

Optimal design of a recovery and valorization network for end-of-life tires

G. Franceschina^{1,5}[0009-0006-3666-4679], M. González Prieto^{1,2,4}[0000-0002-9123-5301] and M. S. Moreno^{3,4}[0000-0001-5744-5586]

¹ Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible - CEDETS (UPSO-CIC)

² Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS)

³ Planta Piloto de Ingeniería Química - PLAPIQUI (UNS-CONICET)

Bahía Blanca, 8000, Argentina

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

⁵ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina
gfranceschina@plapiqui.edu.ar

Abstract. End-of-Life Tires (ELT) management constitutes an environmental, sanitary, and logistical problem of high complexity, requiring the development of recovery and valorization systems aimed at mitigating their impact. This work addresses the optimal design of a reverse logistics network for ELT, focused on recovering their components and transforming them into value-added products. A mixed-integer linear programming (MILP) model is developed to evaluate the use of different technological alternatives for material and energy recovery, maximizing the economic benefit of the system. The network includes ELT generation points with retreading capacity, collection centers, co-processing plants, and recovery facilities with different technologies, such as shredding, pyrolysis, gasification, and devulcanization. Unlike previous studies, this work incorporates the conceptual design of recovery plants, considering the use of primary and secondary equipment to obtain different products. Given an ELT generation profile, the model determines the optimal configuration of the network, including the opening of collection and recovery facilities at predefined locations, the participation of co-processing plants, the selection of technologies and equipment types at each recovery facility, as well as the allocation of flows between nodes and the products to be commercialized. The objective function integrates investment, operational, and transportation costs along with revenues from the commercialization of recovered products. The model is applied to a case study based on estimates for the province of Buenos Aires.

Keywords: MILP model, ELTs, reverse logistics, ELTs valorization, optimization.

Diseño óptimo de una red de recuperación y valorización de neumáticos fuera de uso

Resumen. La gestión de los Neumáticos Fuera de Uso (NFU) constituye un problema ambiental, sanitario y logístico de alta complejidad, que requiere el desarrollo de sistemas de recuperación y valorización orientados a mitigar su impacto. Este trabajo aborda el diseño óptimo de una red de logística inversa de NFU orientada a recuperar sus componentes y transformarlos en productos de valor. Para ello, se desarrolla un modelo de programación mixto entero lineal (MILP) que evalúa el empleo de distintas alternativas tecnológicas de valorización material y energética, maximizando el beneficio económico del sistema. La red considerada incluye puntos de generación de NFU con capacidad de reconstruirlos, centros de acopio, plantas de coprocesamiento y plantas de recuperación con diferentes tecnologías, tales como trituración, pirólisis, gasificación y desvulcanización. A diferencia de trabajos previos, se incorpora el diseño conceptual de las plantas de recuperación, considerando la utilización de equipamiento primario y secundario para obtener distintos productos. Dado un perfil de generación de NFU, el modelo permite determinar la configuración óptima de la red incluyendo la apertura de instalaciones de acopio y recuperación en ubicaciones predefinidas, la participación de plantas de coprocesamiento, la selección de tecnologías y tipo de equipamiento en cada planta de recuperación, así como la asignación de flujos entre nodos y productos a comercializar. La función objetivo integra costos de inversión, operación y transporte junto a los ingresos por la comercialización de productos recuperados. El modelo se aplica a un caso de estudio con estimaciones basadas en la provincia de Buenos Aires.

Palabras clave: modelo MILP, NFU, logística inversa, valorización de NFU, optimización.

1 Introducción

Los Neumáticos Fuera de Uso (NFU) constituyen una problemática creciente a nivel global, impulsada por el aumento del parque automotor. Una vez finalizada su vida útil, los neumáticos se convierten en un residuo de difícil gestión debido tanto a su lenta degradación como a su estructura hueca, lo que incrementa los costos logísticos en ausencia de tratamientos previos de trituración (de Souza & D'Agosto, 2013). Asimismo, su morfología favorece la acumulación de agua, mientras que su composición puede dar lugar a lixiviados tóxicos, generando riesgos sanitarios. A ello se suma su dispersión geográfica, que dificulta su recolección eficiente y el diseño de sistemas de reciclado.

No obstante, los NFU representan una fuente relevante de materiales y energía. En este sentido, su adecuada gestión no solo permite mitigar impactos ambientales y sanitarios, sino también recuperar valor a través de distintas alternativas de valorización (Abbas-Abadi et al., 2022). Entre ellas, la reconstrucción extiende la vida útil del neu-

mático para su reutilización; en Argentina, este proceso se limita principalmente a neumáticos de gran porte, como los de carga. En cuanto a la valorización material, la trituración mecánica puede llevarse a cabo en distintos niveles según el tipo de equipamiento y el grado de procesamiento requerido. El principal producto obtenido es caucho granulado de diversa granulometría, pudiendo alcanzarse la producción de polvo de caucho en etapas más avanzadas. Adicionalmente, se recuperan acero y fibras textiles presentes en la estructura del neumático. Por su parte, las tecnologías de valorización química o termoquímica comprenden procesos como la pirólisis, la gasificación y la desvulcanización, que permiten generar una variedad de productos, tales como aceite y gas de pirólisis (TPO y TPG respectivamente, por sus siglas en inglés), gas de síntesis (*syngas*), caucho desvulcanizado y negro de humo recuperado (rCB, por sus siglas en inglés), entre otros, con la posibilidad de adquirir un mayor valor agregado mediante etapas posteriores de procesamiento. Por ejemplo, es posible obtener limoneno a partir del TPO y combustible de aviación sustentable (SAF, por sus siglas en inglés) a partir de *syngas*. Finalmente, los NFU pueden destinarse al coprocesamiento en hornos cementeros, tecnología que combina valorización energética y material, donde el caucho se utiliza como combustible alternativo mientras que los componentes minerales se incorporan al clinker o material sólido que luego se muele para producir cemento.

En este contexto, el diseño de redes de Logística Inversa (LI) resulta clave, ya que la viabilidad de la recuperación de NFU depende en gran medida de los costos de transporte y de las alternativas de valorización. Estas redes involucran generadores, Centros de Acopio (CA), plantas de procesamiento, así como mercados finales de los productos obtenidos. Su diseño estratégico implica definir ubicación, capacidad, tecnologías y asignar flujos de materiales (Sasikumar et al., 2010).

Diversos estudios han abordado este problema mediante modelos de optimización, principalmente utilizando programación matemática. Entre ellos, Sasikumar et al. (2010) desarrollaron un modelo de programación mixto entero no lineal orientado exclusivamente a la reconstrucción de NFU. Asimismo, otros trabajos analizan configuraciones específicas de la red considerando una única tecnología de valorización. Por ejemplo, Flórez Calderón et al. (2012) presentaron un modelo programación mixto entera lineal (MILP) multiperíodo en el que se considera la instalación de nuevas plantas de trituración que complementen a las ya existentes para maximizar el beneficio de la red. Castañeda-Rodríguez & Espinoza Pérez (2025) desarrollaron un modelo MILP multiobjetivo (MO) y multiperíodo que incorpora dimensiones económicas, ambientales y sociales, considerando la pirólisis como alternativa de tratamiento.

Por otro lado, algunas contribuciones han comenzado a integrar más de una vía de valorización. Banguera et al. (2018) presentan un modelo MILP que incorpora coprocesamiento y trituración bajo un esquema de responsabilidad extendida del productor, incorporando restricciones regulatorias y sanciones por incumplimiento. En esta misma línea, Paramanik & Mahanty (2023) consideran pirólisis y desvulcanización mediante un modelo MOMILP multiperíodo.

No obstante, la mayoría de estos trabajos analiza las alternativas tecnológicas de valorización de manera aislada o limitada, sin considerar su coexistencia y competencia dentro de una misma red de LI.

En este trabajo se desarrolla un modelo MILP para el diseño de una red de LI de NFU que integra, además de la reconstrucción, múltiples alternativas tecnológicas de valorización, incluyendo trituración, pirólisis, gasificación, desvulcanización y coprocesamiento. El modelo permite determinar de manera simultánea la apertura de los CA y las plantas de recuperación, la participación de las plantas de coprocesamiento, la selección de tecnologías de recuperación y tipos de equipamiento en las plantas de recuperación, así como la asignación óptima de flujos en la red. A diferencia de enfoques previos, la formulación incorpora el diseño conceptual de las plantas de recuperación permitiendo obtener distintos productos en función del equipamiento seleccionado dentro de cada alternativa de valorización.

2 Descripción del Problema

La Fig. 1 presenta la red de LI de NFU bajo estudio que se compone de tres niveles: sitios de generación, CA y plantas de tratamiento. Cada nodo $g \in G$ genera $n \in N$ tipos de NFU en cantidades conocidas ge_{ng} durante el horizonte de tiempo H . Algunos tipos de NFU ($n \in SN$), por sus características técnicas y condiciones de uso, pueden ser reconstruidos para extender su vida útil en los nodos g (RE_{ng}), proceso que genera polvo de caucho como subproducto (QG_g). Los NFU que no son reconstruidos son enviados a los CA $c \in C$ (FC_{ngc}) para su almacenamiento temporal hasta su traslado final hacia plantas de recuperación $r \in R$ (FR_{ncr}) o de coprocesamiento $s \in S$ (FS_{ncs}). Todos los flujos de materiales se expresan en unidades de masa.

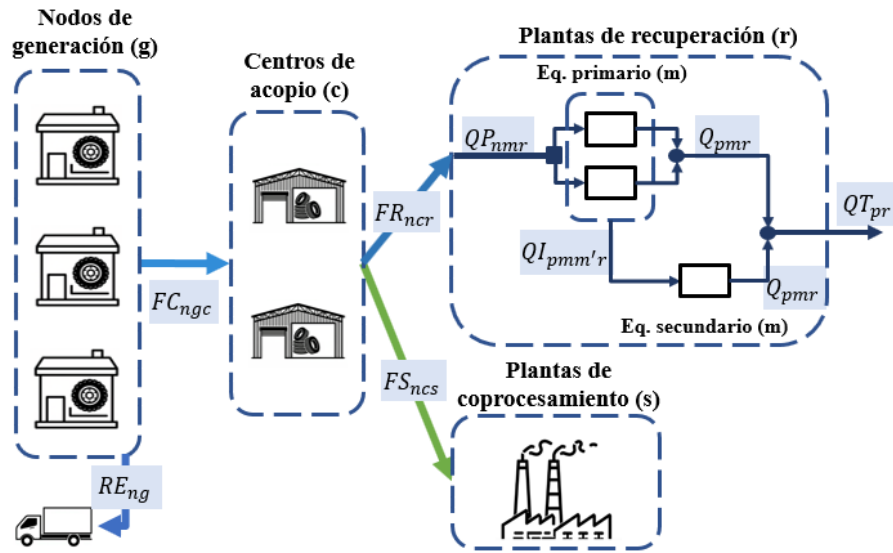


Fig. 1. Estructura de la red de LI para la recuperación de NFU.

En cada planta s los NFU son utilizados principalmente como sustituto de combustible en hornos industriales. Las plantas de recuperación r poseen distintas tecnologías de reciclado, tales como trituración, pirólisis, desvulcanización y gasificación para obtener los productos $p \in P_r$. Como se ilustra en la Fig. 2, cada una de estas tecnologías puede implementarse mediante distintos tipos de equipamiento $m \in M_r$, entre los que se distinguen los de tipo primario $m \in MP_r$ de los secundarios $m \in MS_r$, donde se elaboran los productos $p \in SP_m$. En el caso de los secundarios, ingresan un subconjunto de productos $p \in RM_m$ generados en la etapa primaria.

Como se observa en la Fig. 2, en la trituración el equipamiento primario corresponde al triturador grueso (m_1), que produce caucho granulado (p_1), acero recuperado (p_2) y material textil (p_4), mientras que el secundario es un triturador fino (m_2) que procesa el p_1 para obtener polvo de caucho (p_3). Para la pirólisis, se podría emplear un reactor pirolítico de lecho (m_3) o uno rotativo (m_4) como equipamiento primario, que permiten obtener p_2 , p_3 , TPO (p_5), TPG (p_6) y rCB (p_7) en distintas proporciones. Mediante la incorporación de un tren de columnas de destilación (m_5) como tipo de equipamiento secundario se podrá producir limoneno (p_8), p_7 y compuestos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) (p_{10}) a partir del p_5 . En la desvulcanización existen 2 opciones de equipamiento primario: un reactor termomecánico (m_6) y uno de microondas (m_7) que producen caucho desvulcanizado (p_9) y char (p_{12}). Por último, en la gasificación se utiliza un reactor de gasificación (m_8) como equipamiento primario del que se obtiene *syngas* (p_{11}) y carbón activado (p_{14}) y el reactor Fischer-Tropsch (m_9) como opción secundaria que produce SAF (p_{13}) a partir del p_{11} .

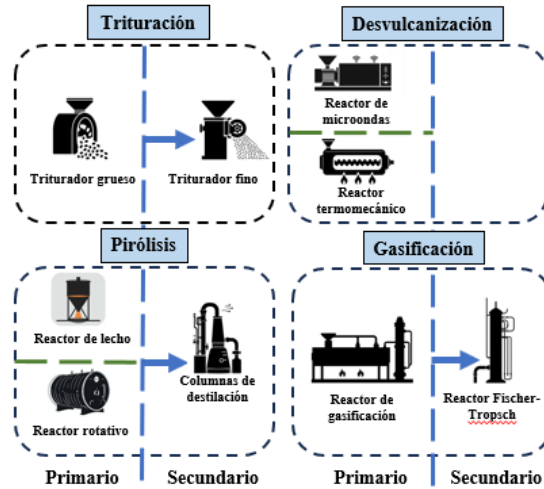


Fig. 2. Tipos de equipamiento disponibles en cada tecnología de recuperación.

Asumiendo que se procesa todo el NFU generado, que los nodos de la red se instalan en ubicaciones preestablecidas y que no se admiten flujos entre nodos del mismo nivel, el problema determina: (i) el diseño de la red que incluye la instalación de CA y plantas de recuperación, la participación de plantas de coprocesamiento preexistentes, la cantidad de NFU reconstruidos en origen y los flujos entre los distintos nodos de la red; (ii)

el diseño conceptual de las plantas de recuperación, seleccionando el equipamiento primario y secundarios a utilizar, la cantidad procesada en cada uno y los productos generados en cada alternativa tecnológica.

3 Formulación del Modelo

A continuación, se detalla la formulación MILP propuesta para diseñar la red de LI de NFU. Las restricciones se presentan agrupadas por nivel de la red y la función objetivo se expresa al final.

3.1 Puntos de Generación

$$ge_{ng} = \sum_{c \in C} FC_{ngc} + RE_{ng} \Big|_{n \in SN} \quad \forall n \in N, g \in G \quad (1)$$

$$\sum_{g \in G} RE_{ng} \leq rmax_n \cdot \sum_{g \in G} ge_{ng} \quad \forall n \in SN \quad (2)$$

$$QG_g = fg_n \cdot RE_{ng} \quad \forall n \in SN, g \in G \quad (3)$$

La Ec. (1) indica que todo lo que se genera de n en los puntos de generación g , y no se reconstruya se envíe a los CA (FC_{ngc}). La Ec. (2) restringe la cantidad total reconstruida de cada tipo de NFU en todos los nodos g a un porcentaje máximo de reconstrucción ($rmax_n$) de la cantidad total del mismo generada en el sistema. La Ec. (3) determina la cantidad de polvo de NFU generado como una fracción (fg_n) de la cantidad reconstruida.

3.2 Centros de Acopio

$$\sum_{n \in N} \sum_{g \in G} FC_{ngc} \leq ca_c^{up} \cdot x_c \quad \forall c \in C \quad (4)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{g \in G} FC_{ngc} \geq ca_c^{lo} \cdot x_c \quad \forall c \in C \quad (5)$$

$$\sum_{g \in G} FC_{ngc} = \sum_{r \in R} FR_{ncr} + \sum_{s \in S} FS_{ncs} \quad \forall n \in N, c \in C \quad (6)$$

La variable binaria x_c es igual a 1 si se instala el CA c , en caso contrario es igual a 0. Entonces, mediante las Ecs. (4) y (5) se establecen las cotas máximas y mínimas para el flujo total de NFU recibido en cada CA imponiendo que no supere su capacidad máxima de almacenamiento (ca_m^{up}) y un nivel mínimo de operación (ca_m^{lo}), respectivamente. La Ec. (6) garantiza que todo lo que ingresa al CA sea enviado a las plantas de recuperación o de coprocesamiento.

3.3 Plantas de Recuperación y Coprocesamiento

$$\sum_{n \in N} \sum_{c \in C} FR_{ncr} \leq cp_r^{up} \cdot w_r \quad \forall r \in R \quad (7)$$

$$\sum_{m \in MP_r} y_{mr} = w_r \quad \forall r \in R \quad (8)$$

$$\sum_{m \in MS_r} y_{mr} \leq \sum_{m \in MP_r} y_{mr} \quad \forall r \in R \quad (9)$$

$$\sum_{n \in N} QP_{nmr} \leq ce_m^{up} \cdot y_{mr} \quad \forall m \in MP_r, r \in R \quad (10)$$

$$\sum_{n \in N} QP_{nmr} \geq ce_m^{lo} \cdot y_{mr} \quad \forall m \in MP_r, r \in R \quad (11)$$

$$\sum_{c \in C} FR_{ncr} = \sum_{m \in MP_r} QP_{nmr} \quad \forall n \in N, r \in R \quad (12)$$

$$\alpha_m \cdot \sum_{n \in N} (fp_{npm} \cdot QP_{nmr}) = Q_{pmr} + \sum_{m' \in MS_r} QI_{pmm'r} \Big|_{p \in RM_{m'}} \quad \forall p \in SP_m, m \in MP_r, r \in R \quad (13)$$

$$\alpha_m \cdot \sum_{p' \in RM_m} \left(fse_{p'pm} \cdot \sum_{\substack{m' \in MP_r \\ m \in MS_r, r \in R}} QI_{p'm'mr} \right) = Q_{pmr} \quad \forall p \in SP_m, \quad (14)$$

$$Q_{pmr} \leq q_{pmr}^{up} \cdot y_{mr} \quad \forall p \in P_r, m \in M_r, r \in R \quad (15)$$

$$\sum_{m' \in MS_r} QI_{pmm'r} \leq q_{pmr}^{up} \cdot y_{mr} \quad \forall p \in RM_m, m \in MP_r, r \in R \quad (16)$$

$$\sum_{m' \in MP_r} QI_{pm'mr} \leq ce_m^{up} \cdot y_{mr} \quad m \in MS_r, r \in R \quad (17)$$

$$\sum_{m' \in MP_r} QI_{pm'mr} \geq ce_m^{lo} \cdot y_{mr} \quad m \in MS_r, r \in R \quad (18)$$

$$QT_{pr} = \sum_{m \in M_r} Q_{prm} \Big|_{p \in SP_m} \quad \forall p \in P_r, r \in R \quad (19)$$

$$DEI_{mr} = (1 - \alpha_m) \cdot \sum_{n \in N} QP_{nmr} \quad \forall m \in MP_r, r \in R \quad (20)$$

$$DEI_{mr} = (1 - \alpha_m) \cdot \sum_{p \in RM_m} \sum_{m' \in MP_r} QI_{pm'mr} \quad \forall m \in MS_r, r \in R \quad (21)$$

$$DE_r = \sum_{m \in M_r} DEI_{mr} \quad \forall r \in R \quad (22)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{c \in C} FS_{ncs} \leq cc_s^{up} \cdot z_s \quad \forall s \in S \quad (23)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{c \in C} FS_{ncs} \geq cc_s^{lo} \cdot z_s \quad \forall s \in S \quad (24)$$

Se introduce la variable binaria w_r la cual adopta el valor 1 si se instala la planta de recuperación r y 0 en caso contrario. Así, la Ec. (7) garantiza que si la planta de recuperación r se instala ($w_r = 1$) el flujo total que ingresa no supere su capacidad máxima de procesamiento (cp_r^{up}).

Para abordar el diseño de las plantas de recuperación se define la variable binaria y_{mr} que toma valor 1 cuando se instala el equipamiento m en la planta r y 0 en caso contrario. Si la planta de recuperación r se instala ($w_r = 1$), entonces la Ec. (8) asegura que se seleccione un único tipo de equipamiento primario. La Ec. (9) indica que solo se puede instalar equipamiento secundario ($m \in MS_r$) si previamente se instala algún equipamiento primario ($m \in MP_r$).

Sea QP_{nmr} la cantidad de NFU n procesados en el equipamiento primario m de la planta r , las Ecs. (10) y (11) restringen esta cantidad para que se encuentre entre las capacidades máxima y mínima de operación (ce_m^{up}, ce_m^{lo}) del equipamiento m , respectivamente, cuando el equipamiento es instalado. La Ec. (12) iguala esta cantidad al flujo total de NFU que ingresa a la planta r .

Mediante el factor de conversión del NFU a producto fp_{npm} , la Ec. (13) calcula la cantidad total de producto p obtenido a partir de n en el equipamiento primario ($m \in MP_r$). Dicho producto puede constituir un producto final, Q_{pmr} , o bien ser enviado a un equipamiento secundario ($m' \in MS_r$), como flujo intermedio $QI_{pm'm'r}$, para un procesamiento adicional. De manera similar, sea $fse_{p'pm}$ el factor de conversión del producto p' a producto p en el equipamiento secundario ($m \in MS_r$), entonces la Ec. (14) obtiene la cantidad de producto final Q_{pmr} en el mismo. En estas restricciones, el factor α_m representa la proporción del material que es efectivamente procesado en cada m , reflejando la eficiencia operativa específica de cada tipo de equipamiento.

Si se instala el equipamiento m en la planta ($y_{mr} = 1$), la Ec. (15) garantiza que Q_{pmr} no supere la cantidad máxima de producto que se puede obtener en el mismo (q_{pmr}^{up}), mientras que la Ec. (16) aplica el mismo criterio para el flujo $QI_{pm'm'r}$ que se envía del equipamiento primario al secundario. Las Ecs. (17) y (18) garantizan, para el equipamiento secundario ($m \in MS_r$), que esta última cantidad no supere la capacidad

de procesamiento máxima y mínima del equipamiento secundario (ce_m^{up}, ce_m^{lo}) , respectivamente. La Ec. (19) condensa la producción total del producto final p en la planta de recuperación r (QT_{pr}), agregando la producción de todos los tipos de equipamientos instalados.

Las Ecs. (20) y (21) determinan el descarte (DEI_{mr}) generado en el equipamiento primario y secundario, respectivamente. Finalmente, la Ec. (22) condensa estos flujos para obtener el descarte total generado en la planta de recuperación r , DE_r .

Se define la variable binaria z_s que adopta valor 1 si la planta de coprocesamiento s participa en la red de LI y 0 en caso contrario. Las Ecs. (23) y (24) establecen que el flujo total de neumáticos n enviados desde el CA c a la planta s (FS_{ncs}), se encuentre entre sus límites operativos máximo y mínimo admisible (cc_s^{up}, cc_s^{lo}) . Además, estas restricciones aseguran que este flujo sea cero cuando la planta de coprocesamiento s no se utiliza en la red ($z_s = 0$).

3.4 Función Objetivo

$$BEN = IT - CT \quad (25)$$

$$IT = \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} RE_{ng} \cdot ir_n + \sum_{g \in G} QG_g \cdot pvg + \sum_{r \in R} \sum_{p \in P_r} QT_{pr} \cdot pvp_p + \sum_{n \in N} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} FS_{ncs} \cdot pvc_n \quad (26)$$

$$CT = fa \cdot (INV + CEQ) + COP + CTR \quad (27)$$

$$INV = \sum_{c \in C} cfc_c \cdot x_c + \sum_{r \in R} cfr_r \cdot w_r \quad (28)$$

$$CEQ = \sum_{r \in R} \sum_{m \in M_r} cfe_m \cdot y_{mr} \quad (29)$$

$$COP = \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} cre_n \cdot RE_{ng} + \sum_{n \in N} \sum_{g \in G} \sum_{c \in C} cvc_c \cdot FC_{ngc} + \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} \sum_{m \in MP_r} cv_m \cdot QP_{nmr} + \sum_{p \in RM_m} \sum_{m' \in MP_r} \sum_{m \in MS_r} \sum_{r \in R} cv_m \cdot QI_{pm'mr} \quad (30)$$

$$CTR = ct \cdot \left(\sum_{n \in N} \sum_{g \in G} \sum_{c \in C} dgc_{gc} \cdot FC_{ngc} + \sum_{n \in N} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} dcr_{cr} \cdot FR_{ncr} + \sum_{n \in N} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} dcs_{cs} \cdot FS_{ncs} + \sum_{r \in R} DE_r \cdot dr_r \right) \quad (31)$$

La función objetivo (Ec. 25) maximiza el beneficio anual del sistema (BEN), definido como la diferencia entre los ingresos totales (IT) y los costos totales (CT). En la Ec.

(26) los ingresos provienen de cuatro términos: (i) la reconstrucción de los NFU, donde ir_n representa el ingreso por unidad de masa reconstruida de NFU n ; (ii) la venta del polvo de caucho en los nodos de generación, siendo pvg su precio de venta por unidad de masa; (iii) la comercialización de productos finales obtenidos en las plantas de recuperación, donde pvp_p corresponde al precio de venta por unidad de masa del producto p ; y (iv) el coprocesamiento de NFU en cementeras, donde pvc_n indica el precio de venta por unidad de masa de NFU n .

En la Ec. (27) los costos totales se descomponen en cuatro componentes: inversión en infraestructura (INV), inversión en equipamiento (CEQ), operación (COP) y transporte (CTR). La Ec. (28) incluye los costos fijos de apertura de los CA ($cf c_c$) y de las plantas de reciclado ($cf r_r$). La Ec. (29) calcula la inversión en equipamiento primario y secundario ($cf e_m$), determinando la configuración tecnológica de cada planta. Ambos tipos de inversión se anualizan mediante el factor fa , de forma tal que todos los términos de la función objetivo estén en la misma base temporal. La Ec. (30) expresa los costos operativos, los cuales incluyen la reconstrucción de NFU (cre_n), la operación de los CA (cvc_c) y el funcionamiento de los equipos en las plantas de recuperación (cv_m). Finalmente, la Ec. (31) estima los costos de transporte, que incluyen el traslado de NFU entre los nodos de la red (considerando las distancias dc_{gc} , dc_{cs} y dc_{cr}) y el transporte del material descartado en plantas de recuperación (DE_r) hasta el relleno sanitario. Para su cálculo se utiliza el parámetro ct , correspondiente al costo unitario por unidad de masa y por unidad de distancia.

4 Caso de Estudio

El modelo desarrollado se aplica a la provincia de Buenos Aires (PBA), utilizando como base la generación de NFU reportada por el Ministerio de Medio Ambiente (2022). De acuerdo a este informe, se estima que en 2020 se generaron 65.946 t de NFU. Se tienen en cuenta dos tipos de NFU: automóvil (n_1) y camión (n_2) siendo estos últimos los únicos que pueden reconstruirse. En este caso de estudio, la cantidad generada en cada partido de la PBA se agrupa en seis nodos ($|G| = 6$) ubicados en la localidad cabecera del partido situado en el centro geográfico de cada agrupamiento, como se detalla en la Tabla 1. En cada nodo, se adopta la proporción propuesta por Genevois & Dinç (2023) que considera un 80% para n_1 y 20% para n_2 . Se establece $rmax = 0,25$ como parámetro limitante de la reconstrucción.

Tabla 1. Cantidad generada de cada tipo de NFU en cada nodo: ge_{ng} [t].

n	Alte. Brown (g_1)	Cap. Sar- miento (g_2)	Lincoln (g_3)	Las Flo- res (g_4)	Balcarce (g_5)	Cnel. Suárez (g_6)
n_1	32.642	6.128	2.891	2.218	4.998	3.878
n_2	8.161	1.532	723	555	1.250	970

Por otra parte, se pueden instalar hasta un máximo de seis CA ($|C| = 6$) situados en la localidad cabecera del partido donde se registra la mayor generación de neumáticos de cada agrupamiento. En particular c_1 se ubica en La Matanza, c_2 en Pilar, c_3 en Junín,

c_4 en Azul, c_5 en Mar del Plata y c_6 en Bahía Blanca. La capacidad máxima de almacenamiento de cada CA es de: $ca_1^{up} = 45.000$ t, $ca_2^{up} = ca_5^{up} = 10.000$ t, $ca_3^{up} = ca_4^{up} = ca_6^{up} = 5.000$ t. En el caso de las plantas de coprocesamiento, se considera una única cementera radicada en Olavarría cuya capacidad de procesamiento de NFU es $cc_s^{up} = 15.000$ t. Respecto a las plantas de recuperación, se considera la posibilidad de instalar hasta ocho plantas ($|R| = 8$), una de cada tipo de tecnología ubicadas en dos localidades: $r_1 - r_4$ en Cañuelas (localidad próxima a la región de mayor generación de NFU) y $r_5 - r_8$ en Olavarría (centro geográfico de la PBA). Las capacidades mínimas de las instalaciones del segundo y tercer nivel de la red se asumen iguales al 10% de su capacidad máxima. El factor de anualización de costos (fa) es 0,1625, correspondiente a una tasa de interés del 10% y un horizonte de 10 años. Por motivos de espacio, no se presentan el resto de los datos técnicos y económicos del problema.

El modelo matemático se implementó en el software GAMS Studio 43.4.1 empleando el código CPLEX 22.1.1.0 para su resolución y se ejecutó en una PC Intel® Core™ i7-3770, 3.40 GHz con 8 GB de RAM. El modelo resultante involucra 255 ecuaciones, 354 variables continuas y 33 binarias. El tiempo de resolución para un GAP del 0% fue de 0,188 CPUs.

4.1 Análisis de Resultados

La Fig. 3 muestra en detalle el diseño óptimo de la red de LI de NFU para la PBA, indicando flujos materiales y valores económicos asociados. Como se observa, en la solución óptima se instalan un total de 4 CA y 4 plantas de recuperación, alcanzando un beneficio anual de 20.517.472 USD. La red es económicamente viable bajo las condiciones analizadas, con un beneficio económico neto de 311,13 USD/t de NFU.

La distribución de los NFU generados anualmente en la PBA es la siguiente: 5% se destina a reconstrucción, 1,13% a coprocesamiento y 93,87% a recuperación. La reconstrucción alcanza su cota máxima, lo que se logra reconstruyendo en 4 de los 6 puntos de generación (g_2, g_3, g_4 y g_6).

En relación con los CA, la solución óptima determina la instalación de c_1 , ubicado en La Matanza, el cual opera a máxima capacidad. Esta decisión se explica por su proximidad a los nodos g_1 y g_2 , ya que recibe la totalidad de los NFU generados en g_1 y una fracción de los correspondientes a g_2 , concentrando aproximadamente el 68% de la generación total en la PBA. También se instalan c_3 y c_4 , los cuales operan a su capacidad máxima, condensando flujos provenientes de g_2, g_3, g_4 y g_6 . En el caso de los NFU generados en g_6 , se opta por enviarlos a c_4 , ya que la distancia total de transporte que separa a g_6 de las instalaciones más cercanas del tercer nivel (plantas de recuperación o coprocesamiento) es menor si el material es enviado a c_4 (390 km) que si se enviara a c_6 (550 km). El c_5 se instala con capacidad ociosa y recibe el material proveniente de su nodo más próximo (g_5).

En cuanto a las plantas de recuperación, en ambas ubicaciones se instalan una planta de trituración, con triturador grueso y fino como equipamiento primario y secundario respectivamente, y una planta de pirólisis con reactor de lecho como equipamiento primario únicamente. La selección del reactor de lecho frente al rotativo responde a su mayor capacidad de procesamiento y a sus menores costos operativos, lo que se traduce

en un mayor beneficio económico de la red. Las plantas de Cañuelas (r_1 y r_2) reciben material solo de c_1 , mientras que las de Olavarría (r_5 y r_6) reciben NFU de todos los CA instalados. A partir del resultado del modelo se desprende que, una vez completa la capacidad de las plantas r_1 y r_2 , es económicamente más beneficioso trasladar los NFU desde c_1 (en el noreste) hasta la zona centro para procesarlos en r_5 y r_6 , recorriendo 320 km, que abrir una planta de gasificación o desvulcanización en Cañuelas.

Los productos generados por la valorización de los NFU en el caso de estudio, en orden decreciente de cantidad producida, son: polvo de caucho (p_3), acero recuperado (p_2), fibras textiles (p_4), rCB (p_7), TPO (p_5) y TPG (p_6). Los resultados indican que las plantas de trituración procesan distintas proporciones de NFU: r_1 procesa un 59% de n_2 , mientras que r_5 procesa solo un 5%, destinando el resto al procesamiento de n_1 . En el caso de las plantas de pirólisis, la generación de productos resulta equivalente, ya que reciben un flujo de entrada compuesto íntegramente por n_1 .

En cuanto a la planta de coprocesamiento, recibe 748,7 t del CA c_5 , lo que representa alrededor de un 15% de su capacidad máxima de procesamiento. Estos resultados permiten inferir que, una vez incurrido en el gasto de inversión de las plantas de recuperación, el modelo prioriza el procesamiento de NFU en ellas, ya que la obtención de productos de mayor valor agregado maximiza el beneficio económico global.

5 Conclusiones

En este trabajo se propone un modelo MILP para el diseño de redes de LI de NFU, integrando distintas alternativas tecnológicas de valorización incluyendo reconstrucción, trituración, pirólisis, gasificación, desvulcanización y coprocesamiento. La formulación incorpora, de manera explícita, el diseño conceptual de las plantas de recuperación, mediante la selección de distintos tipos de equipamiento (primarios y secundarios) asociados a cada tecnología, lo que permite obtener diferentes productos finales.

La aplicación del modelo a la PBA evidencia la viabilidad del sistema bajo las condiciones analizadas. Los resultados muestran que la alternativa de reconstrucción alcanza su cota máxima, lo que confirma su relevancia dentro del sistema. En contraste, el coprocesamiento, si bien no requiere costos de inversión (al igual que la reconstrucción), sí implica costos logísticos y genera un beneficio económico significativamente menor en comparación con otras alternativas de valorización.

En este contexto, la valorización material mediante trituración, orientada principalmente a la obtención de polvo de caucho, junto con la pirólisis para la producción de combustibles líquidos, emerge como la estrategia predominante para el tratamiento del flujo remanente de NFU. Esto sugiere que la combinación de tecnologías resulta clave para garantizar tanto la viabilidad económica como la capacidad de procesamiento del sistema. El modelo desarrollado se distingue por su nivel de detalle en la representación de las tecnologías de reciclado: no solo incorpora todas las alternativas identificadas en la bibliografía, sino que modela las distintas alternativas de equipamiento dentro de cada tecnología. Esto permite capturar que, para una misma tecnología, distintos tipos de equipamiento generan diferentes productos o diferentes proporciones entre ellos.

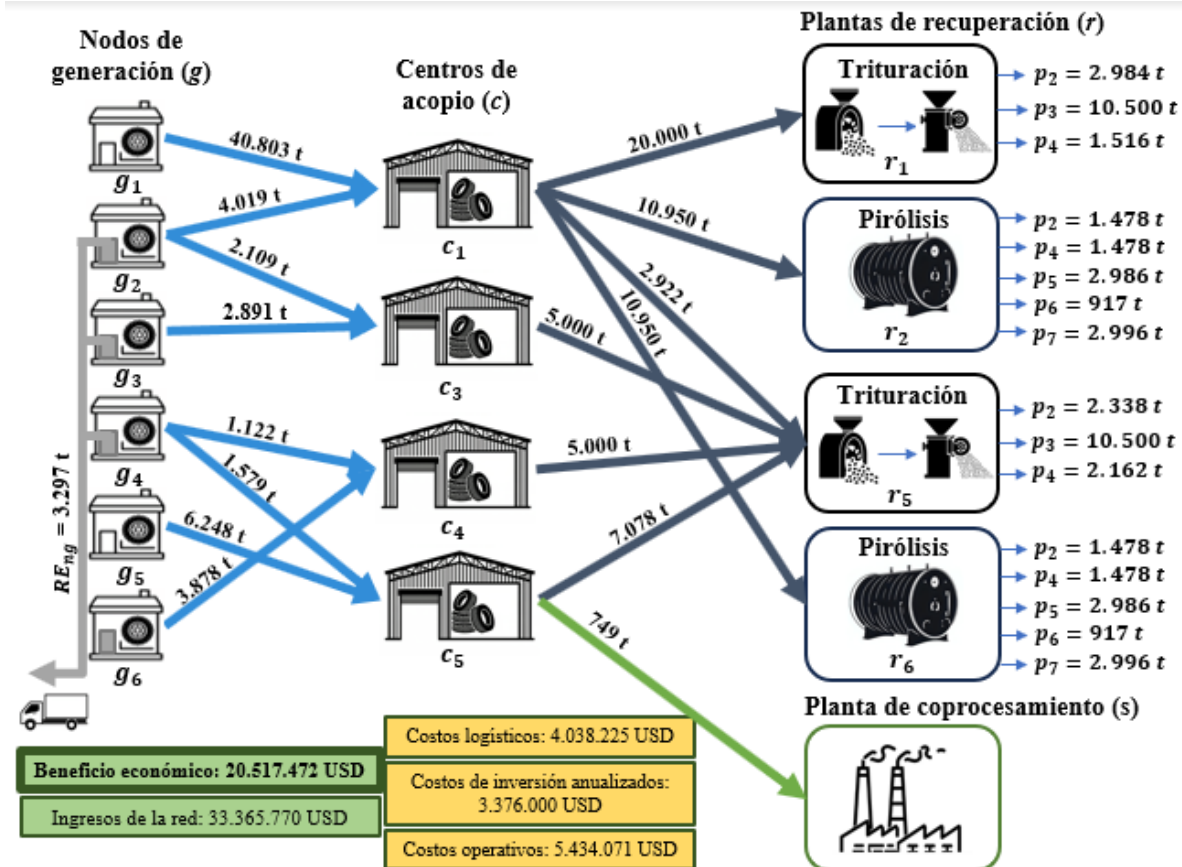


Fig. 3. Estructura y flujo entre nodos de la red de LI de NFU para el caso de estudio.

Como trabajo futuro se considera extender el modelo para que permita optimizar en forma simultánea la tecnología de valorización y la localización de las plantas de recuperación, así como incorporar aspectos vinculados con la incertidumbre asociada a la generación de NFU en el sistema. Asimismo, la extensión del modelo hacia un horizonte de planificación multiperíodo representa una línea de investigación relevante, ya que permitiría capturar la dinámica temporal inherente al sistema de gestión de NFU.

Nota

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron asistencia basada en inteligencia artificial (ChatGPT) con el fin de mejorar el lenguaje y legibilidad del manuscrito. Tras utilizar esta herramienta, los autores revisaron y editaron el contenido según fuera necesario y asumen plena responsabilidad por el contenido de la publicación.

Referencias

- Abbas-Abadi, M. S., Kusenber, M., Shirazi, H. M., Goshayeshi, B., & Van Geem, K. M. (2022). Towards full recyclability of end-of-life tires: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production* (374). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134036>
- Flórez Calderón, A. L., Mirledy Toro Ocampo, E., Granada Echeverry, M., P. (2012). A network design for a reverse logistics: a review and a practical application. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 22(2), 153-177.
- Banguera, L. A., Sepúlveda, J. M., Ternero, R., Vargas, M., & Vásquez, Ó. C. (2018). Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile. *International Journal of Production Economics* (205), 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.006>
- Castañeda-Rodríguez, I., & Espinoza Pérez, A. T. (2025). Multi-objective model for end-of-life tires reverse logistics: Enhancing sustainability through a techno-political framework. *Expert Systems with Applications* (291). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128203>
- De Souza, C. D. R., & D'Agosto, M. D. A. (2013). Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: An applied study of co-processing in the cement industry. *Resources, Conservation and Recycling* (78), 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.007>
- Erol Genevois, M., & Dinç, M. (2023). Design of Reverse Logistics Network for Waste Tire Incineration in Cement Factories. *Politeknik Dergisi*, 26(1), 1–11. <https://doi.org/10.2339/politeknik.644996>
- Ministerio de Medio Ambiente de la Provincia de Buenos Aires. (2022). Neumáticos fuera de uso en la provincia de Buenos Aires - Hacia una Economía Circular.
- Paramanik, A. R., & Mahanty, B. (2023). A circular system for end-of-life tires under extended producer responsibility. *Materials and Manufacturing Processes* 38(15), 1964–1971. <https://doi.org/10.1080/10426914.2023.2190384>
- Sasikumar, P., Kannan, G., & Haq, A. N. (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery-a case of truck tire remanufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9–12), 1223–1234. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2470-4>