

Selección de vías de proceso y diseño de cadenas de suministros utilizando estrategias de optimización

Jonathan Wheeler¹, Isabel Salas Tonello¹, Fernando D. Mele¹

¹ Universidad Nacional de Tucumán, FACET, Av. Independencia 1800,
T4002BLR S. M: de Tucumán, Argentina
jwheeler.ing@gmail.com
isasalast@gmail.com
fmele@herrera.unt.edu.ar

Resumen. La actividad agroindustrial se ve afectada por el rendimiento agrícola: la calidad y cantidad de materia prima pueden variar en cada cosecha por diversos factores. Ante esta posibilidad, se deben buscar alternativas de producción que maximicen la rentabilidad de la actividad. El diseño de una cadena de suministros de múltiples opciones productivas, que tomando como materia prima un determinado cultivo, permita obtener un conjunto de productos de alto valor agregado, es una de las formas de afrontar la incertidumbre y lograr robustez ante los cambios en la materia prima, y a su vez, mantener la rentabilidad ante la variabilidad del mercado. En este trabajo se propone realizar el diseño de una cadena de suministros basada en biomasa utilizando una formulación lineal mezcla entera (MILP). Esta formulación incluye las vías de proceso más prometedoras seleccionadas previamente mediante una formulación lineal (LP), la cual las escoge de una superestructura que tiene en cuenta un conjunto de tecnologías viables para el uso de la biomasa considerada.

1 Introducción

La producción y rentabilidad de una agroindustria se ve afectada por la cantidad y calidad de la materia prima que recibe de sus proveedores. La actividad agrícola se caracteriza por presentar gran variabilidad en sus rindes debido a las condiciones climáticas y a la calidad del laboreo realizado. Esto incide notablemente en la eficacia de las tareas de planificación de la producción en un horizonte de tiempo determinado. La variación en la cantidad o calidad de la materia prima recibida afecta al producto final obtenido e influye sensiblemente en las decisiones tácticas, estratégicas y operativas que se toman a lo largo de toda la cadena productiva. En la actividad agroindustrial se presentan a menudo dos situaciones extremas: por un lado el exceso de oferta agrícola para el sector industrial conlleva a la sobreproducción de derivados que genera un incremento en la oferta de éstos y una consecuente disminución en su precio. Por otro lado, la escasez de materia prima puede provocar una disminución en el volumen de productos finales y una baja en su oferta, aumentando los precios. Estos efectos indeseables en la economía de la actividad van de la mano con consecuencias sociales como la pérdida de empleos o del acceso a productos de necesidad básica. Será necesario, entonces, coordinar los recursos disponibles en toda la cadena

productiva para encontrar soluciones que permitan optimizar su uso y generar un conjunto de acciones que permitan afrontar la variabilidad de la actividad agrícola.

Una estrategia que adoptan generalmente las empresas es la diversificación de la actividad productiva incorporando tecnologías para la obtención de nuevos productos. Los nuevos procesos lógicamente deben utilizar la misma materia prima o alguno de los productos intermedios existentes en la actividad y permiten aprovechar de manera más eficiente la cantidad de materia prima disponible para mantener niveles de rentabilidad aceptables. Es preciso, por lo tanto, identificar, dentro de un conjunto de tecnologías posibles, aquéllas que resulten más prometedoras desde el punto de vista techno-económico para su incorporación a las vías de proceso preexistentes. Asimismo se ha de evaluar la inversión necesaria y la distribución de los flujos de materiales a lo largo de la cadena productiva. Una de las herramientas idóneas para buscar una coordinación eficiente de los procesos y movimientos de una empresa o actividad, es la programación matemática aplicada a la optimización de cadenas de suministros (CS). Su potencial para incrementar las ganancias y optimizar el uso de los recursos la ha convertido en una vía para la toma de decisiones de administradores, gerentes y entidades gubernamentales.

En este trabajo se propone una estrategia para el diseño de la CS de agroindustrias incorporando nuevas vías de proceso que amplíen la oferta tradicional de productos. Para ello, en primer lugar se propone realizar una selección de las vías de proceso (tecnologías) más prometedoras desde el punto de vista económico, mediante un modelo lineal (LP). Luego se procede al diseño de la CS de la actividad (modelo lineal mixto entero, MILP) considerando sólo los procesos seleccionados anteriormente. Esto permite simplificar el problema de diseño de la CS que, al abordar la toma de decisiones estratégicas, es intrínsecamente de gran tamaño de acuerdo con el grado de detalle de la descripción y el número de decisiones enteras involucradas. Un caso típico de diseño de CS [1, 2, 3], consiste en determinar el conjunto de inversiones a realizar y la distribución de los flujos de materiales a lo largo de la red. La utilidad de la propuesta se ilustra mediante su aplicación al diseño de la CS de azúcar y etanol de la provincia de Tucumán (Argentina), incorporando las tecnologías para la producción de antocianinas, poli-hidroxi butirato (PHB), biobutanol y cogeneración de electricidad, aplicación que constituye el diseño de la CS de una biorrefinería.

2 Planteo del Problema y Metodología Propuesta

Considérese un proceso existente de obtención de N productos a partir de una materia prima agrícola determinada. Conocidos P procesos que no se encuentran implementados en la cadena de valor de una actividad, que pueden utilizar la misma materia prima o alguno de los productos intermedios para la obtención de M nuevos productos, se desea diseñar la estructura de la CS de la actividad. Realizar el diseño de la CS implica determinar cuáles de los nuevos procesos se deben implementar para mejorar el desempeño de la cadena de producción, conocer la distribución de los flujos de materiales dentro de la estructura y determinar las inversiones necesarias para concretar el diseño.

Para realizar el diseño de la CS considerando la potencial incorporación de nuevos procesos, se propone un método de dos etapas. En primera instancia, se realiza una evaluación que permita determinar cuáles de los procesos pueden brindar mayor rentabilidad aprovechando la materia prima existente. Para ello se utiliza una formulación LP que permite elegir las vías de proceso que otorgan el mayor beneficio económico. Posteriormente se procede al diseño de la CS incorporando como opciones los procesos que resultaron más prometedores en el paso anterior. Esto constituye un modelo MILP cuyo objetivo es la maximización de las ganancias netas de la actividad. En ambas etapas se realizan los cálculos introduciendo la posibilidad de distintos escenarios en la disponibilidad de materia prima. Se puede lograr así un diseño más robusto de la CS que permita tratar la incertidumbre originada en la actividad primaria.

3 Caso de estudio

La metodología propuesta se utiliza para resolver el problema de diseño de la CS de la industria sucroalcoholera de la provincia de Tucumán (Argentina). Concretamente, se analiza la posibilidad de incorporar en la cadena productiva un conjunto de procesos para la obtención de cuatro nuevos productos: bio-butanol, PHB, antocianinas y la posibilidad de cogeneración de energía.

3.1 Descripción general de la actividad sucroalcoholera

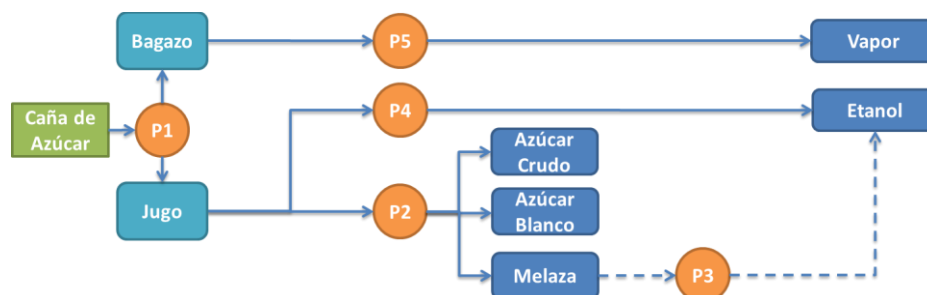


Figura 1. Esquema del proceso de producción actual de azúcar y etanol a partir de caña de azúcar. La línea de trazo indica la producción de un producto a partir de la melaza (producto intermedio)

La industria sucroalcoholera es una de las actividades productivas más importantes de la provincia de Tucumán. Actualmente cuenta con 14 plantas que tienen capacidades de producción y estrategias financieras diferentes. La materia prima de esta cadena productiva es la caña de azúcar. La calidad y cantidad de cultivo se ve influenciada principalmente por las condiciones climáticas, por lo que son habituales grandes cambios de una cosecha a la siguiente. En todas las plantas de procesamiento de caña, las tecnologías de producción, estructuras de distribución de materia prima y almacenamiento de productos son similares. El proceso de producción de azúcar y

etanol consiste básicamente en una etapa de molienda (P1) en la que se extrae el jugo, rico en azúcar, y se separa el bagazo que se quema en las calderas para producir vapor para el propio proceso (P5). Luego el jugo es concentrado a través de un conjunto de etapas para obtener finalmente el azúcar blanco y azúcar crudo (P2), y también la melaza (subproducto) que se destina a un proceso fermentativo para la producción de etanol (P3). También existe la posibilidad de destinar parte del jugo directamente a la fermentación para el mismo fin (P4). La Fig. 1 muestra el proceso descrito.

La actividad azucarera y del alcohol actualmente se enfrenta a grandes dificultades. En primer lugar, la continua sobreproducción agrícola genera un exceso de oferta y consecuente una disminución del precio del producto terminado, afectando tanto a las ganancias de la industria como a las del agricultor. Esto se da principalmente a causa de la imposibilidad de realizar exportaciones en volúmenes suficientes y a que el mercado interno tiene un cupo fijo para la producción de alcohol [4]. De aquí, que resulta de gran interés analizar la posibilidad de diversificar la actividad para aumentar su rentabilidad a partir de la inclusión de nuevos procesos y productos en la cadena productiva.

4.2 Procesos alternativos

Existe un conjunto de procesos que pueden utilizar fuentes azucaradas para la obtención de diversos materiales. Para este trabajo se han seleccionado los procesos que rinden productos de elevado valor agregado y que, en trabajos recientes, se han evaluado de forma acoplada al proceso tradicional sucroalcoholero [5, 6, 7, 8, 9]. Estos procesos son los de producción de bio-butanol [10], PHB [11], antocianinas [12] y de cogeneración de electricidad a partir del bagazo.

Poli-hidroxi butirato (Ácido 3-hidroxibutírico) (PHB). El PHB, por ser un termoplástico biodegradable y biocompatible, evita los inconvenientes ecológicos típicos que tienen los plásticos no biodegradables a la hora de su disposición final. De aquí el interés no sólo económico sino ambiental por este producto. El proceso seleccionado para la producción del PHB consiste en una primera operación de fermentación aeróbica llevada a cabo por el microorganismo *Ralstonia eutropha*, que transforma los azúcares del jugo de caña de azúcar clarificado en el polímero de interés. La descripción de la cepa específica, el medio de cultivo, el proceso de la fermentación y sus procedimientos puede encontrarse en [13]. El biopolímero es almacenado en las células como reserva de carbono y se recupera mediante un proceso de extracción y purificación [14].

Bio-butanol. El butanol es un producto con dos mercados principales, puede ser vendido a las industrias químicas o como combustible. La producción del butanol comprende dos grandes etapas: la fermentación del jugo de caña utilizando células de una cepa mutante de *Clostridium* y luego la separación de los productos que pueden venderse (butanol, acetona y etanol) [7].

Antocianinas. Las antocianinas son compuestos muy utilizados en la industria alimenticia. Su producción consta de tres pasos principales: (i) crecimiento celular y pigmentación [14], (ii) ruptura de la célula para la recuperación del metabolito y (iii) concentración y purificación del metabolito. La ruptura de la célula se realiza a través

de una extracción por solvente a alta presión. La separación del metabolito y su concentración se hace a través de membranas [15].

Cogeneración. La cogeneración implica la producción conjunta de electricidad y vapor a partir de una fuente combustible. Actualmente existen diversas tecnologías para realizar este proceso por lo que se adoptará las empleadas en otros trabajos [6].

4.3 Selección de vías de procesos.

En esta sección se describe la metodología para la selección de los caminos mediante los cuales se transformará la caña de azúcar en los productos de interés: azúcar (T2), melaza (T2), etanol (T3, T4, T7 ó T8), butanol (T4, T8), acetona (T4, T8), PHB (T5, T9), antocianinas (T6, T10) y electricidad (T11). En la Fig. 2 se muestra un esquema de los procesos involucrados para la diversificación de la industria de la caña de azúcar.

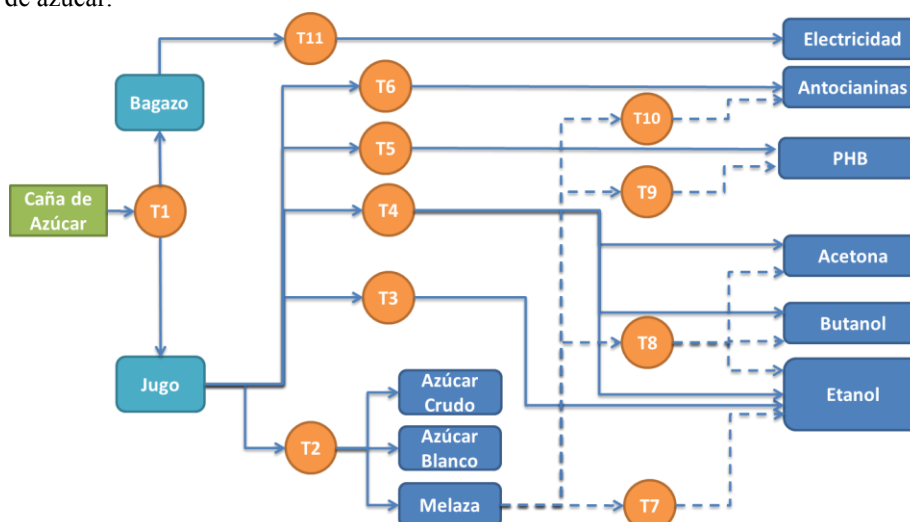


Figura 2. Superestructura para la diversificación de la industria sucroalcoholera a butanol, PHB, antocianinas y electricidad. La línea de trazos corresponde a los procesos que utilizan la melaza (producto intermedio) como materia prima.

Los criterios de selección pueden ser variados. En este caso se han utilizado los costos de producción, principalmente asociados al consumo energético, los rendimientos de producción y los precios de venta en el mercado. Formalmente el problema de selección de vías de proceso se puede establecer como: dados los rendimientos y los costos de producción de las tecnologías consideradas, las demandas mínimas y máximas de los productos de interés en el mercado, los costos para disposición de las vinazas y los precios de los productos terminados, se desean encontrar los flujos de materiales a través de las estructura de procesos que permiten maximizar el beneficio económico de la actividad.

Algoritmo. Para resolver el problema se realiza una formulación tipo LP, planteada mediante las siguientes ecuaciones:

Objetivo. El beneficio económico será igual a los ingresos (REV) por ventas, disminuidos por los costos de producción (TPC) y de disposición de residuos (DPC).

$$FO = REV - TPC - DPC \quad (1)$$

Los ingresos dependen de la cantidad total producida de los productos i de la cadena que se pueden vender (SEP_i) y del precio de dichos productos.

$$REV = \sum_i TP_i \cdot PR_i \quad i \in SEP_i \quad (2)$$

Los costos de producción dependen del flujo del producto principal ($i \in IM_{ip}$) para cada proceso p (F_{ip}) y del costo de producción asociado a ese proceso (CV_p).

$$TPC = \sum_p CV_p \cdot \sum_{i \in IM(i,p)} F_{ip} \quad (3)$$

Los costos de disposición de residuos (DPC) dependen de los flujos de vinaza tipo I y tipo II que se produzcan y del costo de disposición (DC)

$$DPC = DC \cdot \sum_p F_{i,p} \quad i = vinazaI, vinazaII \quad (4)$$

Restricciones. Las restricciones del problema surgen de los balances de materia, de la capacidad de producción de materia prima y de las demandas mínimas y máximas del mercado. De los balances de materia, surge que la cantidad total producto que se puede vender ($TP_i, i \in SEP_i$) es igual a la sumatoria de los flujos de ese producto i en las plantas p (Ec. 5). Además, esta cantidad debe ser mejor que la demanda máxima admitida (DMM) y mayor que la demanda mínima (DMI).

$$TP_i = - \sum_p F_{ip} \quad i \in SEP_i \quad (5)$$

$$DMI \leq TP_i \leq DMM \quad i \in SEP_i \quad (6)$$

El flujo de un producto i en la planta p está dado por el flujo del producto principal multiplicado por el coeficiente de balance de materia (ρ_{pi})

$$F_{ip} = \rho_{pi} \cdot F_{i \in IM_{ip}, p} \quad (7)$$

Por último, la cantidad total de materia prima utilizada debe ser menor o igual que la cantidad total producida en el campo ($CROP$)

$$F_{caña, T1} \leq CROP \quad (8)$$

Resultados. El problema para la maximización de los beneficios económicos de la industria de la caña de azúcar se ha resuelto para 3 escenarios específicos considerando la variabilidad de las condiciones climáticas durante el crecimiento y cosecha (zafra) del cultivo. En la Tabla 1 se describen los tres escenarios.

Tabla 1. Escenarios a considerar para la producción de caña de azúcar [16].

Escenario, descripción	Cantidad de caña (t)	Rendimiento (t azúcar/t caña)
1 Buena maduración, ausencia de heladas o heladas leves, buenas condiciones para el desarrollo de la zafra.	17.050.000	10.40%
2 Maduración intermedia, heladas moderadas y/o abundancia de lluvias durante la zafra.	16.620.000	9.70%
3 Malas condiciones para la maduración, heladas severas y abundancia de lluvias durante la zafra.	15.940.000	9.00%

La formulación se ha codificado en GAMS® v.24.0.2 y resuelto con CPLEX 11.0, en un procesador Intel® Core 2 Duo, 4GB de RAM. Los esquemas de producción resultantes para el escenario 1 y 3 se pueden ver en la Fig. 3 y la Fig. 4 respectivamente. La estructura que se obtiene para el escenario 2 es similar a la del 1 con distintos flujos de materiales.

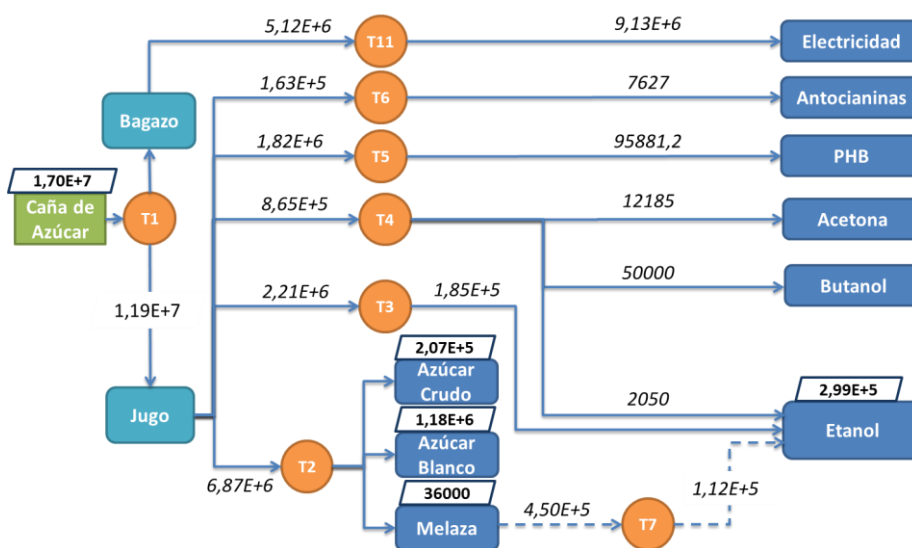


Figura 3. Estructura resultante para el escenario 1. Los flujos de materiales se expresan en t y la electricidad en MWh

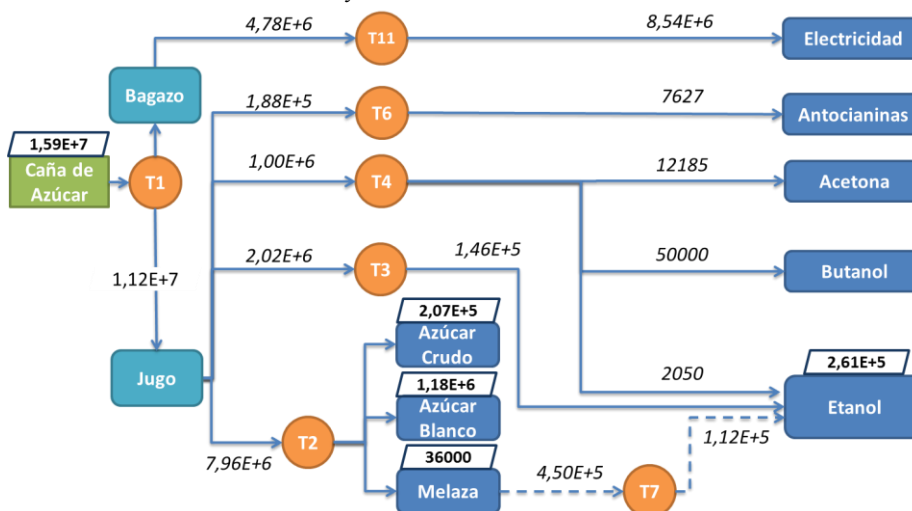


Figura 4. Estructura resultante para el escenario 3. Los flujos de materiales se expresan en t y la electricidad en MWh.

Como se puede observar en las figuras, la solución para escenarios favorables (1 y 2) considera producir todos los productos, pero solamente etanol a partir de melaza (T7). En cambio, cuando las condiciones para el cultivo empeoran (escenario 3), no se tienen en cuenta los procesos para obtención de PHB y nuevamente se produce solamente etanol a partir de melaza. La ausencia del proceso de PHB se debe principalmente a la escasez de materia prima y a que la producción de PHB tiene una mayor relación costo-beneficio. De esto surge que para resolver el diseño de la CS, en la sección siguiente, se considerará la posibilidad de instalar plantas para los procesos de la Fig. 4.

4.4 Diseño de la cadena de suministros.

En esta sección se va a abordar el problema de diseño general de la CS. Para ello se considerará a la actividad de la caña de azúcar como un todo: campo-industria-almacén. Este enfoque puede ser de particular utilidad para la toma de decisiones estatales, ya que se pueden dirigir medidas para la coordinación de las distintas áreas de la cadena de valor y además desarrollar planes de fomento a la inversión en determinadas áreas para generar el beneficio general de la actividad. Dado que el objetivo del presente caso de estudio es sólo ilustrar las posibilidades de la metodología planteada, el diseño de la CS se realiza de forma limitada, pudiendo ampliarse su alcance y detalle como en otros trabajos [1, 2]. El principal objetivo es encontrar soluciones a nivel estratégico para afrontar el desarrollo de la actividad, considerando las restricciones del mercado, políticas productivas estatales y limitaciones propias del sector de procesos. Para ello se determina cuáles deben ser el conjunto de inversiones a realizar en la provincia en cuanto a la generación de nuevos espacios de cultivo de caña de azúcar y creación de nuevas instalaciones productivas y para almacenamiento. Así también se determina el destino los flujos de materiales para optimizar el beneficio neto derivado de la industria. El presente desarrollo se encuentra sujeto a las limitaciones del espacio agrícola local, la demanda y cupos internos, el límite a las exportaciones establecidas por ley y las limitaciones técnicas de los procesos. Para definir el problema de diseño de la CS se plantea una estructura de tres escalones (cultivo-proceso-almacenamiento) y, siendo un modelo estático, se considera un horizonte de tiempo de 1 año. Formalmente el diseño de la CS de la industria en la provincia se puede establecer de la siguiente forma: dados el precio de los productos, los costos de cultivo, producción, almacenamiento, el pronóstico de demanda, las tasas de impuestos, las capacidades de los distintos procesos y de los campos agrícolas, las políticas estatales para la producción y exportación de productos, y los impuestos para disposición de residuos (vinazas). El objetivo es determinar el número de entidades de la estructura de la industria (nuevos campos y plantas industriales) y las decisiones de planeamiento asociadas con el objeto de maximizar los beneficios económicos (*FO*). La toma de decisiones incluye el número y capacidad de nuevas plantas productivas y establecimientos agrícolas, y la determinación de los caudales de materia prima, productos terminados y desechos dentro de la estructura, para un determinado pronóstico de precios y demanda.

Algoritmo. Para resolver el problema se plantea una formulación MILP cuyo objetivo es la ganancia neta obtenida de la actividad (NE) disminuida por el desembolso necesario para las inversiones (FCI). La formulación MILP puede escribirse como:

Objetivo

$$FO = NE - FCI \quad (9)$$

La ganancia neta será igual a los ingresos (REV) por ventas al mercado interno y por exportación, disminuidos por los costos de producción (TPC), de stock (STC) y de disposición de residuos (DPC).

$$NE = REV - TPC - STC - DPC \quad (10)$$

Los ingresos por ventas dependen de los precios del mercado interno (PRI_i) y externo (PRE_i), de las cantidades destinadas a ambos mercados (DMI_i y DME_i) y de las ventas de electricidad.

$$REV = \sum_{i \in SEP(i)} DMI_i \cdot PRI_i + \sum_{i \in EXP(i)} DME_i \cdot PRE_i + TP_{electricidad} \cdot PRI_{electricidad} \quad (11)$$

Los costos de operación (TPC) vienen dados por la Ec. 4 y los costos por disposición de residuos por la Ec. 5. Los costos de almacenamiento (STC) se calculan a partir de los costos unitarios de almacenamiento (USC_i) y de las cantidades almacenadas (ST_i).

$$STC = \sum_{i \in STO(i)} ST_i \cdot USC_i \quad (12)$$

El desembolso para las inversiones (FCI) depende del número de instalaciones (NP_p) y los costos fijos de instalación (α_p), de la capacidad de esas instalaciones ($PcapE_p$) y los costos variables de instalación (λ_p), y del área extra necesaria para cultivo (ESC) y los costos por establecimiento agrícolas ($CFLD$).

$$FCI = ESC \cdot CFLD + \sum_p NP_p \cdot \alpha_p + PcapE_p \cdot \lambda_p \quad (13)$$

Restricciones. Las restricciones vienen dadas por los balances de materia, las demandas de los productos y las capacidades de las instalaciones. Los balances de materia están representados por la Ec. 6 y Ec. 8. La cantidad total producida (TP_i) es igual a la cantidad enviada al mercado interno (MI_i), a exportación (ME_i) y la almacenada (ST_i).

$$TP_i = DMI_i + DME_i + ST_i \quad i \in SEP_i \quad (14)$$

La cantidad almacenada es una fracción (β) de la cantidad total vendida.

$$ST_i = \beta(DMI_i + DME_i) \quad i \in SEP_i \quad (15)$$

Las cantidades enviadas al mercado interno y externo deben cumplir con la demanda interna (DII , DIM) y externa (DEI , DEM).

$$DII \leq DMI_i \leq DIM \quad i \in SEP_i \quad (16)$$

$$DEI \leq DME_i \leq DEM \quad i \in SEP_i \quad (17)$$

El área de cultivo total, la existente (CAP) más el área extra necesaria (ESC), debe ser menor que la superficie posible de cultivo ($SCcap$).

$$CAP + ESC \leq SCcap \quad (18)$$

Existe un límite de extensión de área mínimo (CAP_i) y máximo ($CAPM$) para las nuevas instalaciones agrícolas (NSC).

$$NSC.CAPI \leq ESC \leq NSC.CAPM \tag{19}$$

También existe un límite de capacidad mínimo ($PcapI$) y máximo ($PcapM$) para las instalaciones industriales (N_p).

$$N_p \cdot PcapI \leq PcapE \leq N_p \cdot PcapM \tag{20}$$

Resultados. La formulación MILP también se ha codificado en GAMS® v.24.0.2 y resuelto con CPLEX 11.0 para los 3 escenarios en el mismo ordenador que el problema LP. En la Fig. 5 se puede ver la estructura de la CS para el escenario 3, el más desfavorable desde el punto de vista del rendimiento cultivo, que puede brindar un plan estratégico más robusto para la CS. Se muestran los flujos de materiales y número de instalaciones de cada una de las tecnologías, como así también las explotaciones agrícolas.

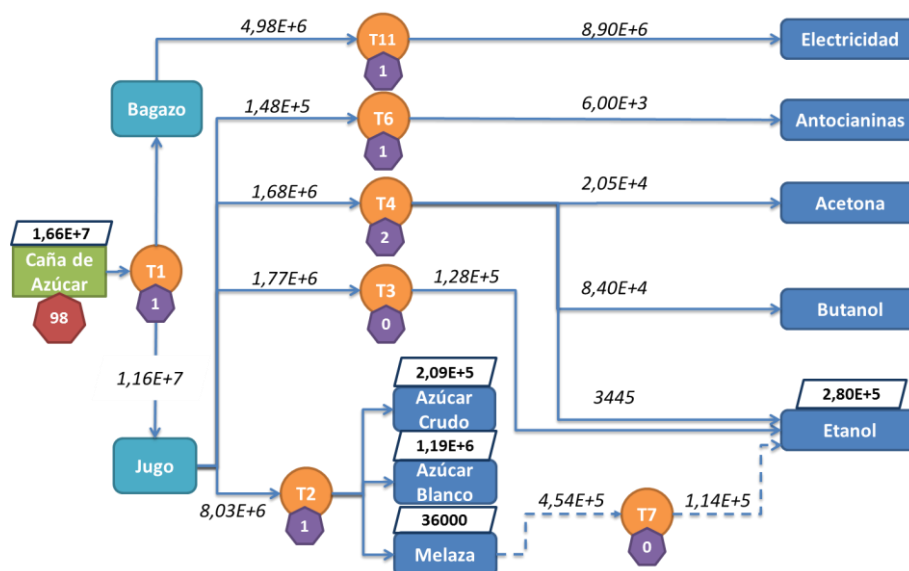


Figura 5. Diseño de la CS resultante para el escenario 3. Los valores asociados a materiales se expresan en t y la electricidad en MWh. El heptágono posee el número de instalaciones necesarias para cada tecnología y para el campo

Aunque las necesidades de expansión son distintas para los 3 escenarios, todos dan lugar a esa expansión con la misma cantidad de instalaciones industriales, es decir que la CS presenta la misma topología industrial en los 3 casos. A diferencia de los escenarios 1 y 2 que no requieren expansión de la superficie agrícola, el escenario 3 plantea la necesidad de incrementarla, y para ello plantea la creación de 98 nuevos espacios agrícolas. Dado este cuadro de inversiones, para el escenario 3 se requiere una inversión de M\$ 200 (límite) a diferencia de los escenarios 1 y 2 que requieren menor inversión, M\$ 184 y M\$ 183, respectivamente.

5 Conclusiones

En el presente trabajo se ha desarrollado un método para diseñar la CS de una agroindustria cuando se desea incorporar procesos alternativos para diversificar la matriz productiva. Situación a menudo motivada por las variaciones en la productividad de la materia prima. El método permite seleccionar previamente los procesos que resultan más prometedores mediante la resolución de un problema sencillo que elige los caminos para la transformación de la materia prima maximizando las ganancias obtenidas. Esta selección previa permite simplificar el modelado, resolución y análisis de resultados al diseñar posteriormente la CS mediante un nuevo modelo que incorpora solamente los procesos seleccionados como posibles inversiones para mejorar la rentabilidad de la actividad industrial.

Referencias

1. Kostin, A., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D., Bagajewicz, M., Jiménez, L. A novel rolling horizon strategy for the strategic planning of supply chains. Application to the sugar cane industry of Argentina. *Computers & Chemical Engineering*. 35(11) (2011) 2540-2563
2. Mele, F. D., Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L. Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (2011) 4939-4958
3. García, D.J., You, F. Multiobjective optimization of product and process networks: General modeling framework, efficient global optimization algorithm, and case studies on bioconversion. *AIChE Journal*. 61(2)(2015) 530-554
4. Secretaría de Energía de la Nación. República Argentina. Resolución N° 1673/2010 (2010)
5. Vaz Rossell C. E., Mantelatto P. E., Agnelli J. A. M., Nascimento J. Sugar-based Biorefinery: Technology for Integrated Production of Poly(3-hydroxybutyrate), Sugar, and Ethanol. *Biorefineries – Industrial Processes and Products. Status Quo and Future Directions*. 1 (2006) 209-226.
6. Moncada J., El-Halwagi M. M., Cardona A. C. Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case. *Bioresource Technology* 135 (2013) 533–543.
7. Pinto Mariano A., Dias M.O.S., Junqueira T. L., Cunha M. P., Bonomi A., Filho R. M. Butanol production in a first-generation Brazilian sugarcane biorefinery: Technical aspects and economics of greenfield projects.
8. Grillo Renó M. L., Almazán del Olmo O., Escobar Palacio J. C., Silva Lora E. E., Venturini O. J. Sugarcane biorefineries: Case studies applied to the Brazilian sugar–alcohol industry. *Energy Conversion and Management* 86 (2014) 981–991.
9. Junqueira T. L., Cavalett O., Bonomi A. The Virtual Sugarcane Biorefinery—A Simulation Tool to Support Public Policies Formulation in Bioenergy. *Industrial Biotechnology* 12(1) (2016) 62 – 67.
10. Roffler S., Blanch H. W., Wilke C. R. Extractive Fermentation of Acetone and Butanol: Process Design and economic evaluation. *Biotechnology Progress*. 3 (3) (1987) 131-140.
11. Shahhosseini S. Simulation and optimisation of PHB production in fed-batch culture of *Ralstonia eutropha*. *Process Biochemistry* 39 (2004) 963–969.
12. Zhang, W., Seki, M., Furusaki, S., Middelberg, A.P.J., 1998. Anthocyanin synthesis, growth and nutrient uptake in suspension cultures of strawberry cells. *J. Ferment. Bioeng.* 86 (1), 72–78.

13. Braunegg G., Lefebvre G., Genser K. F. Polyhydroxyalkanoates, biopolyesters from renewable resources: Physiological and engineering aspects. *Journal of Biotechnology* 65 (1998) 127-161
14. S. Derenzo, Brazilian Patent PI 93023120, 1993.
15. Patil, G., Raghavarao, K., 2007. Integrated membrane process for the concentration of anthocyanin. *J. Food Eng.* 78 (4), 1233–1239.
16. EEAOC. Reporte Agroindustrial: Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. 107 (2015)