

## 25. Medio Ambiente

### DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE BIORREFINERÍAS DE CAÑA DE AZÚCAR CON CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD

Machín Ferrero, Lucas M.; Mele, Fernando D.

lmachinferrero@herrera.unt.edu.ar; fmele@herrera.unt.edu.ar;

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Universidad Nacional de Tucumán

---

### Resumen

La industria sucroalcoholera en la provincia de Tucumán (Argentina) se ve afectada por diversos factores como el rendimiento agrícola y la incertidumbre del mercado. Ante esta situación, se debe buscar alternativas de producción que maximicen la rentabilidad de la actividad. El concepto de biorrefinería se adapta a este objetivo: a partir de una materia prima biomásica se logran múltiples productos de alto valor agregado. En este trabajo se propone realizar el diseño de una cadena de suministros de una biorrefinería basada en caña de azúcar utilizando una formulación lineal mezcla entera (MILP), buscando la mejor combinación de procesos y flujos de materia desde el punto de vista económico. Además, se realiza la evaluación ambiental de las soluciones mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

**Palabras clave:** Caña de azúcar, Biorrefinería, Cadena de suministros, Optimización, Análisis de Ciclo de Vida.

## Introducción

La producción de caña de azúcar en la Argentina se concentra en las provincias de Tucumán, Jujuy y Salta representando el 98% de la producción nacional de azúcar.

Por su parte, la provincia de Tucumán genera, mediante 15 ingenios azucareros, el 65% de la producción nacional de azúcar (CAA, 2018). Lo que destaca a esta actividad como uno de los pilares de la economía de la provincia.

Actualmente, la caña de azúcar es el recurso natural generalizado para la producción de azúcar y bioetanol, sin embargo, desde hace unos años existe una tendencia mundial a convertir estas plantas en biorrefinerías (Cavalett *et al.*, 2011; Moncada *et al.*, 2013). Esto implica la incorporación de nuevas vías de proceso, y sus tecnologías, para ampliar la gama de productos que se puedan producir a partir de un tipo de biomasa (Cherubini, 2010).

Las ventajas que se obtienen de la conversión de plantas tradicionales en biorrefinerías son, principalmente:

- *Eficiencia* en el uso de materia prima mediante la producción de productos secundarios y energía.
- *Flexibilidad* de elegir, entre las numerosas vías de procesos, aquellas adecuadas para lograr condiciones óptimas de operación y mantener la rentabilidad del sistema (o la

sustentabilidad del sistema en una visión más amplia).

Es conveniente cambiar el paradigma actual de los ingenios azucareros para poder adecuarlos al concepto de biorrefinería y poder aprovechar sus beneficios, y así maximizar el potencial que presenta esta industria.

Motivan este pensamiento la variabilidad en la etapa agrícola en función de las condiciones climáticas y a la tecnología aplicada —incertidumbre en la cantidad de materia prima (EEAOC, 2017)—, el descenso de los consumos per cápita de azúcar —descenso de demanda del producto principal— y la limitación en los cupos de bioetanol para el corte de combustibles fósiles —estancamiento de la demanda del coproducto (MH, 2016; MA, 2017).

Para diseñar la biorrefinería de caña de azúcar, se debe investigar y diseñar diferentes vías de proceso de nuevos productos que puedan adaptarse al esquema que presenta la industria sucroalcoholera en la actualidad. Para ello se requiere que el diseño de nuevas alternativas no esté solamente enmarcado en el análisis técnico-económico sino también complementar ese estudio con evaluaciones ambientales y sociales.

Este trabajo se enfoca en determinar el mejor arreglo posible de nuevas vías de proceso utilizando un criterio económico. Y realizar luego una evaluación ambiental del resultado obtenido. Se deja como una

proyección de este trabajo el análisis social.

### Objetivos:

#### Objetivo principal:

El objetivo principal del presente trabajo es proponer una estrategia para el diseño de una biorrefinería de caña de azúcar en la provincia de Tucumán (Argentina) incorporando vías de proceso que amplíen la oferta tradicional de productos fabricados a partir del recurso vegetal.

#### Objetivos específicos

- Diseñar mediante programación matemática la cadena de suministros incluyendo las etapas de producción, almacenamiento y distribución de productos.
- Seleccionar la combinación de vías de producción de nuevos productos que presenten un mayor potencial económico frente a otros arreglos.
- Estudiar el desempeño ambiental de los arreglos resultantes de vías de proceso utilizando como herramienta el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

### Materiales y Métodos

Para realizar el modelado de la cadena de suministros se realizó un análisis previo de la situación actual de la industria azucarera en la provincia de Tucumán y la búsqueda de procesos que rindan productos de alto valor agregado y puedan acoplarse al esquema actual ingenio-destilería.

#### Descripción de la situación actual

La provincia de Tucumán cuenta con 15 ingenios productores de azúcar y 11 destilerías anexas que elaboran alcohol etílico a partir de las mieles finales (melazas) de los ingenios (Diez *et al.*, 2011). En la figura se muestra un esquema simplificado del escenario actual. El sistema *CAMPO* incluye todas las actividades involucradas en la producción de caña de azúcar, como la siembra, el cultivo y la cosecha. El rendimiento de este sistema depende fuertemente de las condiciones climáticas. Para este trabajo se consideran distintos escenarios entre condiciones límites de alta y de baja cantidad de caña de azúcar disponible.

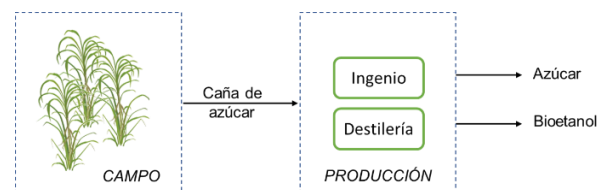


Figura 1: Esquema simplificado del escenario actual en la provincia de Tucumán

El sistema *PRODUCCIÓN* comienza con la molienda de la caña de azúcar ( $T_0$ ) donde se separa el jugo del bagazo (material lignocelulósico). Este último es en general quemado en calderas para producción de vapor y así cubrir los requerimientos de energía y calor del ingenio y la destilería. El jugo atraviesa en el ingenio ( $T_1$ ) una serie de procesos fisicoquímicos, de evaporación y un sistema de cocimientos de donde se obtienen los cristales de azúcar y melaza. La destilería ( $T_6$ ) utiliza la melaza como

materia prima para la producción de etanol anhidro mediante etapas de fermentación, destilación y deshidratación. Para este trabajo se consideran, también, las instalaciones productivas existentes en las otras regiones productivas de la Argentina con sus correspondientes capacidades de cultivo (Salta, Jujuy, Santa Fe y Misiones).

### Tecnologías alternativas

Continuando el camino para la conversión de la industria sucroalcoholera en una biorrefinería, se seleccionan procesos que generen productos de interés. A continuación, se listan dichos productos:

- a) *Biobutanol*: este producto es de interés para la industria química y como combustible. Se obtiene mediante la fermentación de sustratos azucarados (jugos,  $T_3$  o melazas,  $T_7$ ) y posterior separación de los productos. Además, se obtienen como subproductos acetona y etanol (Pinto Mariano *et al.*, 2013).
- b) *Ácido cítrico*: Es un insumo de múltiples aplicaciones, principalmente en la industria alimenticia. Según Ikram-ul *et al.* (2004) se puede obtener

a partir de la fermentación de melazas ( $T_8$ ) u otros sustratos azucarados ( $T_4$ ).

- c) *Polihidroxitirato (PHB)*: Este producto presenta no sólo interés económico sino también ambiental, dado que es un biopolímero, termoplástico biodegradable y biocompatible. El proceso seleccionado para la producción del PHB consiste en una fermentación del jugo ( $T_5$ ) o melaza ( $T_9$ ) y posterior recuperación mediante un proceso de extracción y purificación (Shahhosseini, 2004)
- d) *Cogeneración ( $T_{10}$ )*: Esta tecnología permite la producción simultánea de vapor y electricidad a partir de la quema del bagazo al ser acoplada a una instalación que procesa caña de azúcar (Macedo Guerra *et al.*, 2014)

En base al análisis de estos procesos se propone la superestructura que se muestra en la figura 2.

Para elegir cuál de todos los posibles arreglos entre las distintas tecnologías genera un óptimo económico, se recurre al modelado matemático y posterior optimización.

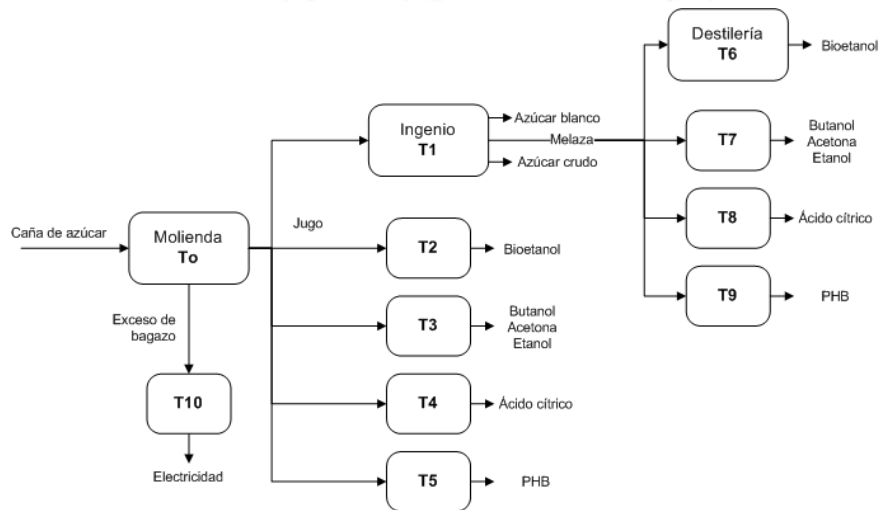


Figura 2: Superestructura con todas las vías posibles de proceso consideradas

### Modelado matemático y problema de optimización

Esta sección del trabajo implica el diseño de la cadena de suministros para una biorrefinería en la Argentina. Se considera la posibilidad de instalar las nuevas plantas sólo en la provincia de Tucumán para convertir los ingenios en biorrefinerías.

El diseño se realiza tomando en cuenta tres niveles de la cadena de suministros: industria-almacén-distribución. Se requiere conocer el conjunto de inversiones a realizar para crear nuevas instalaciones sin descuidar la demanda de azúcar y etanol en las distintas regiones de la Argentina.

El horizonte de tiempo considerado es de diez años en los cuales se ha supuesto que la demanda del azúcar decaerá en forma lineal en un 10%.

Se tienen como datos, extraídos de la bibliografía citada, los costos de producción, almacenamiento y transporte, de las instalaciones de almacenamiento,

productivas y de transporte, de materia prima, los precios de los productos, los costos de tratamiento de los residuos (vinazas) y la tasa de interés e impuestos. Se busca determinar el número de plantas, vehículos y almacenes, los flujos de materiales asociados a las distintas tecnologías y la distribución de los productos finales.

Para resolver el problema se plantea una formulación lineal mixta entera (MILP) para maximizar una función objetivo que representa los beneficios económicos de la actividad (valor actual neto, VAN).

Por cuestiones de espacio no se consigna el modelo matemático completo, por lo que, a continuación, se describen sólo las ecuaciones más representativas.

Se definen los conjuntos e índices que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Conjuntos y subconjuntos del modelo matemático

notación	significado
$i$	materiales
$p$	tecnologías para la producción
$g$	regiones
$t$	años
$l$	tipos de transporte

$s$	tipos de almacenes
$IM(p)$	productos principales de cada tecnología $p$
$SEP$	materiales que se pueden vender
$IL(l)$	materiales que pueden ser transportados por el medio de transporte $l$
$IS(s)$	materiales que pueden ser guardados en un almacén tipo $s$
$SI(i)$	almacenes que pueden guardar los materiales $i$

**Función objetivo (FO):**

$$FO = NPV_e = \sum_t \frac{CF_{te}}{(1+ir)^{t-1}} \quad (1)$$

$NPV_e$  es el valor actual neto para el escenario  $e$ ;  $CF_{te}$  es el flujo de caja en el año  $t$  para el escenario  $e$ ;  $ir$  es la tasa de corte.

Los flujos de caja se calculan para cada año como la diferencia entre los ingresos ( $Rev_{te}$ ) y los costos totales mediante la ecuación 2. Los primeros se calculan sumando los productos de flujos de productos vendidos y sus respectivos precios. Los costos totales incluyen costos directos  $DE_{te}$  (costos variables de producción, de almacenamiento, de transporte y de inventario), indirectos  $IE_t$  que dependen de las capacidades de las plantas-almacenes, y los impuestos originados en toda la cadena de suministros ( $Tax_{te}$ ).

$$CF_{te} = Rev_{te} - DE_{te} - IE_t - Tax_{te} \quad (2)$$

En el primer intervalo de tiempo donde se decida instalar una nueva tecnología, se debe tener en cuenta, además, la inversión total de capital que se calcula como la suma de la inversión de capital fijo y el capital de trabajo. En el último

período se recuperan el capital de trabajo y el valor de rescate.

En el cálculo de costos e ingresos se deben conocer los flujos, para ello se realizan los balances de materia.

**Restricciones de balance de materia:**

El balance total de masa para cada región se cumple mediante la ecuación 3:

$$\begin{aligned} & \sum_{s \in SI(i)} ST_{i,s,g,t-1,e} + PT_{i,g,t,e} + PU_{i,g,t} + \\ & \sum_{l \in LI(i)} \sum_{g' \neq g} Q_{i,l,g',g,t,e} = \\ & \sum_{s \in SI(i)} ST_{i,s,g,t-1,e} + DTS_{i,g,t,e} + \\ & \sum_{l \in LI(i)} \sum_{g' \neq g} Q_{i,l,g',g,t,e} + W_{i,g,t,e} \quad \forall i, g, t, e \end{aligned} \quad (3)$$

donde, para cada material  $i$  y escenario  $e$ ,  $ST_{i,s,g,t-1,e}$  es el inventario inicial de los materiales almacenables ( $SI$ ) en cada subregión  $g$ ,  $PT_{i,g,t,e}$ , la cantidad de productos,  $PU_{i,g,t}$ , la cantidad de insumos adquiridos,  $Q_{i,l,g',g,t,e}$ , el flujo de material desde la región  $g'$  a la región  $g$ ;  $ST_{i,s,g,t,e}$  es el inventario final,  $DTS_{i,g,t,e}$ , la cantidad enviada a los clientes y  $W_{i,g,t,e}$  es la cantidad de residuos generados (vinazas). Para cada escenario  $e$ , la cantidad de productos producidos en cada región  $g$  se calcula como la suma de las cantidades producidas ( $PE_{i,p,g,t,e}$ ) por cada tecnología instalada  $p$ .

Los flujos de materia prima y de coproductos se calculan por un balance de materia para una dada tecnología en función del producto principal, mediante la ecuación 4.

$$\begin{aligned} & PE_{i,p,g,t,e} = \\ & \rho_{p,i} PE_{i',p,g,t,e} \quad \forall i, p, g, t, e \quad \forall i' \in IM(p) \end{aligned} \quad (4)$$

### Restricciones de capacidad y demanda

Estas restricciones vienen dadas por las capacidades del campo ( $CapCrop$ , ec. 5), de las plantas de producción ( $PCap$ , ec. 6), de los centros de almacenamiento ( $SCap$ , ec. 7) y por la demanda de cada región ( $SD$ , ec. 8).

$$PU_{i,g,t,e} \leq$$

$$CapCrop_{g,t} \quad i=\text{caña de azúcar} \quad \forall g, t, e$$

(5)

$$PE_{i,p,g,t,e} \leq PCap_{p,g,t} \quad \forall i, p, g, t, e$$

(6)

$$\sum_{s \in SI(i)} ST_{i,s,g,t,e} \leq SCap_{s,g,t} \quad \forall s, g, t, e$$

(7)

$$DTS_{i,g,t,e} \leq SD_{i,g,t,e} \quad \forall i, g, t, e \quad (8)$$

Cabe destacar que la capacidad instalada total de producción depende del número de instalaciones, que puede variar con los años si se deciden instalar nuevas plantas o almacenes.

La capacidad del campo o cantidad de caña disponible tomará distintos valores según el escenario sea favorable, desfavorable o tome algún valor intermedio.

Para todos los escenarios, se exige cumplir con la demanda de etanol y azúcar en un 80 y 95 por ciento, respectivamente.

Es de notar que este planteo sólo tiene en cuenta y basa sus decisiones en cuestiones económicas. Para añadir una evaluación ambiental a los resultados del modelo, se utiliza el enfoque del ACV.

### **Análisis de Ciclo de Vida**

El ACV es una herramienta integral para la estimación cuantitativa del impacto ambiental potencial a lo largo del ciclo de vida de un producto desde la adquisición, procesamiento, fabricación y uso de la materia prima, hasta finalmente su eliminación (desde la cuna hasta la tumba).

Esta metodología sigue las normas ISO 14040 y se realiza en cuatro fases: (1) definición del objetivo y alcance del estudio; (2) análisis de inventario de ciclo de vida; (3) evaluación de impacto del ciclo de vida; y (4) interpretación de resultados.

#### Fase 1: definición del objetivo y alcance del estudio

El alcance del ACV, para este trabajo, implica la producción de caña de azúcar en el subsistema *Campo*, el subsistema *Producción* (con los procesos seleccionados en el problema de optimización) y el *Transporte*. El objetivo del estudio es la cuantificación de ciertos parámetros ambientales para evaluar el potencial impacto que produciría al medio ambiente la conversión de los ingenios tucumanos en biorrefinerías. Para ello se realiza un análisis exhaustivo en la bibliografía sobre estudios de ACV ya realizados para los nuevos procesos.

Todos los datos se deben referir a una unidad funcional (UF). En este trabajo se calcula el impacto de cada etapa por unidad de flujo del producto principal de salida. Por ejemplo: para el campo será 1 kg de caña de azúcar; para una destilería,

1 litro de etanol; para una estación de cogeneración, 1 MJ de electricidad generado, etc. Esto permite finalmente calcular el impacto global de la biorrefinería mediante la ec. 9.

$$X_{total} = x_{caña\ de\ azúcar} + x_{procesos} +$$

$x_{transporte}$

(9),

donde  $X_{total}$  es el impacto total de la biorrefinería,  $x_i$  son los impactos totales de cada etapa y se calculan como el producto entre los impactos específicos (por unidad funcional) y los flujos totales de producto principal que sale de cada etapa.

### Fase 2: análisis de inventario de ciclo de vida

En esta fase se elabora un inventario con todos los flujos de salida y de entrada a cada subsistema o etapa.

Para el subsistema *Campo* se utilizan los datos de Nishihara Hun *et al.* (2016), tomando como unidad funcional 1 tonelada de caña de azúcar.

Para las unidades de producción tradicionales (ingenio-destilería) se toma el inventario de Mele *et al.* (2011).

Para generar el inventario de las nuevas vías de proceso se utilizan diversos trabajos de investigación para la recolección de datos y se adecuan los mismos a los procesos estudiados. Se utilizan las siguientes referencias: Roffer *et al.* (1987), Heinzle *et al.* (2007), Harding *et al.* (2007) y Joglekar *et al.* (2018).

Para el transporte se utiliza la base de datos Ecoinvent® disponible en el

software SimaPro®. Se seleccionan camiones de carga pesada para el transporte de la caña de azúcar a los centros de producción y, por otro lado, transporte de carga mediana para el transporte de los productos finales. En el caso de la electricidad, no se considera el impacto de su transporte en la red.

### Fase 3: evaluación de impacto de ciclo de vida

En esta fase se transforman los datos de inventario en impactos ambientales. Este cálculo se realiza mediante el software el programa SimaPro®.

Se utilizan las siguientes categorías de impacto del modelo ReCiPe Midpoint V1.12 (Goedkoop *et al.*, 2008):

- i. *Cambio climático*: contribución total al fenómeno de aumento de temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos. Unidad: kg CO<sub>2</sub>eq/UF.
- ii. *Acidificación terrestre*: o acidificación del suelo es el proceso por el cual el suelo absorbe cationes de hidrógeno, reduciendo su pH. Unidad: kg SO<sub>2</sub>eq/UF.
- iii. *Eutrofización*: Efectos biológicos adversos derivados del excesivo enriquecimiento con nutrientes de las aguas superficiales continentales. Unidad: kg Peq/UF.
- iv. *Agotamiento fósil*: Consumo de recursos no renovables. Unidad: kg Petróleo<sub>eq</sub>/UF.
- v. *Puntuación única*: cuantifica de forma agrupada la contribución de las diferentes categorías de impacto. Este



parámetro adimensional se calcula mediante el modelo ReCiPe Endpoint V1.12.

variables discretas y se resolvió, para cada escenario, hasta un *gap* de 0,01%.

#### Fase 4: Interpretación de resultados

La interpretación es la fase de un ACV en la que se analizan y discuten los resultados de las fases 2 y 3 en relación a los objetivos definidos en la fase 1.

*Tabla 2: Escenarios a considerar, calculados en base al cambio en la cantidad de caña debido a las condiciones climáticas presentado por EEAOC (2017)*

Escenario	Cantidad total de caña de azúcar [t]
1	20.298.600
2	20.593.950
3	20.889.300
4	21.184.650
5	21.480.000

#### **Resultados y Discusión**

El problema de optimización planteado mediante la formulación MILP expuesta en la sección anterior, se codifica en GAMS® v.24.0.2 y se resuelve con CPLEX 11.0.

Para evaluar la robustez de la cadena de suministros ante cambios en la cantidad de materia prima, se resuelve el problema para 5 escenarios (tabla 2). Los escenarios 1 y 5 (desfavorable y favorable, respectivamente) se toman de EEAOC (2017), a los que se suman las cantidades correspondientes a las demás provincias productoras de caña de azúcar; mientras que los demás escenarios se definen con valores intermedios.

La estructura de la biorrefinería resultante se puede ver en la figura 4. En ella se observa que es necesaria una ampliación de la situación actual (figura 3) en cuanto a instalaciones industriales para llegar a un óptimo económico.

Resulta conveniente observar que esta configuración es la misma para los cinco escenarios. Este hecho refuerza las características de robustez que presenta una biorrefinería dado que, ante situaciones de abundancia o escasez de materia prima, la configuración elegida para mantener el óptimo económico sigue siendo la misma.

El modelo posee 149.978 ecuaciones, 154.147 variables totales y 20.670

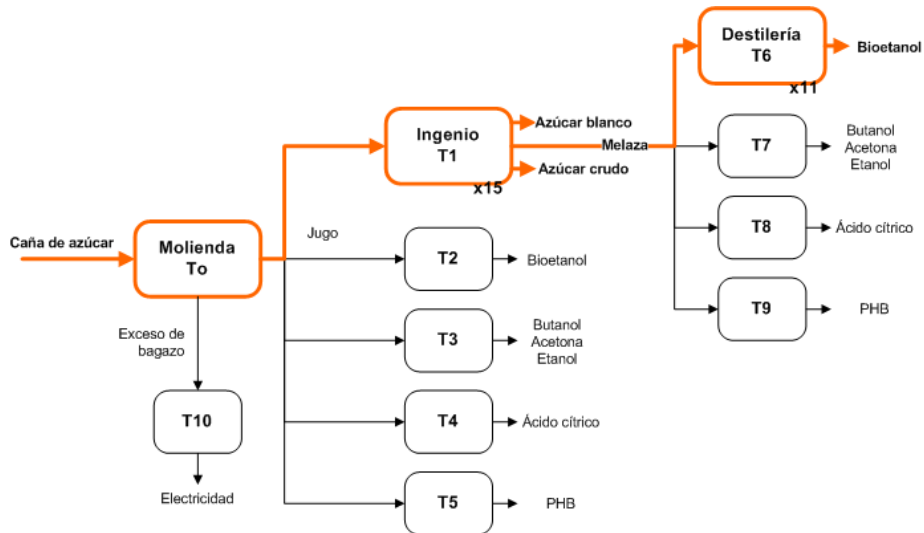


Figura 3: En color naranja: capacidad instalada (x15, x11) - situación actual

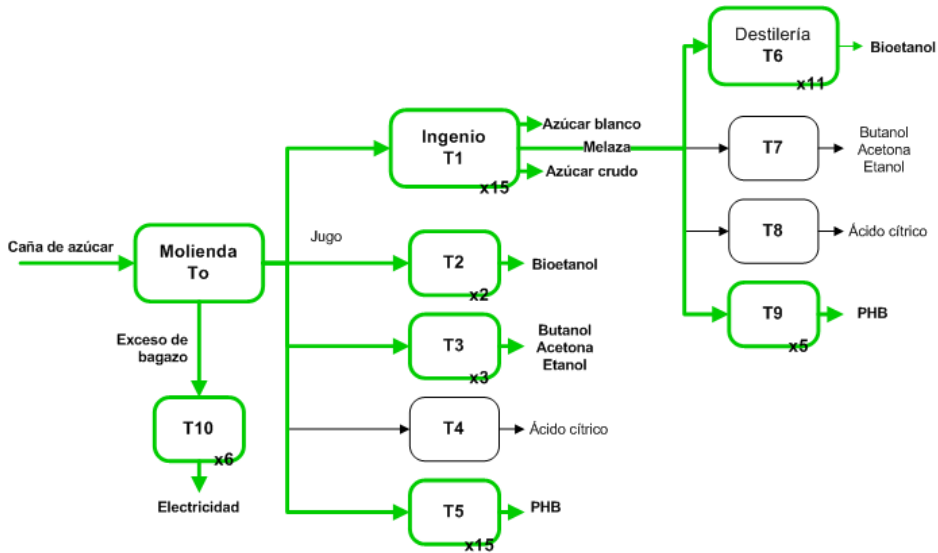


Figura 4: Vías de procesos y número de plantas a instalar (x6, x2, x3, etc.) en cualquiera de los escenarios, en 10 años

El resultado propone instalar dos nuevas plantas de producción de etanol a partir de jugo de caña de azúcar en el primer año; tres plantas para la producción de butanol en el primer año; quince plantas de producción de PHB en los primeros cuatro años, cinco plantas de PHB a partir de melaza en el primer año y seis plantas de cogeneración para producción de energía eléctrica en los dos primeros años.

El hecho de que la solución tenga preferencias por la producción del biopolímero se debe al elevado precio en el mercado que éste presenta. Un enfoque atractivo desde el punto de vista económico sería instalar las plantas de PHB anexas a los ingenios y destilerías de modo de compartir costos de producción y elevar el ingreso por ventas, mientras se sigan cubriendo las demandas de etanol y azúcar.

Ante la presencia de exceso de bagazo, el modelo demuestra que es más rentable instalar plantas para generación y venta de energía eléctrica frente a descartar el exceso.

También surge el biobutanol como parte de los, ahora más numerosos, coproductos. Este puede cubrir una demanda tanto en industrias químicas nacionales como en combustibles a futuro. Teniendo en cuenta que esta solución es económicamente viable y, además, la mejor entre las posibles soluciones; a continuación, se describen los resultados obtenidos en la fase de evaluación de impacto e interpretación de los resultados.

### Evaluación ambiental

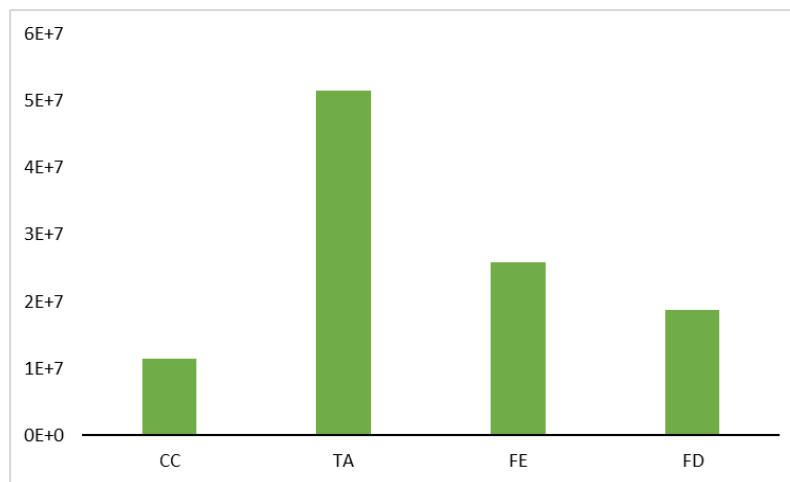


Figura 5: Comparación entre valores de impacto normalizados para el escenario uno. CC: cambio climático, TA: acidificación terrestre, FE: eutrofización de agua dulce y FD: agotamiento fósil.

Se puede concluir del gráfico comparativo que la biorrefinería contribuye en mayor medida en la acidificación terrestre respecto de los demás indicadores.

Por otro lado, todas las categorías de impacto aumentan con el aumento de materia prima. Se muestra a modo de

Para convertir los flujos de entrada y salida de los inventarios en impactos ambientales, se utiliza el software SimaPro® 8.0.3 analizando las categorías de impacto tomadas de los modelos mencionados en la sección anterior.

Los valores numéricos de los impactos resultan del producto entre los impactos específicos (por unidad funcional) y los flujos de materia entre las distintas etapas de la biorrefinería. Los valores así calculados difieren en sus órdenes de magnitud, por lo tanto, para permitir su comparación se los normaliza teniendo en cuenta los factores de normalización del modelo utilizado (figura 5).

ejemplo, en la figura 6, el aumento del impacto cambio climático para los distintos escenarios. Esto se debe a que los flujos de materiales son mayores cuando esto ocurre, lo que genera un aumento en los valores de impacto calculados.

En la figura 7, se puede observar la participación de cada producto en las categorías de impacto analizadas. La producción de butanol es la que mayor contribución presenta en los impactos correspondientes a cambio climático y agotamiento fósil, mientras que la producción de PHB presenta contribuciones importantes en todas las categorías, siendo la mayor en eutrofización de agua dulce. Por otro lado, la cogeneración parece impactar en

menor medida al medio ambiente al compararla con otras tecnologías.

Se descubre que existe una relación de compromiso entre el objetivo económico y los impactos ambientales. En la figura 10 se puede observar que, al aumentar el beneficio económico de la actividad, también aumenta el impacto ambiental (Puntuación única). Es decir, no se puede aumentar indiscriminadamente el beneficio económico sin dejar de afectar al medio ambiente.

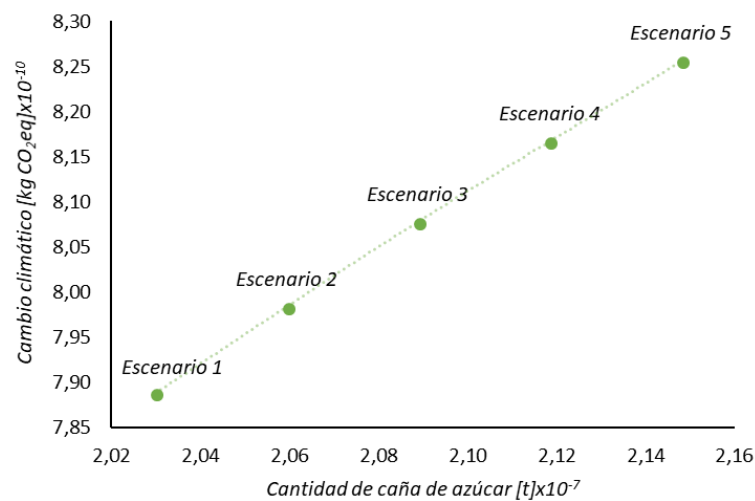


Figura 6: Cambio climático para los distintos escenarios

Universidad Nacional de Cuyo | Mendoza | Argentina

17, 18 y 19 de octubre de 2018

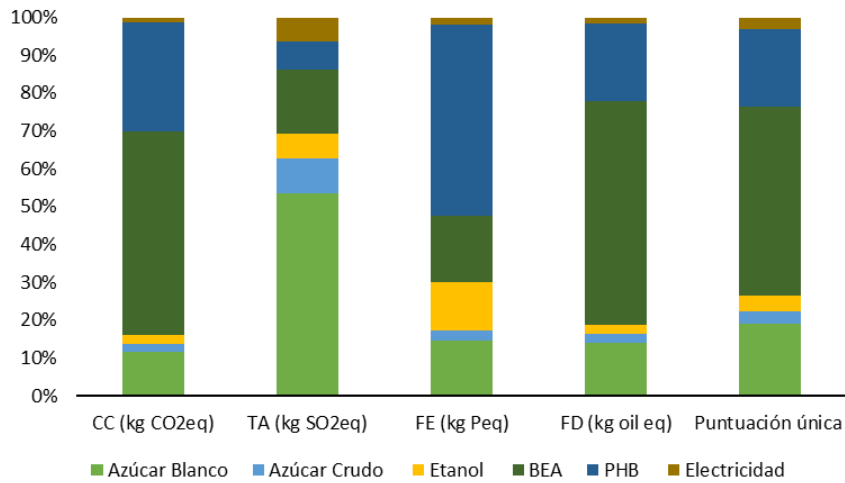


Figura 7: Contribución de la producción de cada producto a los impactos calculados

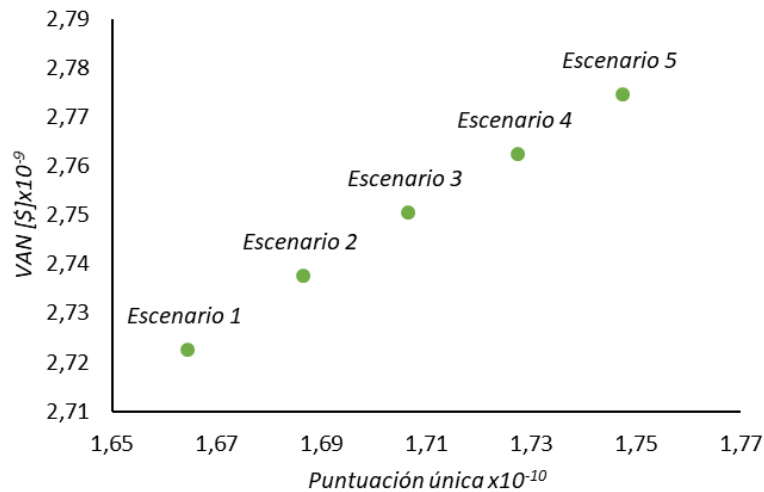


Figura 8: Valor actual neto vs. puntuación única ambiental para los distintos escenarios

## Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto un método para diseñar la cadena de suministros de una biorrefinería incorporando procesos alternativos para diversificar la producción y lograr ser más flexibles ante cambios en el mercado y en la cantidad de materia prima disponible. Se plantea un modelo matemático que tiene en cuenta la producción, almacenamiento y distribución de los productos. Se han seleccionado los

procesos que resultan más prometedores mediante la maximización de las ganancias obtenidas, cuantificadas mediante el VAN en un período de diez años. Luego se ha realizado una evaluación ambiental utilizando el ACV como herramienta y ReCiPe como modelo para la evaluación de impactos.

Se concluye que se podría aumentar el beneficio económico de la agroindustria actual si se instalan nuevas plantas de producción de biobutanol, PHB,

cogeneración y etanol a partir de jugo de caña sin descuidar las demandas de azúcar y etanol del mercado. Por otro lado, del análisis de distintos escenarios con diferentes cantidades caña de azúcar, se concluye que al aumentar los flujos de productos no solo aumenta el beneficio económico sino también el impacto ambiental, lo que genera una situación de compromiso cuyo análisis plantea una línea de estudio futuro.

## Bibliografía

**Cavalett, O.,** Junqueira, T. L., Dias, M. O. S., Jesus, C. D. F., Mantelatto, P. E., Cunha, M. P., Franco, H. C. J., Cardoso, T. F., Filho, R. M., Rossell, C. E. V. y Bonomi, A. (2012). Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(3), 399–410. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0424-7>

**Centro Azucarero Argentino, CAA.** 11 de junio de 2018. [www.centrozucarero.com.ar](http://www.centrozucarero.com.ar)

**Cherubini, F.** (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>

**Diez, O.; Cruz, C. y Cárdenas G.** (2011). Optimización energética para la producción simultánea de azúcar y alcohol en Tucumán. *Revista industrial y agrícola* 88.

**Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEOC).** Reporte Agroindustrial. 138, 2017.

**Goedkoop, M.,** Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., De Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R., Ministry of Housing SP and E (VROM) (2012): ReCiPe 2008—A Life Cycle Impact Assessment Method Which

Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level, 1ra ed. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM)

**Harding, K. G.,** Dennis, J. S., Blottnitz, H. Von, & Harrison, S. T. L. (2007). Environmental analysis of plastic production processes: Comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly-hydroxybutyric acid using life cycle analysis, 130, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.02.012>

**Heinze, E.,** Biber, A. P., & Cooney, C. L. (2007). *Development of Sustainable Bioprocesses Modeling and Assessment*, 125-135.

**Ikram-ul H.,** Sikander A., Qadeer M.A., Iqbal J. Citric acid production by selected mutants of *Aspergillus niger* from cane molasses. *Bioresource Technology* 93 (2004) 125–130

**Joglekar, S. N.,** Tandulje, A. P., Mandavgane, S. A., & Kulkarni, B. D. (2018). Environmental Impact Study of Bagasse Valorization Routes. *Waste and Biomass Valorization*, 0(0), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0198-9>

**Macedo Guerra J. P.,** Coleta Jr. J. R., Carvalho Martins Arruda L., Silva G. A., Kulay L. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. *International Journal of Life Cycle Assess* (2014) 19:814–825

**Mele, F. D.,** Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., & Jimenez, 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. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>

**Ministerio de Agroindustria (MA).** Cadena Azúcar. Informe de Coyuntura Mensual. 2017.

**Ministerio de Hacienda y Finanzas Públicas (MH).** Informes de cadenas de valor. Azúcar. 1 (3), 2016.

**Moncada J.,** El-Halwagi M. M., Cardona A. C. Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case. *Bioresource Technology* 135 (2013) 533–543.

**Nishihara Hun, L.A.,** Mele, F. D., & Pérez, G. A. (2016). A comparative life cycle assessment of the

sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>

**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, 2013.

**Roffer**, S., Blanch, H. W., & Wilke, C. R. (1987). Extractive Fermentation of Acetone and Butanol: Process Design and economic evaluation. *Biotechnology Progress*, 131–140.  
<https://doi.org/10.1002/btpr.542003030>

**Shahhosseini** S. Simulation and optimisation of PHB production in fed-batch culture of *Ralstonia eutropha*. *Process Biochemistry* 39 (2004) 963–969.

## Financiamiento

Trabajo financiado por la Universidad Nacional de Tucumán (Proyecto PIUNT E647-2) y por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) a través de la beca doctoral de LMMF.