

Optimización de la logística para la valorización de residuos de cosecha forestal

Virginia Amor Delfino¹, Lucia Larrosa Gaso¹, and Víctor Viana^{1,2}

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

² ITR Centro Sur, Universidad Tecnológica, Durazno, Uruguay

Resumen. En el contexto de un creciente sector forestal en Uruguay, surge la oportunidad de aprovechar los residuos de la cosecha forestal para generar valor agregado y evitar los riesgos de incendios forestales que representan al permanecer en el campo. Este trabajo aborda la aplicación del Problema del Vendedor Viajante para optimizar la logística de una planta de pirólisis móvil, destinada al procesamiento en el lugar de residuos forestales. Se plantea un modelo matemático basado en programación lineal mixta entera, para determinar la secuencia óptima de visitas a los frentes de cosecha y optimizar el transporte de los productos resultantes a destinos de acopio y comercialización. Los experimentos numéricos demuestran la aplicabilidad del enfoque propuesto para instancias de tamaño moderado, aunque se identifican limitaciones computacionales al escalar a instancias más grandes. Además de los residuos forestales, la metodología desarrollada puede aplicarse a otros tipos de residuos, ampliando su impacto potencial.

Palabras claves: optimización · logística · residuo forestal

1. Introducción

En el contexto actual del creciente sector forestal en Uruguay, surge una oportunidad relevante para aprovechar los residuos generados durante las operaciones de cosecha. Estos residuos, compuestos principalmente por ramas, cortezas y restos de tala, son generalmente subutilizados o abandonados en los frentes de cosecha, representando un desperdicio de recursos y un posible riesgo ambiental al convertirse en combustible para incendios forestales. La gestión adecuada de estos residuos forestales no solo contribuiría a mitigar estos riesgos, sino que también permitiría generar valor agregado a partir de su aprovechamiento como materia prima para diversos procesos de conversión termoquímica, como la pirólisis.

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar una metodología para optimizar la logística asociada al despliegue de plantas de pirólisis móviles destinadas al procesamiento in situ de los residuos forestales. Estas plantas, al tener la capacidad de trasladarse directamente a los frentes de cosecha, permiten eliminar los altos costos de transporte que generalmente dificultan el aprovechamiento de

estos residuos. Sin embargo, se requiere determinar de manera óptima la secuencia de visitas de las plantas móviles a los diferentes frentes de cosecha, con el fin de minimizar los costos logísticos totales, incluyendo los costos de movilización de las plantas y el traslado de los productos resultantes hacia centros de acopio y comercialización.

Para abordar este desafío, se propone una adaptación del Problema del Vendedor Viajante (TSP, por sus siglas en inglés), un problema de optimización combinatoria ampliamente estudiado en la literatura. El modelo matemático desarrollado, basado en programación lineal mixta entera (Mixed-Integer Linear Programming, MILP), permite determinar la secuencia óptima de visitas a los frentes de cosecha, al tiempo que optimiza el transporte de los productos obtenidos hacia sus destinos finales.

2. Residuos forestales y pirólisis móvil

Los residuos forestales se definen como aquellos materiales orgánicos generados durante las operaciones de cosecha forestal, que no son extraídos habitualmente para su conversión en subproductos madereros. Estos residuos están compuestos principalmente por ramas, cortezas, restos de tala y otros desechos vegetales que quedan en el sitio de cosecha, que en raras ocasiones se trituran o astillan, más bien son abandonados en el monte para favorecer la rápida incorporación al suelo debido a que aprovecharlos para otros fines impone un costo adicional[2]. Esta práctica no solo implica un desperdicio de recursos potencialmente aprovechables, sino que también puede representar un riesgo ambiental al convertirse en combustible para eventuales incendios forestales. Según estudios oficiales, en Uruguay aproximadamente el 23 % de un árbol talado se convierte en residuo forestal[3], lo que representa una cantidad considerable de biomasa subutilizada. En la Tabla 1 se puede apreciar en detalle de las proporciones que componen el residuo forestal.

Tabla 1. Detalles de las proporciones de Pino y Eucaliptos para aserrío y pulpa. Elaboración propia con información proporcionada por las autoridades gubernamentales[3].

Elemento	Pino		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 %

Teniendo en cuenta los información brindada en [3], podemos apreciar en la Figura 1 como ha evolucionado en un periodo de 12 años, la cantidad de residuos

forestales disponibles en campo luego de la cosecha forestal. Si bien la cantidad estimada de residuos a descendido en los últimos años, la cantidad de materia residuo es considerable.

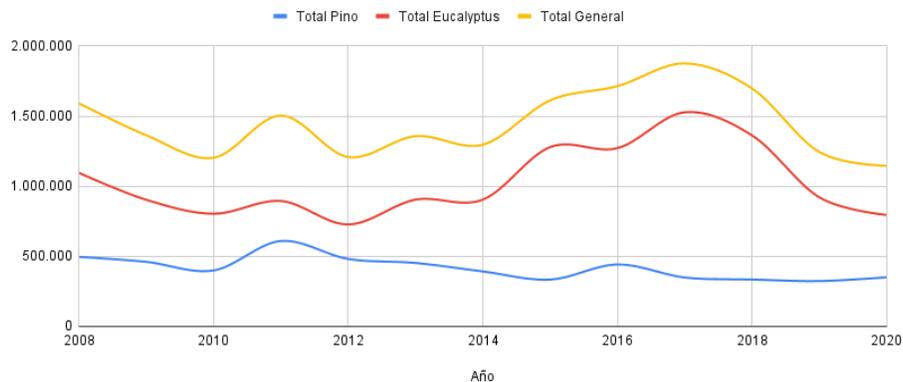


Figura 1. Totales nacionales de residuos forestales generados en campo proveniente de plantaciones para aserrío y pulpa en m^3 . Elaboración propia con información proporcionada por las autoridades gubernamentales[3]

2.1. Pirólisis rápida

Existen diversos procesos para sumar valor agregado la biomasa: mecánicos, termoquímicos y biológicos. Los principales procesos termoquímicos son la combustión, la gasificación y la pirólisis[4]. La pirólisis convencional es un proceso termoquímico que descompone materiales orgánicos en ausencia de oxígeno a altas temperaturas, generalmente entre $400^{\circ}C$ y $600^{\circ}C$. El proceso de pirólisis rápida utiliza temperaturas más altas que la pirólisis convencional, generalmente entre $600^{\circ}C$ y $800^{\circ}C$, 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 rápidamente 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. 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[5].

La pirólisis rápida de biomasa puede generar varios productos útiles listados a continuación[8]:

- **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.

2.2. 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. 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 Nettenergy [10], 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 [11]. 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 Nettenergy 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. Este modelo trata de un diseño compacto y fácil de trasladar con un peso de 10 toneladas, como se puede ver en la Figura 2. 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 [10]:



Figura 2. Máquina de pirólisis comercializada por Nettenergy. [10]

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

3. Presentación del modelo matemático

A continuación se describe el modelo matemático propuesto para abordar el problema de optimización de la logística en la valorización de residuos de cosecha forestal mediante el uso de la tecnología de pirólisis rápida móvil. El objetivo principal del modelo es determinar la secuencia óptima de visitas a los diferentes frentes de cosecha forestal, de manera que se minimicen los costos logísticos asociados al transporte de la máquina de pirólisis y al traslado de los productos resultantes hacia los centros de acopio y comercialización.

El modelo está basado en una adaptación del TSP[9], en el contexto del problema abordado, cada frente de cosecha forestal representa un “cliente a visitar”, y la máquina de pirólisis móvil es el “viajante” que debe recorrer estos frentes de manera óptima. Sin embargo, a diferencia del TSP clásico, en este problema se deben considerar aspectos adicionales, como la disponibilidad de múltiples máquinas de pirólisis, los períodos de tiempo en los que se realizan las cosechas y la necesidad de transportar los productos resultantes hacia los centros de acopio. El modelo matemático propuesto se formula como un MILP, donde se incluyen variables binarias para representar las decisiones de asignación de máquinas a los frentes de cosecha, así como variables enteras para determinar la secuencia de visitas y los períodos de tiempo en los que se realizará la pirólisis. La función objetivo busca minimizar los costos totales, que incluyen los costos de transporte

de las máquinas de pirólisis, los costos de realizar el proceso de pirólisis en cada frente de cosecha y los costos de transporte de los productos resultantes hacia los centros de acopio. Además, se incorpora un término de penalización para favorecer la finalización temprana del recorrido de las máquinas. El modelo está sujeto a diversas restricciones que garantizan la factibilidad y coherencia de la solución obtenida. Estas restricciones incluyen la asignación única de cada frente de cosecha a una máquina, la continuidad en el recorrido de cada máquina, el cumplimiento de los períodos de tiempo disponibles para realizar la pirólisis y la correcta asignación de los productos resultantes a los centros de acopio.

A continuación se definen los diferentes conjuntos de índices utilizados en este modelo:

- $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$, sitios de cosecha donde se trasladará la máquina de pirólisis móvil.
- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{n_P}\}$, horizonte de planificación, conjunto de períodos de tiempo.
- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{n_A}\}$, puntos de destino posibles para trasladar los productos obtenidos de la pirólisis.
- $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{n_M}\}$, máquinas de pirólisis móvil.

Los diferentes parámetros utilizados en este modelo son los siguientes:

- 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 de los productos de la pirólisis, $i \in I$, $a \in A$.
- pf_c_i : 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 , $i \in I$.
- r_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.
- maq : cantidad de máquinas disponibles para realizar pirólisis.

Las decisiones a tomar se representan por estas variables:

- 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 , $i \in I$, $m \in M$.

3.1. Función objetivo

$$\text{mín } f_1 + f_2 + f_3 + \sum_{i=1}^i s_i \quad (1)$$

donde:

- $f_1 = \sum_{m=1}^m \sum_{i=0}^i \sum_{j=0}^j \text{ctm} \cdot \text{dl}_{ij} \cdot x_{ijm}$ es el costo total de trasladar la máquina de pirólisis m del lugar de cosecha i al lugar de cosecha j .
- $f_2 = \sum_{m=1}^m \sum_{i=0}^i \sum_{j=0}^j \text{cp} \cdot \text{tp}_i$ es el costo total de realizar pirólisis en el lugar de cosecha.
- $f_3 = \sum_{i=1}^i \sum_{a=1}^a \text{cpt} \cdot \text{dc}_{ia} \cdot \text{frac} \cdot r_i \cdot z_{ia}$ es el costo total de trasladar el producto terminado desde el lugar de cosecha i al destino a .
- $\sum_{i=1}^i s_i$ es la penalización por demora en la finalización del recorrido de la máquina.

Las restricciones del modelo son expresadas a continuación:

$$\sum_{i=1, i \neq j} \sum_m x_{ijm} = 1 \quad \forall j, \quad j \neq 0 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1, i \neq j} \sum_m x_{ijm} = 1 \quad \forall i, \quad i \neq 0 \quad (3)$$

$$u_{im} - u_{jm} + n \cdot x_{ijm} \leq n - 1 \quad \forall i, j, \quad i \neq j, \quad i \geq 1, \quad j \geq 1 \quad (4)$$

$$\sum_{j \neq 0} x_{0jm} \leq 1 \quad \forall m \quad (5)$$

$$\sum_{i \neq 0} x_{i0m} \leq 1 \quad \forall m \quad (6)$$

$$\sum_{i \neq j} x_{ijm} = \sum_{k \neq j} x_{jkm} \quad \forall m, j \quad (7)$$

$$s_i \geq \text{pfc}_i \quad \forall i \quad (8)$$

$$s_i + \text{tp}_i - H \cdot \left(1 - \sum_m x_{ijm}\right) \leq s_j \quad \forall i, j, \quad j > 0, \quad i \neq 0, \quad j \neq i \quad (9)$$

$$s_i + \text{tp}_i \leq n_P \quad \forall i, \quad i \neq 0 \quad (10)$$

$$\sum_{a=1} z_{ia} = 1 \quad \forall i \quad (11)$$

$$\sum_m y_{im} = 1 \quad \forall i, \quad i \neq 0 \quad (12)$$

$$\sum_{j \neq i} x_{ijm} = y_{im} \quad \forall m, i, \quad i \neq 0 \quad (13)$$

$$\sum_{i \neq j} x_{ijm} = y_{jm} \quad \forall m, j, \quad j \neq 0 \quad (14)$$

Las restricciones (2) y (3) imponen que una máquina puede trasladarse a un lugar de cosecha una única vez. La restricción (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), (6) imponen que cada máquina puede salir como máximo una vez desde el lugar de inicio de las operaciones. La restricción (7) asegura que si una máquina llega al lugar de cosecha debe también continuar el trayecto a partir del mismo. La restricción (8) controla que la pirólisis se realice a partir de un período posterior al fin de la cosecha en ese lugar. La restricción (9) asegura que si la máquina se traslada del lugar i al lugar j , el período en que se realiza pirólisis en el lugar i más el tiempo en que se demora en hacer pirólisis allí sea menor al período en que se realiza pirólisis en el lugar j , siendo H un número grande. La restricción (10) impone que la pirólisis siempre se realice dentro del horizonte establecido. La restricción (11) controla que todos los productos de pirólisis sean trasladados a un destino de comercialización. La restricción (12) fuerza que todos los lugares de cosecha sean visitados por una única máquina. Las restricciones (13), (14) obliga a que si la máquina m es trasladada del lugar de cosecha i al lugar de cosecha j , en j se debe realizar pirólisis, excluyendo los destinos de comercialización.

4. Resultados numéricos

Para realizar los experimentos numéricos se eligieron 30 lugares de cosecha forestal situados en los departamentos de Rivera y Tacuarembó de Uruguay. Para la selección de los lugares de cosecha a utilizar se tomó como punto de partida el mapa forestal facilitado por el MGAP[1]. Allí se encuentra la distribución de las plantaciones de diferentes especies forestales en el territorio nacional, como se muestra en la figura 3.

En la Tabla 2 se puede ver la información de estos 30 lugares, donde se especifica para cada uno las distancias a los destinos de comercialización los productos obtenidos, el periodo en el que finaliza la cosecha en ese lugar, la cantidad de periodos que insumiría procesar los residuos forestales y la cantidad estimada de residuo forestal de ese lugar.

Para la codificación del modelo se utilizó AMPL y se resolvió utilizando CPLEX Solver for AMPL, en su versión 22.1.1. El modelo fue ejecutado en un computadora con sistema operativo Windows, un procesador AMD Ryzen 5 5600X 6-Core y un RAM de 32.0 GB.

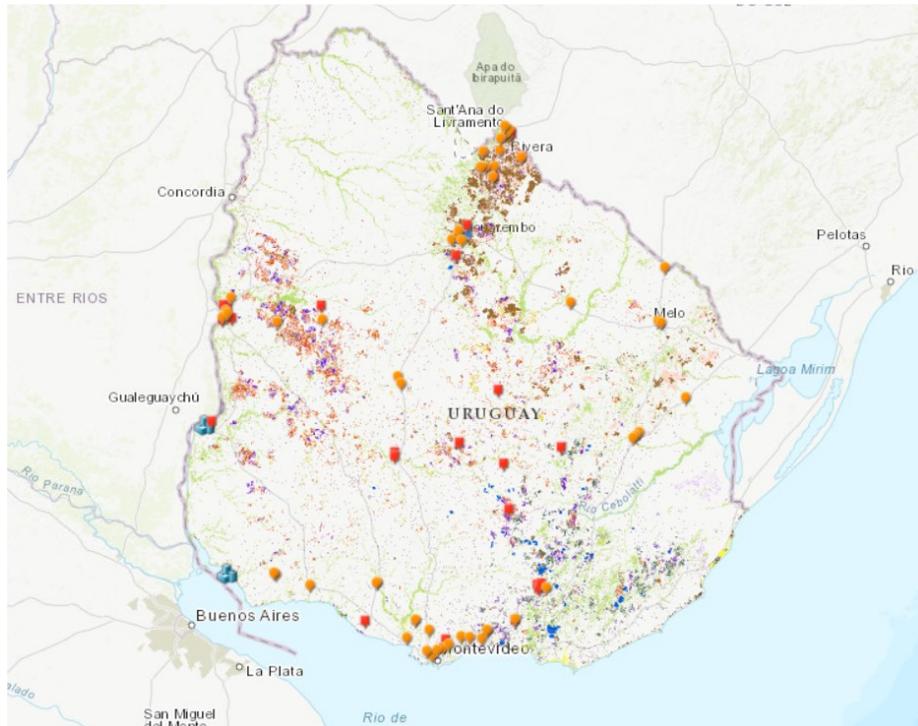


Figura 3. Geoportal web de MGAP[1].

Tabla 2. Información de los 30 lugares de cosecha elegidos para los experimentos numéricos.

Lugar de cosecha	Dist. a destino 1 (km)	Dist. a destino 2 (km)	Periodo finalización cosecha	Periodos de pirólisis	#residuo(ton.)
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 3. Detalle de la ejecución del modelo matemática para cada instancia

Instancia	Lugares de cosecha	Máquinas	Periodos	Lugares de destino	#Variables	#Restricciones	Valor de la función objetivo (US\$)	Tiempo(s)
1	5	1	12	1	40	67	18819	0,046
2	5	1	18	1	41	68	18746	0,047
3	10	1	18	1	131	233	62901	0,062
4	10	1	18	2	151	243	48580	0,062
5	10	2	12	1	219	341	134636	0,046
6	10	2	12	2	239	351	105994	0,062
7	10	2	18	1	271	366	134661	0,062
8	10	2	18	2	291	376	105421	0,062
9	10	3	12	1	324	464	201442	0,078
10	10	3	12	2	344	474	158478	0,062
11	10	3	18	1	401	489	200600	0,063
12	10	3	18	2	421	499	157636	0,047
13	15	1	24	1	271	498	79788	0,094
14	15	1	24	2	301	513	59705	0,250
15	15	2	12	1	534	760	160738	9,687
16	15	2	12	2	564	775	120435	4,906
17	15	2	18	1	556	771	160258	0,172
18	15	2	18	2	586	786	129584	0,125
19	15	2	24	1	556	771	157504	0,079
20	15	2	24	2	586	786	117884	0,078
21	15	3	12	1	741	1001	254250	1,438
22	15	3	12	2	771	1016	193654	0,610
23	15	3	18	1	826	1029	252975	0,110
24	15	3	18	2	856	1044	193545	0,094
25	15	3	24	1	826	1029	252742	0,093
26	15	3	24	2	856	1044	193313	0,109
27	20	2	18	1	941	1326	199261	8,657
28	20	2	18	2	981	1346	157113	5,813
29	20	2	24	1	941	1326	198638	0,156
30	20	2	24	2	981	1346	156894	0,141
31	20	3	18	1	1401	1769	296993	0,219
32	20	3	18	2	1441	1789	234377	0,219
33	20	3	24	1	1401	1769	296910	0,172
34	20	3	24	2	1441	1789	234294	0,156
35	30	2	18	1	-	-	No factible	-
36	30	2	18	2	-	-	No factible	-
37	30	2	24	1	2011	2886	256435	25,906
38	30	2	24	2	2071	2916	208867	31,640
39	30	3	18	1	3001	3849	383774	97,360
40	30	3	18	2	3061	3879	311589	79,386
41	30	3	24	1	3001	3849	382028	0,406
42	30	3	24	2	3061	3879	310398	0,390

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos al aplicar el modelo matemático propuesto a diferentes instancias del problema. Estas instancias varían en la cantidad de lugares de cosecha, máquinas de pirólisis disponibles, períodos del horizonte de planificación y lugares de acopio considerados. Se puede observar que el tiempo de cálculo requerido para obtener la solución óptima aumenta significativamente a medida que crece el tamaño de la instancia. Por ejemplo, para instancias con 10 lugares de cosecha, el tiempo de cálculo es del orden de algunos segundos, mientras que para instancias con 30 lugares de cosecha, el tiempo puede llegar a ser de varios minutos. Es importante destacar que para las instancias más grandes, con 30 lugares de cosecha, 2 máquinas y 18 períodos (instancias 35 y 36), el modelo no logró encontrar una solución factible dentro de los límites de tiempo establecidos. Esto indica que el problema se vuelve más complejo a medida que aumenta el número de variables y restricciones involucradas. Por otro lado, se puede observar que el valor de la función objetivo, que representa el costo total a minimizar, varía significativamente dependiendo de la configuración de la instancia. Por ejemplo, para instancias con la misma cantidad de lugares de cosecha y máquinas, pero con un horizonte de planificación más amplio, el costo total tiende a ser menor. Esto se debe a que un horizonte más amplio permite una mejor distribución de las visitas a los lugares de cosecha y, por lo tanto, una optimización más efectiva de las rutas. En general, los resultados obtenidos demuestran la capacidad del modelo para resolver instancias de tamaño moderado en tiempos razonables, pero también revelan las limitaciones computacionales al abordar instancias más grandes y complejas. Esto sugiere la necesidad de explorar técnicas de solución adicionales, como heurísticas o métodos de descomposición, para abordar eficientemente instancias de mayor tamaño.

5. Conclusiones

Este trabajo ha abordado el problema de la valorización de residuos de cosecha forestal mediante el uso de una tecnología innovadora: la pirólisis rápida móvil. Se ha propuesto un enfoque integral que combina aspectos técnicos, logísticos y de optimización para maximizar el aprovechamiento de estos residuos y generar valor agregado de manera sostenible. Se ha propuesto la utilización de una planta de pirólisis rápida móvil, capaz de procesar los residuos en los mismos frentes de cosecha, reduciendo así los costos de transporte de estos a otros lugares de procesamiento. La pirólisis rápida ha demostrado ser una tecnología prometedora para la conversión termoquímica de la biomasa, generando diversos productos como bioaceite, gas de síntesis y biochar. Con el fin de optimizar la logística asociada al despliegue de estas plantas móviles, se ha desarrollado un modelo matemático basado en una adaptación del Problema del Vendedor Viajante (TSP). El modelo propuesto busca determinar la secuencia óptima de visitas a los diferentes frentes de cosecha, minimizando los costos de transporte de las máquinas de pirólisis y de los productos resultantes hacia los centros de acopio y comercialización. Los resultados numéricos obtenidos demuestran la

capacidad del modelo para resolver instancias de tamaño moderado en tiempos razonables. Sin embargo, también se han identificado limitaciones computacionales al abordar instancias más grandes y complejas, lo que sugiere la necesidad de explorar técnicas de solución adicionales, como heurísticas o métodos de descomposición. Si bien se han mostrado avances significativos, existen oportunidades para futuras investigaciones y mejoras en el modelo propuesto, con el fin de abordar instancias de mayor tamaño y complejidad. Es importante destacar que el enfoque presentado no se limita únicamente a los residuos forestales, sino que también puede ser aplicado a otros tipos de residuos orgánicos, ampliando así su impacto potencial en el procesamiento de residuos y la promoción de una economía circular más sostenible.

Referencias

1. Ministerio de Ganadería Agricultura y pesca. Cartografía forestal bosques plantados 2021. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2021/estudios/cartografia-forestal-bosques-plantados-2021> (visitado 10-06-2023).
2. B. Velázquez. 2006. 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.
3. C. Faroppa. 2010. Evaluación de la disponibilidad de residuos o subproductos de biomasa a nivel nacional.
4. A.R. Fernandez-Akarregi y J. Makibar. 2010. Valorización de Biomasa mediante pirólisis rápida. Revista Bioenergy, págs. 16-17.
5. A. Urien. 2013. Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual.
6. Eres Medio Ambiente. Pirólisis: Qué es, tipos y proceso pirolítico. 2007. www.eresmedioambiente.com/pirolisis-que-es-tipos-y-proceso-pirolitico/ (visitado 17-11-2022).
7. A. Jesús. Pirólisis. 2007. www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirolisis (visitado 01-06-2024).
8. A.V. Bridgwater. 2012. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, Biomass and Bioenergy 38, págs. 68-94.
9. A. Calvino Martínez. 2011. Cooperación en los problemas del viajante (TSP) y de rutas de vehículos (VRP): una panorámica.
10. Nettenergy. www.nettenergy.com/ (visitado 01-06-2024).
11. Beston Group. <https://bestonasia.com/> (visitado 01-06-2024).