

## Diseño óptimo de la cadena de suministros de papel en el complejo foresto-industrial

María Agustina Muñoz<sup>1</sup>, Sofía Pitashny<sup>1</sup> y María Analía Rodríguez<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, 3000, Lavaise 610  
{magustina.munoz, sofiapitashny}@gmail.com

<sup>2</sup> IDTQ (CONICET-UNC), Córdoba, 5000, Velez Sarsfield 1611  
r\_analia@santafe-conicet.gov.ar

**Abstract.** La cadena de suministros (CS) del papel dentro del complejo forestal presenta desafíos en Argentina. A fin de mantenerse competitiva, debe incrementar sus capacidades instaladas y desarrollarse de un modo integral para mejorar las eficiencias. En este trabajo se evalúa el diseño integral de esta CS, compuesta por plantaciones que pueden producir diferentes especies, plantas de pulpas y de papel que pueden ser instaladas en diversas localizaciones, del mismo modo que plantas integradas que fabrican tanto la pulpa como el papel en la misma ubicación. Por otro lado, diferentes procesos pueden ser seleccionados en todos los nodos dando lugar a una cartera de productos que representa la mayoría de los papeles comercializados en el país. Se propone un modelo matemático mixto entero lineal (MILP) para optimizar el diseño de la CS determinando la localización de nodos, tamaño, procesos, y flujos de materias primas y productos a fin de minimizar los costos totales y satisfacer la demanda. El mismo es implementado en el sistema GAMS.

### 1 Introducción

Las empresas operan en mercados exigentes, donde es primordial ofrecer productos de calidad, en el tiempo y lugar requeridos por los clientes, y al menor costo posible [1]. Es fundamental la integración de los diversos eslabones que componen la CS y proponer un diseño óptimo que permita aumentar la productividad, generando ahorros que incrementen las ganancias sin que ello afecte al precio pagado por los consumidores ni perjudique el nivel de servicio [2, 3]. La CS del papel a partir de pasta de madera comprende desde los bosques hasta la elaboración de la pulpa y la correspondiente fabricación de papel en sus diversos tipos. Algunos trabajos de la literatura plantean una integración parcial de esta CS considerando productos energéticos [4–6] pero en general contemplan una versión simplificada de su cartera de productos así como de la versatilidad de flujos involucrados.

En Argentina, es evidente la necesidad de proponer mejoras y fomentar las inversiones en este sector industrial, debido a dos razones. Por un lado, la balanza comercial forestal

es históricamente deficitaria, siendo la rama de la celulosa y el papel uno de los principales causantes de este saldo negativo. En 2014, se incrementó el porcentaje de exportaciones de esta rama, pero fue insuficiente frente al valor de las importaciones, y en consecuencia la balanza tuvo un déficit mayor a 600 millones de dólares [7, 8]. Por otro lado, la falta de inversiones ha provocado que la Argentina se encuentre estancada en una producción de 980 mil tn de pulpa anuales, mientras que otros países de la región han alcanzado mayor producción, por ejemplo, 4,5 miles de millones de tn en Chile, 1,2 en Uruguay y 13,5 en Brasil [9]. Esto evidencia un claro desaprovechamiento de recursos, si se consideran las ventajas comparativas del país para la producción forestal, basadas en amplias extensiones de tierra y climas ideales para la plantación forestal y la gran disponibilidad de agua, recurso fundamental para la elaboración de este tipo de productos.

En este trabajo se propone brindar una herramienta que permita obtener la configuración óptima de la CS de papel minimizando los costos involucrados, tanto de operación, como de transporte e inversión. Para llevar a cabo este objetivo se desarrolla un modelo de optimización MILP considerando los múltiples nodos que participan de esta red, los flujos de materias primas y una cartera de familias de productos que se ofrecen al mercado. A partir del modelo propuesto es posible analizar escenarios y decidir la instalación de plantas, su tamaño y localización, tipo de productos y materias primas.

## 2 Descripción del problema

La CS del papel considerada comprende plantaciones, plantas de pulpa, plantas de producción de papel, plantas integradas y mercados de consumo (Fig. 1). El flujo se inicia con la obtención de la materia prima en las plantaciones, la cual consiste en madera de diferentes especies. Cada especie posee un rendimiento asociado, que indica la cantidad de toneladas de madera que pueden obtenerse por hectárea de superficie cultivada, lo que incide directamente en el costo de la materia prima obtenida. Los rollizos de madera talados en cada plantación pueden enviarse a las plantas de producción de pulpa o a las plantas integradas. La diferencia entre éstas radica en que las últimas integran el proceso de producción de pulpa y la posterior fabricación del papel en un mismo lugar físico, mientras que las primeras elaboran la pulpa para luego comercializarla en fardos (planchas gruesas de pasta) a plantas de papel o integradas.

Para obtener la pasta, tanto en plantas integradas como en fábricas de pulpa, el modelo contempla la selección de procesos con rendimientos disímiles, y a partir de distintas especies de madera. Esto deriva en la generación de pulpas de diferentes calidades y costos, las cuales se destinan a la elaboración de papel, ya sea en plantas de papel o integradas. A su vez, existe una gran diversidad de productos que pueden destinarse a usos variados, y que poseen características diferentes vinculadas al proceso de fabricación y las materias primas empleadas así como distintos costos de inversión y procesamiento.

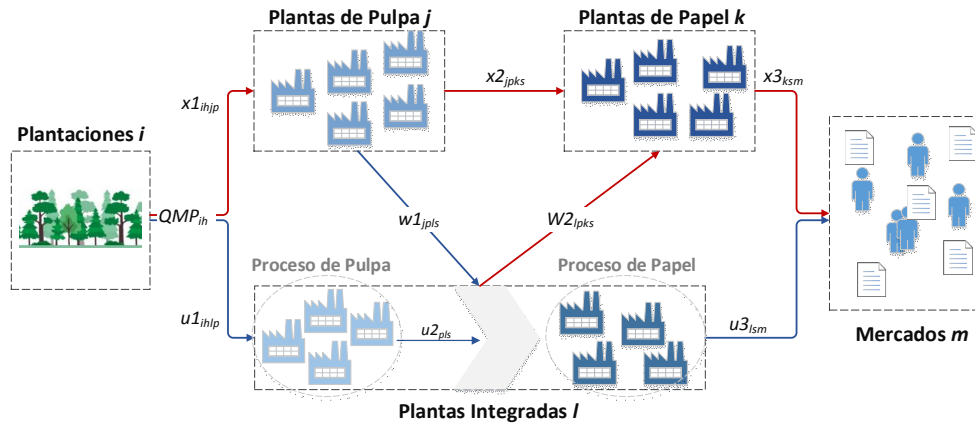


Fig. 1. – Cadena de suministros del papel

Cada papel puede obtenerse de un único tipo de pulpa o de una mezcla de ellas, por lo que se considera una receta que establece la proporción de cada pasta que debe emplearse para los diferentes productos de papel. Se asume que tanto las plantas de pulpa como las fábricas de papel pueden elaborar un único producto. Igualmente, cada planta integrada puede fabricar un solo tipo de pulpa y un papel particular. Es por ello que, dado que la producción de un tipo de papel puede requerir el empleo de una mezcla de pulpas, se contempla la posibilidad de que las plantas integradas por un lado comercialicen parte de la pulpa generada a otras plantas integradas o de papel, y por el otro, adquieran diferentes tipos de pastas celulósicas para ingresar al proceso de papel. En consecuencia, los flujos de pulpa parten desde plantas de pulpa o de las fábricas integradas, y se destinan a plantas integradas o a industrias de producción de papel. Por último, los diversos tipos de papeles se envían a mercados de consumo radicados en diferentes sitios.

### 3 Formulación Matemática del Modelo

En este apartado se propone el modelo matemático para la obtención del diseño óptimo de la CS del papel, considerando los siguientes conjuntos:  $I$  plantaciones,  $J$  Plantas de Pulpa,  $K$  Plantas de Papel,  $L$  plantas Integradas de pulpa y papel,  $M$  mercados,  $H$  especies de madera,  $P$  tipos de pulpa y  $S$  tipos de papel. Se utilizan las mismas letras en minúsculas para indicar los elementos correspondientes a los conjuntos respectivos.

#### 3.1 Variables

Las variables continuas positivas representan los flujos de materiales entre los nodos en la CS en [tn /año].  $QMP_{ih}$  representa la cantidad de madera de la especie  $h$  obtenida en la

plantación  $i$ ;  $x1_{ihjp}$  la cantidad de madera de la especie  $h$  enviada desde  $i$  a la planta de pulpa  $j$  para producir la pulpa  $p$ ;  $u1_{ihlp}$  la cantidad de madera de la especie  $h$  enviada desde la plantación  $i$  a la planta integrada de papel  $l$  para producir la pulpa  $p$ ;  $x2_{jpks}$  la cantidad de pulpa  $p$  enviada desde la planta  $j$  a la fábrica de papel  $k$  para producir el papel  $s$ ;  $u2_{pls}$  la cantidad de pulpa  $p$  obtenida en la planta integrada  $l$  para producir el papel  $s$ ;  $w1_{jpls}$  la cantidad de pulpa  $p$  enviada desde la planta  $j$  a la planta integrada de papel  $l$  para producir el tipo de papel  $s$ ;  $w2_{lpks}$  la cantidad de pulpa  $p$  enviada desde la planta integrada  $l$  a la planta de papel  $k$  para producir el papel  $s$ ;  $x3_{ksm}$  la cantidad de papel  $s$  enviada desde la planta  $k$  al mercado  $m$  y  $u3_{lsm}$  la cantidad de papel  $s$  enviada desde la planta integrada  $l$  al mercado  $m$ . Se utilizan variables binarias (0-1) para las decisiones discretas:  $y1_{ih}$  determina la inversión en la plantación  $i$  para obtener la madera de especie  $h$ ;  $y2_{jp}$  la instalación del proceso de pulpa  $p$  en la planta de pulpa  $j$ ;  $y3_{ks}$  la instalación de la planta de papel  $k$  para producir el producto  $s$ ;  $y4_{lp}$  la instalación de la planta integrada  $l$  con el proceso de pulpa  $p$ ;  $y5_{ls}$  la instalación de la planta integrada  $l$  para fabricar el papel  $s$ ;  $y6_{lps}$  la instalación de la planta integrada  $l$  para producir la pulpa  $p$  y el papel  $s$ .

### 3.2 Restricciones

La Ec. (1) representa el balance de masa de las plantaciones  $i$ . La cantidad de madera  $h$  de una plantación  $i$ ,  $QMP_{ih}$ , debe ser igual a la cantidad enviada de esa madera a todas las plantas  $j$  y  $l$ .

$$QMP_{ih} = \sum_{j,p} x1_{ihjp} + \sum_{l,p} u1_{ihlp}, \quad \forall i, \forall h \quad (1)$$

La Ec. (2) asegura que se cumpla el balance de masa del proceso de pulpa  $p$  en la planta  $j$ ; el cual implica que la totalidad de la madera de las diferentes especies  $h$  recibida de todas las plantaciones  $i$ , multiplicada por el rendimiento del proceso de pulpa  $p$  para la madera de especie  $h$  ( $\eta Pulpa_{hp}$ ), es igual a la totalidad de la pulpa  $p$  enviada a las plantas de papel  $k$  para producir los productos  $s$  más la totalidad de pulpa  $p$  enviada a todas las plantas integradas  $l$  para elaborar los productos  $s$ .

$$\sum_{i,h} x1_{ihjp} \cdot \eta Pulpa_{hp} = \sum_{k,s} x2_{jpks} + \sum_{l,s} w1_{jpls}, \quad \forall j, \forall p \quad (2)$$

En la Ec. (3) se contempla el balance de masa para la producción de papel  $s$  en la planta  $k$  con cada pulpa  $p$ . Indica que la sumatoria de pulpa  $p$  recibida de todas las plantas de pulpa  $j$  y de las plantas integradas  $l$ , afectada por el correspondiente rendimiento del proceso, es equivalente a la totalidad del papel del tipo  $s$  enviado a todos los mercados  $m$  multiplicada por la proporción de pulpa  $p$  requerida para producir el papel  $s$  ( $\delta_{ps}$ ).

$$(\sum_j x2_{jpks} + \sum_l w2_{lpks}) \cdot \eta Papel_{ps} = \delta_{ps} \cdot \sum_m x3_{ksm}, \quad \forall k, \forall s, \forall p \quad (3)$$

La Ec. (4) establece que la cantidad de pulpa  $p$  obtenida en la planta integrada  $l$  que debe destinarse a la producción de todos los tipos de papeles  $s$ , es igual al producto entre la cantidad de madera de distintas especies  $h$  recibida de las plantaciones  $i$ , y el rendimiento de la pulpa  $p$  para la madera  $h$  ( $\eta Int1_{hp}$ ).

$$\sum_{i,h} u1_{ihlp} \cdot \eta Int1_{hp} = \sum_s u2_{pls}, \quad \forall l, \forall p \quad (4)$$

La Ec. (5) representa el balance de masa para el proceso de producción de papel  $s$  en una planta integrada  $l$ . La cantidad de pulpa  $p$  ingresada al proceso de papel  $s$ , afectada por el rendimiento del mismo ( $\eta Int2_{ps}$ ), es equivalente a la cantidad total de papel  $s$  enviada desde la planta  $l$  hacia todos los mercados  $m$  multiplicada por la proporción de pulpa  $p$  necesaria para producir el papel  $s$  ( $\delta_{ps}$ ). Cabe aclarar que la pulpa  $p$  ingresada al proceso de papel  $s$  está dada por la suma de la cantidad de pulpa  $p$  producida en la planta integrada  $l$  y la cantidad recibida de la totalidad de las plantas  $j$ , menos la cantidad de pulpa  $p$  vendida a todas las plantas de papel  $k$ .

$$(u2_{pls} + \sum_j w1_{jpls} - \sum_k w2_{lpks}) \cdot \eta Int2_{ps} = \delta_{ps} \cdot \sum_m u3_{lsm}, \quad \forall l, \forall s, \forall p \quad (5)$$

Las Ecs. (6) a (10) impiden superar las capacidades de procesamiento en los diversos nodos. A modo de ejemplo, se menciona que la Ec. (7) indica que, en caso que se decida instalar la planta  $j$  para producir la pulpa  $p$ , la variable binaria  $y2_{jp}$  será 1, y por lo tanto la cantidad de madera de las diversas especies  $h$  recibida de las plantaciones  $i$ , no debe superar la capacidad de procesamiento  $CPulpa_{jp}$ . Si no se decide instalar la planta,  $y2_{jp}$  toma valor nulo al igual que la cantidad de madera recibida en dicha planta  $j$ .

$$CPlant_{ih} \cdot y1_{ih} \geq QMP_{ih}, \quad \forall i, \forall h \quad (6)$$

$$CPulpa_{jp} \cdot y2_{jp} \geq \sum_{i,h} x1_{ihjp}, \quad \forall j, \forall p \quad (7)$$

$$CPapel_{ks} \cdot y3_{ks} \geq (\sum_{j,p} x2_{jpks} + \sum_{l,p} w2_{lpks}), \quad \forall k, \forall s \quad (8)$$

$$CInt1_{lp} \cdot y4_{lp} \geq \sum_{i,h} u1_{ihlp}, \quad \forall l, \forall p \quad (9)$$

$$CInt2_{ls} \cdot y5_{ls} \geq \sum_p u2_{pls} + \sum_{j,p} w1_{jpls} - \sum_{p,k} w2_{lpks}, \quad \forall l, \forall s \quad (10)$$

Las Ecs. (11) a (14) permiten obtener un solo tipo de producto en cada planta. Por ejemplo, la Ec. (11) indica que la planta de pulpa  $j$  puede elaborar una única pulpa  $p$ .

$$\sum_p y2_{jp} \leq 1, \quad \forall j \quad (11)$$

$$\sum_s y3_{ks} \leq 1, \quad \forall k \quad (12)$$

$$\sum_p y4_{lp} \leq 1, \quad \forall l \quad (13)$$

$$\sum_s y5_{ls} \leq 1, \quad \forall l \quad (14)$$

La Ec. (15) indica que, si se instala la planta integrada  $l$  para elaborar un cierto tipo de pulpa también debe producirse un tipo de papel. Las Ecs. (16) a (18) vinculan las variables binarias que indican la inversión en una planta integrada y la selección de pulpas y papeles a producir en dicha planta. La Ec. (16) obliga a que, si en una determinada planta integrada  $l$  se decide invertir para fabricar una cierta pulpa  $p$  ( $y_{4lp} = 1$ ) y además se decide producir en esa planta el tipo de papel  $s$  ( $y_{5ls} = 1$ ), entonces la variable  $y_{6tps}$  tomará el valor 1 para la pulpa  $p$  y el papel  $s$ . Si por el contrario, no se decide producir la pulpa  $p$  ( $y_{4lp} = 0$ ) o no se decide producir el papel  $s$  ( $y_{5ls} = 0$ ), la variable  $y_{6tps}$  será nula, de acuerdo a las Ecs. (17) y (18), respectivamente.

$$\sum_p y_{4lp} = \sum_s y_{5ls}, \quad \forall l \quad (15)$$

$$y_{6tps} \geq y_{4lp} + y_{5ls} - 1, \quad \forall l, \forall p, \forall s \quad (16)$$

$$y_{6tps} \leq y_{4lp}, \quad \forall l, \forall p, \forall s \quad (17)$$

$$y_{6tps} \leq y_{5ls}, \quad \forall l, \forall p, \forall s \quad (18)$$

La Ec. (19) asegura la satisfacción de la demanda de todos los productos en los diversos mercados, los cuales se satisfacen por las plantas de papel  $k$  o las integradas  $l$ .

$$\sum_k x_{3ksm} + \sum_l u_{3lsm} \geq QD_{sm}, \quad \forall s, \forall m \quad (19)$$

### 3.3 Función objetivo

El objetivo es la minimización de costos totales  $CT$  que se componen por los costos variables de operación,  $CVar$ , los fijos de inversión,  $CF$ , y los de transporte,  $CTransp$ .

$$\text{Min } CT = CVar + CF + CTransp, \quad (20)$$

La Ec. (21) presenta los costos variables en los diversos nodos de la CS. Los parámetros utilizados en esta formulación son:  $cvPlant_{ih}$  que representan los costos de procesamiento en cada plantación  $i$  por tn de madera talada de la especie  $h$ ,  $cvPulpa_{hjp}$  que refiere a los costos de producción de pulpa  $p$  en cada planta  $j$  por tonelada de madera de la especie  $h$ , y  $cvPapel_{pks}$  que indica el costo de elaboración del papel  $s$  en cada fábrica de papel  $k$  por tonelada de pulpa  $p$ . En el caso de las plantas integradas  $l$ , los costos variables se calculan por separado para cada proceso, refiriéndose el parámetro  $cvInt1_{hlp}$  a los costos de procesamiento por tonelada de madera de la especie  $h$  para producir la pulpa  $p$ , y  $cvInt2_{pls}$  a los de producción de papel  $s$  por tonelada de pulpa  $p$ .

$$\begin{aligned} CVar = & \sum_{i,h} (cvPlant_{ih} \cdot QMP_{ih}) + \sum_{h,j,p} (cvPulpa_{hjp} \sum_i x_{1ihjp}) + \sum_{p,k,s} (cvPapel_{pks} \cdot \\ & (\sum_j x_{2jps} + \sum_l w_{2lpks})) + \sum_{h,l,p} (cvInt1_{hlp} \cdot \sum_i u_{1ihlp}) + \sum_{p,l,s} (cvInt2_{pls} \cdot (u_{2pls} + \\ & \sum_j w_{1jpls} - \sum_k w_{2lpks})) \end{aligned} \quad (21)$$

La Ec. (22) muestra los costos fijos de los diferentes puntos de la cadena. Estos costos están vinculados a la estructura de cada fábrica, y consecuentemente contemplan la amortización de la inversión necesaria para poner en marcha una planta. Estos parámetros se multiplican por las correspondientes variables binarias referidas a la decisión de instalar o no un cierto nodo. Los parámetros  $CFPlant_{ih}$  corresponden a los costos fijos para la obtención de la madera  $h$  en la plantación  $i$ ,  $CFPulpa_{jp}$  a los costos fijos de producción de pulpa  $p$  en la planta de pulpa  $j$ ,  $CFPapel_{ks}$  a los de fabricación de papel  $s$  en la planta  $k$ , y  $CFInt_{lps}$  refiere a los costos fijos de las plantas integradas  $l$  para la elaboración del papel  $s$  a partir de la pulpa  $p$ .

$$CF = \sum_{i,h}(CFPlant_{ih} \cdot y1_{ih}) + \sum_{j,p}(CFPulpa_{jp} \cdot y2_{jp}) + \sum_{k,s}(CFPapel_{ks} \cdot y3_{ks}) + \sum_{l,p,s}(CFInt_{lps} \cdot y6_{lps}) \quad (22)$$

Por último, la Ec. (23) representa los costos de transporte de materiales entre los diferentes eslabones de la cadena. Los valores considerados corresponden a los costos de traslado de: madera desde las plantaciones  $i$  a las plantas de pulpa  $j$  o hasta las plantas integradas  $l$ , pasta desde las fábricas de pulpa  $j$  hacia las plantas de papel  $k$  o a las integradas  $l$ , y desde las fábricas integradas  $l$  a las plantas de papel  $k$ , papel  $s$  desde las plantas  $k$  a los mercados  $m$  y papel  $s$  desde las fábricas integradas  $l$  a los mercados  $m$ . Se utilizan los costos de transporte  $ctr1_{ij}$ ,  $ctr2_{il}$ ,  $ctr3_{jk}$ ,  $ctr4_{jl}$ ,  $ctr5_{lk}$ ,  $ctr6_{skm}$  y  $ctr7_{slm}$  entre los nodos mencionados. Los diversos tipos de papel  $s$  poseen diferentes costos por tonelada pero no se realizan distinciones para diferentes especies de madera o tipos de pulpas. Finalmente, la formulación MILP queda definida por las Ecs. (1) a (23).

$$CTransp = \sum_{i,j}(ctr1_{ij} \cdot \sum_{h,p} x1_{ihjp}) + \sum_{i,l}(ctr2_{il} \cdot \sum_{h,p} u1_{ihlp}) + \sum_{j,k}(ctr3_{jk} \cdot \sum_{p,s} x2_{jpks}) + \sum_{j,l}(ctr4_{jl} \cdot \sum_{p,s} w1_{jpls}) + \sum_{l,k}(ctr5_{lk} \cdot \sum_{p,s} w2_{lpks}) + \sum_{s,k,m}(ctr6_{skm} \cdot x3_{ksm}) + \sum_{s,l,m}(ctr7_{slm} \cdot u3_{lsm}) \quad (23)$$

#### 4 Caso de estudio

El caso de estudio planteado para la aplicación del modelo contempla 4 plantaciones, 2 plantas de pulpa, 3 industrias de producción de papel, 3 fábricas integradas y 4 localizaciones de mercados. Además, se considera la utilización de 2 especies de madera, y la elaboración de 2 tipos de pulpa y 4 tipos de papel. A continuación se justifica la elección de algunos de los elementos mencionados.

Si bien en Argentina existen dos tipos de bosques, los nativos y los implantados, en el modelo se consideran solamente los segundos, los cuales se ubican principalmente en las provincias de Corrientes, Misiones, Entre Ríos y Buenos Aires. Las principales especies cultivadas en los bosques considerados son **pino** y **eucaliptus**.

Para la obtención de la pasta celulósica se considera el **pulpado mecánico**, el cual comprende la separación de las fibras de la madera a través de un proceso de arranque, al presionar los troncos contra una muela giratoria; y el **pulpado kraft**, que consiste en un proceso químico llevado a cabo en un digestor, en el cual se realiza la cocción de las astillas de madera con ciertos productos químicos (hidróxido de sodio y sulfuro de sodio) a fin de favorecer la disolución de la lignina y, de esta manera, separar las fibras de la madera. Cabe aclarar que el primer proceso posee un rendimiento más elevado, siendo el agua el único aditivo utilizado, la cual cumple la función de lubricante y refrigerante.

A fin de seleccionar los productos se consideran datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Producción. Teniendo en cuenta los volúmenes de producción, se pueden establecer los tipos de papel más representativos: **papel de impresión**, **papel sanitario (tissue)**, **papel de diario (prensa)** y **papel de embalar**. Para cada uno, se define una receta que establece la proporción de pulpas mecánica y kraft. Por último, los mercados se fijaron en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba y Mendoza, dado que las mismas concentran la mayor cantidad de población, y por lo tanto, del consumo de papel.

#### 4.1 Datos

En la Tabla 1 se presentan los valores de las demandas de cada tipo de papel en los diversos mercados ( $QD_{sm}$ ) considerando el consumo nacional aparente por tipo de papel y la cantidad de población radicada en los diferentes nodos. Se toma el 67% del consumo nacional, dado que estas provincias representan el 67% de la población Argentina.

**Tabla 1.** - Demanda de papel por mercado ( $QD_{sm}$ ) (toneladas anuales)

<b>Mercado</b>	<b>Impresión (s=1)</b>	<b>Diario (s=2)</b>	<b>Sanitario (s=3)</b>	<b>Embalaje (s=4)</b>
Buenos Aires (m=1)	224.497	80.541	140.253	439.737
Santa Fe (m=2)	38.734	13.896	24.199	75.870
Córdoba (m=3)	40.120	14.394	25.065	78.586
Mendoza (m=4)	21.085	7.564	13.172	41.300

En la Tabla 2 se muestran los rendimientos de pulpa según la materia prima utilizada. No se realizó distinción si la pasta se obtiene en plantas de pulpa o en integradas: existe un único rendimiento que depende de la materia prima y el proceso de pulpado realizado.

**Tabla 2.** - Rendimientos de los procesos de pulpado ( $\eta_{Pulpa_{hp}}$  y  $\eta_{Int1_{hp}}$ )

<b>Rendimientos</b>	<b>Pino (h=1)</b>	<b>Eucalipto (h=2)</b>
Pulpa Mecánica (p=1)	0,9	0,95



Pulpa Kraft (p=2)	0,48	0,53
-------------------	------	------

Los rendimientos en la elaboración de cada papel ( $\eta Int2_{ps}$  y  $\eta Papel_{ps}$ ) se ilustran en la Tabla 3. También se exponen las recetas consideradas para los diversos papeles, es decir, la proporción necesaria de cada pulpa ( $\delta_{ps}$ ). Se destaca que, si bien el modelo contempla la posibilidad de definir un rendimiento del papel para cada materia prima, en el caso de estudio se ingresa una mezcla de las dos pulpas consideradas, por lo que se establece un único rendimiento por mezcla de pulpa.

**Tabla 3.** - Rendimientos y recetas por tipo de papel

Tipo de papel	Rendimiento ( $\delta_{ps}$ )	Prop. de Mecánica (p=1)	Prop. de Kraft (p=2)
Impresión (s=1)	0,95	0,2	0,8
Diario (s=2)	0,98	0,85	0,15
Sanitario (s=3)	0,96	0,3	0,7
Embalaje (s=4)	0,96	0,25	0,75

La Tabla 4 muestra las capacidades de las plantaciones  $i$  para las diversas especies de madera  $h$  ( $CPlant_{ih}$ ) en tn por año, y los costos variables por tonelada talada en cada sitio,  $cvPlant_{ih}$ . De cada plantación puede obtenerse pino y eucalipto simultáneamente.

**Tabla 4.** - Parámetros para las plantaciones  $i$

Plantación	CPlant <sub>ih</sub> [tn/año]		cvPlant <sub>ih</sub> [\$/tn]	
	Pino (h=1)	Eucalipto (h=2)	Pino (h=1)	Eucalipto (h=2)
Buenos Aires (i=1)	259,60	384,78	310	520
Corrientes (i=2)	2.531.272	1.446.060	270	480
Misiones (i=3)	2.947.824	140.074	250	465
Entre Ríos (i=4)	193.977	1.410.183	290	500

En la Tabla 5 se presentan los parámetros de las plantas  $j$  para ambas pulpas  $p$ : las capacidades de las plantas, los costos fijos de amortización de la inversión y los costos de procesamiento por tn de madera según la especie utilizada.

**Tabla 5.** - Parámetros para las plantas de pulpa  $j$

Plantas de Pulpa	Tipo de pulpa	CPulpa <sub>jp</sub> [tn madera/año]	CFPulpa <sub>jp</sub>	cvPulpa <sub>hjp</sub>	
				Pino	Eucalipto
Puerto Esperanza - Misiones (j=1)	Mecánica	378.378	145.000.000	4.698	4.959
	Kraft	693.069	185.388.126	3.619	3.996

Capitán Bermúdez - Santa Fe (j=2)	Mecánica	216.216	79.750.000	4.437	4.683
	Kraft	396.039	105.936.072	3.549	3.919

La Tabla 6 contiene los parámetros de las plantas de papel  $k$ , para los papeles  $s$ : las capacidades  $CPapel_{ks}$ , los costos fijos de inversión  $CFPapel_{ks}$ , y los costos variables de procesamiento por tn de pulpa según su tipo,  $cvPapel_{pks}$ .

**Tabla 6.** - Parámetros para las plantas de papel  $k$

<i>Plantas de papel</i>	Tipo de papel	$CPapel_{ks}$ [tn pulpa/año]	$CFPapel_{ks}$ [\$ /año]	$cvPapel_{pks}$	
				Mecánica	Kraft
Holt Ibicuy - Entre Ríos (k=1)	Impresión (s=1)	421.053	27.840.008	2.452	2.383
	Diario (s=2)	408.163	22.620.026	2.316	2.245
	Sanitario (s=3)	416.667	26.100.004	2.060	1.991
	Embalaje (s=4)	416.667	25.374.959	1.225	1.155
Zárate - Buenos Aires (k=2)	Impresión (s=1)	421.053	26.448.017	2.480	2.411
	Diario (s=2)	408.163	21.489.021	2.345	2.274
	Sanitario (s=3)	416.667	24.795.008	2.088	2.018
	Embalaje (s=4)	416.667	24.106.229	1.253	1.183
Ituzaingó - Corrientes (k=3)	Impresión (s=1)	368.421	25.407.053	2.507	2.438
	Diario (s=2)	357.143	20.640.776	2.373	2.302
	Sanitario (s=3)	364.583	23.816.254	2.116	2.046
	Embalaje (s=4)	364.583	23.154.667	1.281	1.211

Los costos de operación, de inversión y capacidades de las plantas integradas se omiten por limitaciones de espacio. Los costos de transporte rondan entre 0,75 y 0,87[\$/tn-km].

## 4.2 Resultados

El modelo fue implementado en GAMS 24.1.3, empleando CPLEX como algoritmo de resolución. El tiempo de ejecución fue de 0,219 seg y se contemplaron 257 ecuaciones, 540 variables continuas y 80 discretas. El diseño óptimo de la CS para el caso propuesto, comprende la instalación de 2 plantas de pulpa, 2 de papel y 3 integradas, obteniéndose la madera de las 4 plantaciones disponibles. El costo total es de  $\$1,636 * 10^{10}$ , y se compone principalmente de los costos variables, los cuales representan el 83,7% del total, seguidos por los costos de transportes (9,9%) y en último lugar, los costos fijos correspondientes a las amortizaciones de las inversiones con un 6,4%.

Respecto a las plantaciones, si bien se extrae madera de los 4 sitios considerados, se ocupa el 37,8% de la capacidad disponible de pino y el 7,56% de eucalipto. El mayor consumo de pino se debe a su menor costo. Las plantaciones de Buenos Aires y Entre Ríos proveen de pino y eucalipto a la planta integrada de San Pedro que elabora pasta mecánica y papel de diario; la planta de pulpa kraft de Capitán Bermúdez se abastece de eucalipto de Entre Ríos, mientras que los sitios forestales de Misiones y Corrientes venden solamente pino a las plantas ubicadas en la misma provincia donde se encuentra la plantación, respectivamente. En Misiones se instala una planta de pasta mecánica y una integrada que elabora pulpa kraft y papel de impresión, y en Corrientes, una planta integrada que produce pulpa kraft y papel de embalaje.

Los flujos de pulpa se ilustran en la Tabla 8. Las celdas coloreadas indican la pulpa producida en una planta integrada que se emplea en la misma planta para producir papel, por lo que no conllevan asociado un costo de transporte.

**Tabla 8.** – Flujos de pulpa desde plantas de pulpa o integradas hacia plantas de papel o integradas

Tipo de Pulpa	Tipo de Planta	Origen	Plantas de papel		Plantas Integradas		
			Holt Ibicuy (k=1)	Zárate (k=2)	San Pedro (l=2)	Puerto Piray (l=3)	Ituzaingó (l=4)
Mecánica	De Pulpa	Puerto Esperanza (j=1)				68302.3	82743.5
	Integradas	San Pedro (l=2)	63340.3	82749.5	100954.9		
Kraft	De Pulpa	Capitán Bermúdez (j=2)		62036.8	17815.6		
	Integradas	Puerto Piray (l=3)	147794.1	54244.2		273209.3	
		Ituzaingó (l=4)		131967.6			248230.4

El papel de impresión demandado, es producido en su totalidad por la planta integrada de Puerto Piray (Misiones), mientras que la de San Pedro (Buenos Aires) abastece la totalidad del papel de diario y la planta de papel de Holt Ibicuy (Entre Ríos) satisface las necesidades del papel sanitario. Finalmente, la demanda de papel de embalaje es cubierta en partes iguales por la planta de papel de Zárate (Buenos Aires) y la integrada de Ituzaingó (Corrientes).

## 5 Conclusiones

Como ha sido mencionado anteriormente, la CS de papel argentina requiere de un incremento de las capacidades instaladas y una mejora en la gestión integral para aumentar la competitividad. El modelo propuesto constituye una base para el análisis de

alternativas de inversión y conexión de nodos. Las soluciones obtenidas permiten estimar las inversiones en las plantas de producción de pulpas, papel y plantas integradas, así como considerar el requerimiento de recursos naturales de las especies mayormente disponibles en los bosques implantados.

A través del caso de estudio se ha validado la formulación propuesta para la optimización de la CS de papel, lográndose incrementar a 1.333.388 tn anuales la producción de pulpas (con una capacidad de 1.700.000 tn) y a 1.780.000 tn, la capacidad para papel. Esta situación permitiría mejorar la balanza comercial considerando que se ha definido como demanda el consumo aparente de productos. Contemplando que solo se tomó el 67% de dicho consumo, podría incrementarse aún más la producción de pulpa y papel.

En virtud de la simplificación efectuada en el presente trabajo resulta claro que existe trabajo futuro dentro de esta línea. Uno de los puntos constituye la posibilidad de reutilización de subproductos que se obtienen en distintas etapas de procesamiento, como fuente de energía. Por otro lado, podría incluirse un mayor grado de detalle en los procesos de producción incorporando el reciclado de papel, y la valorización del consumo de agua como criterio ambiental. Finalmente, en materia de costos se planea considerar tramos de inversión y capacidad a fin de tener en cuenta las economías de escala como así también abordar el problema multi-periodo para reflejar el horizonte de planificación sobre el cual afecta este tipo de proyectos de carácter estratégico.

## Referencias

1. Ballou, R.H.: Logística. Administración de la cadena de suministros. Pearson Educación, México (2004).
2. Grossmann, I.E.: Advances in mathematical programming models for enterprise-wide optimization. *Comput. Chem. Eng.* 47, 2–18 (2012).
3. Papageorgiou, L.G.: Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities. *Comput. Chem. Eng.* 33, 1931–1938 (2009).
4. Waldemarsson, M., Lidestam, H., Rudberg, M.: Including energy in supply chain planning at a pulp company. *Appl. Energy* 112, 1056–1065 (2013).
5. Bredström, D., Lundgren, J.T., Rönnqvist, M., Carlsson, D., Mason, A.: Supply chain optimization in the pulp mill industry—IP models, column generation and novel constraint branches. *Eur. J. Oper. Res.* 156, 2–22 (2004).
6. Gunnarsson, H., Rönnqvist, M., Lundgren, J.T.: Supply chain modelling of forest fuel. *Eur. J. Oper. Res.* 158, 103–123 (2004).
7. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca.: ARGENTINA: PLANTACIONES FORESTALES Y GESTIÓN SOSTENIBLE. (2013).
8. Brandán, S., Corinaldesi, L., Frisa, C.: COMERCIO EXTERIOR. INTERCAMBIO COMERCIAL ARGENTINO DE PRODUCTOS FORESTALES. AÑO 2014. (2015).
9. Ministerio de Industria: Mesa de implementación de la cadena foresto industrial: Resultados. (2012).