

# **IMPACTO DEL USO DE RESIDUOS EN EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE UNA CADENA DE SUMINISTROS PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL**

N. Vanzetti, Y. Fumero, J. M. Montagna, G. Corsano\*

Instituto de Desarrollo y Diseño, INGAR (CONICET-UTN), Santa Fe, Argentina

E-mail: [gcorsano@santafe-conicet.gov.ar](mailto:gcorsano@santafe-conicet.gov.ar)

**Resumen.** En este trabajo se desarrolla un modelo multiobjetivo (maximizar ganancias-minimizar impacto ambiental) para el diseño óptimo de una cadena de suministro para la producción de etanol a partir de mieles provenientes de diversas plantas de azúcar. Simultáneamente se obtiene el diseño de cada planta instalada y la programación detallada de su producción, esto último modelado mediante campañas mixtas de producción. El impacto ambiental causado por la producción de etanol es medido a través de los efluentes generados en cada planta. Para minimizar este impacto, se propone producir levaduras de dos tipos. De esta forma, el problema multiobjetivo es resuelto maximizando la función económica para diferentes valores permitidos de efluentes, generando un conjunto de soluciones posibles. A través de un caso de estudio, se muestra la potencialidad del enfoque propuesto, que sirve como herramienta al momento de diseñar una cadena sustentable y permite analizar diferentes escenarios.

**Palabras clave:** cadena de suministros, diseño y planificación, optimización multiobjetivo, etanol, residuos.

## **1. Introducción**

La producción de biocombustibles ha crecido a pasos agigantados en la última década y en particular, el etanol se encuentra en una posición de liderazgo. Numerosos

trabajos han abordado el desarrollo de diferentes tecnologías para producir etanol a partir de diversas fuentes de materias primas. Hoy en día, los combustibles de primera generación son los que dominan el mercado, pero su competencia por el uso de fuentes alimenticias y la discusión social sobre esto, han estimulado el interés por la producción de biocombustibles producidos a partir de residuos y biomasa no comestible, los que se denominan combustibles de segunda generación (Balat y Balat, 2009).

El etanol producido a partir de las mieles provenientes de la producción de azúcar de caña, es un biocombustible de segunda generación atractivo desde el punto de vista ambiental porque en general su uso reduce las emisiones comunes a toda combustión. Sin embargo, una de las mayores desventajas de esta producción es la gran cantidad de efluentes que genera su proceso. Por lo tanto, uno de los grandes desafíos es proponer instalaciones integradas capaces de producir productos de alto valor agregado y reutilizar sus efluentes para provocar el mínimo impacto ambiental posible.

En este contexto, la toma de decisiones en el diseño y operación de instalaciones para la producción y distribución de etanol, debe considerar tanto el factor económico como el factor ambiental. En esta dirección, la programación matemática representa una herramienta útil para evaluar diferentes escenarios de diseño y producción de una cadena de suministros (CS) donde, en forma holística, diferentes decisiones son tenidas en cuenta (Kallrath, 2000).

Existen varios trabajos que se enfocan en el diseño óptimo de CSs para la producción de etanol a partir de diferentes materias primas, y aquellos que consideran el impacto ambiental de la cadena, aplican en su mayoría, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la red completa minimizando las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Zamboni y col. (2009) proponen un modelo mixto entero lineal (MILP) para el diseño óptimo de una CS de bioetanol a través de una representación espacial para la conexión entre nodos de la cadena. El objetivo considerado es la minimización de los costos totales. Marvin y col. (2012) determinan la localización y capacidad óptima de plantas de bioetanol a partir de residuos agrícolas, con el objetivo de maximizar el valor presente neto. Estos autores proponen un MILP y lo aplican a nueve estados del oeste de EEUU. En referencia a formulaciones multiobjetivos, Grossmann y Guillén (2010) presentan un review sobre diferentes formulaciones para síntesis de procesos y gestión

de CS considerando cuestiones ambientales. Mele y col. (2011) plantean un modelo MILP para el diseño óptimo de una CS de etanol a partir de caña de azúcar considerando el impacto ambiental provocado desde la “cuna hasta la tumba”, como generalmente se lo caracteriza al ACV. Estos autores obtienen un conjunto de Pareto para evaluar distintos diseños sustentables. Giarola y col. (2012) optimizan simultáneamente la performance económica y ambiental de una CS considerando diferentes opciones tecnológicas para la producción de bioetanol. Ellos muestran cómo el impacto ambiental modifica las decisiones sobre la elección de la tecnología a utilizar.

En este trabajo, el impacto ambiental se maneja desde otra perspectiva. Para reutilizar los residuos generados en las plantas de etanol, se considera la producción de dos tipos de levaduras: levadura de cerveza y levadura *Torula* para alimento ganado. Para llevar a cabo dichas producciones, etapas adicionales son incluidas en el proceso de producción de etanol (Corsano y col. 2014). De esta manera, se presenta un modelo multiobjetivo de MILP para encontrar el diseño óptimo de una CS de producción de etanol a partir de mieles provenientes de una planta de azúcar de caña, con el fin de maximizar los beneficios económicos y minimizar los flujos residuales. Simultáneamente, se obtiene el diseño y la programación detallada de la producción de cada planta de “etanol-levaduras” seleccionada en la cadena. Para esta última tarea, se modelan campañas mixtas de producción (MPC), de acuerdo a Fumero y col. (2012a).

El modelo de optimización multiobjetivo (maximizar beneficios – minimizar efluentes), se resuelve mediante el método “ $\epsilon$ -constraint” (Ehrgott, 2000), donde el objetivo ambiental (de mínimo efluente) es manejado a través de una restricción, generando un conjunto de subproblemas del problema original, y obteniendo de esta manera un conjunto de soluciones del tipo “Pareto”. Cada solución de Pareto representa un escenario de producción y distribución de la cadena, para el cual un caudal de efluentes es permitido. Para cada escenario, la optimización simultánea permite evaluar los diferentes tradeoffs que existen entre las distintas variables de decisión del nivel estratégico, táctico y operativo, junto con la posibilidad o no de producir levaduras para cumplir con el requerimiento ambiental. De esta manera, el enfoque propuesto representa una herramienta útil para el análisis de distintas CSs de etanol sustentables.

## 2. Descripción del Problema

La CS considerada en este trabajo consiste de tres niveles o “escalones”: sitios de materias primas, plantas multiproductos (etanol/levaduras), y clientes. Cerca de cada sitio de materia prima, se encuentra disponible una cantidad limitada de caña de azúcar para producir azúcar y mieles. En este trabajo no se tiene en cuenta la producción y distribución de azúcar, pero puede ser fácilmente incorporada a la formulación. Las mieles pueden ser distribuidas desde cada sitio de materia prima a las plantas para producir etanol. Cada planta instalada puede producir tres productos: levadura Torula, etanol, y levadura de cerveza. La Figura 1 muestra las etapas consideradas en estas plantas. Finalmente, los productos son distribuidos desde cada planta a cada cliente, de manera de satisfacer los límites de demandas de cada uno de éstos.

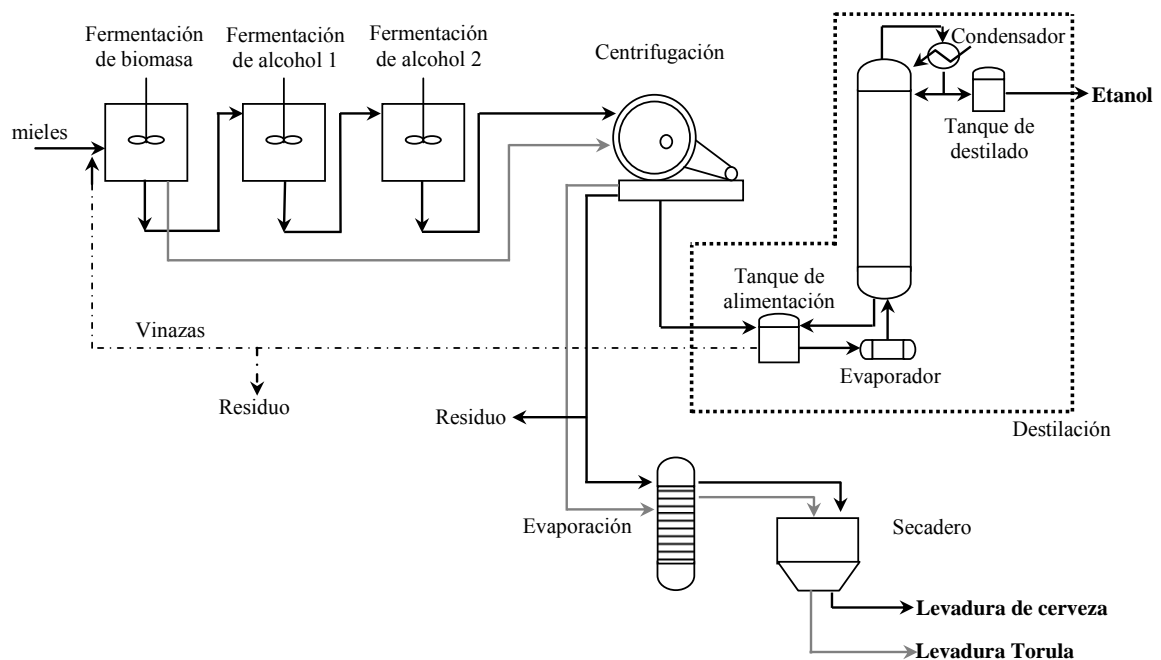
El etanol y la levadura de cerveza son simultáneamente producidos. La producción de etanol involucra las etapas de fermentación de biomasa, dos unidades en serie de fermentación de etanol, centrifugación, y destilación. La levadura de cerveza puede ser producida simultáneamente con el etanol, evaporando y secando el residuo de la centrífuga (mosto rico en biomasa) del proceso de etanol. La etapa de centrifugación, separa líquidos y sólidos del caldo fermentado. El líquido es destilado para producir el etanol, mientras que la separación sólida puede ser evaporada y secada para producir levadura de cerveza. La levadura Torula es utilizada para alimento ganado. Su producción involucra las etapas de fermentación de biomasa, centrifugación, evaporación y secado. Esta levadura puede producirse a partir de las vinazas producidas en el fondo de la destilación (residuos).

Las fermentaciones se consideran etapas batch, y la centrífuga, evaporador y secadero son unidades semicontinuas. Éstas forman un tren semicontinuo cuando se producen las levaduras. La destilación está compuesta de 5 ítems: el tanque de alimentación y el tanque de destilado son unidades batch, mientras que el evaporador, el condensador y la columna son unidades semicontinuas. Por lo tanto, esta etapa se considera batch.

Este tipo de plantas, denominadas “multipropósito secuencial” (Voudouris y Grossmann, 1996), presentan grandes desafíos desde el punto de vista de la modelación matemática. Para el diseño de la planta, se determina el número de unidades en paralelo

fuera de fase para las etapas batch y el tamaño de las unidades batch y semicontinuas. En particular, si la etapa de destilación es duplicada, todos los ítems que componen esta operación son duplicados. En este trabajo se considera la duplicación de unidades de tamaños idénticos.

Desde el punto de vista del scheduling, la destilación es considerada como una única etapa, al igual que el tren semicontinuo. Por lo tanto, cuando se produce etanol/levadura de cerveza, las etapas consideradas para el scheduling basado en MPC, son: fermentación de biomasa, fermentación de alcohol 1, fermentación de alcohol 2, tren semicontinuo (centrifugación, evaporación y secado), y destilación; mientras que para la levadura *Torula* se consideran las etapas de fermentación de biomasa y el tren semicontinuo.



**Fig. 1.** Diagrama de las plantas de etanol/levaduras.

Como se mencionó anteriormente, la levadura *Torula* se produce a partir de las vinazas. Debido a la degradación de esta sustancia, debe asegurarse un suministro continuo de este residuo. Luego, el uso de MPCs de repetición cíclica para la programación de la producción es la política más adecuada para este ambiente

productivo. El número de lotes de cada producto en la campaña, el secuenciamiento de los diferentes lotes en cada unidad de procesamiento, como así también los tiempos de inicio y finalización de ellos, son variables de optimización. La campaña es luego repetida un número finito de veces a lo largo del horizonte de producción. En este trabajo se considera que el número de repeticiones de la campaña es discretizado teniendo en cuenta cotas inferior y superior propuestas por el diseñador.

En este enfoque, el impacto ambiental es medido a través de los efluentes provocados. Se consideran las vinazas residuales, es decir, aquellas que no son utilizadas en la producción de levadura *Torula*, y la crema residual de la centrífuga. Esta última es la crema que no se utiliza en la producción de la levadura cervecera en el evaporador y secadero, como se muestra en la Fig. 1. Estos caudales de residuos son computados y se exige que sean menor o igual que cierta cota superior. Se proponen diversos valores de cotas superiores para los efluentes de manera que el modelo es ejecutado tantas veces como cotas se tenga. En resumen, el problema de diseño óptimo y planeamiento detallado de la CS y las plantas de etanol/levaduras involucradas, consiste en determinar simultáneamente para cada valor máximo permitido de efluente de vinazas y residuo de la centrífuga:

a) el diseño de la CS: (i) localización de las plantas; (ii) suministro de mieles desde cada planta de azúcar (sitios de materias primas); (iii) cantidades producidas de etanol y levaduras en cada planta instalada; y (iv) flujos de materias primas y productos entre los distintos nodos de la CS.

b) el diseño de cada planta instalada: (i) configuración de la planta (número de unidades duplicadas fuera de fase para cada etapa batch); (ii) el tamaño de las unidades; y (iii) número de lotes de cada producto en cada planta y sus tamaños.

c) el programa detallado de la producción para cada planta de etanol/levadura instalada: (i) composición de la campaña (número de lotes de etanol y levadura en la campaña); (ii) asignación de lotes a cada unidad en cada etapa; (iii) secuenciamiento de los lotes en cada unidad; (iv) tiempos iniciales y finales de los lotes en la campaña para cada unidad de procesamiento; y (v) número de veces que se repite la campaña a lo largo del horizonte de cada planta.

La función objetivo considerada es la maximización del beneficio neto calculado como los ingresos por ventas menos los costos de instalación, inversión, producción y transporte, teniendo en cuenta que se tienen demandas mínimas y máximas de cada cliente que se deben cumplir para las producciones de etanol y levaduras.

### 3. Modelo Matemático

En este trabajo, por cuestiones de espacio, no se detallan las ecuaciones del modelo MILP para el diseño y operación óptima de la CS y plantas involucradas, el cual es ejecutado en forma iterativa de acuerdo a los valores máximos de efluentes permitidos, pero están disponibles para los lectores interesados.

Este modelo está basado en la formulación presentada por Corsano y col. (2014). A continuación se describen, de manera resumida, las restricciones consideradas en la formulación y la metodología utilizada para resolver el problema multiobjetivo.

#### 3.1. Ecuaciones de diseño de la cadena de suministros

Consisten en restricciones para la selección de plantas de producción de etanol/levaduras, y balances entre los nodos de la cadena. Además se establecen relaciones de dependencia entre las cantidades a producir de levaduras y la producción de etanol en cada planta. Por lo tanto, se incluyen las siguientes expresiones:

$$Q_{Tor_f} \leq \eta_{eta,Tor} Q_{ET_f} \quad (1)$$

$$Q_{Lev_f} \leq \eta_{eta,lev} Q_{ET_f} \quad (2)$$

#### 3.2. Ecuaciones de diseño de las plantas

Se modela las restricciones necesarias para determinar el número de unidades duplicadas fuera de fase para cada etapa batch, fijando una cota superior sobre el número posible de unidades a utilizar en cada etapa. Para el dimensionamiento de las unidades en cada etapa, se supone que las unidades duplicadas son idénticas y que el tamaño que adoptan es seleccionado de un conjunto discreto de tamaños posibles. Para determinar el número de lotes que se producirán de cada producto y su tamaño, es necesario discretizar el número de veces que se repetirá la campaña a lo largo del horizonte de producción. Para tal fin, se establece una cota inferior y una cota superior para el número veces que se repetirá la campaña en cada planta. Estas cotas pueden

calcularse a partir de los parámetros del modelo. Esta suposición es necesaria para lograr expresiones lineales.

### **3.3. Ecuaciones de secuenciamiento de la producción en cada planta basadas en MPC**

Para modelar la asignación de lotes a cada unidad de cada etapa en cada planta instalada, se utiliza una formulación de tiempo continuo basada en slots asincrónicos (Fumero y col. 2012b). De esta manera, para cada unidad de cada etapa de cada planta se establece un número máximo de slots en donde los lotes serán asignados. Se establecen además, restricciones para el cálculo de los tiempos iniciales y finales de cada slot en cada unidad de cada planta, como así también restricciones para determinar el número de lotes de cada producto en la campaña de cada planta. Para esto último, es necesario definir el número máximo de lotes permitidos de cada producto en la campaña, de manera de linealizar las restricciones y lograr una formulación MILP.

### **3.4. Relaciones lógicas**

Este modelo se caracteriza por tener un gran número de variables binarias: selección de plantas, selección de unidades en cada etapa de cada planta, selección de tamaño para cada unidad, discretización del número de veces que se repetirá la campaña, asignación de lotes a slots, entre otras. En la formulación se plantean relaciones lógicas entre las distintas variables “0-1” de manera de reducir el espacio de búsqueda y lograr soluciones en tiempos computacionales más eficientes.

### **3.5. Función objetivo**

Como se mencionó anteriormente, con este enfoque se busca hallar el diseño óptimo de la CS con mayor ganancia y menor impacto ambiental. La función objetivo económica es la maximización del beneficio neto (*BN*), dado por la ecuación:

$$BN = Ventas - (C_{inv} + C_{inst} + C_{op} + C_{trans}) \quad (3)$$

*Ventas* es la ganancia por ventas de productos y *C<sub>inv</sub>*, *C<sub>inst</sub>*, *C<sub>op</sub>*, y *C<sub>trans</sub>* son los costos de inversión, instalación, operativos y de transporte, respectivamente.

En este trabajo, el impacto ambiental se mide a través de los efluentes generados en cada planta instalada. El cálculo de los efluentes totales (Ec. (6)) involucra el residuo proveniente de la centrífuga tanto en el proceso de producción de etanol (Ec. (4)), y las vinazas residuales (Ec. (5)):



$$QVR_f = \delta_{vin}QET_f - \rho_{tor}QTor_f \quad (4)$$

$$QCR_f = \theta_{crem}QET_f - \lambda_{lev}QLev_f \quad (5)$$

$$RES = \sum_f QVR_f + QCR_f \quad (6)$$

donde  $QVR_f$  representan las vinazas residuales de la planta  $f$ , calculada como las vinazas producidas en la planta  $f$  (cantidad proporcional a la producción de etanol  $\delta_{vin}QET_f$ ), menos las vinazas utilizadas para producir levadura *Torula* en la planta  $f$  (cantidad proporcional a la producción de *Torula*,  $\rho_{tor}QTor_f$ ).  $QCR_f$  representa la crema residual en la planta  $f$ , la cual se calcula como la cantidad producida de crema (proporcional a la producción de etanol,  $\theta_{crem}QET_f$ ), menos la cantidad de crema utilizada para la producción de levadura cervecera, proporcional a la producción de esta levadura ( $\lambda_{lev}QLev_f$ ). Finalmente,  $RES$  representa los efluentes totales de las plantas instaladas.

De esta forma, el problema resulta en un modelo multi-objetivo (7) que puede plantearse en general como:

$$\begin{aligned} & \min_{x,y} \{-BN(x,y); RES(x,y)\} \\ \text{sujeto a : } & \text{restricciones de diseño de la CS} \\ & \text{restricciones de diseño de las plantas} \\ & \text{restricciones de planeamiento de la producción en cada planta} \\ & x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $x$  e  $y$  representan las variables continuas y discretas del modelo.

### 3.6. Metodología de resolución

Se propone resolver el modelo multiobjetivo generando puntos del tipo Pareto, considerando las ecuaciones del cálculo de los residuos dentro del conjunto de restricciones y acotando la variable  $RES$  entre dos valores ( $\varepsilon_{min}, \varepsilon_{max}$ ) que se obtienen mediante la resolución de dos sub-problemas, (9) y (10), que se definen a continuación. De esta forma, el problema maestro que se resuelve es:

$$\begin{aligned}
 & \max_{x,y} BN(x, y) \\
 \text{sujeto a : } & \text{restricciones de diseño de la CS} \\
 & \text{restricciones de diseño de las plantas} \\
 & \text{restricciones de planificación de la producción en cada planta} \\
 & \varepsilon_{\min} \leq RES \leq \varepsilon_{\max} \\
 & x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\}
 \end{aligned} \tag{8}$$

donde  $\varepsilon_{\min}$  toma el valor óptimo de  $RES$  del problema:

$$\begin{aligned}
 & \min_{x,y} RES(x, y) \\
 \text{sujeto a : } & \text{restricciones de diseño de CS} \\
 & \text{restricciones de diseño de plantas} \\
 & \text{restricciones de planificación de la producción en cada planta} \\
 & x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Mientras que  $\varepsilon_{\max}$  toma el valor óptimo de la variable  $RES$  del problema:

$$\begin{aligned}
 & \max_{x,y} BN(x, y) \\
 \text{sujeto a : } & \text{restricciones de diseño de CS} \\
 & \text{restricciones de diseño de plantas} \\
 & \text{restricciones de planificación de la producción en cada planta} \\
 & x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Para la obtención de los puntos de tipo Pareto, se resuelve en forma iterativa el problema maestro (8), acotando inferiormente y superiormente el valor del parámetro  $\varepsilon$  con los valores intermedios pertenecientes al intervalo  $[\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}]$ . Las soluciones óptimas obtenidas de la resolución de cada modelo maestro representan las distintas soluciones Pareto.

#### 4. Caso de Estudio

Consideramos una CS de tres niveles, la cual cuenta con 5 sitios de materia prima de donde la miel puede ser distribuida a las plantas de producción, 3 posibles localizaciones para las plantas de etanol/levaduras, y 8 clientes, de los cuales 5 de ellos ( $c1-c5$ ) demandan sólo etanol, y los 3 restantes ( $c6-c8$ ) sólo levaduras. Las demandas

mínimas de las levaduras son nulas, de tal forma que éstas podrían no producirse, mientras que las demandas máximas son 34000000 t/año de Torula y 44000000 t/año de levadura cervecera para cada cliente  $c6$ - $c8$ . Las demandas mínimas y máximas de etanol para cada cliente se muestran en la Tabla 1. Los precios de venta son 0.2 \$/kg para las levaduras y 1.5 \$/kg para el etanol. Las distancias entre los sitios de materia prima (plantas de azúcar que proveen la miel) y las localizaciones de las plantas, y, por otro lado, la producción de miel de cada planta de azúcar, se muestran en la Tabla 2. La Tabla 3 muestra las distancias entre las posibles localizaciones de las plantas y los clientes. Las levaduras deben distribuirse en las cercanías de la planta en dónde se producen porque se degradan en corto tiempo. Las distancias entre los clientes  $c6$ ,  $c7$  y  $c8$  y las localizaciones  $f1$ ,  $f2$ , y  $f3$ , respectivamente se asumen iguales a 10 km.

**Tabla 1.** Demandas mínimas y máximas de etanol para cada cliente (t/año)

	$c1$	$c2$	$c3$	$c4$	$c5$
Dem. Mínima	10000000	15000000	25000000	20000000	20000000
Dem. Máxima	20000000	30000000	50000000	40000000	40000000

**Tabla 2.** Distancia entre las plantas de azúcar y las localizaciones para las plantas de etanol/levaduras (km) y disponibilidad de miel (t/año)

	$f1$	$f2$	$f3$	Miel disponible ( $\times 10^6$ )
$s1$	0	328	520	6041
$s2$	352	0	220	213.8
$s3$	310	90	0	102.2
$s4$	1756	1092	850	6.2
$s5$	1086	1165	930	3.07

Para el diseño de cada planta se permiten hasta tres unidades operando en paralelo y fuera de fase en las etapas batch, mientras que para la configuración de la campaña de producción de cada planta, se admiten hasta 3 lotes de cada producto. Los factores de tamaño y tiempos fijos para las distintas etapas de las plantas, como así también los tamaños discretos que pueden tomar las unidades de las distintas etapas, son considerados como en el trabajo de Corsano y col. (2014). El horizonte de producción es de 7500 h. Los costos operativos de cada planta se muestran en la Tabla 3.

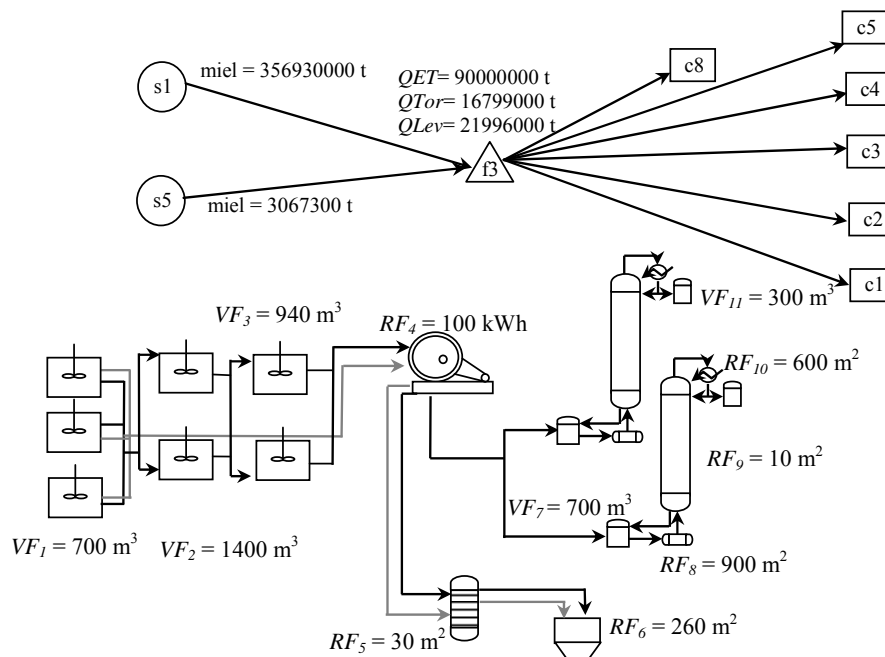
**Tabla 3.** Distancia entre localizaciones de plantas y clientes (km) y costos operativos (\$/t) de cada planta para cada producto final

	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	Etanol	Lev. de cerveza	Lev. Torula
<i>f1</i>	1229	1286	319	764	2728	1.5	0.8	0.8
<i>f2</i>	1565	822	500	1092	3014	2	1	1
<i>f3</i>	542	1599	45	1077	2990	3	1.5	1.5

En primera instancia se ejecuta el modelo considerando la función objetivo que minimiza el efluente total (9), para obtener así el valor mínimo de la variable *RES* que servirá como cota inferior para el rango de variación de estos efluentes. La solución óptima de este modelo consiste en producir la demanda mínima de etanol, y las cantidades permitidas de levaduras de acuerdo a las relaciones entre las producciones etanol/levadura de cerveza y etanol/levadura Torula (Ecs. (1) y (2)). De esta manera, una sola planta es instalada (*f3*) y el residuo mínimo obtenido es igual a  $RES = 49169.65$  t/año. Cabe mencionar que la solución eligió la planta *f3* pero podría haber escogido cualquiera ya que la función objetivo económica no se tiene en cuenta. Este valor de *RES*, representa la cota inferior para esta variable, la cual es denominada  $\epsilon_{min}$ . El beneficio neto obtenido en este caso es de \$126020000, aunque como no se tiene en cuenta en la función objetivo, este valor carece de importancia en este caso, al igual que el diseño de la planta, la cual puede estar sobredimensionada porque el costo de inversión no es considerado.

En la Figura 2 se muestra la solución óptima obtenida en este caso: dos sitios de materia prima proveen de miel a la planta *f3*, la cual produce 90000000 t de etanol, 16799000 t de levadura Torula y 21996000 t de levadura de cerveza para satisfacer las demandas mínimas de todos los clientes. Notar que las levaduras son satisfechas solo a los clientes que se encuentran en la cercanía de la planta instalada, en este caso *c8*.

La campaña óptima de la planta es producir dos lotes de cada producto, con un tiempo de ciclo de la campaña igual a 24.59 h, la cual se repite 305 veces a lo largo del horizonte de producción.



**Fig. 2.** Solución óptima para mínimo *RES*.

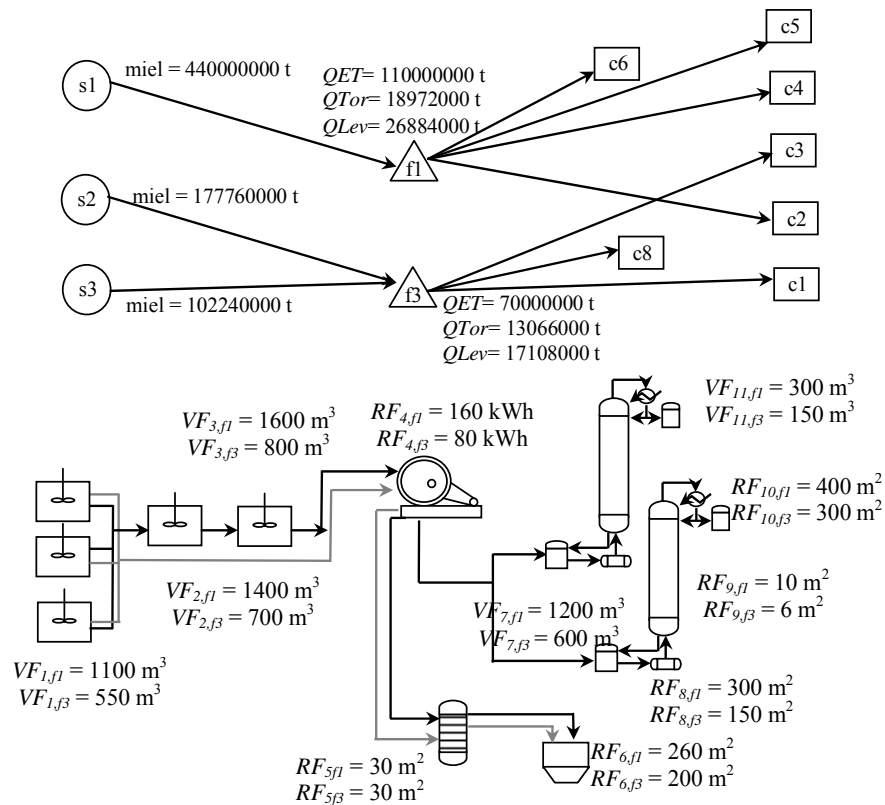
De igual manera, se ejecuta el modelo que considera la maximización del beneficio neto, sin considerar en este caso los efluentes provocados (modelo dado en (10)). La solución óptima que se obtiene es la que se muestra en la Figura 3. La configuración de ambas plantas instaladas es la misma, por eso se presentan en el mismo dibujo, con diferentes tamaños, según se indica en la misma figura para cada caso. El beneficio neto obtenido es de \$ 264680000 y el total de efluentes es  $RES = 118230000$  t/año, el cual es denominado  $\varepsilon_{max}$ . Se producen en ambas plantas dos lotes de cada producto, con tiempo de ciclo igual a 24.59 h y la campaña es repetida 305 veces a lo largo del año.

De acuerdo a los valores obtenidos para la variable *RES* en los dos modelos anteriores, se generan los siguientes puntos que representarán los sucesivos  $\varepsilon_{max,it}$  en los modelos maestros (presentados en (8)), donde *nit* el número de iteraciones o soluciones que se desea encontrar. Luego:

$$paso = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}{nit} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{max,it} = \varepsilon_{min} + it \cdot paso \quad it = 1, \dots, nit \quad (12)$$

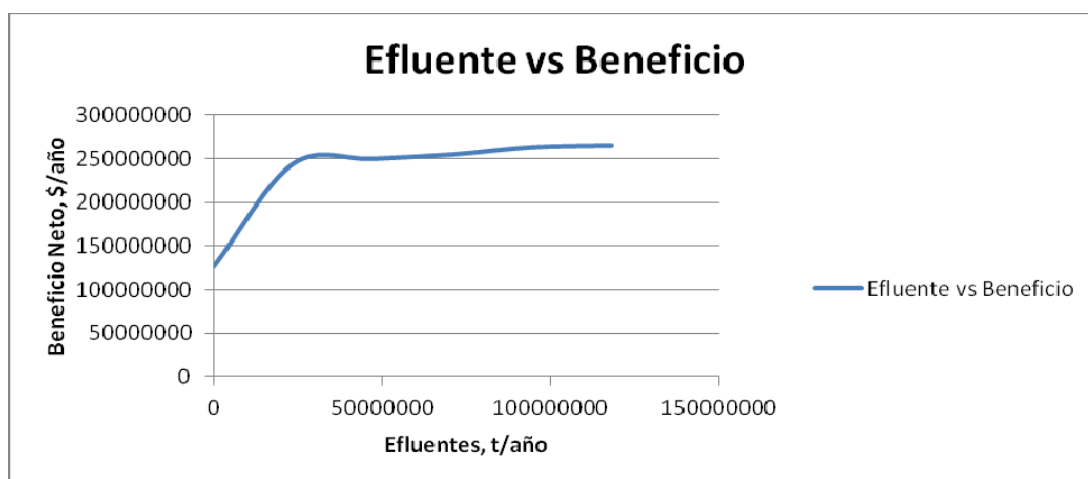
La Figura 4 muestra el conjunto de soluciones del tipo Pareto “Beneficio vs Efluentes”. Como es de esperar, a mayor beneficio, mayores son los efluentes causados, debido a que la producción de levaduras no es atractiva dado el bajo precio de venta y el alto costo de inversión que implica agregar el evaporador y secadero. Por lo tanto, éstas se producen en las cantidades necesarias para cumplir con el requerimiento ambiental.



**Fig. 3.** Diseño óptimo de la CS y plantas para el modelo de máximo beneficio

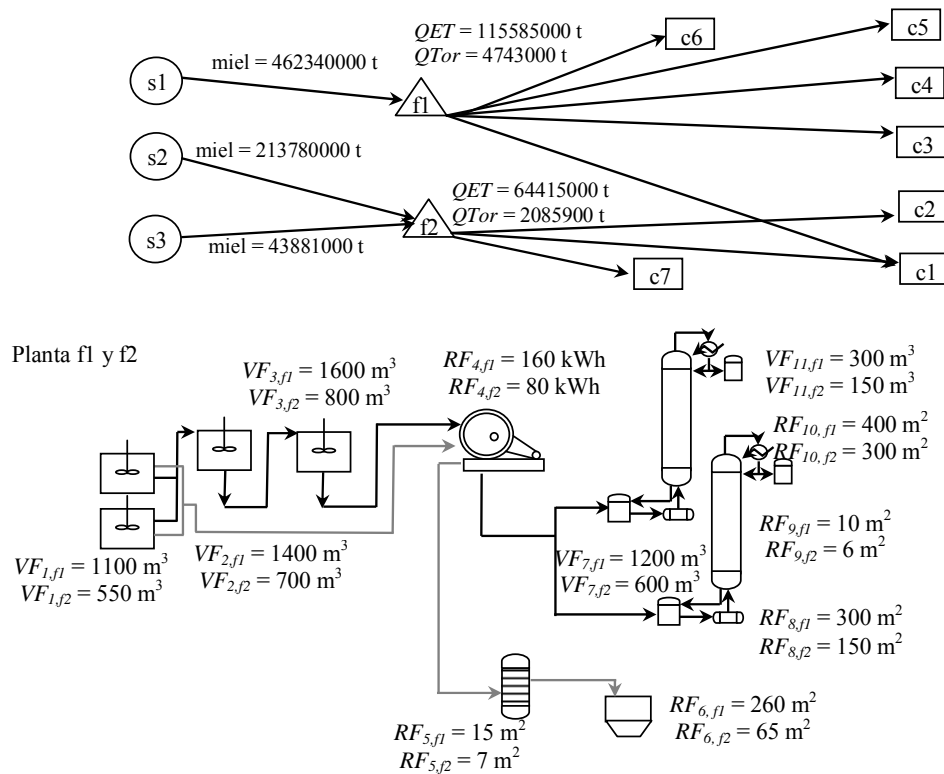
Se toma en particular la solución obtenida para  $\varepsilon_{\max, it} = 47321000 \text{ t/año}$ , donde el beneficio neto es de \$ 249163311. Esta solución consiste en instalar dos plantas: *f1* y *f2*, cada una produce etanol y levadura Torula pero no levadura de cerveza, lo que implica que el mosto sólido total que sale de la centrífuga en la separación líquido/sólido del proceso de etanol, es descartado. Cabe destacar que para el proceso de evaporación y secado de la levadura de cerveza, se requieren tamaños más grandes por tratarse de una levadura seca, mientras que para la levadura Torula, el tamaño de estos equipos puede ser menor porque esta levadura sale en forma de crema. La Figura 5 muestra el diseño de la CS y de las plantas involucradas. Notar que, al igual que en el caso anterior, ambas

plantas tienen la misma configuración pero con distintos tamaños de equipos, como se expresa en la figura. La planificación de la producción en ambas plantas consiste en una campaña que procesa dos lotes de etanol y un lote de levadura Torula, con tiempo de ciclo de la campaña igual a 24.59 h y una repetición de 305 veces.



**Fig. 4.** Soluciones de Pareto para los distintos valores máximos de efluentes.

De las soluciones obtenidas en las distintas iteraciones, se puede observar que a medida que la cota superior de efluentes permitidos aumenta, la producción de etanol aumenta hasta llegar a satisfacer la demanda máxima de etanol. Esta demanda máxima se puede producir instalando dos plantas, y como el costo de inversión predomina sobre el costo de transporte en la función objetivo, elige instalar dos plantas en todas las soluciones en donde produce esta demanda máxima. De acuerdo a los efluentes permitidos produce más o menos levadura, y distribuye de distintas maneras la producción de etanol en las plantas seleccionadas (ya que las cantidades producidas de levaduras están relacionadas con las cantidades producidas de etanol). Esto modifica la distribución de productos finales y por lo tanto el diseño de la CS. La variación de las cantidades de etanol y levaduras producidas en cada planta, hacen cambiar el diseño y planificación de la producción en cada una de ellas.



**Fig. 5.** Solución óptima para  $RES \leq 47321000 \text{ t/año}$

## 5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un modelo MILP para obtener diseños óptimos de una CS para la producción de etanol a partir de mieles provenientes de una planta de azúcar, maximizando el beneficio neto y minimizando los efluentes provocados en la producción de etanol. Simultáneamente se obtienen el diseño de las plantas involucradas en la cadena y la planificación detallada de la producción. Se considera la producción de levaduras como derivados de la producción de etanol, para evitar el exceso de efluentes.

Se propuso una metodología del tipo “ $\epsilon$ -constraint” para acotar los efluentes permitidos, maximizando la función objetivo económica. De esta manera, se plantea un conjunto de sub-problemas los cuales generan diferentes soluciones del tipo Pareto. Cada una de ellas representa un diseño de la CS y de las plantas que la componen, con una MPC en cada planta, de tal forma que los efluentes provocados en la red global son menores o iguales que un valor dado.



Con este enfoque, el diseñador puede obtener un abanico de escenarios posibles a partir de la restricción sobre los efluentes. Además, para cada caso, existen numerosos tradeoffs entre las variables de diseño y planeamiento tanto de la cadena como de las plantas, que hacen de este enfoque una herramienta de análisis útil para evaluar diferentes situaciones operativas y configuraciones.

## Reconocimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido por CONICET y ANPCyT en el marco del proyecto PICT-2012-2484.

## Referencias

- Balat, M. Balat, H. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, 86, 2273-2282.
- Corsano, G., Fumero, Y., Montagna J.M. (2014). Integrated decision making for the optimal bioethanol supply chain. *Energy Conversion Management*, 88, 1127 – 1142.
- Ehrgott, M. (2000). Multicriteria Optimization. *Springer*. Berlín.
- Fumero Y., Montagna J.M., Corsano G. (2012a) Simultaneous design and scheduling of a semicontinuous/batch plant for ethanol and derivatives production. *Comp. Chem. Eng.*, 36, 342-357.
- Fumero Y., Montagna J.M., Corsano G. (2012b) Scheduling of multistage multiproduct batch plants operating in a campaign-mode. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51 (10), 3988–4001.
- Giarola S, Zamboni A, Bezzo F. (2012). Environmentally conscious capacity planning and technology selection for bioethanol supply chains. *Renewable Energy*, 43, 61-72.
- Grossmann IE, Guillén G. (2012). Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. *Comp. Chem. Eng.*, 34, 1365–1376.
- Kallrath, J. (2000). Mixed integer optimization in chemical industry processes: experience, potential and future. *Chem. Eng. Res. Des.*, 78(6), 809-822.
- Marvin, W. A., Schmidt L.D., Beenjafar, S., Tiffany, D., Daoutidis, P. (2012). Economic optimization of a lignocellulosic biomass-to-ethanol supply chain. *Chemical Engineering Science*, 67, 68-79.
- Mele, F.D., Kostin, A.M., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L. (2011). Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50, 4939-4958.
- Voudouris V.T., Grossmann I.E. (1996). MILP model for scheduling and design of a special class of multipurpose batch plants. *Comp. Chem. Eng.*, 32, 1335-1360.
- Zamboni, A., Bezzo, F., Shah, N. (2009). Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production system. 1. Cost minimization. *Energy & Fuel*, 23, 5121– 5133.