

Optimización de la Cadena de Suministros de Bioetanol a partir de Madera

Resumen: Este trabajo presenta un modelo para el diseño óptimo de la cadena de suministros de la producción de bioetanol de base celulósica. La cadena de suministros (CS) considerada en el modelo se compone de plantaciones forestales, plantas de bioetanol y centros de consumo. El objetivo es determinar la configuración óptima para la CS maximizando los beneficios y utilizar los resultados para la toma de decisiones respecto a localización de plantaciones y plantas de producción, tipos de madera y tecnología utilizada en la producción de bioetanol y cantidades óptimas transportadas entre los diferentes nodos. El modelo es formulado con programación disyuntiva generalizada (GDP) y luego implementado como programa lineal mixto entero en GAMS.

Palabras Claves: Cadena de suministros; Bioetanol; Celulosa; Programación MILP.

Abstract: This work presents a model for the optimal supply chain (SC) design of the cellulosic bioethanol production. The supply chain studied consists of forest plantations, cellulosic bioethanol plants and consumption centers. The aim of the project is to identify the optimal SC configuration that maximizes profits and to facilitate the decision making regarding forestry plantations and plants localization, wood and technology involved in the bioethanol production process and optimum amount of products transported between different links. The model is formulated with generalized disjunctive programming and then implemented as a mixed integer linear program in GAMS.

Keywords: Supply chain; bioethanol; cellulose; MILP.

Gerardo F. Montoya⁽¹⁾, Noelia Alasino⁽¹⁾, Maria Analia Rodriguez^(1,2)

⁽¹⁾DTQ (CONICET-UNC), Av. Vélez Sarsfield 1611, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

⁽²⁾UTN-FRSF, Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina.

Mail: r_analia@santafe-conicet.gov.ar

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Revisión de la Literatura

En las últimas décadas, producto de una creciente competitividad de mercado, la optimización de las cadenas de suministros (CS) ha ganado creciente interés en el ámbito científico (Papageorgiou, 2009). La industria de biocombustibles ha encontrado su desarrollo dentro de la CS forestal gracias a la posibilidad de transformar materias primas lignocelulósicas en bioetanol. El bioetanol se puede utilizar directamente en los motores de explosión convencionales con ligeras modificaciones. Se emplea en las gasolinas de tipo "súper sin plomo" y se puede usar en mezclas que llegan al 25%, como se hace en Brasil, sin necesidad de modificar los motores (Fernández y Lucas, 2012).

Los procesos de conversión de celulosa en etanol pueden dividirse en dos grandes grupos, según se realicen en una o dos etapas. En los procesos en dos etapas, la hidrólisis (ácida o enzimática) y la fermentación se realizan por separado. En los procesos que utilizan la vía enzimática, una parte de la biomasa pretratada se utiliza como sustrato para la obtención de las enzimas. Una vez producidas las enzimas se añaden al resto del material pretratado en un reactor de hidrólisis. La glucosa obtenida en este reactor pasa a otro, donde se realiza la fermentación mediante la acción de los microorganismos. La ventaja de este proceso es que, al estar separadas la etapa de hidrólisis y de fermentación, ambas pueden realizarse en sus condiciones óptimas. La principal desventaja del proceso es que la glucosa y celobiosa liberadas durante la etapa de hidrólisis enzimática, inhiben las enzimas implicadas en el proceso, obteniéndose bajos rendimientos. Si en lugar de enzimas como catalizadores de la hidrólisis se emplea una hidrólisis ácida, es necesario neutralizar los hidrolizados antes de la fermentación. Además, la

generación de productos de degradación durante la hidrólisis puede afectar al microorganismo encargado de realizar la fermentación.

En los procesos en una etapa, la hidrólisis y fermentación se realizan en el mismo reactor. La principal ventaja de estos procesos es que se reduce la inhibición por producto final que se produce en la operación en dos etapas, ya que la presencia de microorganismos fermentadores, junto con las enzimas celulolíticas reducen la acumulación de azúcar en el fermentador. Por ello se consiguen mayores tasas de hidrólisis que en el proceso de hidrólisis y fermentación por separado, necesitándose una menor cantidad de enzimas, y obteniéndose como resultado un aumento de los rendimientos de etanol. En estos procesos la hidrólisis y fermentación se combinan de manera simultánea y se pueden distinguir procesos de sacarificación y fermentación simultánea de hexosas y sacarificación y cofermentación simultánea de hexosas y pentosas (Patrouilleau et al., 2007).

Uno de los desafíos que se presentan al momento de modelar y optimizar la CS es la complejidad de la misma. Hay múltiples materias primas, con diferentes composiciones; diversos pretratamientos y procesos productivos que acarrear diferentes costos operativos y tienen diferentes rendimientos; diferentes opciones de localización, que conllevan a diversos costos de transporte y de inversión; entre otros. La mayoría de los artículos que se enmarcan en la temática propuesta, abordan la optimización de la CS del bioetanol a base de caña de azúcar (Corsano et al., 2011); las plantas de bioetanol involucradas fueron modeladas con modelos simplificados (Rodríguez et al., 2015a, 2015b) y generalmente, la toma de decisiones sobre la estructura de las plantas se realiza en una etapa posterior a la de la configuración de la CS. Con

la incorporación del diseño de planta detallado dentro del diseño de la SC se obtienen mejores soluciones que con los métodos secuenciales o jerárquicos (Corsano y Montagna, 2011).

Descripción del Problema y Objetivo

En este trabajo se presenta un modelo para el diseño óptimo de la SC para la producción de bioetanol de base celulósica. El modelo de programación comprende una cadena compuesta por tres eslabones: los bosques de plantaciones de algún tipo de madera, las plantas productoras de bioetanol y los centros de corte (de consumo). El objetivo es determinar la configuración óptima para la CS maximizando los beneficios decidiendo: los sitios de plantaciones a explotar y qué madera plantar en cada uno, la ubicación para las plantas de producción, la tecnología empleada en la producción de bioetanol en cada una de las plantas propuestas, y las cantidades transportadas entre los diferentes nodos, a los fines de satisfacer la demanda de bioetanol. En la Figura 1 se muestra un esquema de la CS considerada.

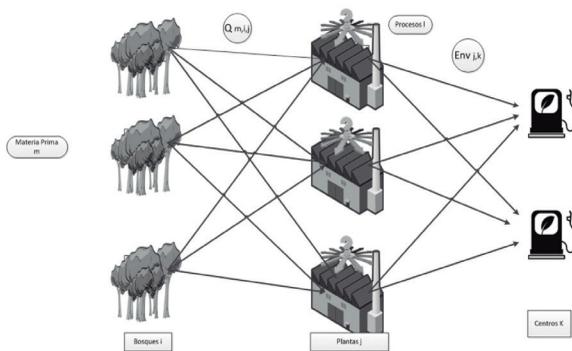


Figura 1. Cadena de suministros considerada.

Cada plantación proporciona madera en forma de rollizos. La madera talada se destina a las plantas

productoras bioetanol de base celulósica donde los rollizos son procesados mediante cuatro tecnologías alternativas: 1- la sacarificación y fermentación simultánea (una etapa, para tratamiento de madera dura y blanda); 2- sacarificación y cofermentación simultánea (una etapa, para tratamiento de madera dura); 3- hidrólisis ácida y posterior fermentación (dos etapas, para tratamiento de madera dura y blanda); y 4- hidrólisis enzimática y posterior fermentación (dos etapas, para tratamiento de madera blanda) (Frederick et al., 2008; Lynd et al., 1996; So y Brown 1999; Wingren et al., 2003).

METODOLOGÍA

Modelo Matemático

En esta sección se presenta el modelo matemático empleado para el problema de diseño óptimo de la SC para la producción de bioetanol. Sea I el conjunto de sitios de materias primas (plantaciones), J el conjunto de plantas de productoras plantas productoras de etanol, K los centros de consumo, M el conjunto de materias primas; L el conjunto de tecnologías empleadas en las plantas de bioetanol. Para hacer referencia a cada uno de los nodos, se emplean los subíndices correspondientes, asumiendo que en cada caso el índice pertenece al conjunto correspondiente, esto es $i \in I$. Se define también el conjunto $[[mpproc]]_{(m,l)}$ que relaciona las tecnologías empleadas (L), con las materias primas (M) que pueden ser procesadas según esa tecnología.

Variables, Restricciones y Función Objetivo

Se definen las siguientes variables continuas positivas para representar los flujos de materiales entre

los diferentes puntos de la cadena: $Q_{m,i,j}$ cantidad de madera m transportada desde el sitio i a la planta j ; $Q2_{m,j,l}$ cantidad de madera m que ingresa a la planta j al proceso l ; $Env_{j,k}$ cantidad de bioetanol enviada de la planta j al centro k . Se define $Y_{m,l,j}$ como la variable que determina, en caso de resultar igual a 1, la inversión en la planta de producción j para procesar la materia prima m , mediante la tecnología l .

La Ecuación (1) asegura que no se exceda la capacidad de cada sitio i para la producción de cada madera m $Cap_{i,m}$, la Ecuación (2) asegura que la demanda de cada centros k Dem_k sea cubierto, la Ecuación (3) es un balance de masa que asegura que la cantidad enviada de todos los bosques sea recibida en cada planta para ser procesada y la Ecuación (4) consiste en un balance de masa para que la totalidad de lo producido sea enviado a los centros de distribución. La producción se calcula multiplicando la cantidad de madera que recibe cada planta por la eficiencia del proceso $Efi_{l,m}$:

$$\sum_j Q_{m,i,j} \leq Cap_{i,m}, \forall i, m \quad (1)$$

$$\sum_j Env_{j,k} \geq Dem_k, \quad \forall k \quad (2)$$

$$\sum_i Q_{m,i,j} = \sum_l Q2_{m,j,l}, \quad \forall m, j \quad (3)$$

$$\sum_k Env_{j,k} = \sum_{l,m} Efi_{l,m} \times Q2_{m,j,l}, \quad \forall j \quad (4)$$

La Ecuación (5) establece que en cada planta j se puede emplear a lo sumo una tecnología l para procesar una madera m .

$$\sum_{\substack{m,l \\ \forall(m,l) \in mpproc_{m,l}}} Y_{m,l,j} \leq 1, \quad \forall j \quad (5)$$

La disyunción (6) contempla que si selecciona la planta j con la tecnología l para procesar la madera j , es

necesario incurrir en un costo de inversión asociado a la implementación de esa tecnología $CIP_{m,l,j}$ considerando la amortización anual con una vida útil dada; un costo de operación que depende de la cantidad procesada $Q2_{m,j,l}$ y del costo de producción unitario $COP_{m,l,j}$; y permite asignar capacidad de procesar material y asegura que no se supere el máximo de su capacidad de procesamiento en cada planta $Maxp_{m,l,j}$. La tercera ecuación dentro de este término de la disyunción indica que si se invierte en esta planta, al menos deberá procesar una unidad (por ejemplo, 1 t/año si la variable está en esta unidad de medida). Por el contrario, si no se decide invertir, las restricciones de costo son relajadas y la cantidad procesada debe ser nula.

$$\left[\begin{array}{l} Y_{m,l,j} \\ CIP_{m,l,j} \geq CIP_{m,l,j} \\ COPT_{m,l,j} \geq COP_{m,l,j} \times Q2_{m,j,l} \\ Q2_{m,j,l} \geq 1 \\ Q2_{m,l,j} \leq Maxp_{m,l,j} \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{l} \neg Y_{m,l,j} \\ CIP_{m,l,j} \geq 0 \\ COPT_{m,l,j} \geq 0 \\ Q2_{m,j,l} = 0 \end{array} \right], \quad \forall j, \forall(m,l) \in mpproc_{m,l} \quad (6)$$

El objetivo de la CS es la maximización de los beneficios anuales z , como muestra la Ecuación (7), considerando los ingresos anuales (Ing), los costos anuales de la materia prima (CostoMP), operación (COT), envío (CostoEnv) e inversión (Inv):

$$z = Ing - CostoMP - COT - CostoEnv - Inv \quad (7)$$

$$Ing = \sum_{j,k} Env_{j,k} \times PVB \quad (8)$$

$$CostoMP = \sum_{m,i,j} Q_{m,i,j} \times (CMP_{m,i} + CTPMP * DisPlanta_{i,j}) \quad (9)$$

$$COT = \sum_{m,l,j} COPT_{m,l,j} \quad (10)$$

$$CostoEnv = \sum_{k,j} Env_{j,k} \times CTP \times DisCentro_{j,k} \quad (11)$$

$$Inv = \sum_{m,l,j} CIP_{m,l,j} \quad (12)$$

El ingreso anual (Ecuación 8) se obtiene multiplicando la totalidad de bioetanol enviado de las

plantas j a los centros k por su precio (PVB). El costo de la materia prima (Ecuación 9), está formado por el costo de la madera $CMP_{m,j}$ y los costos aparejados en su transporte, proporcionales a las distancia entre el bosque i y la planta j $DisPlanta_{i,j}$ y el costo de transporte unitario (CTPMP). El costo de envío (Ecuación 11) se obtiene teniendo en cuenta la cantidad de bioetanol enviada a los centros de corte, el costo de transporte del mismo (CTP) y la distancia de la planta al centro de corte $DisCentro_{j,k}$. Las Ecuaciones (10) y (12) computan las sumas de los costos de operación e inversión de cada planta. Finalmente, el modelo dado por las ecuaciones (1) a (12) desarrollado a través de programación lineal disyuntiva generalizada es transformado aplicando la reformulación Big-M e implementado como se presenta a continuación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros Empleados para la Resolución del Modelo

El caso de estudio considerado consiste en los nodos que se presentan en la Tabla 1. Se consideran dos tipos diferentes de maderas (pino y eucaliptus) y las cuatro tecnologías mencionadas. Los parámetros empleados se muestran en las Tablas 2 a 11 según estimaciones y datos de la bibliografía (Uasuf y Hilbert, 2012; Rodríguez et al., 2015; Co.I.For.M, 2015; Molina et al., 2015; INTA 2014; Wingren et al., 2003; Frederick et al., 2008; Lynd et al., 1996; So y Brown, 1999).

Plantaciones	Plantas de bioetanol	Centros de distribución
i1. Misiones	j1. San Lorenzo, Santa Fe	k1. San Lorenzo, Santa Fe
i2. Corrientes	j2. La Plata, Buenos Aires	k2. La Plata, Buenos Aires
i3. Entre Ríos	j3. Lujan de Cuyo, Mendoza	k3. Lujan de Cuyo, Mendoza
	j4. Rio Cuarto, Córdoba	k4. Campo Duran, Salta

Tabla 1. Nodos considerados para la resolución del modelo.

	m1	m2
i1	771 252.9	30 940.2
i2	571 617	119 039.1
i3	42 025.5	128 170.2

Tabla 2. $Cap_{i,m}$ Capacidad máxima de los bosques [t].

Centro	Demanda
k1	42 378 500
k2	121 660 766
k3	67 911 168
k4	6 800 772

Tabla 3. Dem_k Demanda de bioetanol en los centro de corte [L/año].

Se considera satisfacer en total un 30% de la demanda anual nacional estimada para 2016.

	m1	m2
i1	280.0	--
i2	321.0	352.0
i3	302.8	359.6
i4	--	407.5

Tabla 4. $Ef_{i,m}$ Eficiencias para cada proceso y cada materia prima [L/t].

	m1	m2
i1	3 380 000	--
i2	2 600 000	1 280 000
i3	5 720 000	1 340 000
i4	--	5 360 000

Tabla 5. $CIP_{m,j}$ Costo Inversión de procesos todo j [\$/año].

	m1 $\forall j$	m2 $\forall j$
i1	11.40	--
i2	10.35	5.10
i3	6.00	5.25
i4	--	1.95

Tabla 6. $COP_{m,j}$ Costo de operación [\$/t].

	m1	m2
i1	196 000	--
i2	196 000	268 000
i3	648 000	263 000
i4	--	280 000

Tabla 7. $Maxp_{m,j}$ Capacidad máxima de operación de los diferentes procesos [t/año].

	i1	i2	i3
m1	269	337	480
m2	306	177	375

Tabla 8. $CMP_{m,i}$ Costo de las diferentes maderas m de diferentes bosques i [\$/t].

	j1	j2	j3	j4
i1	922	1 059	1 704	1 208
i2	705	975	1 474	978
i3	177	508	959	464

Tabla 9. $DisPlanta_{i,j}$ Distancia entre las plantaciones y las plantas de producción de bioetanol [km].

	k1	k2	k3	k4
j1	0	383	892	1 459
j2	383	0	1 118	1 838
j3	909	1 118	0	1 614
j4	413	670	489	1 407

Tabla 10. $DisCentro_{j,k}$ Distancias entre las plantas de producción y los centros de corte de combustible [km].

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
<i>PVB</i>	precio de venta del bioetanol	10	[\$/L]
<i>CTPMP</i>	costo del transporte materia prima	0.35	[\$/t km]
<i>CTP</i>	costo transporte de producto	0.41	[\$/t km]

Tabla 11. Otros parámetros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo fue implementado en GAMS 24.4.6 y se usó CPLEX como algoritmo de resolución. El caso de estudio requiere 104 ecuaciones y 142 variables, de las cuales 48 son binarias, y el tiempo de resolución fue de 0.35 segundos. El valor de la función objetivo (Beneficio) resultó de \$3 999 221 418; compuestos por ingresos de \$5 343 101 000, costo de madera \$498 875 600 y transporte de la madera a planta de producción de \$522 174 500, costo de operación total de \$9 238 459, costo de envío de producto de \$23 191 400, y costo de inversión anual de \$ 290 400 000.

La cadena óptima resultante está compuesta por tres bosques: Misiones, Corrientes y Entre Ríos; cuatro plantas de producción de bioetanol: San Lorenzo-Santa Fe, La Plata-Buenos Aires, Rio Cuarto-Córdoba y Lujan de Cuyo-Mendoza; y cuatro centros de distribución: San Lorenzo-Santa Fe, La Plata-Buenos Aires, Lujan de Cuyo-Mendoza y Campo Duran-Salta. Los nodos y conexiones activas se muestran en la Figura 2.

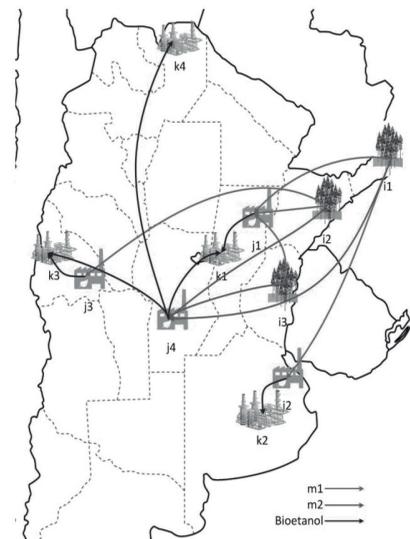


Figura 2. Nodos activos y conexiones resultado de la optimización.

Los valores óptimos de las variables del modelo se muestran en las Tablas 12 a 14. Como se observa en la Tabla 12, ambas maderas (m1-pino y m2-eucalipto) deben ser producidas en las tres plantaciones al máximo de las capacidades consideradas (i1-Misiones, i2-Corrientes y i3-Entre Ríos). La planta de j1-San Lorenzo, es abastecida con madera m1-pino de los bosques de Misiones, Corrientes y Entre Ríos; la planta de j2-La Plata se abastece exclusivamente de la madera de m1-pino producida en i1- Misiones; la planta ubicada en j3-Lujan de Cuyo recibe aportes de madera m1-pino de i2-Corrientes; y la planta j4-Rio Cuarto recibe aportes de m2-eucalipto de los tres bosques considerados en el modelo.

	j1	j2	j3	j4
m1.i1	123 252.9	648 000		
m1.i2	482 721.6		88 895.4	
m1.i3	42 025.5			
m2.i1				30 940.2
m2.i2				119 039.1
m2.i3				128 170.2

Tabla 12. $Q_{m,i,j}$ Madera transportada desde los bosques a las plantas, en [t/año].

La tecnología empleada en las plantas j1 y j2 es la tecnología l3, que consiste en un pretratamiento de la madera con ácido diluido y luego una fermentación separada del proceso de hidrólisis. En la planta j3 se utiliza como materia prima el pino y se selecciona el proceso l2, que consiste en sacarificación y cofermentación simultánea. En la planta j4 se aplica el proceso l4 que implica la hidrólisis enzimática y posterior fermentación y se utiliza el eucalipto como materia prima. La Tabla 13 muestra la cantidad total que ingresa a las diferentes plantas y los costos de operación totales incurridos en cada una.

	k1	k2	k3	k4
j1	0	383	892	1 459
j2	383	0	1 118	1 838
j3	909	1 118	0	1 614
j4	413	670	489	1 407

Tabla 13. Madera procesada y costo de operación total de cada planta.

Por último, la Tabla 14 muestra la cantidad de litros enviados de las diferentes plantas a los diferentes centros de distribución. La planta j1 provee la totalidad de su producción al centro k1 ambos localizados en San Lorenzo. Este centro también es abastecido por la planta j4 que se ubica en Rio Cuarto. Esta planta a su vez provee su producción a los centros k3 y k4, localizados en Luján de Cuyo y Campo Duran, respectivamente. El centro k3 también es suministrado con producto desde la planta j3, localizada en Luján de

Cuyo. Finalmente, el centro k2, La Plata, es abastecido por la planta localizada en la misma ciudad, j2. Dado que el modelo busca maximizar los beneficios, en los centros k1, k2, y k3 se supera la demanda ya que el precio de venta supera al costo unitario del producto, en cambio para el centro de consumo k4, situado más alejado de las plantas de producción solo se satisface la demanda mínima.

	k1	k2	k3	k4
j1	1.96x10 ⁹			
j2		1.96x10 ⁹		
j3			2.85x10 ⁷	
j4	6.72x10 ⁷		3.94x10 ⁷	6.8x10 ⁶

Tabla 14. Producción bioetanol enviada de cada planta a cada centro [L].

CONCLUSIONES

La solución obtenida propone una configuración óptima para la CS que especifica tanto costos de materia prima, tipos de madera como inversión en tecnología y localización de las plantas para satisfacer el consumo de la totalidad de la demanda de bioetanol de las principales refinерías existentes en el país, las cuales representan un 30% de la demanda total argentina para 2016.

El modelo maximiza beneficios y envía un excedente de producción a los nodos de consumo más cercanos a las plantas. Esto puede mantenerse así dependiendo del mercado o agregarse limitaciones a la demanda en cada centro y estudiar la posibilidad de destinar ese excedente para abastecer las refinерías de menor importancia del país que no están consideradas en el modelo.

Las cotas superiores para la explotación de las plantaciones forestales responden tanto a limitaciones de disponibilidad de recursos como también a la

necesidad de proteger el recurso natural para evitar la explotación indiscriminada de los bosques, de esa forma se puede además integrar conjuntamente las demás cadenas de suministros que tienen como principal materia prima la madera.

Las decisiones tecnológicas en cada planta permiten elegir la mejor manera de producir bioetanol considerando solo los costos de procesamiento e inversión. En virtud de estas simplificaciones efectuadas se evidencia la posibilidad de incorporar a los futuros problemas de modelado otras variables como pueden ser la integración energética de los procesos para aprovechar los resi-

duos del proceso o la elección de tecnologías teniendo en cuenta también impactos ambientales como la reducción de la huella de carbono.

Cabe destacar que el modelo propuesto presenta una situación simplificada de la cadena de suministros. Como trabajo futuro, se propone considerar una mayor cantidad de nodos, ubicando plantas potenciales cercanas a los centros de producción de materia prima. Asimismo se plantea contemplar diferentes tamaños de plantas para una misma tecnología (proceso y materia prima) a los fines de evaluar el impacto las economías de escala en las decisiones de localización.

REFERENCIAS

- Co.I.For.M. (2015). *Boletín de precios de madera aserrada y otros*.
- Corsano, G., Montagna, J.(2011). *Mathematical modeling for simultaneous design of plants and supply chain in the batch process industry*. *Computers & Chemical Engineering*, 35, 149–164.
- Corsano, G., Vecchiatti, A., Montagna, J.(2011). *Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model*. *Comput. Chem. Eng.*, 35, 8, 1384–1398.
- Fernández, J., Lucas, H. (2012). *Biocarburantes*. Madrid: Haya Comunicación
- Frederick, W, Lien, S., Courchene, C., DeMartini, N., Ragauskas, A., Lisa, K. (2008). *Production of ethanol from carbohydrates from loblolly pine: A technical and economic assessment*. *Bioresource Technology*, 99, 11, 5051–5057.
- INTA EEA Concordia. (2015). *Planilla de precios forestales - Zona NE de Entre Ríos, (junio)*.
- Lynd, L., Elander, R., Wyman, C. (1996). *Likely features and costs of mature biomass ethanol technology*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 57, 8, 741–761.
- Molina, N., Ruiz Diaz, R., Zabala, J., Bessonart, S.(2015). *Boletín de precios de productos y servicios forestales, (Marzo)*, 1–3.
- Papageorgiou, L. (2009). *Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities*, *Comput. Chem. Eng.*, 33, 12, 1931–1938
- Rodríguez, M., Alasino, N., Vecchiatti, A.(2015)a. *Diseño óptimo de la cadena de suministros del complejo foresto-industrial*. *CAIQ 2015 y 3 JASP*. 2015.
- Rodríguez, M., Alasino, N., Vecchiatti, A.(2015)b. *Forest Supply Chain Optimization applying Generalized Disjunctive Programming*. *Computer Aided Chemical Engineering, Proceedings of the 26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE 26*.
- So, K., Brown, R.(1999). *Economic Analysis of Selected Lignocellulose-to-Ethanol Conversion Technologies*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 77, 2, 633–640.
- Uasuf, A., Hilbert, J.(2012). *El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina*. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 2, 1–53.
- Patrouilleau, R.D., Lacoste, C., Yapura, P., Casanovas, M. (2007). *Perspectivas de los biocombustibles en Argentina, con énfasis en el etanol de base celulósica*. *En Serie Cuadernos del Desarrollo*, 1. *Unidad de Conyuntura y Prospectiva*. INTA. http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-serie_cuadernos_del_desarrollo_-_1_-_perspectivas_de_.pdf
- Wingren, A., Galbe, M., Zacchi, G.(2003). *Techno-Economic Evaluation of Producing Ethanol from Softwood : Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks*. *Biotechnol. Prog*, 19, 1109–1117.