contable se restó la depreciación acumulada al monto de la inversión en el período 18, como se detalla en la tabla 5.25.

		Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes...	Mes 18
Máquina de pirólisis	Inversión total	700.000	700.000	700.000	...	700.000
	Depreciación	11.667	11.667	11.667	...	11.667
	Depreciación acumulada	11.667	23.333	35.000	...	210.000
	Valor residual contable	688.333	676.667	665.000	...	490.000
Chipeadora	Inversión total	2.600	2.600	2.600	...	2.600
	Depreciación	43	43	43	...	43
	Depreciación acumulada	43	87	130	...	780
	Valor residual contable	2.557	2.513	2.470	...	1.820
Generador de gas	Inversión Total	20.000	20.000	20.000	...	20.000
	Depreciación	333	333	333	...	333
	Depreciación acumulada	333	667	1.000	...	6.000
	Valor residual contable	19.667	19.333	19.000	...	14.000

Tabla 5.25: Depreciación de la inversión

Se decidió consolidar los períodos en trimestres para conseguir un flujo de fondos más compacto y facilitar el análisis. Partiendo de los datos recolectados y calculados se construyó el flujo de fondos del proyecto, ver tabla 5.26, y su respectivo cálculo de Valor actual para cada trimestre.

Flujo de Fondo del Proyecto	Trim 0	Trim 1	Trim 2	Trim 3	Trim 4	Trim 5	Trim 6
Beneficios Gravados por Impuestos	0	27.729	0	59.803	69.171	20.433	20.433
Egresos Fijos Gravados por Impuestos	0	1.400	2.100	2.100	2.100	2.100	2.100
Egresos Variables Gravados por Impuestos	0	4.542	174	8.507	8.420	2.173	2.173
Gastos no desembolsables	36.130	36.130	36.130	36.130	36.130	36.130	36.130
Utilidad antes de impuestos	-36.130	-14.342	-38.404	13.066	22.522	-19.970	-19.970
Impuestos a las ganancias	0	0	0	3.266	5.630	0	0
Utilidad después de impuestos	-36.130	-14.342	-38.404	9.800	16.892	-19.970	-19.970
Ajuste por gastos no desembolsables	36.130	36.130	36.130	36.130	36.130	36.130	36.130
Beneficios No Gravados por Impuestos							
Egresos No Gravados por Impuestos							
Valor de Rec. Act. Fijos (Valor de Deshecho)							505.820
Valor de Recupero Capital de Trabajo							
Inversión	722.600	0	0	0	0	0	0
Flujo de fondo del proyecto	-722.600	0	21.788	-2.274	45.930	53.022	521.980

Tabla 5.26: Flujo de fondos del proyecto

La viabilidad económica del proyecto se analiza en base a un horizonte de estudio de 6 trimestres. Como se puede observar en la tabla 5.26 el flujo de fondo de todos los trimestres en los que se realiza pirólisis es positivo, lo que implica que las ganancias de la venta del producto de pirólisis supera a los costos operativos. Sin embargo si se realiza un análisis financiero para determinar si la inversión es conveniente para generar ganancias, el panorama es diferente.

Se utilizó una tasa de descuento del 4,26 %, valor basado en el análisis de [49]. Para analizar la rentabilidad del proyecto se hallaron los valores de VAN (Valor Actual Neto) y TIR (Tasa Interna de Retorno), ver tabla 5.27. El primero es un indicador de rentabilidad, el cual establece que el proyecto generará ganancias para valores mayores a 0 y pérdidas para valores menores a 0. Para el caso presentado el valor del VAN termina siendo de USD -216.258, por lo cual el proyecto generará pérdidas. En tanto la TIR, representa la tasa de descuento para la cual el VAN es 0, es decir no genera ni pérdidas ni ganancias. Para el proyecto la TIR tiene un valor de -2 %, lo cual contribuye a la conclusión de que el proyecto no es financieramente rentable.

Tasa de descuento	4,26 %
VAN (USD)	-216.258
TIR	-2 %

Tabla 5.27: Resultados financieros del flujo de fondos

Al ser valores generados en todo un ejercicio financiero, es claro que hay numerosos factores que generan y afectan este resultado de pérdidas. Se consideró interesante realizar un análisis de sensibilidad de algunos de estos factores para vislumbrar tanto el impacto que tienen en la rentabilidad, como en el efecto de su variabilidad.

Escenario 1

Se puede apreciar en la tabla 5.28 el impacto en el Valor Actual Neto del proyecto cuando se varía la inversión inicial y el precio de venta del producto terminado. Una variación de la inversión inicial es factible debido a movimientos del mercado o negociaciones con los proveedores, incluso se podría reducir generando convenios con la universidad para su desarrollo. El precio de venta del producto terminado también se encuentra atado al mercado, por lo que es importante analizar cómo impacta su fluctuación en el análisis financiero del proyecto.

La reducción de un 40 % en la inversión inicial muestra como resultado un VAN positivo para cualquier variación del precio de venta. Con una reducción del 20 % de la inversión no se consigue un VAN positivo pero sí genera una gran aproximación un valor favorable, lo que demuestra que la inversión inicial es una variable clave en este proyecto.

			PRECIO DE VENTA				
			60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
			1,42	2,37	2,96	3,55	4,14
INV. INICIAL	60 %	433.560	20.845	48.484	72.782	97.078	121.376
	80 %	578.080	-123.675	-96.036	-71.738	-47.442	-23.144
	100 %	722.600	-268.195	-240.556	-216.258	-191.962	-167.664
	120 %	867.120	-412.715	-385.076	-360.778	-336.482	-312.184
	140 %	1.011.640	-557.235	-529.596	-505.298	-481.002	-456.704

Tabla 5.28: Escenario 1 - Afectación del VAN variando el precio de venta y la inversión inicial

Escenario 2

En este escenario se busca analizar el impacto de la variación de los gastos operativos y del precio de venta del producto terminado, como se puede observar en la tabla 5.29.

Cabe destacar como los gastos operativos generan variaciones muy peque-

ñas en el VAN en comparación al impacto del precio de venta. Una variación del 20 % de los gastos operativos tiene un impacto aproximado de un 2 % en el VAN, mientras que la misma variación en el precio de venta tiene un impacto aproximado del 11 %. Con esto se puede deducir que los gastos operativos en el proyecto no son significativos.

			PRECIO DE VENTA				
			60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
			1,18	1,97	2,46	2,95	3,44
GASTOS OP.	60 %	20.169	-256.869	-230.982	-206.684	-182.387	-158.089
	80 %	26.892	-262.532	-235.770	-211.472	-187.174	-162.877
	100 %	33.615	-268.195	-240.556	-216.258	-191.962	-167.664
	120 %	40.338	-273.859	-245.559	-221.046	-196.748	-172.451
	140 %	47.061	-279.522	-250.795	-225.833	-201.536	-177.238

Tabla 5.29: Escenario 2 - Afectación del VAN variando el de precio de venta y los gastos operativos

Escenario 3

En el siguiente escenario se analiza la variación del VAN en función de la inversión inicial y la tasa de descuento. La tasa de descuento es un valor que está vinculado a la inflación del país, por lo que puede variar a lo largo del proyecto. Este escenario devuelve un resultado similar al de variar el precio de venta de los productos. Incluso un cambio positivo en la tasa de descuento, es decir, una tasa de descuento menor, no consigue un VAN positivo para la inversión inicial original. También vuelve a confirmarse la importancia del descenso de la inversión para generar rentabilidad con el panorama del caso de estudio. La variación según estos parámetros se ve reflejada en la tabla 5.30.

			TASA DE DESCUENTO				
			60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
			2,56 %	3,41 %	4,26 %	5,11 %	5,96 %
INV. INICIAL	60 %	433.560	121.931	96.672	72.782	50.177	28.778
	80 %	578.080	-22.589	-47.848	-71.738	-94.343	-115.742
	100 %	722.600	-167.109	-192.368	-216.258	-238.863	-260.262
	120 %	867.120	-311.629	-336.888	-360.778	-383.383	-404.782
	140 %	1.011.640	-456.149	-481.408	-505.298	-527.903	-549.302

Tabla 5.30: Escenario 3 - Afectación del VAN variando la tasa de descuento y la inversión inicial

Escenario 4

Por último se analizaron los resultados de variar la inversión inicial contra el aumento de disponibilidad de materia prima, lo que repercute directamente en las ganancias ya que a efectos de este análisis todo lo que se produce se vende. Como se determinó en la sección 5.3 la máquina tiene tiempo ocioso, por lo cual dentro del período de estudio determinado sería posible procesar más residuos agregando más lugares de cosecha o ampliando las hectáreas cosechadas. En la tabla 5.31 se observa que un aumento del 40 % en la materia prima disponible para procesar implicaría un aumento de más del 20 % del VAN. Si bien el residuo no es un bien infinito, es posible mejorar las perspectivas del proyecto si se maximiza, dentro de las posibilidades, el uso de la máquina de pirólisis evitando tiempos sin uso.

			MATERIA PRIMA				
			100 %	110 %	120 %	130 %	140 %
			1.200.928	1.321.021	1.441.114	1.561.206	1.681.299
INV. INICIAL	60 %	433.560	72.782	84.092	95.403	106.714	118.026
	80 %	578.080	-71.738	-60.428	-49.117	-37.806	-26.494
	100 %	722.600	-216.258	-204.948	-193.637	-182.326	-171.014
	120 %	867.120	-360.778	-349.468	-338.157	-326.846	-315.534
	140 %	1.011.640	-505.298	-493.988	-482.677	-471.366	-460.054

Tabla 5.31: Escenario 4 - Afectación del VAN variando la cantidad de materia prima y la inversión inicial

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

A lo largo de esta tesis se abordó un problema de optimización de procesamiento de residuos forestales desde una óptica diferente a la habitual para el país. Como conclusión general se considera que se logró encontrar una alternativa interesante para el problema planteado. La investigación se centró en una herramienta innovadora capaz de abordar uno de los principales obstáculos para la utilización de estos residuos: los altos costos de transporte. Esta herramienta representa un nuevo enfoque en la valorización de la biomasa, que como es mencionado anteriormente, no se limita solamente a residuos de la cosecha forestal, sino que también puede aplicarse a otros insumos, como plásticos, neumáticos y caucho. La máquina estudiada se distingue por su versatilidad de localización, su funcionamiento prácticamente autónomo y la capacidad de generar tres productos diferentes para ser comercializados.

Para la optimización del transporte de la máquina, se adaptó con éxito el Problema del Viajante con ventanas de tiempo a la situación específica. El

problema planteado es complejo desde el punto de vista computacional debido a su naturaleza altamente combinatoria, por lo que fueron utilizadas diversos solvers de programación lineal para poder abordarlo. Inicialmente, se intentó resolver utilizando GLPK, pero al superar los ocho frentes de cosecha y los doce períodos, el tiempo de resolución superó los 120 minutos. Por lo tanto, se optó por cambiar por AMPL/CPLEX, donde se logró resolver casos con hasta once frentes de cosecha y dieciocho períodos en cuestión de segundos. Sin embargo, en el alcance del modelo donde se corrieron instancias con un gran número de variables, CPLEX ya no fue lo suficientemente veloz, por lo que se pasó a utilizar Gurobi. Para este último se añadieron dos limitantes: que el tiempo de resolución no supere los treinta minutos y un porcentaje de brecha de optimalidad de 1 %.

Referente a la evaluación económica y financiera, se concluyó que reducir la inversión inicial es fundamental para lograr tener un proyecto rentable. Se observó que, con una reducción del 40 % en la inversión inicial se logra obtener un VAN positivo. Tomando en cuenta los montos que componen esta inversión, el mayor impacto es el de la compra de la máquina de pirólisis. Esto en sí, no resulta un escenario preocupante si se toma en cuenta que es un recurso muy poco desarrollado hoy en día. Se estima que es posible que en los próximos años aparezcan nuevos proveedores que aumenten las ofertas disponibles y a consecuencia de ello, se reduzca su precio. También se debe tomar en cuenta que la evaluación se llevó a cabo para un lapso de un año y medio. Sabiendo que el tiempo que se estimó como vida útil de la máquina fueron 5 años, queda bastante holgura como para realizar un proyecto más extenso y volver a evaluar si los beneficios compensan la elevada suma de inversión. Es importante resaltar que existen otros factores que podrían influir en la rentabilidad del proyecto a una menor escala, como por ejemplo: aumentar la cantidad de residuos a procesar mediante la expansión de las áreas de cosecha, la recolección de un mayor porcentaje de residuos por lugar de cosecha o procesar otros residuos para obtención de producto o incluso para su destrucción. Un punto importante que se destaca de la evaluación es que para los trimestres donde se realiza pirólisis, el flujo de

caja es siempre positivo, es decir, que los beneficios siempre superan a los gastos operativos.

Trabajos futuros

Existen pequeños cambios que se le pueden realizar al modelo planteado que permiten una suerte de personalización del mismo según el objetivo propuesto. Si la aplicación del modelo tuviera como objetivo reducir los costos, se puede utilizar tal cual fue planteada en la sección 5.1.5. No obstante, si se desea priorizar la culminación temprana del recorrido el ajuste sería sencillo. Consistiría en agregar un parámetro auxiliar lo suficientemente grande que al ser multiplicado por el factor de penalización por demora, aporte en la función objetivo un costo considerable. De esta manera, el retraso adquiere un costo ficticio que logra competir contra los costos de traslado. Con el cambio planteado, la optimización no estará enfocada solamente en la minimización de distancias recorridas, sino también en la conclusión temprana del recorrido.

Como trabajo futuro se podría profundizar aún más en algunos parámetros que componen el modelo para hacerlo más cercano a la realidad. En este proyecto se efectuó una simplificación de los tiempos en que se llevan a cabo la cosecha y la pirólisis. Con el fin de modelar tiempos equitativos, se utilizaron reglas de redondeo para alinear los procesamientos en períodos de un mes. Esto implica, por ejemplo, que a un lugar de cosecha que demora diez días en procesar los residuos, se le adjudiquen los 22 días hábiles que componen el mes. De esta manera, los tiempos totales podrían ser más acotados si se segmentaran los períodos en otra unidad de medida: días, semanas, quincenas. También se podrían tomar en consideración los tiempos de traslado de la máquina. Tener distancias relativamente pequeñas en el caso presentado no supone una gran diferencia en el resultado final, ya que se llega de un lugar a otro en cuestión de horas. Si se quisiera extrapolar a un escenario con mayores distancias, este detalle puede llegar a influir en el resultado final.

Se mencionó anteriormente la importancia que tiene la inversión de la máquina en la rentabilidad el proyecto. Al respecto, se considera una buena opción la posibilidad de trabajar en conjunto con la Universidad para poder desarrollar una máquina de pirólisis móvil que se adapte perfectamente a las necesidades del país y conseguir de este modo reducir la inversión.

Bibliografía

- [1] Uruguay XXI. *Uruguay, líder en energías renovables*. URL: www.uruguayxxi.gub.uy/es/noticias/articulo/uruguay-lider-en-energias-renovables/ (visitado 15-05-2022).
- [2] ADME (Administración del Mercado Eléctrico). «Informe Anual 2021 Administración del mercado eléctrico». En: (2021), pág. 11.
- [3] UTE. *Composición Energética de Uruguay por Fuente*. URL: <https://portal.ute.com.uy/composicion-energetica-y-potencias> (visitado 10-08-2021).
- [4] Fundación Endesa. *Centrales de biomasa y sus tipos*. URL: www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa (visitado 22-09-2022).
- [5] Probio. *Proyecto de Producción de Electricidad a partir de biomasa en Uruguay*. URL: www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/proyecto-produccion-electricidad-biomasa (visitado 25-01-2023).

- [6] *Ley N° 15939 - Ley Forestal-Fondo Forestal-Recursos Naturales*. URL: <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987> (visitado 21-05-2022).
- [7] SPF (Sociedad de Productores Forestales del Uruguay). *Proyecto de Producción de Electricidad a partir de biomasa en Uruguay*. URL: www.spf.com.uy/uruguay-forestal%5C (visitado 25-04-2021).
- [8] Ministerio de Ganadería Agricultura y pesca. *Cartografía forestal bosques plantados 2021*. URL: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2021/estudios/cartografia-forestal-bosques-plantados-2021> (visitado 10-06-2022).
- [9] B. Velázquez. «Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética». Tesis doct. Departamento de Mecanización y Tecnología Agraria, Universidad Politécnica de Valencia., 2006.
- [10] C. Faroppa. «Evaluación de la disponibilidad de residuos o subproductos de biomasa a nivel nacional». En: (2010).
- [11] FAO. «Conservación de energía en las industrias mecánicas forestales». En: (2003).
- [12] Forestal Atlantico Sur. *Forestación*. URL: www.fas.com.uy/data/rincon/forestacion_1.pdf%5C (visitado 29-08-2021).
- [13] Ricardo Anselmo Malinovski y col. «Otimização da distância de extração de madeira com forwarder». Tesis doct. 2008.
- [14] T. Gullberg y J. Johansson. «A method for integrated extraction of logging residues and soil scarification on a small scale». En: *Biomass and Bioenergy* 30.12 (2006), págs. 1035-1042. DOI: [10.1016/j.biombioe.2005.12.011](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.12.011).
- [15] S. Hoyne y A. Thomas. «Forest residues: Harvesting, storage and fuel value.» Tesis doct. URL: <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/projectreports/residues.pdf>.

- [16] E. Tolosana y col. «Recovering of forest biomass from Spanish hybrid poplar plantations». En: *Biomass and Bioenergy* (2011), págs. 2570-2580. DOI: [10.1016/j.biombioe.2011.02.007](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.007).
- [17] E. Cuchet, P. Roux y R. Spinelli. «Performance of a logging residue bundler in the temperate forests of France». En: *Biomass and Bioenergy* 27.1 (2004), págs. 31-39. DOI: [10.1016/j.biombioe.2003.10.006](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.10.006).
- [18] A.R. Fernandez-Akarregi y J. Makibar. «Valorización de Biomasa mediante pirólisis rápida». En: *Revista Bioenergy* (abr. de 2010), págs. 16-17.
- [19] A. Urien. *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual*. 2013.
- [20] Eres Medio Ambiente. *Pirólisis: Qué es, tipos y proceso pirolítico*. 2007. URL: www.eresmedioambiente.com/pirolisis-que-es-tipos-y-proceso-pirolitico/ (visitado 17-11-2022).
- [21] A. Jesús. *Pirólisis*. 2007. URL: www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirolisis%5C (visitado 22-11-2021).
- [22] A.V. Bridgwater. «Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading». En: *Biomass and Bioenergy* 38 (2012), págs. 68-94. DOI: [10.1016/j.biombioe.2011.01.048](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048).
- [23] M. Palma y col. «Economic Feasibility of a Mobile Fast Pyrolysis System for Sustainable Bio-crude Oil Production». En: *International Food and Agribusiness Management Review* 14 (ene. de 2011). DOI: [10.22004/ag.econ.114636](https://doi.org/10.22004/ag.econ.114636).
- [24] M.Patel y col. «The development of a cost model for two supply chain network scenarios for decentralized pyrolysis system scenarios to produce bio-oil». En: *Biomass and Bioenergy* 128 (2019), pág. 105287. DOI: [10.1016/j.biombioe.2019.105287](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105287).
- [25] B. Holo Ba, C. Prins y C. Prodron. «Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective». En: *Renewable Energy* 87 (2016), págs. 977-989. DOI: [10.1016/j.renene.2015.07.045](https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.045).

- [26] J. Wu y col. «Agri-biomass supply chain optimization in north China: Model development and application». En: *Energy* 239 (2022), pág. 122374. DOI: [10.1016/j.energy.2021.122374](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122374).
- [27] X. Guo y col. «Optimizing Resource Utilization in Biomass Supply Chains by Creating Integrated Biomass Logistics Centers». En: *Energies* 13.22 (2020). DOI: [10.3390/en13226153](https://doi.org/10.3390/en13226153).
- [28] C. Cambero y col. «Strategic optimization of forest residues to bio-energy and biofuel supply chain». En: *International Journal of Energy Research* 39.4 (), págs. 439-452. DOI: [10.1002/er.3233](https://doi.org/10.1002/er.3233).
- [29] M. Sharifzadeh, M. Cortada Garcia y N. Shah. «Supply chain network design and operation: Systematic decision-making for centralized, distributed, and mobile biofuel production using mixed integer linear programming (MILP) under uncertainty». En: *Biomass and Bioenergy* 81 (2015), págs. 401-414. ISSN: 0961-9534. DOI: [10.1016/j.biombioe.2015.07.026](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.026).
- [30] F. Psathas, P. Georgiou y A. Rentizelas. «Optimizing the Design of a Biomass-to-Biofuel Supply Chain Network Using a Decentralized Processing Approach». En: *Energies* 15.14 (2022). DOI: [10.3390/en15145001](https://doi.org/10.3390/en15145001).
- [31] A. Calvino Martinez. *Cooperación en los problemas del viajante (TSP) y de rutas de vehículos (VRP): una panorámica*. 2011.
- [32] A.M. Campbell y J.H Wilson. «Forty years of periodic vehicle routing.» En: *Networks* 63.1 (2014), págs. 2-15. DOI: [10.1002/net.21527](https://doi.org/10.1002/net.21527).
- [33] A. Reyes Guerrero. *Propuesta de un diseño de rutas con ventanas de tiempo sin restricción de capacidad para una empresa distribuidora de productos alimenticios en el municipio de Palmira*.
- [34] C. Gracia, B. Velázquez-Martí y J. Estornell. «An application of the vehicle routing problem to biomass transportation». En: *Biosystems Engineering* 124 (2014), págs. 40-52. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2014.06.009](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.009).

- [35] A. Furchi y col. «Route Optimization in Precision Agriculture Settings: A Multi-Steiner TSP Formulation.» En: 99 (2022), págs. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3204584>.
- [36] J. Conesa-Muñoz, G. Pajares y A. Ribeiro. «Mix-opt: A new route operator for optimal coverage path planning for a fleet in an agricultural environment». En: *Expert Systems with Applications* 54 (2016), págs. 364-378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.12.047>.
- [37] A. Bellabdaoui y Karim k. El Bouy Ahyiouy. «An am-TSPTW transformation and a RTS algorithm for commodity selection and vehicle routing planning in full truckload industry». En: 2022, págs. 1-6. DOI: [10.1109/LOGISTIQUA55056.2022.9938049](https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA55056.2022.9938049).
- [38] Nettenergy. URL: www.nettenergy.com/ (visitado 22-08-2022).
- [39] Beston Group. URL: <https://bestonasia.com/es/> (visitado 16-09-2022).
- [40] Pyrotech Energy. URL: <https://pyrotechenergy.com/unique-process-turns-waste-biomass-into-renewable-energy-2/%5C> (visitado 10-06-2022).
- [41] Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). «Suplemento tecnológico». En: (2006).
- [42] C. Paccota y R. Peters. «Quantificação da madeira recebida: Um problema resolvido?» En: (2007).
- [43] *Consejos de Salarios y Negociación Colectiva*. URL: www.gub.uy/ministerio-trabajo-seguridad-social/tematica/1-forestacion-incluido-bosquesmontes-turberas (visitado 21-07-2023).
- [44] Intergremial de Transporte Profesional de Carga Terrestre del Uruguay. URL: <https://www.intergremial.com/site/index.php/tarifas/precios-referencia/36-precio-cargasgenerales-feb2018> (visitado 19-03-2023).

- [45] Ltd. Henan Zhangsheng Environmental Protection Equipment Co. URL: <https://woodchipperzs.en.made-in-china.com/product/lwSfpYXckvUN/China-6-Inch-10-Inch-Heavy-Duty-Electric-Engine-Wood-Chipper-for-Mulcher.html> (visitado 10-06-2023).
- [46] M. Palma y col. «Economic Feasibility of a Mobile Fast Pyrolysis System for Sustainable Bio-crude Oil Production». En: *International Food and Agribusiness Management Review* 14 (), pág. 7. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/231875441.pdf>.
- [47] Portal inmobiliario profesional. URL: <https://uruguay.inmobiliaria.com/fotos-de-galpon-en-rivera-capital-515m2-1-bano-F2492844> (visitado 10-06-2023).
- [48] Pablo Urganic. URL: https://articulo.mercadolibre.com.uy/MLU-602714109-biocarbon-biochar-urganic-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=00d48cb5-3e9b-4ca0-b0ba-126849cd15f6 (visitado 15-04-2023).
- [49] V. Calzada y col. *Producción de Bio-Oil a partir de pirólisis de residuos de madera*.

APÉNDICE A

Modelo matemático

Modelo matemático

/ Conjuntos */*

set I; */*Lugares de cosecha*/*

set P; */*Periodos*/*

set A; */*Destinos*/*

set M; */*Maquinas de pirolisis*/*

/ Parametros */*

param dl {I,I}; */*Distancia entre i y j */*

```
param dc {I,A}; /*Distancia entre i y los destinos */
param pfc {I}; /*periodo fin de cosecha +1 en punto i*/
param tp {I}; /*Tiempo de pirolisis en i*/
param cp; /*Costo de hacer pirolisis por periodo*/
param ctm; /*Costo de traslado de la maquina*/
param ctpt; /*Costo de traslado de producto terminado*/
param n ;/*cantidad de puntos*/
param maq ;/*cantidad de maquinas*/
param H; /*auxiliar*/
param periodo; /*cantidad de periodos de estudio*/
param residuo {I}; /*cantidad de residuo disponible en el punto
de cosecha i */
param frac; /*porcentaje de residuo que se transforma en
producto comercializable */
/* Variables */
var x {I,I,M} binary; /*M quina m de pirolisis se traslada de i
a j*/
var y {I,M} binary; /*M quina m hace pirolisis en el punto i*/
var s {I} integer >= 0; /*periodo de comienzo de la pirolisis en
el lugar i*/
var z {I, A} binary; /*Se traslada el producto terminado de i a
a*/
```

```

var u {I,M} integer >= 1; /*Variable auxiliar*/

/* Funcion objetivo */

minimize costo: sum{m in M} sum {i in I} (sum{j in I}ctm*dl[i,j
    ]*x[i,j,m] + cp*tp[i] + sum{a in A}ctpt*dc[i,a]*residuo[i]*
    frac*z[i,a]) + sum {i in I}(s[i]);

/* Restricciones */

s.t. camino_unico_uno{j in I: j<>0}: sum{i in I: i<>j} sum{m in
    M} x[i,j,m] = 1;

s.t. camino_unico_dos{i in I: i<>0}: sum{j in I: i<>j} sum{m in
    M} x[i,j,m] = 1;

s.t. camino_unico_tres{i in I, j in I, m in M: i<>j and i >= 1
    and j >= 1}: u[i,m]-u[j,m]+n*x[i,j,m]<=n-1;

s.t. volver {m in M}: sum{j in I: j<>0} x[0,j,m] <= 1;

s.t. volver2 {m in M}: sum{i in I: i<>0} x[i,0,m] <= 1;

s.t. recorrido_por_m quina {m in M, j in I}: sum{i in I : i<>j
    } x[i,j,m]= sum{k in I: k<>j } x[j,k,m];

s.t. pirolisis_pos_cosecha_2 {i in I, p in P}: s[i] >= pfc[i];

s.t. orden_pirolisis {i in I, j in I: j >0 and i<>0 and j<>i}: (
    s[i] + tp[i] - H*(1- sum{m in M}x[i,j,m])) <= s[j];

s.t. control_pirolisis_periodo {i in I : i<>0}: s[i] + tp[i] <=
    periodo;

s.t. traslado_destino{i in I : i<>0}: sum{a in A} z[i,a]=1;

s.t. solo_una_maq_por_pto{i in I : i<>0}: sum{m in M} y[i,m]=1;

```

s.t. vinculo_1 $\{i \in I, m \in M : i \neq 0\}$: $\sum_{j \in I : i < j} x[i, j, m] = y[i, m]$;

s.t. vinculo_2 $\{j \in I, m \in M : j \neq 0\}$: $\sum_{i \in I : i < j} x[i, j, m] = y[j, m]$;

end;

Ejemplo ilustrativo de datos utilizados en el modelo

Lugar de cosecha	param dc (Rivera)	param dc (Tbo)	param pfc	param tp	param residuo
0	0	111	0	0	0
1	53.6	21.32	5	1	141
2	60.29	0.11	10	1	286
3	61.95	29.92	6	2	361
4	64.15	50.79	7	1	248
5	75.73	68.58	4	1	212
6	41.68	25.91	3	2	331
7	58.57	20.37	9	3	638
8	68.05	41.53	10	1	264
9	135.15	128.49	2	3	723
10	26.46	93.55	8	2	397
11	71.13	19.89	2	2	355
12	58.49	27.32	9	1	101
13	87.06	71.14	3	1	34
14	76.56	61.09	3	1	123
15	56.78	25.86	7	1	217
16	70.48	56.7	10	1	79
17	107.96	86.76	8	2	227
18	46.97	51.41	3	1	83
19	47.84	61.73	2	1	117
20	68.49	81.38	10	1	198
21	29.9	48.62	6	2	267
22	75.73	30.67	5	2	235
23	24.94	57.29	8	1	181
24	73.09	85.15	7	1	116
25	95.57	53.24	7	1	131
26	55.78	71.4	2	1	49
27	75.67	79.81	7	1	56
28	67.62	91.15	1	1	56
29	109.24	101.39	5	1	71
30	42.66	49.78	4	1	191

Tabla A.1: Parámetros utilizados en el modelo

APÉNDICE B

Análisis de costos

	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Mes 13	Mes 14	Mes 15	Mes 16	Mes 17	Mes 18	
INVERSIÓN EN MAQUINARIA																				
DETALLE																				
Máquina pirólisis rápida	700.000																			
Chipeadora	2.000																			
Generador de gas	20.000																			
Total de inversión para maquinaria	722.000																			
COSTOS INMUEBLES																				
DETALLE																				
Galpón para almacenamiento producto																				
Total de inversión para inmuebles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
COSTOS INSUMOS																				
DETALLE																				
Cantidad de residuo	kg	0	0	0	68.017	119.979	0	0	0	0	128.006	102.731	174.707	160.279	154.340	154.340	138.529	0	0	0
Distancia del lugar de cosecha a capital	km	0	0	0	37,9	72,7	0	0	0	103,0	51,0	44,9	74,4	47,0	47,0	47,0	36,5	0	0	0
Costo flete producto terminado	USD/kg*km	0,0003	0,00	0,00	0,00	458,60	1.551,73	0,00	0,00	2.345,54	832,07	1.395,51	2.121,41	1.290,48	1.290,48	896,52	0,00	0,00	0,00	0,00
Peso máquina Kg	kg	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Distancia entre lugares de cosecha	km	0	0	0	37,9	29,3	0	0	0	65,9	53,1	20,2	41,7	43,3	0	27,4	36,5	0	0	0
Costo flete máquina prótesis	USD/kg*km	0,00044	0,00	0,00	99,94	77,26	0,00	0,00	0,00	173,78	140,02	53,27	109,96	114,18	0,00	72,25	96,25	0,00	0,00	0,00
Costos totales		0	0	0	100	536	1.552	0	0	174	2.486	985	1.505	2.236	1.290	1.363	996	0	0	0
MANO DE OBRA																				
DETALLE																				
Operario máquinas	USD/mes	550	0	0	550	550	0	0	0	550	550	550	550	550	550	550	550	550	0	0
Operario recolección MP	USD/mes	550	0	0	550	550	0	0	0	550	550	550	550	550	550	550	550	550	0	0
Total mano de obra	USD/mes	1.100	0	0	1.100	1.100	0	0	0	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	0	0
Aportes patronales	%	7,0	0	0	0	77	77	0	0	77	77	77	77	77	77	77	77	77	0	0
Total costos laborales		0	0	0	0	1.177	1.177	0	0	1.177	1.177	1.177	0	0						
Se considera Usd = \$40																				
COSTOS OPERATIVOS TOT.																				
	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 9	Mes 10	Mes 11	Mes 12	Mes 13	Mes 14	Mes 15	Mes 16	Mes 17	Mes 18	
	0	0	0	0	100	2.413	3.429	700	700	874	4.363	2.862	3.382	4.113	3.167	3.240	2.873	700	700	
INGRESOS																				
DETALLE																				
Cantidad producida Biochar	kg	0	0	0	6.802	11.998	0	0	0	12.801	10.273	17.471	16.028	15.434	15.434	13.853	0	0	0	
Ventas Biochar	USD/kg	1,00	0	0	6.802	11.998	0	0	0	12.801	10.273	17.471	16.028	15.434	15.434	13.853	0	0	0	
Cantidad producida Bio-oil	kg	0,25	0	0	17.004	29.995	0	0	0	32.002	25.683	43.077	40.070	38.585	38.585	34.632	0	0	0	
Ventas Bio-oil	USD/kg	0,19	0	0	3.231	5.699	0	0	0	6.080	4.880	8.299	7.613	7.331	7.331	6.580	0	0	0	
Cantidad producida Vinagre de madera	kg	0,25	0	0	17.004	29.995	0	0	0	32.002	25.683	43.077	40.070	38.585	38.585	34.632	0	0	0	
Ventas Vinagre de madera	USD/kg	1,27	0	0	21.595	38.093	0	0	0	40.642	32.617	55.469	50.889	49.003	49.003	43.983	0	0	0	
Total ventas anuales		0	0	0	0	10.033	17.697	0	0	18.881	15.153	24.769	23.641	22.765	22.765	20.433	0	0	0	

Tabla B.1: Análisis de costos