

## **I Jornada Binacional de Docentes de Educación Superior del Río Uruguay**

**Título del resumen extenso:** Planificación de Actividades Logísticas en Cadenas de Suministros con modelos computacionales para el desarrollo de la industria forestal en la región

**Eje temático:** Investigación y desarrollo en la Educación Superior.

**Nombres Completos :** Cedaro Karina, Navas Laura E, Jairala María José

**Pertenencia Institucional:** Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay (UTN FRCU)

**País:** Argentina

**Correo electrónico:** [cedarok@frcu.utn.edu.ar](mailto:cedarok@frcu.utn.edu.ar), [navasl@frcu.utn.edu.ar](mailto:navasl@frcu.utn.edu.ar),  
[jairalm@frcu.utn.edu.ar](mailto:jairalm@frcu.utn.edu.ar)

**Resumen** (extensión máxima 500 caracteres sin espacios):

Entre los factores más importantes que afectan la competitividad de una industria figuran los costos de producción y distribución, la calidad de los productos ofrecidos, la capacidad de provisión y el cuidado del medio ambiente. Esto convierte a la planificación logística en una actividad clave para la gestión eficiente de operaciones en cadenas de suministros, a través de un desarrollo sustentable. Dicha afirmación cobra aún más importancia en la industria forestal, un sector productivo que en nuestro país se ve fuertemente afectado por la baja competitividad asociada a los altos costos en logística y transporte por infraestructura inadecuada. Cerrar la brecha entre las prácticas de operación aplicadas en la actualidad y las mejores prácticas logísticas podría significar una gran oportunidad para mejorar la capacidad operativa de las industrias, otorgando un valioso impulso a su competitividad. De esta manera, el presente busca desarrollar modelos computacionales avanzados para la gestión de operaciones en cadenas de suministros a través de la creación de técnicas híbridas y sistemáticas de optimización y/o simulación. Se pondrá especial énfasis sobre la cadena de valor foresto industrial, considerando las condiciones sobre las que se desarrolla la actividad en nuestra región.

**Palabras claves**

CADENA DE SUMINISTRO; LOGÍSTICA; OPTIMIZACIÓN; SIMULACIÓN;  
INDUSTRIA FORESTAL

**Trabajo completo** (extensión mínima 12.000 y máxima 15.000 caracteres sin espacios):

## Introducción

La logística en una cadena de suministro se encarga de coordinar las operaciones vinculadas al manejo de inventarios, el mantenimiento de instalaciones, el aprovisionamiento de materias primas, la producción, el empaquetamiento y el transporte de productos terminados. Se considera la logística como un componente de agregado de valor, que enlaza las necesidades del mercado y la actividad operativa de las industrias.

Hace más de 20 años se estudian los beneficios de planificar de manera integrada las actividades logísticas en una cadena de valor [1, 2], y se ha demostrado que la eficiencia logística se sustenta principalmente en una adecuada coordinación de las operaciones que suceden aguas arriba (“upstream”) y aguas abajo (“downstream”) de las plantas de producción y se ve fuertemente influenciada por la estructura de la cadena de suministro, por la naturaleza de las materias primas y productos que fluyen en ella y por el ciclo de vida de estos. La planificación en cadenas de suministros puede hacerse en los niveles estratégico, táctico y/u operacional, dependiendo de la frecuencia de las decisiones y el tiempo sobre el cual dichas decisiones tendrán un impacto. En el nivel estratégico se toman decisiones a largo plazo sobre la configuración que tendrá la cadena de suministro y los procesos que en esta se realizarán. En el nivel táctico, se determinan los flujos de materiales/productos entre las distintas instalaciones de la red y las políticas de reabastecimiento de inventarios. Por último, en el nivel operacional, la configuración de la cadena de suministro se considera fija. Existe una relación entre el nivel de planificación y el grado de detalle requerido por los modelos computacionales, su complejidad, los requerimientos de información, el nivel de inversión, los riesgos relacionados y la flexibilidad en el proceso de toma de decisiones. En toda cadena de suministro, existe un flujo de materiales/productos entre las distintas instalaciones de la red, representando las operaciones de transporte aproximadamente un tercio de los costos logísticos totales. En la industria forestal los costos logísticos totales representan el 45%, superando al resto de las industrias. En la Mesopotamia, polo foresto industrial, se encuentran ubicados la mayoría de los aserraderos. Por otro lado, las industrias que incorporan mayor valor agregado al sector, están instaladas cerca de los grandes centros urbanos como Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe, así como los principales puertos de exportación. El modo de transporte más utilizado para vincular ambas regiones es el terrestre, el cual tiene un costo relativamente más alto por unidad enviada en comparación con el transporte por tren o barcaza.

La estructura de los modelos computacionales que abordan la planificación a corto plazo en la cadena de suministro forestal es fuertemente dependiente del tipo de material/producto a movilizar. Además, el transporte de carga por ferrocarril se está utilizando actualmente para movilizar rollizos de pino entre Corrientes y los puertos entrerrianos de Ibicuy y pasta de celulosa entre Misiones y Buenos Aires. El transporte intermodal resulta la estrategia más eficiente para grandes volúmenes de material, por lo que sería de gran importancia poder evaluar el uso de dicha estrategia logística desde el punto de vista computacional. En lo que respecta al transporte de la biomasa forestal también se utilizan camiones de carga completa, que llevan la carga desde un origen a un destino, o desde múltiples orígenes a un destino. Esta última opción debe ser considerada en la estructura de los modelos a desarrollar, ya que la mayoría de los aserraderos que funcionan en el Noreste de nuestro país son de tamaño micro o pequeño

y, por lo tanto, la cantidad ofrecida de residuos por ubicación puede ser menor a la carga completa de un camión. Un trabajo de diseño de cadena de suministro aplicado a las condiciones operativas de la Mesopotamia Argentina fue publicado por Campanella et al. [3], quienes propusieron un modelo matemático para el diseño óptimo de la cadena de suministro, focalizándose en el uso apropiado de los residuos de la cosecha forestal y los subproductos de la industria de la madera. El modelo determina la ubicación y la capacidad de cada planta de producción dentro de la estructura logística, la cantidad de residuos y productos generados, y los flujos de materiales entre los distintos eslabones de la cadena de valor, con el objetivo de maximizar la ganancia total de las empresas involucradas. A pesar de que la propuesta de estos autores considera diferentes opciones para el agregado de valor a los residuos forestales, el modelo no es capaz de manejar las variaciones estacionales que caracterizan al suministro de la biomasa y la demanda de energía, lo que puede generar como resultado una demanda insatisfecha de calor durante la temporada de invierno. En los meses de invierno, la demanda de calor es alta, mientras que el suministro de biomasa es limitado debido al acceso restringido a las áreas forestales, principalmente por las condiciones del clima y el estado de las rutas de acceso. Esto demuestra la necesidad de considerar dentro de los modelos computacionales, restricciones relacionadas al seguimiento de inventarios tanto de materia prima como de producto terminado en los distintos eslabones de la cadena de valor. Además del trabajo antes mencionado de Campanella et al. [3], Uasuf y Becker [4] desarrollaron un estudio para determinar los costos y el consumo de energía en la producción de pellets de madera en el Noroeste Argentino. Dicho trabajo se limitó solo a la operación de conversión de la biomasa en pellets, incluyendo las actividades realizadas desde el ingreso de la materia prima hasta el almacenamiento de los productos terminados dentro de la planta. Las operaciones de transporte no fueron consideradas en este estudio. En conclusión, la mayoría de los trabajos mencionados anteriormente y otros publicados en la literatura sobre la cadena de suministro forestal simplifican las actividades de transporte (recolección de materias primas y/o distribución de producto terminado), considerando entrega directa punto a punto sin incluir decisiones de ruteo de los camiones. Conociendo a priori el aporte significativo de estas actividades al costo operativo final, la planificación detallada de las rutas de recolección/distribución es una cuestión de suma importancia que comenzó a ser abordada por el grupo de trabajo del presente proyecto.

Un algoritmo de optimización para la gestión eficiente del flujo de materiales a lo largo de la cadena de suministro de pellets de madera, considerando la infraestructura de trabajo en nuestro país, fue presentado por Vitale et al. [5]. El objetivo era optimizar de manera integrada, a través de una estrategia matemática-computacional todas las operaciones relacionadas con la recolección, almacenamiento, y transporte de la biomasa forestal hacia los centros de conversión, incluyendo también la logística de salida que trata con el almacenamiento y distribución del producto terminado hacia los centros de consumo. Como la complejidad combinatoria del problema resultaba en modelos matemáticos difíciles de resolver computacionalmente a través de enfoques de optimización monolíticos, se desarrolló un algoritmo de optimización en dos etapas, en dónde en primer lugar se determinan las rutas más rentables tanto para la recolección de los residuos como para la entrega de pellets embolsadas y a granel y luego ambos conjuntos de rutas alimentan a un modelo matemático de tipo MILP con manejo continuo del tiempo que permite determinar, en forma integrada, el resto de las decisiones operativas de recolección, almacenamiento, producción y distribución. La

estrategia de optimización fue utilizada para la resolución de un caso de estudio específico de la provincia de Entre Ríos. Los resultados obtenidos demostraron que los costos operativos más importantes, además de los costos de recolección de la materia prima, son aquellos asociados con el transporte de los productos finales y los costos derivados de las operaciones de producción, incluyendo la biomasa adicional que se requiere para las operaciones de secado de los residuos húmedos dentro de la planta.

Con el objetivo de impulsar el desarrollo de nuevos proyectos de investigación y la formación de recursos humanos en temáticas relacionadas a la gestión de operaciones en ambientes industriales y cadenas de suministros, en el año 2022 se formalizó la creación del Grupo de Investigación en Gestión de Operaciones y Logística -GIOL-, dependiente del Departamento de Licenciatura en Organización Industrial de UTN-FRCU. Actualmente, desde dicho grupo de trabajo se está abordando el problema de la programación diaria de operaciones para una flota de camiones que transportan rollizos desde las áreas de cosecha hacia un conjunto de aserraderos, con el objetivo de minimizar los costos operativos. El trabajo contempla la planificación de las actividades de transporte sobre múltiples períodos de tiempo, evaluando las ventajas de incorporar operaciones de almacenaje en centros intermedios (“transshipment yards”), una práctica que actualmente no es utilizada en nuestro país, pero cuya implementación puede traer importantes beneficios económicos. Por otra parte, también se está abordando el problema de planificación logística a nivel estratégico en la cadena de suministro de la biomasa forestal, para el aprovechamiento eficiente de los subproductos provenientes del primer ciclo de industrialización de la madera, evaluando diferentes alternativas para la producción de biocombustibles líquidos o sólidos.

## **Objetivos del Proyecto**

### **Objetivo General:**

Desarrollar y aplicar herramientas computacionales sistemáticas e integradas para la planificación de actividades logísticas en cadenas de suministros de múltiples niveles, poniendo especial interés sobre el sector foresto-industrial de nuestro país.

### **Objetivos Específicos**

Objetivo 1. Desarrollar algoritmos computacionales sustentados en técnicas de optimización para dar solución de manera predictiva a problemas logísticos en redes de suministro complejas.

Objetivo 2. Desarrollar estrategias de optimización de tipo reactiva y/o modelos de simulación de eventos discretos para manejar la incertidumbre cuando se resuelven problemas a nivel operacional en la cadena de suministro.

Objetivo 3. Extender las estrategias de solución desarrolladas para considerar modelos multiobjetivo que además de incorporar costos operacionales, tengan en cuenta los aspectos sociales y medioambientales involucrados en el funcionamiento de la estructura logística.

Objetivo 4. Validar los modelos desarrollados a partir de la resolución de problemáticas logísticas del sector foresto-industrial de nuestro país.

## Contribuciones al avance científico, tecnológico, transferencia al medio

La resolución de problemas logísticos en cadenas de suministros a través de estrategias matemático-algorítmicas se caracteriza por tener una complejidad combinatoria muy alta, debido al crecimiento exponencial del tamaño de los problemas, los cuales dependen de la cantidad de instalaciones en la red logística, el número de productos a transportar, el tamaño de la flota de vehículos, y otras características que definen la topología de dichos problemas. Las estrategias de optimización de tipo predictivas que se construyan en primera instancia se combinarán luego con estrategias de tipo reactiva para poder ajustar las decisiones operacionales antes los cambios que ocurran en los datos de entrada de los problemas. Una técnica predictiva-reactiva ampliamente utilizada es aquella conocida como “horizonte rodante”(rolling horizon), la cual consiste en particionar el horizonte de planificación en varios periodos y tomar decisiones operativas para cada uno de los periodos de forma encadenada. Con esto se consigue incorporar los cambios y variaciones ocurridas en cada período. Además, se utilizará la simulación de eventos discretos como técnica complementaria para evaluar las fuentes de incertidumbre en los sistemas estudiados. De esta manera, se pueden plantear y simular distintos escenarios posibles para analizar la capacidad de respuesta del sistema ante los cambios en el funcionamiento que se presenten. Una de las ventajas de la simulación es la posibilidad de visualizar las operaciones a ejecutar y los eventuales “cuellos de botella” que pueden aparecer en el funcionamiento de los sistemas.

En el presente proyecto también se pretende abordar la optimización multi-objetivo (MOP por sus siglas en inglés), qué significa optimizar de manera simultánea dos o más objetivos en conflicto. A diferencia de un problema de optimización de un solo objetivo, una MOP no tiene solo una solución óptima al problema de optimización, sino un conjunto de soluciones conocido como el frente óptimo de Pareto. Dada la complejidad, la dificultad y el alto costo asociado con la evaluación de las funciones objetivo, muchas veces es necesario el empleo de algoritmos metaheurísticos para tratar de resolver las MOP de la manera más eficiente. La variedad de herramientas a utilizar pone de manifiesto el aspecto multidisciplinar del plan de trabajo. Para la resolución de los modelos matemáticos lineales o no-lineales que incluyen variables discretas y continuas, se dispone de paquetes de software que realizan una búsqueda implícita y eficiente en el árbol de soluciones del problema (ambientes de programación GAMS, Python con la librería PYOMO, y “solvers” CPLEX, GUROBI y DICOPT). En cuanto a la metodología de desarrollo de los modelos se emplearán técnicas estándar provenientes de la Ingeniería de Software, tales como la técnica de desarrollo incremental, que propone la generación de un modelo básico, el cual se va paulatinamente verificando y se van agregando nuevos elementos y funcionalidades que permiten considerar problemas de mayor nivel de complejidad. Para la construcción de los modelos de simulación de eventos discretos, se utilizará el software SIMIO. Por último, vale la pena destacar que se espera integrar los modelos computacionales desarrollados con base de datos y planilla de cálculos para la lectura de datos de entrada y escritura de resultados.

Se pondrá especial énfasis sobre un sector productivo muy importante para la Mesopotamia Argentina y cuya operación actualmente se ve fuertemente afectada por los altos costos logísticos asociados. Mejores prácticas logísticas se traducen directamente en una mejora de la competitividad en toda cadena de suministro, por

ejemplo, la generación de bioenergía de base forestal, a partir del aprovechamiento de los subproductos de la transformación primaria y secundaria de la madera, representa una oportunidad de dinamización para la industria forestal. En Entre Ríos funcionan más de 200 empresas en el sector de la madera, de las cuales 178 son aserraderos, según el último censo nacional realizado en el año 2015. La principal característica de este sector es el bajo rendimiento, donde prácticamente el 65% de la materia prima se pierde como residuo. Se estima que el rendimiento promedio (producción/materia prima) de los aserraderos es de aproximadamente un 37% [6,7].

De esta manera, el desarrollo de conocimiento y la transferencia de nuevas herramientas logísticas al sector foresto industrial de la región, permitirá no solo mejorar la rentabilidad de las empresas involucradas (en su mayoría PyMEs), sino que también favorecerá el aprovechamiento eficiente de los recursos naturales, minimizando el impacto ambiental asociado. En cuanto al avance científico-tecnológico, el desarrollo de herramientas logísticas de soporte al proceso de toma de decisión en cadenas de suministros es un área de investigación muy activa a nivel internacional. Si bien numerosos trabajos han sido publicados sobre modelos de optimización/simulación para la gestión logística en la cadena de suministro forestal, la mayoría de los problemas se plantearon desde el punto de vista estratégico y/o táctico, dejando el nivel operacional, es decir la planificación a corto plazo, como un área de investigación naciente y en donde todavía queda mucho trabajo por hacer, especialmente en el desarrollo de técnicas computacionales eficientes que puedan brindar soluciones prácticas a problemas reales con moderado esfuerzo computacional. Los problemas de planificación a corto plazo en cadenas de suministro generalmente involucran decisiones sobre el ruteo y la programación de actividades de la flota de transporte disponible, lo que conduce a problemas de elevada complejidad computacional que requieren del diseño de técnicas de solución eficiente para cada problemática abordada.

## Referencias

1. Baita, F, Ukovich, W, Pesenti, R. & Favaretto, D. (1998). Dynamic routing-and-inventory problems: a review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 32(8), 585-598.
2. Chandra, P. & Fisher, M.L. (1994). Coordination of production and distribution planning. *European Journal of Operational Research*, vol. 79, 503-517.
3. Campanella, S., Corsano, G., & Montagna, M. (2018). A modeling framework for the optimal forest supply chain design considering residues reuse. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 16, 13-24.
4. Uasuf, A., & Becker, G. (2011). Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. *Biomass and Bioenergy*, vol. 35 (3), 1357-1366.
5. Vitale, I., Dondo, R., Gonzalez, M., & Cóccola, M. (2022). Modelling and optimization of material flows in the wood pellet supply chain. *Applied Energy*, vol. 313.
6. Censo Nacional de Aserraderos. Informe del relevamiento censal en la provincia de Corrientes. (2018). <https://apefic.org.ar/wpcontent/uploads/2019/>

10/Censo-Nacional-de-Aserraderos-Provincia-de-Corrientes.pdf.

7. Censo Nacional de Aserraderos. Informe del relevamiento censal en la provincia de Entre Ríos - Región Mesopotámica. (2018).