

Enfoques MILP para la Sincronización de Operaciones de Carga y Descarga en el Problema de Transporte de Rollizos de Madera

Ignacio Vitale¹, Rodolfo Dondo¹, Mariana Cóccola²

¹ INTEC (UNL – CONICET), S3000 Santa Fe, Argentina

² CONICET/UTN-FRCU, E3264 Concepción del Uruguay, Argentina

vitalenacho@gmail.com
rdondo@santafe-conicet.gov.ar
marcoccola@santafe-conicet.gov.ar

Resumen. En la actualidad, las cadenas de suministros forestales se enfrentan a constantes desafíos a la hora de solventar la demanda de rollizos desde los bosques hacia las industrias que los procesan. La sincronización y coordinación de estas operaciones de abastecimiento representa un problema de planificación complejo que impacta significativamente en los tiempos y costos operativos. Esta investigación desarrolla y compara dos formulaciones matemáticas exactas utilizadas para optimizar la sincronización de las actividades de carga/descarga en cada nodo de la red de distribución. Se describen diversas funciones objetivo para evaluar el comportamiento de los modelos planteados. Además, se proponen y analizan varios escenarios con el fin de demostrar el comportamiento, la sensibilidad y el impacto de las decisiones en función de los objetivos perseguidos al resolver el problema.

Palabras clave: Optimización, Transporte de Rollizos, Sincronización de Tareas.

1 Introducción

El desarrollo foresto industrial en Argentina está fuertemente condicionado por una baja competitividad y altos costos logísticos causados por una infraestructura de trabajo inadecuada [1]. Entre todas las actividades logísticas que se llevan a cabo en la cadena de suministro forestal, el transporte de la madera en rollo desde los rodales hacia las industrias representa una porción significativa de los costos operativos y su correcta planificación requiere de la sincronización eficiente de diferentes tipos de recursos [2].

El transporte de rollizos es un problema de planificación a nivel operacional que ya ha sido ampliamente abordado en la literatura a través de los denominados *Timber Transport Vehicle Routing Problem (TTVRP)* o *Log-Truck Scheduling Problem (LTSP)* [3]-[7]. El objetivo es determinar el conjunto de rutas óptimo que minimice los costos operativos y que permita satisfacer la demanda de las industrias para cada tipo de

producto por medio de una flota de camiones que se encuentran geográficamente distribuidos en varias ubicaciones (depósitos base). El problema se puede representar matemáticamente como un problema de ruteo de vehículos de recolección y entrega (PDP, por sus siglas en inglés), con la característica de que cada nodo de la red puede ser visitado más de una vez dentro de una misma ruta y que se pueden recolectar/entregar más de un tipo de producto [5].

A pesar de ser un problema de planificación ya conocido en la literatura, muchos de los enfoques de solución propuestos asumen la existencia de recursos ilimitados para realizar las operaciones de carga/descarga de los camiones en cada nodo de la red, algo que resulta irreal en la práctica diaria. Generalmente, cada sitio posee un único recurso para las operaciones de carga/descarga, cuyos tiempos de actividad tienen que ser sincronizados con las operaciones de los camiones que arriban al lugar. Sin estas restricciones de sincronización, es casi probable que cualquier técnica de resolución provea soluciones que no sea factibles en relación con los tiempos máximo de viaje que se imponen para cada una de las rutas a ejecutar.

Dada su complejidad, se han propuesto enfoques exactos [8], [9] y metodologías de descomposición [2], [10] para resolver el problema de transporte de productos con sincronización de operaciones entre camiones y cargadoras. Los enfoques exactos integran todas las decisiones del problema en un mismo modelo, lo que incrementa su complejidad de resolución. Para evitar este inconveniente, los enfoques de descomposición particionan el problema original en varios subproblemas, pero sin garantizar la optimalidad de la solución hallada. En particular, la propuesta de [10] divide en 2 etapas la resolución del problema de transporte de rollizos con sincronización de cargas. Primero se determinan las rutas de recolección y entrega sin considerar las restricciones de secuenciación de las operaciones en cada punto de suministro/consumo, las cuales se determinan luego en una segunda fase del procedimiento de solución.

Como en sí mismo, el problema de la sincronización de las actividades de los camiones y las cargadoras en cada nodo de la red presenta una gran complejidad computacional en su resolución, esta investigación propone y compara dos formulaciones matemáticas exactas para resolver el problema en cuestión tomando como entrada el conjunto de rutas a realizar por la flota de camiones, de acuerdo con la propuesta de [10]. Además, se describen diversas funciones objetivo con el fin de estudiar el comportamiento de los modelos en diversos escenarios de prueba y luego se analizan los resultados obtenidos.

2 Descripción del Problema

El problema abordado considera una cadena de suministro integrada por un conjunto de instalaciones $f \in F$, representando a los depósitos base de los camiones, los puntos de suministro (rodales en cosecha) y los puntos de consumo (industrias madereras). Como se muestra en la Figura 1, cada ruta $r \in R$ consiste en un viaje desde el depósito base del camión hasta el primer punto de carga, luego puedo seguir con un máximo de 3 viajes de carga completa, para finalizar con el regreso del camión desde el último punto de descarga hasta el depósito base. Un viaje de carga completa representa un

segmento de ruta que une un punto de carga con un punto de descarga. El objetivo del problema es determinar el conjunto de rutas de menor costo para poder satisfacer la demanda de todas las industrias considerando la oferta disponible en cada una de las fuentes de suministro.

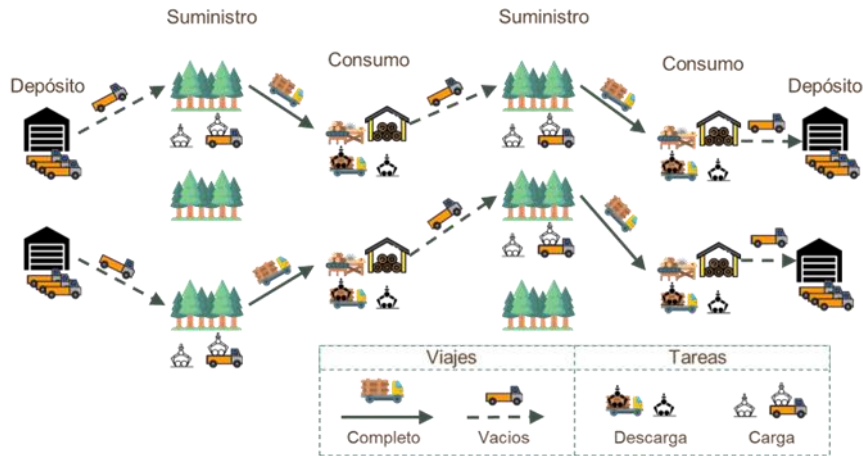


Fig. 1. Ilustración del problema del transporte de rollizos

Generalmente, para realizar las operaciones de carga/descarga existe un solo recurso disponible en cada una de las instalaciones y esto obliga a tener que sincronizar las actividades de los camiones en cada uno de los sitios. Por ejemplo, si un camión vacío arriba a un área de cosecha, el vehículo tendrá que esperar para la carga del producto hasta que el recurso esté disponible. De igual manera, en cada industria, cada camión que arribe podrá comenzar a ser descargado una vez que el recurso se encuentre en estado libre. El recurso disponible en cada sitio $f \in F$ tiene asociado un tiempo de servicio ts_f para realizar cada operación de carga/descarga. De esta manera, encontrar una solución factible al problema descrito no solo consiste en determinar el conjunto de rutas de distribución que cumpla con las restricciones de oferta y demanda, sino que también es necesario secuenciar las operaciones de los camiones en cada una de las instalaciones de la red en base a la disponibilidad del recurso de carga/descarga, considerando que existe un tiempo máximo permitido $maxT$ para poder completar cada una de las rutas.

3 Formulaciones Matemáticas Alternativas

Cómo se describió anteriormente, el algoritmo propuesto por [10] se utiliza en primera instancia para computar el conjunto de rutas con mínimo costo operacional que satisfagan las restricciones de oferta y demanda en cada nodo de la red de suministro. Este conjunto de rutas $r \in R$, que indican la secuencia de nodos a visitar, se utiliza como entrada en la segunda etapa del algoritmo con el objetivo de sincronizar las

actividades de los camiones en cada punto de suministro/consumo, considerando la disponibilidad de recursos limitados y con la restricción de no exceder el tiempo máximo de viaje aceptado para completar la totalidad de cada ruta. Para esta segunda etapa, el presente trabajo desarrolla y evalúa el desempeño de las dos formulaciones MILP que se describen a continuación.

3.1 Formulación MILP 1. Enfoque por tareas con restricción Big-M

El primer modelo matemático propuesto considera que cada ruta $r \in R$ está formada por una secuencia de tareas $j \in J_r$, cada una representando una tarea de carga o descarga a ejecutarse en algún nodo de la red de suministro. Todas las tareas por realizarse en un mismo sitio deberán ocupar el recurso de carga/descarga de ese sitio y pueden agruparse en un conjunto $j \in J_f$. Un ejemplo para 3 rutas, que visitan 4 puntos de suministro y consumo para ejecutar un total de 16 tareas de carga y descarga se muestra en la Figura 2.

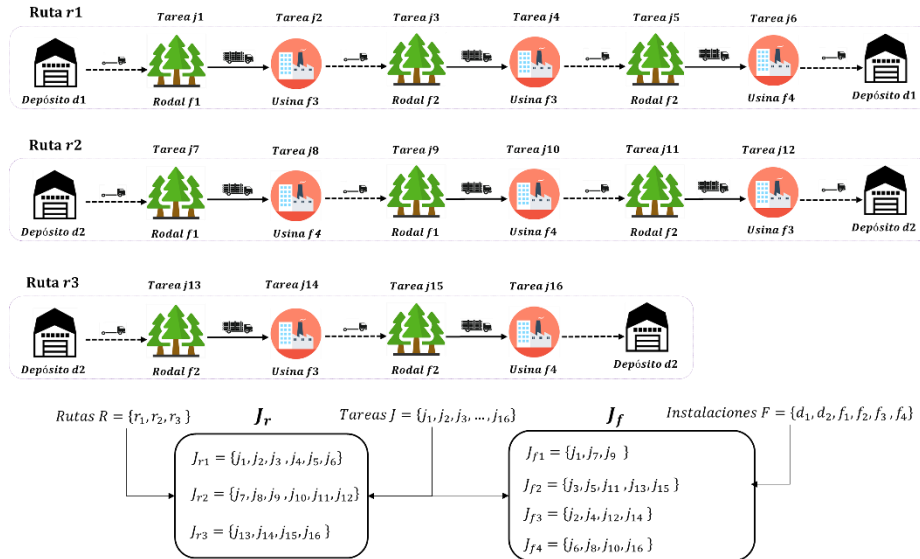


Fig. 2. Tareas para un ejemplo con 3 rutas, 2 nodos de suministro y 2 nodos de consumo.

A partir de los conjuntos y subconjuntos que se muestran en la Figura 2, es posible definir las siguientes restricciones.

$$\text{Min } \sum_{r \in R} MK_r + cp * P_r \quad (1)$$

$$TI_{j'} \geq TF_j - M * (1 - XP_{j,j'}) \quad \forall f \in F, (j, j') \in J_f : j \neq j' \quad (2)$$

$$TF_j \geq TI_j + ts_f \quad \forall f \in F, j \in J_f \quad (3)$$

$$TI_j \geq st_r + tv_j \quad \forall r \in R, j \in J_r \quad (4)$$

$$TI_j \geq TF_{j-1} + tv_j \quad \forall r \in R, j \in J_r : j > 1 \quad (5)$$

$$MK_r \geq TF_j + td_r \quad \forall r \in R, j \in J_r : j = |J_r| \quad (6)$$

$$MK_r - TI_j + tv_j \leq maxT + P_r \quad \forall r \in R, j \in J_r : j = 1 \quad (7)$$

La función objetivo (1) busca minimizar el tiempo de finalización de cada ruta (MK_r) más un costo de penalidad cp multiplicado por la cantidad de tiempo PR_r que una ruta r se excede del tiempo de viaje máximo permitido. La restricción (2) impone la secuenciación entre los tiempos de inicio $TI_{j'}$ y fin TF_j de cada par de tareas (j, j') a ejecutarse en una misma ubicación f , tal que $(j, j') \in J_f$. La variable binaria $XP_{j,j'}$ vale 1 si la tarea j se realiza antes que j' en el recurso disponible. Además, para una misma tarea $j \in J_f$, su tiempo de finalización será siempre mayor igual que su tiempo de inicio para el tiempo de operación para la carga/descarga ts_f , como lo indica la restricción (3). Por otra parte, las restricciones (4) y (5) se utilizan para ordenar los tiempos de inicio y finalización de todas las tareas $j \in J_r$ que pertenecen a una misma ruta r . El parámetro st_r indica el tiempo de comienzo de la ruta mientras que tv_j determina el tiempo de viaje entre el sitio donde se realiza la tarea que le precede $(j - 1)$ y la ubicación donde se ejecuta la tarea j . El tiempo de finalización de cada ruta se calcula a través de la restricción (6), donde el parámetro td_r indica el tiempo de viaje desde el sitio donde se ejecuta la última tarea en la ruta $j \in J_r$ hasta el depósito. Finalmente, a través de la restricción (7) se determina si el tiempo total de actividad del camión a lo largo de la ruta cumple con la condición de ser menor al tiempo máximo permitido ($maxT$) o es necesario relajar dicha restricción dándole un valor mayor a cero a la variable de penalidad P_r .

3.2 Formulación MILP 2. Enfoque por eventos sin restricción Big-M

La segunda formulación propuesta busca eliminar el uso de la restricción (2), la cual incluye un término big-M dentro de una desigualdad con signo \geq , y cuya eliminación, en un problema de minimización, podría mejorar el cómputo de la cota inferior por parte del resolutor MILP, y, por lo tanto, lograr una convergencia más rápida hacia la solución óptima del problema.

En este segundo modelo matemático, la operación de la cargadora en cada sitio f se representa a través de un conjunto ordenado de eventos $w \in W_f$, siendo $|W_f| = |J_f|$. Las restricciones que definen el modelo se detallan a continuación.

$$Min \sum_{r \in R} MK_r + cp * P_r \quad (8)$$

$$\sum_{w \in W_f} XL_{w,f,j} = 1 \quad \forall f \in F, j \in J_f \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} XL_{w,f,j} = 1 \quad \forall f \in F, w \in W_f \quad (10)$$

$$\sum_{j' \in J_f} TI_{w',j',f} \geq TF_{w,j,f} \quad \forall f \in F, j \in J_f, (w, w') \in W_f: w < w' \quad (11)$$

$$TF_{w,j,f} \geq TI_{w,j,f} + ts * XL_{w,f,j} \quad \forall f \in F, w \in W_f, j \in J_f \quad (12)$$

$$TI_{w,j,f} \leq M * XL_{w,f,j} \quad \forall f \in F, w \in W_f, j \in J_f \quad (13)$$

$$TF_{w,j,f} \leq M * XL_{w,f,j} \quad \forall f \in F, w \in W_f, j \in J_f \quad (14)$$

$$TA_j \geq st_r + tv_j \quad \forall r \in R, j \in J_r \quad (15)$$

$$TA_j \geq TS_{j-1} + tv_j \quad \forall r \in R, j \in J_r : j > 1 \quad (16)$$

$$\sum_{w \in W_f} TI_{w,j,f} \geq TA_j \quad \forall f \in F, j \in J_f \quad (17)$$

$$TS_j \geq TF_{w,j,f} \quad \forall f \in F, j \in J_f, w \in W_f \quad (18)$$

$$MK_r \geq TS_j + td_r \quad \forall r \in R, j \in J_r: j = |J_r| \quad (19)$$

$$MK_r - TA_j + tv_j \leq maxT + P_r \quad \forall r \in R, j \in J_r : j = 1 \quad (20)$$

La formulación alternativa 2 comparte la misma función objetivo (8) que el primer modelo presentado. La restricción (9) indica que cada tarea $j \in J_f$ tiene que ser asignada a un solo evento $w \in W_f$. A su vez, cada operación w en cada sitio solo puede atender a un único camión, como se representa en la restricción (10). Los tiempos de inicio y fin de cada operación $w \in W_f$ que se realiza en una misma ubicación f se determinan a través de las restricciones (11) y (12). Estos tiempos pueden tomar valor mayor a cero solamente para aquella tarea $j \in J_f$ asignada a dicha operación, es decir $XL_{w,f,j} = 1$, como lo establecen las restricciones (13) y (14). Por otra parte, las restricciones (15) y (16) se utilizan para determinar los tiempos de arribo (TA_j) y salida (TF_j) del camión a la facilidad dónde se realiza la tarea j . Estas restricciones se utilizan para secuenciar los tiempos de todas las tareas ejecutadas en una misma ruta r . Los tiempos de arribo y salida del camión a cada facilidad se coordinan con los tiempos de operación de la cargadora disponible en el sitio a través de las restricciones (17) y (18). Finalmente, las restricciones (19) y (20) determinan el tiempo de finalización de cada ruta MK_r y la tardanza asociada P_r , en caso de corresponder.

4 Resultados Computacionales

Para evaluar el desempeño de las dos formulaciones propuestas, se plantean tres escenarios con diferentes niveles de complejidad. Cada escenario representa la operación diaria de abastecimiento para una determinada configuración de la cadena de suministro, considerando datos obtenidos de la actividad foresto-industrial en la provincia de Misiones, Argentina, la cual cuenta con múltiples rodales dispersos geográficamente y diversas industrias que demandan diferentes tipos cortes de tronco según su proceso de producción. En función de la demanda de los diferentes tipos de cortes y la planificación de estos, se determina, en primer lugar y para cada escenario, el conjunto de rutas con costo mínimo que deben ser efectuadas para abastecer las necesidades de rollizos por parte de las industrias. Luego, cada formulación propuesta recibe como entrada este conjunto de rutas con el objetivo de sincronizar las actividades entre camiones y cargadoras. La Tabla 1 detalla la cantidad de instalaciones de carga/descarga, el número de rutas a realizar y la cantidad total de tareas a ejecutar, para cada uno de los escenarios considerados.

Table 1. Características de cada escenario propuesto

<i>Escenario</i>	<i>#Depósitos</i>	<i>#Instalaciones</i>	<i>#Rutas</i>	<i>#Tareas</i>
1	1	5	5	28
2	2	10	7	42
3	3	17	12	70

Todas las actividades de cosecha y transporte son subcontratadas a distintos operadores logísticos que ofrecen sus servicios a un costo proporcional a la productividad de las operaciones. En cuanto a la tala, se subcontrata maquinaria y personal para realizar actividades como el raleo, corte, movimiento y carga de troncos en camiones, todo ello a un costo determinado en función de la superficie talada. Cada operación de carga y descarga toma 30 minutos por camión, y cada instalación cuenta únicamente con un recurso para estas tareas. El transporte se realiza mediante varias flotas de camiones con una capacidad de 30 m³ cada uno. Los camiones comienzan su jornada desde los depósitos a las 6:00 A.M. ($st_r = 6$) y pueden realizar hasta tres viajes de carga completa antes de regresar al depósito base. En otras palabras, un camión en una ruta ejecuta como máximo 6 tareas de carga y descarga. Solo se puede transportar un tipo de tronco por viaje, y el tiempo máximo de trabajo de los camiones es de 10 horas. Para todos los experimentos computacionales efectuados, se limitó el tiempo de ejecución de cada corrida a 30 minutos y no se consideraron restricciones en cuánto a los tiempos de espera para la ejecución de las tareas.

4.1 Funciones Objetivo

Para cada uno de los escenarios propuestos se exploraron cuatro funciones objetivo. A partir de éstas, se desarrolla un análisis que evalúa el comportamiento y la

distribución temporal de las tareas desde la perspectiva de las instalaciones que deben realizarlas y de la ruta a la que pertenecen.

La función objetivo utilizada en la Formulación 1 (Eq. (1)) y en la Formulación 2 (Eq. (8)) buscan minimizar el tiempo de finalización de cada ruta y la penalidad P_r asociada, la cual se activa solo en el caso que se exceda el tiempo máximo de viaje establecido. Esta función objetivo será referenciada de aquí en adelante cómo FO^1 .

A partir de las variables usadas en cada modelo, se pueden calcular las esperas totales de una ruta r a través de la ecuación (21) y (22), para las Formulaciones 1 y 2, respectivamente.

$$Wait_r = \sum_{\forall j \in J_r / j > 1} TI_j - (TF_{j-1} + tv_j) + (TF_j - (TI_j + ts_f)) \quad (21)$$

$$Wait_r = \sum_{\forall j \in J_r / j > 1} TA_j - (TS_{j-1} + tv_j) + (TS_j - (TA_j + ts_f)) \quad (22)$$

En base a estas definiciones, se exploraron además las siguientes FO alternativas.

Minimizar esperas totales

La FO^2 busca minimizar la suma de los tiempos de finalización de cada ruta r considerando además los tiempos de espera para la ejecución de las tareas. De esta manera, se busca alcanzar una distribución temporal entre tareas menos holgada sin dejar de considerar el tiempo de finalización de cada ruta.

$$FO^2 = \min \sum_{r \in R} MK_r + cp * P_r + Wait_r \quad (23)$$

Minimizar el tiempo de finalización máximo

A diferencia de la FO^1 que minimiza la suma de los tiempos de finalización de cada una de las rutas, la FO^3 (Eq. (25)) solo considera el tiempo máximo de terminación entre todas las rutas, el cual se determina a través de la restricción (24).

$$MK^{max} \geq MK_r \quad (24)$$

$$FO^3 = \min MK^{max} + \sum_{r \in R} cp * P_r \quad (25)$$

Minimizar la espera máxima

De forma similar a la función objetivo anterior, la FO^4 (Eq. (27)) minimiza el tiempo máximo de finalización de una ruta considerando además el tiempo máximo de espera (26).

$$Wait^{max} \geq Wait_r \quad (26)$$

$$FO^4 = \min MK^{max} + Wait^{max} + \sum_{r \in R} cp * P_r \quad (27)$$

4.2 Resultados y Discusión

Para la codificación y ejecución de los modelos se utilizó Pyomo [11], un paquete de software de código abierto basado en Python [12] y el resolvidor Gurobi 9.5.0. Todos los escenarios fueron resueltos en un AMD Ryzen 7 Mobile 4800H, con una velocidad de reloj de 2,9 GHz y 8 GB de RAM. Se impuso un tiempo computacional máximo de 30 minutos para cada corrida.

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos, la brecha de optimalidad (*GAP*) y el tiempo de ejecución para cada uno de los escenarios según el objetivo a optimizar (FO^1 , FO^2 , FO^3 o FO^4). Por su parte, la Tabla 3 analiza las mejores soluciones obtenidas para cada uno de los escenarios, considerando los valores acumulados y máximos para las variables MK_r , $Wait_r$ y P_r . Según la Tabla 2, la Formulación 1 alcanza el óptimo para todos los casos en un tiempo computacional igual o menor a 5 segundos. En cambio, la Formulación 2, solo puede converger al óptimo al resolver el Escenario 1 para FO^3 y el Escenario 2 cualquiera sea la FO considera. Para el resto de los casos, la ejecución finaliza al alcanzar el tiempo máximo impuesto sin garantizar la optimalidad de la solución hallada. Exceptuando el Escenario 2, la formulación matemática sin BIG-M demora un mínimo de 140 segundos en alcanzar soluciones con un GAP inferior al 10%. El resto del tiempo se consume en reducir la diferencia entre la mejor solución entera encontrada y la solución del problema relajado. De esta manera, se puede concluir que la Formulación 1 presenta un desempeño computacional superior al segundo modelo matemático propuesto.

Con respecto al detalle de las mejores soluciones que se muestra en la Tabla 3, se puede inferir que la inclusión de la variable $Wait_r$ en la función objetivo no modifica significativamente los tiempos de finalización de cada ruta, pero si se reducen considerablemente los tiempos de espera. Por ejemplo, para el Escenario 1, entre FO^1 y FO^2 existe una diferencia de 0.08 horas en el tiempo acumulado de finalización de las rutas a causa de la espera en una de las tareas efectuadas. Sin embargo, esta diferencia se compensa con una reducción del 98% de las horas de espera logrando emplear 3.92 horas de espera menos en la solución final de los escenarios considerados. Un comportamiento similar se puede observar en las soluciones del Escenario 3. El tiempo de espera total se reduce en un 95% al utilizar FO^2 en vez de FO^1 . Esto representa una reducción del tiempo máximo de espera de 2 a 0.3 horas.

En todos los casos, la FO^3 solo se preocupa por reducir al máximo el valor del tiempo de terminación de entre todas las rutas. La exclusión de las esperas en la función objetivo conduce a que el valor acumulado y el máximo de estas se vean incrementadas. En otras palabras, la función utiliza esperas mayores respecto de las demás alternativas. En cambio, la FO^4 busca lograr un equilibrio entre el horario máximo de finalización y la espera máxima entre tareas, y, por lo tanto, presenta un valor de función objetivo similar a las alternativas que le preceden, pero con una reducción importante en las esperas acumuladas y máximas. A partir de los resultados analizados, se puede afirmar que la inclusión de la variable $Wait_r$ en la función objetivo permite reducir

significativamente los tiempos de espera para la ejecución de las tareas en cada uno de los sitios, sin afectar los tiempos de finalización de las rutas.

Table 2. Resultados reportados por cada una de las Formulaciones MILP propuestas.

Objetivo	Escenario	Formulación	FO (horas)	GAP	Tiempo de Cómputo (segundos)
FO ¹	1	1	70.52	0%	0.6
		2	70.66	5%	1800
	2	1	112.95	0%	0.6
		2	112.95	0%	279
	3	1	189.06	0%	3.6
		2	189.06	2%	1800
FO ²	1	1	70.68	0%	0.6
		2	70.68	6%	1800
	2	1	112.95	0%	0.6
		2	112.95	0%	259.8
	3	1	189.56	0%	4.8
		2	195.05	6%	1800
FO ³	1	1	15.22	0%	0.6
		2	15.22	0%	755.4
	2	1	16.97	0%	0.6
		2	16.97	0%	87.6
	3	1	17.71	0%	0.6
		2	17.73	14%	1800
FO ⁴	1	1	15.3	0%	0.6
		2	15.3	8%	1800
	2	1	16.97	0%	0.6
		2	16.97	0%	32.4
	3	1	17.73	0%	0.6
		2	18.23	17%	1800

Table 3. Detalle de las mejores soluciones obtenidas para cada escenario.

Escenario	Objetivo	MK _r (horas)		P _r (horas)		Wait _r (horas)	
		Σ	Max	Σ	Max	Σ	Max
1	FO ¹	70.52	15.72	0.0	0.0	4.0	1.0
	FO ²	70.6	15.22	0.0	0.0	0.08	0.08
	FO ³	70.82	15.22	0.0	0.0	9.0	2.0
	FO ⁴	70.6	15.22	0.0	0.0	0.4	0.08
2	FO ¹	112.95	16.97	0.0	0.0	2.0	2.0
	FO ²	112.95	16.97	0.0	0.0	0.0	0.0
	FO ³	114.64	16.97	0.0	0.0	3.0	1.0
	FO ⁴	112.95	16.97	0.0	0.0	0.0	0.0
3	FO ¹	189.06	17.73	0.0	0.0	9.0	2.0
	FO ²	189.14	17.73	0.0	0.0	0.41	0.3
	FO ³	196.4	17.71	0.0	0.0	15.0	2.0
	FO ⁴	190.55	17.73	0.0	0.0	0.0	0.0

A continuación, se realiza una comparación gráfica entre las soluciones obtenidas para el Escenario 1 con el fin de analizar la distribución temporal de las tareas, y demostrar la influencia de la variable $Wait_r$ en la solución del problema. Las Figuras 3 y 4 muestran la secuenciación de las tareas en cada uno de los nodos de la red de suministro según FO^1 y FO^2 respectivamente. El eje vertical indica la instalación dónde se ejecutan las tareas de carga/descarga, el eje horizontal marca el horario de realización de estas y el color de cada barra horizontal indica la ruta de camión en la que está incluida cada tarea. Cada operación de carga/descarga tiene una duración fija de 0.5 horas.

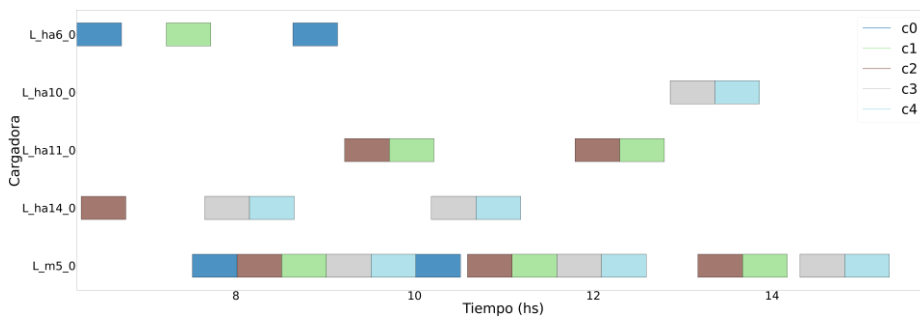


Fig. 3. Sincronización de actividades para FO^1 , Escenario 1.

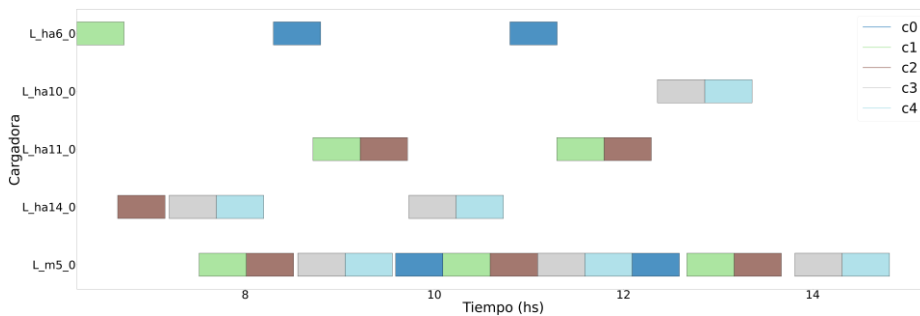


Fig. 4. Sincronización de actividades para FO^2 , Escenario 1.

La solución representada en la Figura 4 muestra una sincronización más eficiente de las actividades que reduce los tiempos muertos innecesarios dentro de cada ruta. Por ejemplo, la ruta $c0$ comienza luego de la ruta $c1$ con el objetivo de evitar una espera de 1 hora al arribar a la facilidad L_m5_0 para llevar a cabo su última tarea programada. Un comportamiento similar se da entre las rutas, $c2$, $c3$ y $c4$, ya que, al cambiar los tiempos de inicio y finalización en conjunto con el orden de ejecución de las tareas, se obtiene un ahorro total de 3.92 horas en esperas sacrificando solo 5 minutos más en el tiempo de finalización total de las rutas. Este tiempo se corresponde con la espera de $c0$ al arribar a L_ha6_0 para ejecutar la tercera tarea en su itinerario.

En las Figuras 5 y 6 se realiza un análisis comparativo similar, pero considerando el comportamiento de los objetivos FO^3 y FO^4 al momento de resolver el Escenario 1.

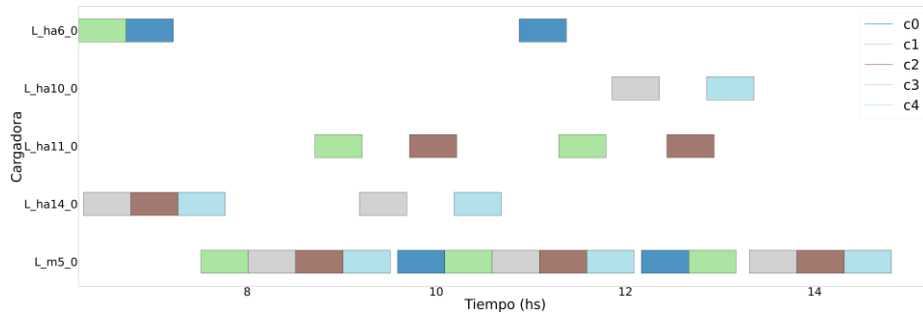


Fig. 5. Sincronización de actividades para FO^3 , Escenario 1.

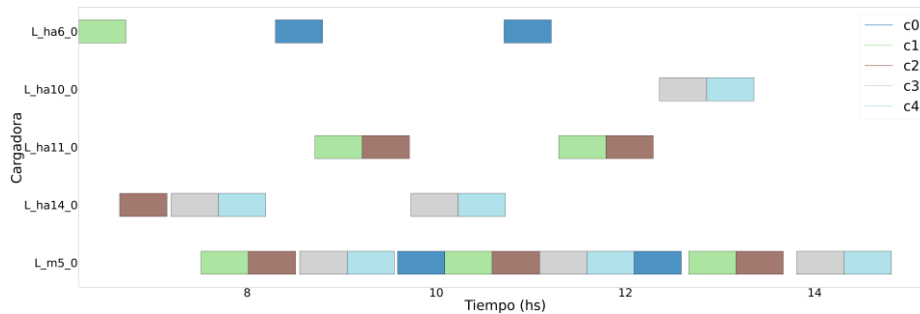


Fig. 6. Sincronización de actividades para FO^4 , Escenario 1.

Al comparar las soluciones ilustradas en las Figuras 5 y 6, se observa una diferencia poco pronunciada entre el tiempo total empleado para finalizar las rutas, con ahorros de tiempo en una magnitud de pocos minutos. Sin embargo, la reducción en los tiempos totales de espera es muy marcada. La sincronización de operaciones obtenida por optimizar FO^4 conlleva un ahorro de 8.6 horas en los tiempos de espera acumulados y reduce el tiempo máximo de espera de las tareas de 3 horas a 5 minutos. La solución alcanzada por esta alternativa genera un ahorro total de 2.84 horas al seleccionar horarios más adecuados para el comienzo y fin de las tareas ejecutadas por $c0$. A su vez, se modifica el orden de ejecución de las tareas planificadas para $c2$, $c3$ y $c4$ y se alcanzan holguras más acotadas para las esperas en las instalaciones origen/destino, lo que produce un ahorro de 5.52 horas totales.

5 Conclusiones

El presente trabajo propuso y evaluó diferentes formulaciones MILP para la sincronización de las actividades de carga/descarga en el problema de transporte de rollizos de madera, considerando los múltiples objetivos que persiguen los tomadores de

decisión a la hora de planificar las operaciones que satisfagan la demanda de las industrias. Además de la minimización de los tiempos máximo de ruta, se analizó el impacto de los tiempos de espera en las soluciones reportadas para los ejemplos considerados. La motivación principal era poder hallar soluciones que se adapten en mayor medida a la realidad al considerar los tiempos muertos entre viajes como uno de los pilares a la hora de optimizar el uso de los recursos disponibles. Debido a que la gran mayoría de estos suelen subcontratarse a un costo en base a la productividad, es fundamental que el tiempo dedicado a la ejecución de las actividades se explote de la manera más eficiente posible.

Agradecimientos. Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Tecnológica Nacional, al CONICET y a la ASaCTel por la financiación recibida a través de los Proyectos PID UTN SIECCU0008601, PIBAA 2872021010 0051CO y PEICID-2022-078.

Referencias

1. Broz, D., Rossit, D., Rossit, D., Cavallin, A. (2018). The Argentinian forest sector: opportunities and challenges in supply chain management. *Uncertain Supply Chain Management*. 6. 375–392. 10.5267/j.uscm.2018.1.001.
2. Ghotb, S., Sowlati, T., Mortyn, J. (2024). Scheduling of log logistics using a metaheuristic approach, *Expert Systems with Applications*, Volume 238, Part D, 122008, doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122008.
3. Karanta, I., Jokinen, O., Mikkola, T., Savola, J., Bounsaythip, C. (2000), Requirements for a Vehicle Routing and Scheduling System in Timber Transport. *Proceedings of the IUFRO International Conference: Logistics in the forest sector*, 235-250.
4. Palmgren, M., Ronnqvist, M., Varbrand, P. (2004). A near-exact method for solving the logtruck scheduling problem. *Int. Trans. Oper. Res.* 11, 447–464.
5. Bordón, M., Montagna, J., Corsano, G. (2021). Solution approaches for solving the log transportation problem, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 98, Pages 611-627, doi.org/10.1016/j.apm.2021.06.003.
6. Vitale, I., Broz, D., & Dondo, R.G. (2021). Optimizing log transportation in the Argentinean forest industry by column generation. *Forest Policy and Economics*.
7. Vitale, I., Cóccola, M., Dondo, R. (2023). Assessing the benefits of storage and transshipments yards in timber supply chains by a column generation + grasp approach. *Annals of Operations Research*. 332. 10.1007/s10479-023-05479-z.
8. Melchiori, L., Nasini, G., Montagna, J., Corsano, G. (2023). Resources synchronization in a full truckload pickup and delivery problem: An exact approach, *Computers & Operations Research*, Volume 151, 10.1016/j.cor.2022.106118.
9. Soares, R., Marques, A., Amorim, P., Rasinmäki, J. (2019). Multiple vehicle synchronization in a full truck-load pickup and delivery problem: A case-study in the biomass supply chain. *European J. Oper. Res.* 277 (1), 174–194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2019.02.025>.
10. Vitale, I., Dondo, R., Cóccola, M. (2023). Optimización logística en cadenas de valor forestales: sincronización de recursos para la carga y descarga de productos forestales. XVI Congreso Internacional de Ingeniería Industrial, COINI 2023.

11. Bynum, M. L., Hackebeit, G. A., Hart, W. E., Laird, C. D., Nicholson, B. L., Sirola, J. D., . . . Woodruff, D. L. (2021). *Pyomo — Optimization Modeling in Python*. Springer Cham.
12. Hart, W. E., Watson, J.-P., & Woodruff, D. L. (2011). Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python. *Mathematical Programming Computation*, 219-260.