



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA**

# **ESTRATEGIAS DE SIMBIOSIS INDUSTRIAL PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS PRODUCTIVOS SUSTENTABLES**

**Mg. Ing. Qca. Andrea Lorena NISHIHARA HUN**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la  
Universidad Nacional de Tucumán, para optar al grado académico superior de  
**Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería**

**Director: Dr. Ing. Fernando Daniel MELE**

Tucumán, Argentina

Año 2025

## **CARRERA DE DOCTORADO EN CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA**

Acreditación CONEAU N° 377/2022, Categoría A septiembre de 2012.

Reconocimiento oficial y validez nacional de Título Res. Ministerial N° 65/2023.

### **Director**

Dra. Sonia Vrech

### **Comité Académico**

Dr. Adolfo María Ávila,

Dra. Ana Georgina Elías,

Dr. Mariano Fagre,

Dr. Fernando Daniel Mele

Dra. Sonia Mariel Vrech

Dr. Enzo Martinelli (Universidad de Salerno, Italia)

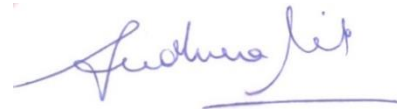
### **Comisión de Supervisión**

Dr. Mario Rodolfo Cesca (Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,  
Universidad Nacional de Tucumán )

Dra. Roxana Inés Piastrellini (Facultad Regional Mendoza, Universidad  
Tecnológica Nacional)

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Exactas e Ingeniería de la Universidad Nacional de Tucumán.

Contiene los resultados obtenidos de la investigación llevada a cabo en el ámbito del Departamento de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (Universidad Nacional de Tucumán) durante el período comprendido entre finales del año 2019 y año 2024, bajo la dirección del Dr. Fernando Daniel Mele.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Andrea Lorena Nishihara Hun', with a horizontal line underneath.

Andrea Lorena Nishihara Hun

Con el apoyo financiero de:

- Secretaría de Ciencia, Arte e Innovación Tecnológica (SCAIT) de la Universidad Nacional de Tucumán.
- Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, UNT.

# Índice

Índice.....	IV
Dedicatoria.....	IX
Agradecimientos .....	X
Resumen.....	XI
CAPÍTULO 1: Revisión de la Literatura – Estado del Arte .....	1
Resumen.....	2
1.1 La Problemática Ambiental .....	2
1.2 La Economía Circular.....	3
1.3 La Simbiosis Industrial.....	4
1.4 Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Simbiosis Industrial.....	7
1.5 Economía Circular, Simbiosis Industrial y el Análisis de Ciclo de Vida .....	8
1.6 La Optimización Multiobjetivo y la Simbiosis Industrial .....	9
1.7 La Bioeconomía en Tucumán.....	12
1.8 Objetivos de la Tesis: General y Específicos.....	15
1.9 Motivación de la Tesis .....	15
1.10 Referencias .....	16
CAPÍTULO 2: Descripción del caso de estudio.....	22
Resumen.....	23
2.1 Contexto Global .....	23
2.2 La Industria Sucroalcoholera .....	25
2.2.1 Campo de Caña de Azúcar .....	27
2.2.2 Ingenio.....	28
2.2.3 Destilería .....	30

2.2.4 Residuos y Efluentes: RAC, bagazo y vinaza.....	32
2.3 La Industria Citrícola.....	33
2.3.1 Campo de Limón .....	34
2.3.2 Citrícola.....	35
2.3.3 Residuos y Efluentes: poda y efluente de la citrícola.....	37
2.4. La Industria Papelera .....	39
2.4.1 Proceso.....	40
2.4.2 Residuos y Efluentes: licor negro .....	42
2.5 Descripción del Esquema Potencial de Simbiosis Industrial .....	43
2.5.1 Sistema de Cogeneración de Energía .....	48
2.5.1.1 Potencial energético de los residuos sólidos.....	48
2.5.1.2 Potencial energético de los efluentes líquidos .....	49
2.5.2 Potencial de materia de las biomosas residuales .....	51
2.6 Beneficios Ambientales .....	51
2.7 Desafíos de Usar las Biomosas Residuales .....	53
2.8 Referencias.....	54
CAPÍTULO 3: Modelo de Optimización .....	58
Resumen.....	59
3.1 Los Modelos Matemáticos de Optimización .....	59
3.2 Modelo Matemático Mono-objetivo.....	60
3.3 Superestructura de Optimización a Resolver. Potenciales Intercambios.....	69
3.4 Herramienta de Modelado y Optimización.....	71
3.6 Referencias.....	72
CAPÍTULO 4: Diseño óptimo de un esquema de simbiosis industrial en Tucumán, bajo criterios económicos.....	74

Resumen.....	75
4.1 Parámetros .....	75
4.1.1 Coeficientes de Balance de Materia y Energía.....	76
4.1.3 Parámetros de Capacidad y Demanda .....	79
4.1.2 Parámetros Económicos.....	80
4.2 Ejecución del Modelo. Función Objetivo Económica.....	81
4.3 Resultados.....	81
4.3.1. Aprovechamiento Energético de Corrientes Residuales .....	83
4.3.2. Aprovechamiento de Vapor de Corrientes Residuales.....	84
4.3.3. Aprovechamiento Másico de Corrientes Residuales .....	85
4.3.4. Esquema Integrado .....	85
4.4 Análisis de Sensibilidad.....	87
4.4.1 Caso 1 - Variación del Precio del Azúcar .....	88
4.4.2 Caso 2 - Variación del Precio del Etanol.....	89
4.4.3 Caso 3 -Variación del Precio de la Energía .....	89
4.5 Conclusiones.....	91
4.6 Referencias.....	92
<b>CAPÍTULO 5: Evaluación Ambiental del Caso de Estudio .....</b>	<b>94</b>
Resumen.....	95
5.1 Introducción al Análisis de Ciclo de Vida .....	95
5.2 Metodología del Análisis de Ciclo de Vida .....	97
5.2.1 Fase I: Definición de los Objetivos y el Alcance .....	97
5.2.2 Fase II: Análisis de Inventario.....	99
5.2.3 Fase III: Análisis de Impacto Ambiental.....	100
5.2.4 Fase IV: Interpretación.....	103

5.3 Fases I y II del LCA Aplicado al Caso de Estudio.....	104
5.3.1 Industria Sucroalcoholera.....	105
5.3.2 Industria Citrícola .....	111
5.3.3 Industria Papelera.....	115
5.3.4 Sistemas de Cogeneración.....	116
5.4 Fase III del LCA. Indicadores Ambientales .....	119
5.5 Fase III del LCA. Resultados.....	120
5.6 Referencias.....	123
CAPÍTULO 6: Optimización Multiobjetivo y Estrategias de Simbiosis Industrial .....	128
Resumen.....	129
6.1 Introducción.....	130
6.2 Modelo Matemático.....	130
6.2.1 Incorporación de Criterios Ambientales .....	130
6.2.2 Matriz y Mapa de Distancias .....	134
6.3 Problema de Optimización Multiobjetivo.....	137
6.3.1 Definición.....	137
6.3.2 Resolución. Método de la Restricción $\varepsilon$ .....	137
6.4 Aplicación de la Optimización Multiobjetivo. Resultados .....	138
6.5 Análisis de Ciclo de Vida - Comparativo.....	148
6.6 Conclusiones.....	152
6.7 Referencias.....	153
CAPÍTULO 7: Conclusiones.....	155
7.1 Conclusiones Generales .....	156
7.2 Principales Contribuciones y Aportes a la Actividad Industrial .....	158

7.3 Desafíos y Limitaciones .....	159
7.4 Posibles Líneas de Trabajo Futuras.....	160
7.5 Publicaciones y Trabajos de la Autora Relacionados con la Tesis.....	161



# Dedicatoria

A mis hijas, Ro y Lulú

A mis padres

A mis abuelos

# Agradecimientos

Deseo expresar mi profundo agradecimiento a las siguientes personas, instituciones que estuvieron presentes en el desarrollo de mi Tesis.

En primer lugar, a Fernando D. Mele, quien no sólo fue mi director sino también un gran compañero, a quien le agradezco su tiempo, apoyo, compañerismo, sabiduría, guía, dedicación, profesionalismo a lo largo de mi investigación. ¡Muchas gracias!

A mi comisión de supervisión de tesis, Dra Roxana Piastrellini y al Dr. Mario Cesca. Me hicieron comentarios, sugerencias muy oportunas y siempre presentes con una gran predisposición.

Gracias Mario por tu optimismo y por tu generosidad para que pueda llegar a la meta una vez más.

A mi ex jefe de cátedra Rolando León. Gracias por nunca impedirme ni poner trabas para que me siga superando académicamente.

A mis profesores, compañeros de la facultad, gracias por la colaboración y compañerismo durante el proceso de la tesis.

A mi familia, amigos, seres queridos por la contención, acompañamiento durante todo este proyecto.

A mis hijas, por tener que resignar tiempo, horas, días, semanas y hasta vacaciones abocada a este proyecto importante para su mamá. Gracias.

A la Universidad Nacional de Tucumán, la institución que me brindó la oportunidad de acceder a una educación pública y gratuita.

A la Secretaría Ciencia, Arte e Innovación Tecnológica de la UNT por haberme otorgado las becas de posgrado.

A todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a este proyecto, mi más sincero agradecimiento.

A Dios y a la Virgen María, mi eterna gratitud por no haberme desamparado nunca y por guiarme con su divina providencia en cada etapa de este proyecto.

# Resumen

La economía de la provincia de Tucumán y del Noroeste Argentino (NOA) tiene una base predominantemente agroindustrial. En Tucumán, las dos actividades productivas principales tienen su origen en el cultivo de la caña de azúcar y del limón. Estos sectores están constituidos por un conjunto de establecimientos industriales con sus dependencias pertenecientes a diferentes firmas.

En este trabajo se plantea un modelo de programación matemática para planificar una simbiosis industrial (SInd) entre diferentes establecimientos fabriles con criterios económicos y ambientales, teniendo en cuenta las restricciones técnicas. El caso de estudio considerado contempla tres plantas productivas, dos relacionadas con la caña de azúcar (sucroalcoholera y papelera) y una derivada del limón. Desarrollar este enfoque para el área de la industria basada en la biomasa representa un importante aporte a la bioeconomía provincial. Estas industrias involucradas generan una serie de residuos que poseen un alto potencial de materia y energía, los cuales pueden ser aprovechados dentro de la red de empresas. El enfoque propuesto busca optimizar el uso de los recursos, minimizar la generación de residuos y maximizar las ganancias del proceso industrial, fomentando una colaboración eficiente entre las plantas involucradas. A través de la implementación del modelo matemático, se identifican las sinergias potenciales.

Los resultados obtenidos, tanto del modelo matemático como del análisis de ciclo de vida (LCA), destacan la viabilidad de la SInd, evidenciando beneficios económicos significativos y una mejora en los indicadores ambientales en comparación con el sistema tradicional, en el que cada industria trabaja de manera independiente. En cuanto a los requerimientos de energía y vapor de las tres industrias involucradas, el modelo integrado muestra ser autosuficiente, eliminando la dependencia de proveedores externos en cuanto a energía y vapor, en la mayoría de los escenarios analizados.

Para cada una de las posibles alternativas técnicas, se estudiaron la satisfacción de las demandas de los productos principales, la generación de residuos, la necesidad de adquirir energía y vapor de la red externa, los flujos de materia y energía a intercambiar luego de la SInd y la activación de los sistemas de cogeneración.

Este estudio, innovador en la integración de agroindustrias claves para la provincia, no solo impulsa el desarrollo sostenible de Tucumán y el NOA, sino que también sienta bases para futuras investigaciones en economía circular y para la implementación de estrategias de sostenibilidad en la agroindustria.

**Palabras claves:** caña de azúcar – limón – papel – programación matemática – análisis de ciclo de vida – economía circular

# Prólogo

Esta Tesis de Doctorado titulada “Estrategias de Simbiosis Industrial para el Diseño de Sistemas Productivos Sustentables” se la desarrolla a lo largo de siete capítulos.

En el capítulo **primero** una introducción con una vasta y actualizada revisión de la bibliografía sobre la economía circular, simbiosis industrial y su relación con el análisis de ciclo de vida y el modelado y optimización de casos de estudios. También se aborda el contexto de la problemática ambiental en la Argentina y en Tucumán. Se presentan el objetivo general, los objetivos específicos de la tesis y la motivación del tema de investigación de esta tesis.

A continuación, en el capítulo **segundo**, se presentan las industrias a tener en cuenta en el caso de estudio de simbiosis industrial. Se realiza la descripción de sus procesos. Se identifican y se analizan las corrientes residuales que contienen un potencial desde el punto de vista de materia y energía, como posibles corrientes a intercambiar en este esquema. Se plantea el esquema potencial de simbiosis industrial.

Luego, en el capítulo **tercero**, se describe el modelo matemático mono objetivo lineal con el fin que devuelva respuesta a la función objetivo planteada, a fin de ayudar en la toma de decisiones multiatributo.

En el capítulo **cuarto**, se presenta como primer paso la aplicación de este modelo matemático, planteado desde el punto de vista económico, obteniendo los resultados parciales para el modelo. En este capítulo también se incluye un análisis de sensibilidad, variando ciertos parámetros, el precio del azúcar, precio del etanol y precio de la energía.

En el capítulo **quinto**, se aborda el estudio ambiental de cada una de las empresas que constituyen esta red, para lo cual se aplica la metodología de análisis de ciclo de vida, se define su objetivo, alcance temporal, espacial y la elaboración de los inventarios de entradas y salidas de materiales y energía. También se definen y se calculan los indicadores ambientales del caso base,

obteniendo los parámetros ambientales de producción con los que se trabajará en el modelo de optimización multiobjetivo.

El **sexto** capítulo, se desarrolla el modelo matemático completo tipo mixto entero y lineal, incorporando las ecuaciones, restricciones y parámetros relacionados con la función objetivo ambiental. Se optimiza el tejido productivo, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, considerando múltiples procesos y productos. Para la resolución de la optimización multiobjetivo se aplica el método de la restricción  $\varepsilon$ , obteniéndose las curvas Pareto para cuatro indicadores ambientales seleccionados, y para la categoría calentamiento global, se analiza la satisfacción de la demanda de los productos principales, el aprovechamiento de residuos que se generan en el proceso, los flujos de energía y vapor a adquirir a proveedores externo y los flujos de materia y energía a intercambiar en el tejido productivo. Al finalizar este capítulo se aplica el análisis de ciclo de vida, de manera tal de poder comparar los impactos ambientales del escenario con simbiosis industrial y el escenario donde cada industria trabaja de manera independiente.

Por último, en el **séptimo** capítulo, se exponen las conclusiones generales de la presente investigación de tesis, las principales contribuciones y aportes a la actividad industrial, los desafíos y limitaciones que se afrontaron y por último se plantean las posibles líneas de trabajo futuras.

En particular los capítulos cuatro y cinco contienen resultados parciales mientras que en el capítulo seis se exponen los resultados globales del modelo de optimización multiobjetivo y del análisis ambiental comparativo.

Cada capítulo está acompañado de las referencias citadas.

---

# CAPÍTULO 1: Revisión de la Literatura – Estado del Arte

*“El viaje de mil millas comienza con un solo paso”*

*Lao Tsé*

## Resumen

Dado que el interés en temáticas relacionadas con la sustentabilidad industrial ha crecido enormemente en los últimos años, la búsqueda en bases de datos de publicaciones científicas internacionales muestra un crecimiento exponencial, particularmente desde el año 2008. En este capítulo se presenta un análisis de la literatura académica relevante y actualizada sobre el tema de investigación de esta Tesis, considerando desde los autores pioneros hasta los más recientes, dentro del área, de manera tal de proporcionar el marco teórico principal y el contexto del estudio. También este capítulo permite identificar las lagunas existentes en el conocimiento, para así justificar la relevancia de la investigación que se propone en este trabajo. Al final del capítulo, se enuncian los objetivos, generales y específicos, y la motivación de la Tesis.

### 1.1 La Problemática Ambiental

Se puede entender el medio ambiente como el conjunto de elementos naturales y sociales que nos rodean. Este espacio en el que se desarrolla la vida de los organismos se encuentra enfrentando desafíos significativos en la actualidad, sobre todo por los impactos negativos que la actividad antrópica ejerce sobre él. El crecimiento demográfico acelerado, el desarrollo industrial y el aumento de la demanda de recursos naturales han generado una presión sin precedentes sobre los ecosistemas y los sistemas de soporte vital de nuestro planeta (Rodríguez, 2007).

La problemática ambiental mundial (Cartea, 2006) se manifiesta en las tres esferas del ambiente: agua, aire y suelo. Las emisiones de gases contaminantes por las industrias, el transporte y las actividades agrícolas afectan no sólo la calidad del aire sino también la salud de las personas. La contaminación del agua por el vertido, tanto de efluentes industriales como de residuos agrícolas y urbanos, amenazan los ecosistemas y cursos de agua, y la disponibilidad de agua potable; mientras que la contaminación del suelo afecta su fertilidad y luego la agricultura y la seguridad alimentaria.

Además de la contaminación, el otro gran problema es el agotamiento de los recursos naturales. Existe una sobreexplotación de recursos tales como los combustibles fósiles, otros minerales y el agua, dando lugar a serios problemas de escasez en un futuro cercano.



Desde una perspectiva técnica, es imprescindible la propuesta de soluciones basadas en evidencia científica. Solo a través de un enfoque multidisciplinario y la colaboración entre los sectores público y privado se puede enfrentar con éxito los desafíos ambientales y asegurar un futuro sostenible para las generaciones venideras.

En la actualidad a nivel empresarial, existen diversas estrategias y enfoques orientados a disminuir los impactos ambientales (Pérez y Meza, 2013), reducir la generación de desechos y minimizar los costos, entre las que se pueden mencionar la economía circular y la simbiosis industrial, las cuales poseen un gran potencial para alargar la vida útil de los recursos mediante el cierre de ciclos de materiales y energía.

## 1.2 La Economía Circular

La economía lineal ha sido objeto de críticas habiéndosele identificado varias desventajas desde la perspectiva de la sostenibilidad, la gestión de recursos y los elevados impactos no solo ambientales sino también sociales. El modelo de economía lineal se basa en la extracción de recursos naturales, uso y desecho de los residuos que se generan (Tukker y Jansen, 2006). Para paliar parte de estos efectos negativos, surgió el concepto de economía circular (EC) (MacArthur, 2012), el cual es un modelo económico de producción y consumo, cuyos objetivos principales son los de reducir estos impactos. En este modelo se promueve la reutilización, la reparación, el reúso y la regeneración de materiales y productos (Camacho-Otero *et al.*, 2018). Se busca cambiar el enfoque de la economía tradicional, de producir, usar y desechar a un sistema más sostenible, promoviéndose la eficiencia en el uso de los recursos y en la reducción de residuos (Geissdoerfer, 2017), siendo un modelo más armónico con los límites planetarios (Wheeler *et al.*, 2021).

Ghisellini (2016) realiza una revisión exhaustiva destacando varios aspectos importantes de la EC y su potencial para promover el desarrollo sostenible, como la reducción de costos de producción, la generación de empleo, la conservación de recursos naturales y la reducción de la contaminación. El artículo también aborda los desafíos y barreras que pueden obstaculizar la transición hacia una EC, como la falta de conciencia, los incentivos económicos inadecuados y la falta de colaboración entre los diferentes actores.

La implementación de la EC enfrenta varios desafíos, como el cambio de la mentalidad y la cultura tanto de las empresas como de los consumidores, incorporando prácticas más sostenibles, involucra también la colaboración entre múltiples actores, como gobierno, sociedad, empresas, consumidores, etc. (Korhonen *et al.*, 2018), para poder sobrellevar las barreras técnicas y logísticas. Bajo este modelo se hace necesario establecer incentivos económicos que fomenten la adopción de prácticas circulares y la disposición de infraestructuras adecuadas, por ejemplo, para acopiar material que se desee reutilizar. Es necesario educar a los consumidores, empresas y a los actores que toman decisiones sobre la importancia de este tipo de modelo, para que puedan contribuir a su implementación.

### 1.3 La Simbiosis Industrial

La simbiosis industrial (SInd) puede entenderse como una estrategia para promover la sinergia y colaboración entre empresas, compartiendo recursos con el fin de: optimizar su aprovechamiento, reducir costos y minimizar los impactos ambientales (Vahidzadeh y Bertanza, 2022). Se trata de una palabra clave que aparece en publicaciones recientes con mucha frecuencia, pero que se relaciona fuertemente con conceptos de mayor arraigo como ecología industrial y EC, en cuyos casos se trata de imitar los ciclos de la naturaleza para llevarlos a los ciclos técnicos, los de producción, en donde esta colaboración de empresas impulsa el desarrollo sustentable (Zhang *et al.*, 2015).

En el esquema de SInd, las empresas trabajan juntas, identificándose las oportunidades de que los flujos de subproductos, residuos sólidos, efluentes líquidos, agua y energía puedan ser utilizados por otras empresas como materias primas o insumos (Ng *et al.*, 2015). La SInd tiene el potencial de generar beneficios económicos, técnicos, ambientales y sociales, como el incremento de ganancias, reducción de costos, el mejor aprovechamiento de los recursos naturales y de los residuos, la protección del medio ambiente, la creación de nuevas oportunidades de negocio y de empleos, entre otros. No obstante, debe destacarse que para poderse medir si un esquema de SInd es superador respecto de las compañías trabajando de manera independiente, se deben hacer las mediciones correspondientes, con herramientas y metodologías acordes a lo que se necesita cuantificar (Khan *et al.*, 2023).

Uno de los primeros ejemplos en el mundo de aplicación de SInd es el de Kalundborg, Dinamarca, donde varias empresas han creado una red de intercambio de recursos y energía, lo que ha llevado a beneficios económicos y ambientales significativos. El caso de Kalundborg se remonta a la década de 1960 cuando se construyó una refinería de petróleo y una central eléctrica en la zona. A medida que se desarrollaron más industrias en la región, surgió la necesidad de encontrar formas de minimizar los residuos y utilizar los recursos de manera más eficiente (Jacobsen, 2006). En Kalundborg, las empresas del parque industrial participan en un intercambio mutuamente beneficioso de recursos y subproductos. Por ejemplo, la central eléctrica suministra vapor y agua caliente residual a otras empresas que lo utilizan para calefacción y en procesos industriales. A su vez, estas empresas suministran subproductos, como gases ricos en CO<sub>2</sub>, a una compañía de producción que los utiliza para estimular el crecimiento de plantas en invernaderos. En el tejido productivo planteado, las empresas han logrado ahorros significativos en costos de energía y materiales. Además, el intercambio de recursos ha llevado a una reducción de residuos y emisiones, lo que ha contribuido a la protección del medio ambiente y la mejora de la calidad del aire y el agua en la región. El caso de Kalundborg ha servido como inspiración para otras SInd en todo el mundo.

El término “simbiosis industrial” lo utilizaron por primera vez, Robert Frosch y Nicholas E. Gallopoulos en un artículo publicado en *Scientific American* en 1989, titulado “Strategies for Manufacturing”. En este artículo, se describe la SInd como una estrategia en la que las empresas colaboran para compartir recursos, subproductos y energía, con el objetivo de lograr beneficios mutuos y reducir el impacto ambiental. A partir de ese momento, se han realizado numerosos estudios y avances en el campo de la SInd, y F. Carl Knopf ha sido uno de los investigadores destacados en este ámbito (Frosch y Gallopoulos, 1989).

Knopf ha realizado contribuciones significativas en el campo de la SInd y la ecología industrial, y ha participado en investigaciones, publicaciones y proyectos relacionados con la optimización de sistemas industriales, el análisis de impacto ambiental y la implementación de estrategias de SInd en diferentes sectores industriales.

Marian Chertow (2000) hace una revisión de la literatura existente sobre SInd en la que propone una taxonomía para clasificar y comprender diferentes tipos de SInd, estableciendo un marco teórico y conceptual que ha sido ampliamente citado y referenciado

en investigaciones posteriores. Además de este trabajo, Chertow hace contribuciones en el campo de la sostenibilidad, la gestión de residuos, incluyendo la investigación y divulgación de casos de SInd en diferentes industrias y regiones (Chertow *et al.*, 2008).

La SInd ha ganado reconocimiento y ha sido objeto de estudios e investigaciones más profundos. Se han desarrollado herramientas y metodologías para evaluar y cuantificar los beneficios económicos y ambientales de la SInd. Además, se han establecido redes y plataformas internacionales para fomentar la colaboración y el intercambio de conocimientos en el campo de la SInd (Neves *et al.* 2020).

Mediante la SInd, las empresas independientes colaboran para compartir servicios y recursos a fin de reducir los desechos y los costos, aumentar ganancias y reducir el impacto ambiental (Laybourn y Morrissey, 2009; Walls y Paquin, 2015). El concepto es análogo al de la cadena de suministros de lazo cerrado (*closed-loop supply chain*), en el cual, la producción de una planta será la entrada para otras plantas, tanto en flujos hacia adelante como en flujos reversos, lo que mejora los beneficios ambientales y económicos mediante la reutilización eficiente de los recursos materiales y energéticos (Abdallah *et al.*, 2012). Martin y Eklund (2011) discuten los beneficios ambientales de un parque simbiótico de bioenergía en Händelö (Suecia) donde los subproductos y los servicios públicos se integran con una biorrefinería, una planta combinada de calor y electricidad (CHP - *Combined Heat and Power*) y una planta de biogás, en una situación en la que “todos ganan”, tanto desde el punto de vista ambiental como económico. La SInd se dirige hacia la EC, y constituye una estrategia poderosa que revoluciona la forma en que las industrias operan y crecen (Eckelman y Chertow, 2009).

Lawal *et al.* (2021) definen la SInd como una colaboración beneficiosa mutua entre industrias o entidades para intercambiar recursos; y donde esta nueva estructura colaborativa tiene el potencial de generar beneficios económicos, sociales y ambientales, apoyando el desarrollo sostenible. Esta opinión es compartida por numerosos autores como Huang *et al.* (2019) y Neves *et al.* (2020). Algunos de los beneficios que la SInd podría brindar se relacionan con lo siguiente:

- Reducción de residuos generados
- Aprovechamiento de los residuos que se generan de manera independiente
- Mejor aprovechamiento de los recursos naturales

- Aumento de la eficiencia energética
- Creación de parques industriales o clústeres

Con la SInd y la EC no solo se impulsa la obtención de mejoras económicas, sino que también es posible, con una buena gestión, generar beneficios ambientales asociados al reúso de recursos, minimización de residuos y fomento de la colaboración entre empresas.

## 1.4 Los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Simbiosis Industrial

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron establecidos por las Naciones Unidas en su Agenda 2030<sup>1</sup> y son un conjunto de metas y objetivos para abordar los desafíos económicos, sociales y ambientales que enfrenta el mundo.

Los ODS son 17 objetivos interconectados y ambiciosos que van desde la erradicación de la pobreza y el hambre, hasta la promoción de la igualdad de género, la acción por el clima y el fomento de la paz y la justicia. Cada objetivo tiene metas específicas, un total de 169, que proporcionan una guía para lograr los cambios necesarios a nivel mundial y un marco de acción para los gobiernos, las empresas y la sociedad civil, con el objetivo de lograr un futuro sostenible para todos.

La SInd puede contribuir directamente a varios ODS de la siguiente manera:

**ODS 9 - Industria, innovación e infraestructura:** La SInd impulsa la innovación y la colaboración entre las industrias para optimizar el uso de recursos, reducir los residuos, mejorar la eficiencia en la producción y promover el desarrollo de infraestructuras sostenibles.

**ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles:** La SInd puede ayudar a construir comunidades sostenibles al promover la cooperación entre empresas en un área geográfica determinada. Esto puede conducir a la optimización de los flujos de materiales y energía, así como a la reducción de la contaminación y los impactos ambientales negativos.

**ODS 12 - Producción y consumo responsables:** La SInd se alinea con este objetivo al fomentar la eficiencia de los recursos y la reducción de residuos. Se evita la generación de desechos y se promueve un enfoque más circular y sostenible en la producción y el consumo.

---

<sup>1</sup> La Agenda 2030 es un plan de acción global adoptado por los líderes mundiales en septiembre de 2015 en la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible.

**ODS 13 - Acción por el clima:** La SInd puede contribuir a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promover el uso eficiente de la energía. Se minimiza la necesidad de extraer y producir nuevos materiales, lo que a su vez reduce la huella de carbono.

**ODS 17 - Alianzas para lograr los objetivos:** La SInd requiere de la colaboración y las alianzas entre empresas, gobiernos, organizaciones y la sociedad civil para promover su implementación efectiva.

De manera indirecta, la SInd contribuye a otros ODS como ser:

**ODS 6 - Agua limpia y saneamiento:** Se reduce el consumo y la contaminación del agua mediante el intercambio de agua tratada o reutilizada entre diferentes industrias.

**ODS 7 - Energía asequible y no contaminante:** Las empresas pueden compartir energía, como calor o electricidad generados a partir de fuentes renovables, lo que ayuda a reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

**ODS 8 - Trabajo decente y crecimiento económico:** Se puede impulsar el crecimiento económico y la creación de empleo al fomentar la colaboración entre empresas. Se reducen costos, se mejora la competitividad y se generan oportunidades de empleo en actividades asociadas a la SInd, como la gestión de residuos y la logística.

**ODS 15 - Vida de ecosistemas terrestres:** La SInd puede ayudar a reducir la presión sobre los recursos naturales y los ecosistemas. Se minimiza la necesidad de extraer nuevos recursos y se reduce la generación de residuos.

## 1.5 Economía Circular, Simbiosis Industrial y el Análisis de Ciclo de Vida

La economía circular es un enfoque que tiene como objetivo principalmente maximizar la utilización de recursos y minimizar la generación de residuos a lo largo del ciclo de vida de los productos, mayormente con un interés económico.

Por otra parte, el Análisis de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*, LCA) es una técnica utilizada para evaluar los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio a lo largo de su ciclo de vida completo, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (de la cuna a la tumba)<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> En el Capítulo 5 se brindan más detalles sobre esta metodología.

La economía circular y el LCA son herramientas que pueden complementarse para abordar los desafíos económicos y ambientales asociados con la producción y el consumo de bienes y servicios. Al utilizar el LCA para evaluar los impactos ambientales y aplicar los principios de la economía circular, se puede ir hacia un modelo más sostenible y eficiente en el uso de los recursos y reducción de las emisiones. El LCA proporciona información sobre los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio, lo que permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia de los recursos y la gestión de residuos (identificación de puntos críticos o *hotspots*) cuya mitigación puede provenir de implementar estrategias de economía circular o de simbiosis con otras industrias (Daddi *et al.*, 2017).

El LCA también puede ayudar a evaluar la conveniencia ambiental de soluciones circulares, comparando los impactos ambientales de diferentes opciones. Por ejemplo, se pueden comparar los beneficios ambientales y económicos de disminuir el consumo de energía de la red externa por el aprovechamiento del potencial energético de una corriente residual, de utilizar una biomasa residual en otra parte del proceso o en otra industria, o medir los beneficios ambientales por el reemplazo de un combustible fósil por una energía renovable.

El LCA brinda información sobre los puntos críticos en el ciclo de vida de un producto o proceso donde existe un mayor consumo de recursos o haya una mayor cantidad de emisiones, permitiendo identificar oportunidades de SInd, donde los subproductos o recursos no utilizados por una empresa puedan ser aprovechados por otra. Esta integración puede conseguirse a través del análisis discreto de escenarios o de forma más sistemática mediante el empleo de optimización multiobjetivo.

## 1.6 La Optimización Multiobjetivo y la Simbiosis Industrial

En general, la optimización multiobjetivo se utiliza en aquellos problemas de optimización en los que existen múltiples objetivos que deben ser satisfechos de manera simultánea. Este tipo de optimización tiene una historia que se remonta a varias décadas atrás, a la misma época en la que surgió el concepto de SInd, alrededor de 1960. En el trabajo de Villa Marulanda *et al.* (2011), se realiza una revisión bibliográfica sobre la teoría de juegos y la

programación matemática, enfocándose en su aplicación para abordar problemas de decisión con múltiples objetivos. Esta investigación sentó las bases para el desarrollo de diversas técnicas y algoritmos que son utilizados en campos como la ingeniería, la economía, la gestión de operaciones y la toma de decisiones empresariales. Por su parte, Coello (2006) analiza la evolución de la optimización multiobjetivo, destacando su relevancia y aplicación en contextos contemporáneos. Estas contribuciones fueron importantes para el avance de la teoría y la práctica de la optimización multiobjetivo, brindando herramientas para abordar problemas complejos en los que la optimización de un solo objetivo no era suficiente. La optimización multiobjetivo ha seguido evolucionando, con aplicaciones en una amplia gama de campos (Gunantara, 2018).

En la literatura científica, dentro del área de estudio de esta Tesis, se destacan las aplicaciones sobre integración de procesos, planificación y operación de redes de SInd y en la optimización de recursos en sistemas industriales, con el objetivo de maximizar simultáneamente los beneficios económicos y ambientales.

En los procesos industriales, la optimización multiobjetivo se utiliza para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad (Cheraghalipour *et al.*, 2018). Por ejemplo, en la optimización de una planta de energía, se pueden considerar objetivos como la maximización de la generación de energía a partir de las biomásas residuales, la minimización de ciertos impactos ambientales como las emisiones de GEI o la optimización del consumo de recursos, como el agua o gas natural. La optimización multiobjetivo permite encontrar soluciones que optimicen estos objetivos de manera simultánea.

También se la puede aplicar en el contexto de la simbiosis industrial, lo que implica buscar soluciones que maximicen la eficiencia en el uso de recursos, minimicen los residuos y las emisiones contaminantes, y promuevan la viabilidad económica de las empresas involucradas (Nishihara Hun y Mele, 2022).

Aunque su aplicación puede proporcionar beneficios significativos, es importante tener en cuenta que la implementación exitosa requiere una comprensión profunda de los procesos industriales, la disponibilidad y calidad de los datos, y la colaboración efectiva entre las partes interesadas en la SInd.

Los estudios de Van Beers *et al.* (2007) y Park *et al.* (2010), quienes estudiaron aplicaciones de SInd, sugieren que la sinergia industrial es una de las estrategias para la sostenibilidad.



Por ello, los gobiernos de varias naciones están considerando gradualmente el fortalecimiento institucional como una estrategia futura para mejorar la utilización de los recursos y reducir los desechos. Muchos investigadores han propuesto diseñar una red óptima de productos en el ámbito de la SInd con el fin de mejorar los beneficios económicos y ambientales a la vez. Lovelady y El-Halwagi (2009), Chew *et al.* (2009), Taskhiri *et al.* (2011) y Chae *et al.* (2010) desarrollaron modelos matemáticos para diseñar una red óptima de utilización de un único recurso (ej.: agua residual o vapor de proceso) para plantas ya existentes. Los resultados sugieren ahorros significativos en costos y recursos para todo el sistema y las plantas individuales.

Si bien la SInd parece ser una estrategia efectiva para obtener beneficios económicos y ambientales, muchos aspectos importantes de la SInd no han sido aún resueltos. Por ejemplo, hay muchas maneras de aplicar SInd a un determinado caso de estudio. Si se tiene un conjunto de plantas candidatas con sus múltiples productos y desechos, ¿cuál es la configuración óptima de simbiosis entre estas plantas tal que reduzca los costos producción de un producto y sus costos logísticos y al mismo tiempo aumente los beneficios económicos de las plantas? (Gonela y Zhang, 2014). Aunque hay contribuciones en esta línea, muy pocas han abordado el problema de manera integral, determinando la configuración óptima del sistema de SInd para mejorar los costos, diseñar los flujos óptimos de múltiples productos y, a la vez, disminuir el impacto ambiental.

Respecto de la industria sucroalcoholera, que tiene un papel importante en esta Tesis, el trabajo de Mele *et al.* (2011) desarrolla un enfoque multiobjetivo a través de un modelo lineal mixto entero (MILP) para diseñar y planificar el funcionamiento de la cadena de valor del etanol en la Argentina, donde se minimizan simultáneamente una función objetivo económica y una ambiental basada en LCA, pero sin consideraciones de SInd. Para el caso de la Argentina y, puntualmente, para la provincia de Tucumán, no se han encontrado publicaciones científicas que propongan esquemas de SInd mediante optimización multiobjetivo y usando LCA para la evaluación de los impactos ambientales. En el país, los antecedentes de estudios de análisis de casos de SInd usando enfoques de optimización no son abundantes. A nivel internacional puede mencionarse el trabajo de Gonela y Zhang (2014) que combina ambos conceptos, y el trabajo de Rigamonti y Mancini (2021), que es un ejemplo de relación entre economía circular, SInd e impacto ambiental.

## 1.7 La Bioeconomía en Tucumán

Esta Tesis se centra en investigar y aplicar estrategias de SInd en agroindustrias regionales, específicamente en cadenas de suministros que contribuyen a la bioeconomía de la provincia y del país. La economía del Noroeste Argentino (NOA) y puntualmente de la provincia de Tucumán es esencialmente agroindustrial (Ferraro y García, 2015). La bioeconomía, al desarrollarse a partir de recursos renovables, constituye un enfoque estratégico hacia un desarrollo sostenible en el mundo, y Argentina no es una excepción. Con una rica diversidad biológica y recursos naturales, el país ha reconocido el potencial de la bioeconomía para impulsar la innovación, la creación de empleo y el crecimiento económico, intentando al mismo tiempo conservar los ecosistemas y proteger el medio ambiente (Lachman *et al.*, 2020).

El sector agroganadero desempeña un papel fundamental en la bioeconomía de Argentina. La producción de cultivos como la soja, el maíz, el trigo y de carne vacuna constituye una parte importante de la economía del país (Trigo *et al.*, 2015). Sin embargo, la bioeconomía también busca también diversificar las actividades y promover la utilización de recursos biológicos subexplotados, así como el desarrollo de cultivos alternativos, la producción de bioproductos (como bioplásticos y biocombustibles) y la valorización de subproductos agroindustriales para la generación de energía (Mejías-Brizuela *et al.*, 2016). La conservación de los recursos naturales y la biodiversidad, la gestión sostenible de los bosques, la protección de los ecosistemas acuáticos y la valorización de la flora y fauna nativas son aspectos clave para la bioeconomía (Henry *et al.*, 2014).

A pesar de que Argentina cuenta con abundantes recursos naturales, un sector agrícola eficiente, buenas infraestructuras para la producción, transformación y exportación, y un capital humano adecuado, en las últimas décadas ha aumentado la preocupación por la sustentabilidad (Brundtland, 1987; Holmberg y Sandbrook, 2019) de estas actividades productivas. Existe una creciente conciencia sobre el agotamiento de los recursos energéticos fósiles, así como el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que ha llevado a un interés creciente por los combustibles renovables y el aprovechamiento integral de la biomasa.

En este contexto, la provincia de Tucumán se encuentra en una posición estratégica para impulsar la bioeconomía y aprovechar los recursos naturales de manera sostenible. Su clima propicio para la producción agrícola y su importante biodiversidad son ventajas clave. La provincia se ha centrado en la producción y procesamiento de cultivos estratégicos, como la caña de azúcar y el limón, que no solo generan ingresos significativos, sino que también ofrecen oportunidades para la diversificación de productos y el agregado de valor. Ambas cadenas de valor generan empleo, contribuyen a la generación de divisas y promueven el desarrollo económico y social de la provincia. Además, se han implementado iniciativas para fomentar la sustentabilidad ambiental y la responsabilidad social en la producción de estos cultivos, buscando minimizar los impactos negativos y promover prácticas sostenibles en toda la cadena productiva.

Particularmente, la caña de azúcar y el limón no solo son fundamentales para la economía de Tucumán, sino que también reflejan el potencial de la provincia para desarrollar un enfoque de bioeconomía que integre la sostenibilidad y la innovación.

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es el principal cultivo en la provincia de Tucumán, destinado a la obtención de azúcar, principalmente para consumo interno y también para exportación. Además, parte de los azúcares se utiliza en la producción de bioetanol, un biocombustible empleado para aditivar la nafta. Este enfoque en la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar contribuye a la diversificación de la matriz energética y, según las condiciones de producción, a la reducción de las emisiones de GEI.

La producción de caña de azúcar en la provincia ha experimentado mejoras significativas en términos de tecnología agrícola (Nishihara Hun *et al.*, 2017) y prácticas sostenibles. Se han realizado esfuerzos para promover la agricultura de precisión y la utilización responsable de fertilizantes y agroquímicos.

La producción nacional de caña de azúcar se concentra en el Noroeste Argentino (NOA). Tucumán, con 250,000 hectáreas cultivadas, genera, a través de 15 ingenios azucareros, el 65% de la producción nacional de azúcar (CAA, 2023). La importancia socioeconómica de este cultivo para la región ha aumentado aún más desde 2010, cuando se implementó la Ley 26.093 sobre biocombustibles, que establece un corte obligatorio de etanol para la nafta (actualmente del 12%), gran parte del cual se obtiene de la caña de azúcar.

Sin embargo, las ganancias económicas de esta agroindustria se ve frecuentemente afectada por la cantidad y calidad de la materia prima, así como por los vaivenes político-económicos. Esta incertidumbre complica la planificación de la producción, lo que dificulta la toma de decisiones tácticas, estratégicas y operativas. Por lo tanto, es fundamental definir estrategias que permitan gestionar de manera óptima esta compleja cadena de suministros (CS). Entre las posibles soluciones, se sugiere diversificar la matriz productiva —actualmente centrada en azúcar y etanol— incorporando nuevos productos como electricidad, biopolímeros (Santos *et al.*, 2020), biogás y productos químicos (Ioannou *et al.*, 2021), operando las plantas como verdaderas biorrefinerías a partir del recurso vegetal. Es esencial identificar, dentro de un conjunto de tecnologías posibles, aquellas que sean sostenibles, es decir, que ofrezcan un óptimo desempeño económico, ambiental y social, así como determinar la inversión necesaria y la distribución de los flujos de materiales a lo largo de toda la cadena de suministros.

El cultivo y la industrialización del limón (*Citrus x limon*) también son sectores importantes en la economía de Tucumán. La provincia es reconocida por la calidad de sus limones y se destaca como uno de los principales productores y exportadores a nivel nacional e internacional. La producción de limón en Tucumán se orienta principalmente hacia el mercado de exportación, donde se utiliza tanto en fresco como para la elaboración de jugo concentrado turbio y clarificado, cáscara deshidratada y aceite esencial (Machin Ferrero *et al.*, 2021).

La industria citrícola tucumana (Pérez y García, 2017) tiene al limón como protagonista, siendo un producto agroexportable clave para Argentina (Federcitrus, 2021). Tucumán es el centro de producción más importante de este cítrico en el país, con una participación del 87% (USDA 2021). Del total de la producción, el 75% se procesa en instalaciones industriales (unas ocho empresas de jugo concentrado, cáscara deshidratada y aceite esencial, entre otros productos), y el resto se vende como fruta fresca (5% al mercado interno y 20% al mercado externo). En los últimos años, la intensificación de las prácticas agrícolas ha aumentado considerablemente el consumo de agua y agroquímicos, en respuesta a la creciente demanda mundial de productos cítricos. Además, la presión de los clientes externos en términos de sostenibilidad exige cambios continuos en la actividad citrícola. Esto resalta la necesidad —al igual que en la industria sucroalcoholera— de

realizar investigaciones y desarrollos en el área de sistemas de soporte a la toma de decisiones, considerando aspectos tecno-económicos y ambientales.

En Tucumán, como se mencionó anteriormente, las dos actividades productivas principales tienen su origen en el cultivo de la caña de azúcar y el limón (González, 2018). Cada uno de estos sectores está conformado por un conjunto de establecimientos industriales pertenecientes a diferentes firmas. Estas industrias, que utilizan biomasa como materia prima, tienen un gran potencial para aplicar conceptos como SInd, dado que la naturaleza renovable de la materia prima permite obtener una amplia gama de productos, subproductos y desechos, muchos de los cuales, constituidos por materia orgánica, pueden utilizarse como fuentes de energía y materia para abastecer esos mismos procesos. Por lo tanto, desarrollar un enfoque de SInd en la industria basada en la biomasa será un aporte significativo a la bioeconomía provincial.

## 1.8 Objetivos de la Tesis: General y Específicos

El objetivo general de esta Tesis es realizar tareas de investigación y desarrollo en el área de soporte a la toma de decisiones para la implementación de estrategias de SInd, teniendo en cuenta simultáneamente aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales.

En el marco de este objetivo general, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- (i) Desarrollar estrategias de optimización basadas en programación matemática para resolver cuestiones relacionadas con la SInd de plantas que originalmente operan de manera independiente.
- (ii) Demostrar la utilidad práctica de los algoritmos y métodos que se desarrollen mediante aplicaciones académicas e industriales, con especial intensidad en el sector productivo regional basado en la biomasa.

## 1.9 Motivación de la Tesis

Hasta ahora, en el país, en el NOA y específicamente en Tucumán, la aplicación de la SInd a una red o tejido productivo no se ha realizado mediante herramientas sistemáticas y tampoco se han tenido en cuenta restricciones técnicas, económicas y socio ambientales, de manera concomitante, en la toma de decisiones. Estos son los puntos innovadores y motivadores fundamentales que aborda este tema de Tesis.

El fin es proponer una metodología para mejorar los beneficios económicos (o reducir los diferentes elementos de costo) y los impactos ambientales de una cartera de productos a través de SInd, usando el LCA como herramienta de cuantificación del impacto ambiental, aprovechando los vacíos en la literatura que se han detectado dentro de la temática. La Tesis busca formular un enfoque cuantitativo para determinar la mejor configuración de un sistema de SInd bajo ciertas restricciones. Se propone como herramienta la programación matemática a través de modelos lineales. Esto permitirá, entre un amplio abanico de decisiones posibles: (i) decidir la mejor combinación posible de plantas para conformar un dado esquema de SInd, y (ii) determinar la red óptima de múltiples productos de diversos materiales en esta SInd. Se toman como casos de estudio en esta Tesis, plantas del medio local o regional para llevar a cabo las aplicaciones, dos plantas productivas relacionadas con la caña de azúcar (sucroalcoholera y papelera) y una derivada del limón.

## 1.10 Referencias

- Abdallah, T., Diabat, A., Simchi-Levi, D. (2012). Sustainable supply chain design: a closed-loop formulation and sensitivity analysis. *Production Planning & Control*, 23 (2/3), 120-133. <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.591622>
- Brundtland, G. (1987) *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*; Oxford University Press. Oxford.
- Camacho-Otero, J., Boks, C., Pettersen, I. N. (2018). Consumption in the circular economy: A literature review. *Sustainability*, 10(8), 2758.
- Cartea, P. Á. M. (2006). Crisis ambiental y globalización: Una lectura para educadores ambientales en un mundo insostenible. *Trayectorias*, 8(20-21), 110-123.
- Centro azucarero argentino (CAA). Recuperado el 13 de abril de 2023 de <https://centroazucarero.com.ar/>
- Chae, S.H., Kim, S.H., Yoon, S. G., Park, S. (2010). Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park. *Applied Energy*, 87, 1978-1988. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.12.003>
- Cheraghalipour, A., Paydar, M.M., Hajiaghaei-Keshteli, M. (2018). A bi-objective optimization for citrus closed-loop supply chain using Pareto-based algorithms. *Applied Soft Computing*, 69, 33–59. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.04.022>

- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual review of energy and the environment*, 25(1), 313-337.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>
- Chertow, M. R., Ashton, W. S., Espinosa, J. C. (2008). Industrial symbiosis in Puerto Rico: Environmentally related agglomeration economies. *Regional Studies*, 42(10), 1299-1312.  
<https://doi.org/10.1080/00343400701874123>
- Chew, I.M., Tan, R.R., Foo, D.C., Chui, A.S. (2009). Game theory approach to the analysis of inter-plant water integration in an eco-industrial park. *Journal of Cleaner. Production*, 17, 1611-1619. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.08.005>
- Coello, C. C. (2006). Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1 (1), 28-36.  
<https://doi.org/10.1109/MCI.2006.1597059>
- Daddi, T., Nucci, B., Iraldo, F. (2017). Using Life Cycle Assessment (LCA) to measure the environmental benefits of industrial symbiosis in an industrial cluster of SMEs. *Journal of Cleaner Production*, 147, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.090>
- Eckelman, M. J., Chertow, M. R. (2009). Quantifying life cycle environmental benefits from the reuse of industrial materials in Pennsylvania. *Environmental Science & Technology*, 43(7), 2550-2556. <https://doi.org/10.1021/es802345a>
- MacArthur Foundation (2012). Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>>(consultado en enero de 2022)
- Federcitrus, (2021). Argentine Citrus Federation. The Argentine citrus industry. <<https://www.federcitrus.org/estadisticas>> (consultado en octubre de 2021).
- Ferraro, D. O., García, F. O. (2015). Análisis de la competitividad de la agroindustria azucarera en Tucumán. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(1), 113-129.
- Frosch, R. A., Gallopoulos, N. E. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261(3), 144-153. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0989-144>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy: A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

- Gonela, V., Zhang, J. (2014). Design of the optimal industrial symbiosis system to improve bioethanol production. *Journal of Cleaner Production*, 64, 513-534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.059>
- González, L. R. (2018). "La industria del limón en Tucumán: evolución y desafíos actuales." *Revista del Instituto de Estudios Económicos y Sociales*, 1(1), 1-25.
- Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), 1502242. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1502242>
- Henry, G., Pahun, J., Trigo, E. (2014). La Bioeconomía en América Latina: oportunidades de desarrollo e implicaciones de política e investigación. *Faces*, 20(42-43), 125-141.
- Holmberg, J., Sandbrook, C. (2019). The challenge of sustainability in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(6), 325-333.
- Huang, M., Wang, Z., Chen, T. (2019). Analysis on the theory and practice of industrial symbiosis based on bibliometrics and social network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 213, 956-967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.131>
- Ioannou, I., D'Angelo, S. C., Galán-Martín, Á., Pozo, C., Pérez-Ramírez, J., Guillén-Gosálbez, G. (2021) Process modelling and life cycle assessment coupled with experimental work to shape the future sustainable production of chemicals and fuels. *Reaction Chemistry & Engineering*, 6, 1179-1194. <http://dx.doi.org/10.1039/D0RE00451K>
- Jacobsen, N. B. (2006). Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: a quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*, 10(1-2), 239-255.
- Khan, Z., Chowdhury, S., Mitra, B., Mozumder, M., Elhaj, A., Salami, B., Rahman, M., Rahman, S. (2023). Analysis of industrial symbiosis case studies and its potential in Saudi Arabia, *Journal of Cleaner Production*, Volume 385, 135536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135536>.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Lachman, J., Bisang, R., Obschatko, E. S. D., Trigo, E., Productivo, D. (2020). Bioeconomía. Una estrategia de desarrollo para la Argentina del siglo XXI.
- Lawal, M., Alwi, S. R. W., Manan, Z. A., Ho, W. S. (2021). Industrial symbiosis tools—A review. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124327>



- Laybourn, P., Morrissey, M. (2009). The Pathway to a Low Carbon Sustainable Economy. <<http://www.nisp.org.uk/Publications/Pathway.pdf>> (consultado en diciembre de 2021)
- Lovelady, E.M., El-Halwagi, M.M. (2009). Design and integration of eco-industrial parks for managing water resources. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 28 (2), 265-272. <https://doi.org/10.1002/ep.10326>
- Machin Ferrero, L.M., Araujo, P.Z., Nishihara Hun, A.L., Valdeón, D. H., Mele, F. D. (2021) Water footprint assessment of lemon and its derivatives in Argentina: a case study in the province of Tucumán. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 1505-1519. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-021-01939-5>
- Martin, M., Eklund, M. (2011). Improving the environmental performance of biofuels with industrial symbiosis. *Biomass and Bioenergy*, 5, 1747-1755. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.016>
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillén, E., Galán-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27-41.
- Mele, F. D., Kostin, A. M., Guillen-Gosalbez, G., Jiménez, L. (2011). Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar cane industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50 (9), 4939-4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>
- Neves, A., Godina, R., Azevedo, S. G., Matias, J. C. (2020). A comprehensive review of industrial symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119113>
- Ng, R.T.L., Ng, D.K.S., Tan, R.R. (2015). Optimal planning, design and synthesis of symbiotic bioenergy parks. *Journal of Cleaner Production*, 87, 291–302. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.045>.
- Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D., Pérez, G. A. (2017). A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 502-515. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>
- Nishihara Hun, A. L.; Mele, F. D. (2022). Estrategias de simbiosis industrial para la industria sucroalcoholera. X Encuentro Argentino de Ciclo de Vida, IX Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica, ENARCIV 2022, 3-4 de noviembre de 2022, Córdoba, Argentina

- Park, J., Sarkis, J., Wu, Z. (2010). Creating integrated business and environmental value within the context of China's circular economy and ecological modernization. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1494-1501. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.001>
- Pérez, G., García, F. (2017). Análisis de la competitividad de la cadena de valor del limón en Tucumán, Argentina. *Revista Agroindustria*, 11(21), 59-72.
- Pérez, J. L., Meza, V. S. (2013). Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales. *Industrial Data*, 16(1), 108-117.
- Rigamonti, L., Mancini, E. (2021). Life cycle assessment and circularity indicators. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 1937–1942. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01966-2>
- Rodríguez, L. (2007). Protocolo de Kyoto: Debate sobre ambiente y desarrollo en las discusiones sobre Cambio Climático, *Gestión y Ambiente*, 10(2), 119-128.
- Santos V. P., Marques N. S. S., Maia P. C. S. V., de Lima M. A. B., de Oliveira Franco L., De Campos-Takaki G. M. (2020). Seafood waste as attractive source of chitin and chitosan production and their applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(12), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ijms21124290>
- Taskhiri, M.S., Tan, R.R., Chui, A.S. (2011). MILP model for energy optimization in EIP water networks. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13, 703-712. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0341-1>
- Trigo, E., Regúnaga, M., Costa, R., Coremberg, A. (2015). Bioeconomía en Argentina: alcances, situación actual y oportunidades para el desarrollo sustentable. *La bioeconomía. Nuevo marco para el crecimiento sostenible en América Latina*, 25.
- Tukker, A., Jansen, B. (2006). Environmental impacts of products: A detailed review of studies. *Journal of Industrial Ecology*, 10(3), 159-182.
- USDA (2021). United States department of agriculture. Foreign Agricultural Service. <<https://www.fas.usda.gov/data/argentina-citrus-annual-5>> (consultado en mayo de 2021)
- Vahidzadeh, R., Bertanza, G., (2022). Industrial symbiosis and eco-industrial parks. *Environmental Sustainability and Industries*, Chapter 17, 405-431. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90034-8.00012-9>
- Van Beers, D., Corder, G., Bossilkov, A., Van Berkel, R. (2007). Industrial symbiosis in the Australian mineral industry: the cases of Kwinana and Gladstone. *Journal of Industrial Ecology* 11 (1), 55-72. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1161>

- Villa Marulanda, M., Torres Delgado, J. F., Ballesteros, F. A. (2011). Revisión bibliográfica de los enfoques teoría de juegos y Vendor Managed Inventory (VMI) para el estudio de cadenas de suministros. Puente. Revista Científica.
- Walls, J. L., Paquin, R. L. (2015). Organizational Perspectives of Industrial Symbiosis: A Review and Synthesis. Organization & Environment, 28(1), 32–53. <https://doi.org/10.1177/1086026615575333>
- Wheeler, J., Galán-Martín, Á., Mele, F. D., Guillén-Gosálbez, G. (2021). Designing biomass supply chains within planetary boundaries. AIChE Journal, 67(4), e17131. <https://doi.org/10.1002/aic.17131>
- Zhang, Y., Zheng, H., Chen, B. (2015). A review of industrial symbiosis research: theory and methodology. Frontiers of Earth Science, 9, 91-104. <https://doi.org/10.1007/s11707-014-0445-8>

---

# CAPÍTULO 2: Descripción del caso de estudio

*“No importa cuán lento vayas, siempre y cuando no te detengas”*

*Confucio*

## Resumen

En este capítulo se analizan tres sectores industriales estratégicos para el caso de estudio: la industria sucroalcoholera y papelera, ambas vinculadas al procesamiento de la caña de azúcar, y la industria citrícola, enfocada en el limón. Para cada una, se identifican y caracterizan los principales residuos generados en sus procesos productivos, evaluando tanto su potencial energético como su posible aprovechamiento como materia prima. A partir de esta caracterización, se plantea un esquema de simbiosis industrial potencial en el que los residuos de una industria pueden convertirse en recursos para otra, cerrando ciclos de materiales y energía y optimizando el uso de los recursos. El capítulo sienta así las bases para evaluar, en los siguientes apartados, la viabilidad técnica, económica y ambiental de estas interconexiones industriales, con el fin de desarrollar un modelo de economía circular aplicable al contexto de estudio.

### 2.1 Contexto Global

Como se mencionó en el Capítulo 1, la economía de la provincia de Tucumán depende fuertemente de dos cultivos agroindustriales: la caña de azúcar y el limón. En este trabajo de Tesis se propone diseñar un esquema de simbiosis industrial (SInd) entre tres plantas productivas, dos relacionadas con la caña de azúcar (sucroalcoholera y papelera) y una derivada del limón (citrícola). Estas industrias tienen potencial para ser más sustentables, tanto desde el punto de vista económico como ambiental (Machin Ferrero *et al.*, 2021) y social, si se disponen a compartir recursos materiales y energéticos entre ellas (Nishihara Hun *et al.*, 2017). Esta mejora no es trivial en todos los aspectos simultáneamente por lo que se debe analizar, cuantificar, comparar y sacar las conclusiones pertinentes.

La producción de caña de azúcar y de limón en Tucumán se concentran principalmente en las zonas específicas que presentan condiciones climáticas y edáficas favorables para su cultivo (Figura 2.1). La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) se cultiva principalmente en la región oriental de la provincia, en el Valle de Taí. Esta área se caracteriza por su clima subtropical húmedo, con veranos cálidos e inviernos suaves, y una altitud que varía entre los 500 y los 700 metros sobre el nivel del mar. El Valle de Taí ofrece suelos fértiles y bien drenados, ideales para el cultivo de caña de azúcar. Los principales productores de

caña de azúcar en Tucumán, abarca a los departamentos de Lules, Famaillá, Monteros, Chicligasta, Río Chico y Alberdi (Valeiro y Biaggi, 2019).

Por otro lado, en la provincia se destaca el cultivo de limón (*Citrus x limon*), que se concentra principalmente en la zona conocida como La Costa, ubicada en el este de la provincia de Tucumán. La Costa se caracteriza por su clima subtropical, con una alta humedad relativa y precipitaciones que varían durante todo el año. El departamento de Burruyacú cuenta con la mayor extensión de superficie cultivada, en contraste con los departamentos de Tafí Viejo, Yerba Buena y Lules, que tienen la mayor proporción de plantaciones antiguas (de más de 19 años) y una tasa de renovación más baja, debido a que algunas tierras han sido destinadas al uso urbano (EEAOC, 2023).

Dado este contexto agrícola, el problema que se quiere resolver puede plantearse de la siguiente manera: dados tres establecimientos fabriles de las industrias antes mencionadas que operan de manera independiente, se busca mediante la SInd establecer la colaboración estratégica entre estas empresas, mediante el intercambio de subproductos, residuos y flujos de energía entre las plantas fabriles. Se busca optimizar estos flujos de materiales y energía de manera de obtener una estructura que trabaje integradamente, maximizándose los beneficios económicos y minimizando los impactos ambientales.

Para poder comprender el esquema integrado de SInd a estudiar, en una primera instancia se describirá el caso base de estudio, es decir cuando cada una de estas industrias se hallan trabajando de manera independiente, sin intercambios de materia y energía. Así, se describirán las industrias sucroalcoholera (Nishihara Hun, 2014), citrícola y papelera, para luego identificar y analizar los flujos de estas industrias con potencial de participar en intercambios en el tejido productivo que se plantea.

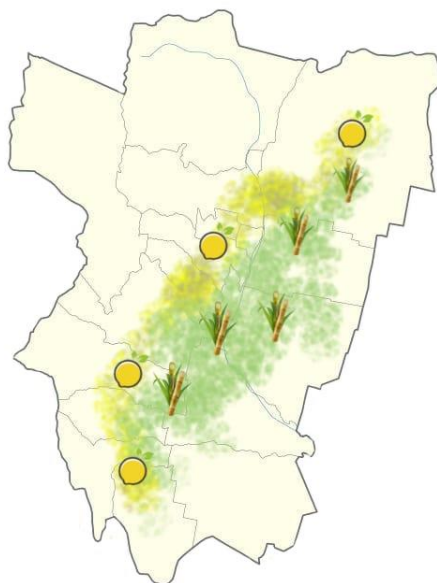


Figura 2.1 - Localización cultivo de caña de azúcar y de limón en Tucumán (figura adaptada de EEAOC, 2021, 2024)

## 2.2 La Industria Sucroalcoholera

La industria del azúcar es una importante actividad a nivel mundial, puesto que produce un componente importante de la dieta de los seres humanos. En el período 2022-2023, se produjeron 177 millones de toneladas de azúcar (SAGP, 2023), donde Brasil e India fueron los principales productores mundiales de azúcar con 38 millones y 29 millones respectivamente.

De los 115 países productores de azúcar, 67 de ellos la producen a partir de caña de azúcar, 39 a partir de remolacha y 9 de caña y remolacha (Voora *et al.*, 2020). El azúcar de caña se produce principalmente en América y Asia, mientras que el de remolacha se produce principalmente en Europa y, en menor cuantía, en Norteamérica. Hacia 1980, la materia prima para la producción de azúcar era la caña y la remolacha en partes iguales, mientras que, en la actualidad, el 80% de la producción mundial de azúcar y gran parte del etanol combustible provienen del cultivo de caña.

A nivel mundial, Brasil y la India ocupan los primeros puestos como productores de azúcar. La Argentina ocupa la posición número 18, con un nivel de producción muy similar a Indonesia, Filipinas, Colombia y Sudáfrica (Voora *et al.*, 2020).

La producción de caña de azúcar en la Argentina se concentra en tres zonas: Tucumán, el Norte (Salta y Jujuy) y el Litoral. Actualmente funcionan veintidós ingenios azucareros, de los cuales catorce están concentrados en Tucumán (Figura 2.2), tres en Jujuy, dos en Salta, dos en Santa Fe y uno en Misiones (CAA, 2023).

El área cañera de Tucumán abarca alrededor de 276.400 ha (EEAOC, 2021) y el azúcar blanco producido representó en la última campaña un 69,7% de la producción nacional según datos del Centro Azucarero Argentino (CAA, 2023).

Los ingenios de Tucumán procesan cerca del 60% del azúcar que se consume en la Argentina. En la provincia hay diez destilerías que producen etanol (Figura 2.2), y algunas de ellas en su calidad anhidra (bioetanol) para su uso como combustible.

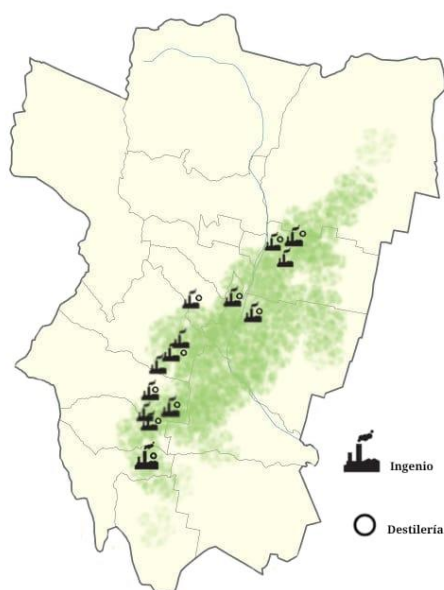


Figura 2.2 - Distribución geográfica de los ingenios y de las destilerías en la provincia (figura adaptada de M.E.P., 2023)

La caña de azúcar se destaca por su importancia socioeconómica. En las zonas de su cultivo se observa una mayor industrialización y una ampliación de la infraestructura productiva generando un incremento en el número de empleos, especialmente en la época de cosecha (zafra). Además, el sector azucarero es dinamizador de diversas actividades que se desarrollan en torno a la agroindustria, comercialización y sistemas de abastecimiento.



Hasta hace unos años, los ingenios solamente producían azúcar, pero hoy en día la mayoría de estas industrias incluye la producción de azúcar, etanol y energía, entre otros productos. Para poder comprender mejor el proceso de esta industria, se la ha dividido en tres subsistemas: Campo de caña de azúcar, Ingenio y Destilería, cuyos productos principales son la caña de azúcar, el azúcar (blanco) y el etanol, respectivamente, tal como se muestra en la Figura 2.3.

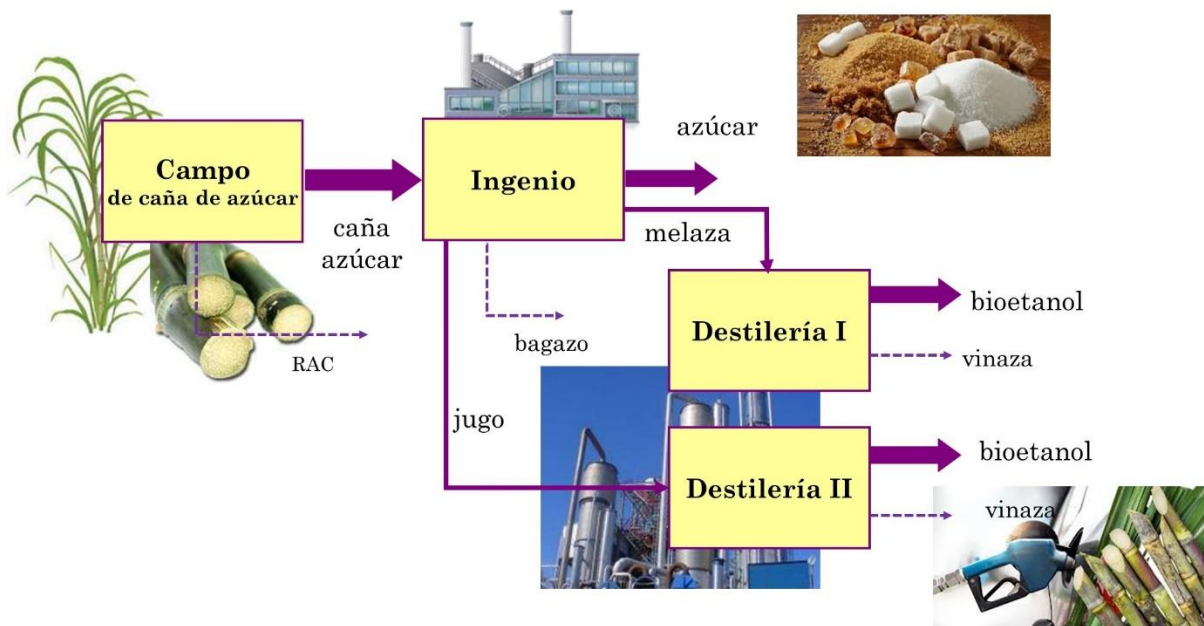


Figura 2.3 - Esquema simplificado de la actividad sucroalcoholera

### 2.2.1 Campo de Caña de Azúcar

Este sub sistema incluye todas las actividades que intervienen en la producción agrícola de la caña de azúcar. En la provincia de Tucumán, la producción de este cultivo se desarrolla siguiendo prácticas que han sido clasificadas por Giancola *et al.* (2012) en tres niveles tecnológicos: alto, medio y bajo (Nishihara Hun *et al.*, 2017).

Un nivel tecnológico alto, se corresponde con campos con un rendimiento agrícola relativamente alto, con un sistema de cosecha mecanizado (se usan máquinas integrales que despuntan las plantas cortan la base de los tallos, los trozan y separan de las hojas con ventiladores, los restos de vegetales del despunte y hojas quedan en el campo y se lo conoce como “maloja” o “malhoja”, residuo agrícola de cosecha o RAC), sin quema de campos y con

uso intensivo de agroquímicos. En ocasiones el RAC termina siendo quemado, sea accidentalmente o como práctica de cultivo por parte de los productores.

En el otro extremo, se encuentra el nivel tecnológico bajo, con un rendimiento agrícola relativamente bajo, sistema de cosecha manual (se hace con machete cortando los tallos, agrupándolos en hileras), por lo que la quema de campos para poder realizar la cosecha es total (a fin de eliminar las hojas) y con menor uso de agroquímicos.

En el subsistema “Campo de caña de azúcar” se incluyen las etapas de cultivo (siembra) de la caña de azúcar, preparación del suelo, riego, aplicación de agroquímicos y cosecha. La etapa de siembra considera las labores de rastrado, cincelado, surcado, tapado y desboquillado correspondientes a la preparación de suelo y las labores de bajada de bordo durante el cultivo. Durante el cultivo de la caña de azúcar se utilizan varios agroquímicos, a fin de proteger la caña (como ser fungicidas, plaguicidas y herbicidas) y también para aumentar su producción (fertilizantes). Respecto de la cosecha de la caña, se considera como producto principal la caña molible (tallos molibles) que será la entrada principal al siguiente subsistema denominado Ingenio. Las principales salidas de esta etapa serán las emisiones gaseosas y RAC.

### 2.2.2 Ingenio

La caña de azúcar (caña molible) producida en el campo es transportada, pesada y descargada en las mesas de alimentación del ingenio para ser utilizada como materia prima para la producción de azúcar. El proceso de producción de azúcar (Figura 2.4) consta de las etapas que se describen a continuación (Nishihara Hun *et al.*, 2015).

#### **Molienda**

Es el proceso en el que se extrae el jugo contenido en los tallos de la caña. La caña que puede haberse lavado previamente, pasa por una serie de molinos que por presión extraen el jugo y separan la parte fibrosa de la caña llamada bagazo. El jugo pasa a la etapa siguiente de clarificación.

#### **Clarificación**

Se agrega  $\text{SO}_2$  al jugo (sulfitación) para bajar su pH y producir la coagulación de proteínas presentes. Luego se agrega cal (encalado),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , con el objeto de volver a pH neutro. Se produce sulfito de calcio que precipita junto a las sales de calcio de los ácidos orgánicos

presentes llevando consigo otras impurezas. A continuación, se eleva la temperatura del jugo encalado hasta una temperatura cercana a su punto de ebullición (105°C). Los sólidos insolubles formados en la etapa anterior se separan del jugo en un decantador por la parte inferior del equipo, mientras que el jugo clarificado se extrae por la parte superior. Los sólidos separados pasan a filtros rotatorios, que trabajan al vacío, los cuales recuperan el jugo retenido por los sólidos, y separan la cachaza, constituida por todos los sólidos insolubles (impurezas) del jugo, la cual suele ser usada como abono en las plantaciones.

### **Evaporación**

Mediante un sistema de evaporadores en múltiple efecto continuos al vacío, se evapora la mayor cantidad de agua contenida en el jugo claro para obtener el melado, una solución principalmente de sacarosa de un 65% en peso de concentración.

### **Cristalización y Centrifugación**

El “cocimiento” del melado se lleva a cabo en evaporadores discontinuos al vacío. Éstos producirán azúcar crudo, azúcar blanco (para consumo directo) y azúcar para recircular en el proceso. La cristalización del azúcar se inicia introduciendo a los tanques cristales de azúcar finamente molidos (semilla), como núcleos de cristalización, que luego se dejan crecer. Los cristales de azúcar formados se separan de la miel madre en las centrífugas. Las mieles se recirculan al proceso, salvo la miel más impura (melaza) que se utiliza como materia prima para la producción de alcohol etílico en la destilería.

### **Refinación**

Mediante la refinación, se eliminan sustancias que dan color al azúcar. Para ello el azúcar se redisuelve en agua y se trata con ácidos inorgánicos y floculantes que ayudan a separar las impurezas en un clarificador. El licor resultante se concentra, se cristaliza de nuevo y el azúcar refinado se separa de las mieles en centrífugas.

### **Secado**

Es la operación mediante la cual se trata con aire caliente el azúcar obtenido, a fin de reducir su humedad a valores que posibiliten su almacenamiento.

Como se mencionara, la miel final o melaza resultante de la etapa de cristalización y centrifugación, se utiliza como materia prima en las destilerías para la obtención de bioetanol. Cabe destacar que este es el esquema productivo predominante en la provincia de Tucumán, pero existen otros esquemas en los que no se obtiene melaza sino mieles más

ricas para la producción de etanol, o bien todo el jugo es destinado a la producción de etanol (destilerías autónomas). Este último tipo se utiliza extendidamente en Brasil (Anschau *et al.*, 2010)

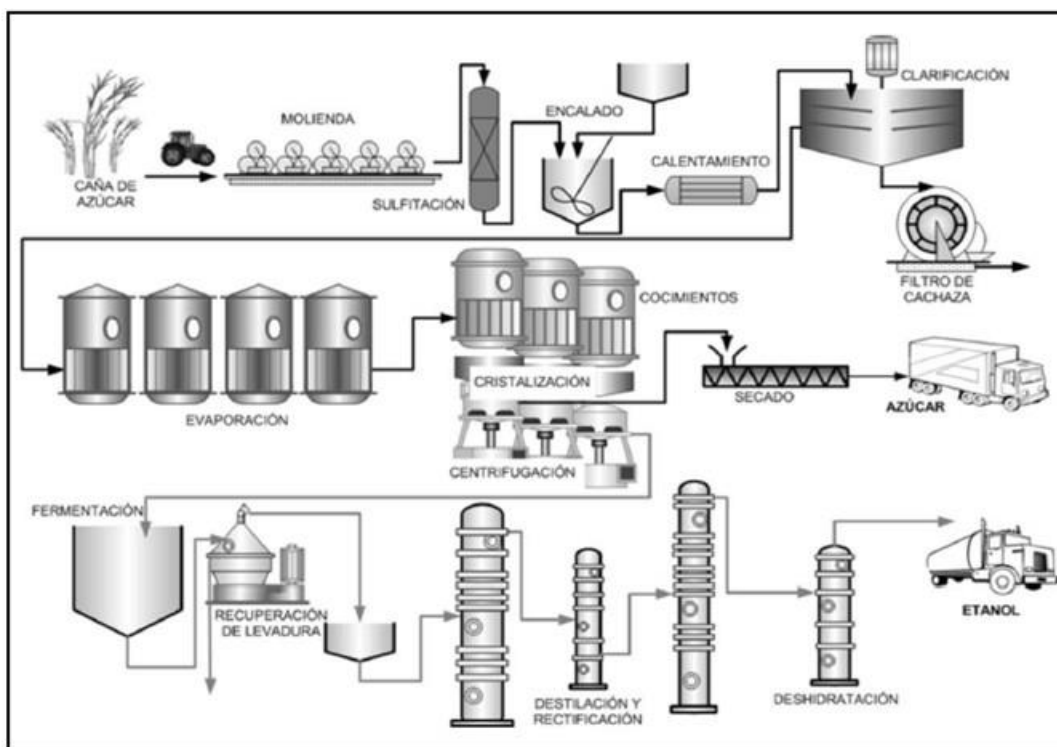


Figura 2.4 - Proceso resumido de la obtención de azúcar y etanol a partir de la caña de azúcar (Nishihara Hun *et al.*, 2015)

### 2.2.3 Destilería

Las destilerías de Tucumán operan asociadas a los ingenios azucareros (a diferencia de Brasil, donde existen numerosas destilerías para obtener solamente etanol) es decir que comparten en gran medida sus servicios auxiliares y usan como materia prima la melaza que se genera como coproducto de la fabricación de azúcar o el jugo obtenido en el proceso de la molienda de la caña. Es decir que, en el caso de estudio de esta Tesis, el etanol, producto principal de este sistema, se puede obtener a partir de dos materias primas, la melaza (destilería de melaza) y el jugo (destilería de jugo).

La melaza (85% sólidos totales en peso) se diluye con agua y se enriquece con fuentes de nitrógeno y de fósforo para que las levaduras fermenten<sup>3</sup> los azúcares y produzcan etanol. Se ha considerado el sistema de fermentación discontinua en tanques abiertos (cubas de fermentación). Al cabo de unas 12 horas, el mosto se convierte en vino con una concentración de etanol de entre 7-10 °GL (°GL = % de etanol en volumen). El vino se centrifuga para recuperar la levadura, la cual luego será reutilizada, y se envía a tanques desde donde se alimentan las columnas de destilación que recuperarán y concentrarán el etanol producido. El vino sin levaduras se destila en trenes de columnas de destilación que separan las impurezas hasta dar como producto el etanol 96 °GL o etanol buen gusto, cuyo contenido de agua es cercano al de la mezcla azeotrópica. El esquema de destilación consta usualmente de 2 o 3 columnas. Además del alcohol buen gusto se obtiene un etanol de baja pureza conocido como alcohol mal gusto y aceite de fusel que es una mezcla constituida principalmente por alcoholes superiores. Como residuos, en esta etapa de destilación se genera la vinaza y la flegmasa.

La vinaza constituye el residuo más importante de la destilería; tiene elevado contenido de sales y carga orgánica, y se genera en grandes volúmenes: por cada litro de etanol 96 °GL se generan aproximadamente 13 litros de vinaza (Ariza *et al.*, 2019). La flegmasa es prácticamente agua y no se tendrá en cuenta en el análisis de las corrientes residuales de esta Tesis.

Para obtener alcohol anhidro grado combustible, el alcohol buen gusto pasa a una etapa de deshidratación que puede llevarse a cabo empleando diferentes técnicas como adsorción en tamices moleculares, destilación azeotrópica, destilación extractiva o pervaporación. En este estudio se ha considerado la deshidratación mediante destilación azeotrópica usando ciclohexano como solvente. El etanol final tiene una concentración mayor a 99,7 °GL.

---

<sup>3</sup> Fermentación: es el proceso bioquímico efectuado por las levaduras en el que los azúcares presentes en la mezcla de alimento (mosto) son transformados en etanol y dióxido de carbono, principalmente, bajo condiciones específicas de temperatura, pH, concentración de azúcares y nutrientes. Destilación: es la operación de separación de mezclas líquidas en sus constituyentes, aprovechando sus diferencias de puntos de ebullición; se lleva a cabo en columnas en las que se suministra calor en el fondo, mientras que, por la parte superior, las corrientes de vapor son retiradas y condensadas.

#### 2.2.4 Residuos y Efluentes: RAC, bagazo y vinaza

Como se vio anteriormente, en el subsistema Campo de caña de azúcar, el producto es la caña de azúcar (molible) y uno de los residuos que se genera es el RAC. Por otra parte, en el subsistema Ingenio, el producto principal es el azúcar y el residuo principal que se produce en la molienda de la caña es el bagazo (residuo lignocelulósico), mientras que en los subsistemas Destilerías, el producto es el bioetanol y el residuo principal es la vinaza (Figura 2.3).

La cachaza que se obtiene como residuo en la clarificación, tiene una alta carga orgánica, contiene sacarosa, azúcares simples, coloides coagulados, cera, fibra de caña, partículas de suelo y una importante presencia de elementos minerales. Sin embargo, no se tendrá en cuenta en el caso de estudio como material con potencial energético, ya que es un residuo más bien líquido, pastoso, con una baja densidad energética que, al tener alto contenido de nutrientes, se prefiere su uso en la fertilización de cultivos.

Así, en este apartado se tratará el RAC, el bagazo y la vinaza, presentándolos ya no como residuos sino como subproductos generados en la industria de la caña de azúcar, y que pueden ser aprovechados por las demás plantas que conforman el tejido productivo.

El residuo agrícola de cosecha (RAC), incluye hojas, tallos, despuntes, cogollos, raíces y rastrojo que queda en el suelo luego de la cosecha de la caña. Un tercio de la caña de azúcar está compuesta por las hojas, vainas y cogollos, y el resto es el tallo, del cual el 50% corresponde al jugo a partir del cual se produce el azúcar y el etanol (Valeiro *et al.*, 2017). Durante la cosecha, se suelen manejar elevadas cantidades de RAC. Estos residuos pueden tener diversos usos, desde la mejora del suelo hasta la producción de energía o alimentación animal.

El bagazo es el residuo fibroso que queda luego de la extracción del jugo de la caña. Consiste en la parte fibrosa de la planta, compuesta principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina. La cantidad de bagazo obtenida depende del contenido de fibra de la caña, que es función, a su vez, de la variedad de caña que se trate, del estado fisiológico de las plantas y del sistema de cosecha empleado. Por cada tonelada de caña molida, 30% aproximadamente es bagazo. Este se utiliza ampliamente como combustible en las plantas

azucareras y destilerías de etanol para generar calor y electricidad. También puede ser utilizado como materia prima en la producción de papel, tableros de fibra y materiales de construcción.

La vinaza es el efluente líquido generado durante el proceso de destilación del etanol, ya sea que este provenga de melaza o de jugo. La vinaza se produce en grandes volúmenes, la bibliografía indica que por cada litro de alcohol etílico se generan entre 10 a 14 litros de vinaza, aproximadamente (Ariza *et al.*, 2019). Es un efluente altamente contaminante por su composición y por sus características fisicoquímicas (pH ácido entre 3 y 4, alta carga orgánica, color oscuro, olor desagradable, elevada cantidad de sales de potasio y cantidades apreciables de fósforo y nitrógeno). Puede tener un uso beneficioso, como la aplicación en la fertilización de cultivos debido a su contenido de nutrientes (N, P, K), o como cosustrato en la producción de biogás mediante digestión anaeróbica.

## 2.3 La Industria Citrícola

La Argentina es uno de los principales productores y exportadores de limón a nivel mundial (Landa, 2014). Si bien los destinos de exportación varían a lo largo del tiempo debido a factores económicos, políticos y comerciales, algunos de los principales países receptores del limón son: Estados Unidos, la Unión Europea (España, Países Bajos), Canadá, Rusia, Brasil y México ((USDA, 2021). Se estima que el país representa aproximadamente el 21% de la producción mundial de limón, siendo uno de los ocho mayores productores mundiales de limón (Federcitrus, 2021). Por otra parte, Tucumán es la principal provincia productora de limón en la Argentina, con uno de los principales polos citrícolas del país.

La zona de producción de limón en Tucumán se concentra principalmente en los departamentos de Tafí Viejo, Burruyacú, Cruz Alta, Leales, Monteros y Famaillá. Esta industria es de gran importancia en la provincia de Tucumán (EEAOC, 2024).

Para poder analizar y comprender mejor los procesos incluidos en esta actividad, se la dividió en dos subsistemas: Campo de limón y Citrícola (Figura 2.5).

En la cadena de valor del limón, la fruta se obtiene en el campo y luego de un proceso de preselección va a empaque (*packing*), El limón que no va a *packing* será procesado para

obtener allí los productos industrializados en las plantas de procesamiento: cáscara deshidratada, jugo concentrado tanto turbio como clarificado y aceite esencial.

El jugo de limón es usado en la industria alimentaria para la elaboración de bebidas, aderezos, salsas, postres y productos de panadería. El aceite esencial se utiliza también en la industria de alimentos y bebidas, así como en la industria cosmética y de perfumería. La cáscara deshidratada es utilizada principalmente para la producción de pectina, la cual se usa como espesante de productos de alimentación y cosmética.

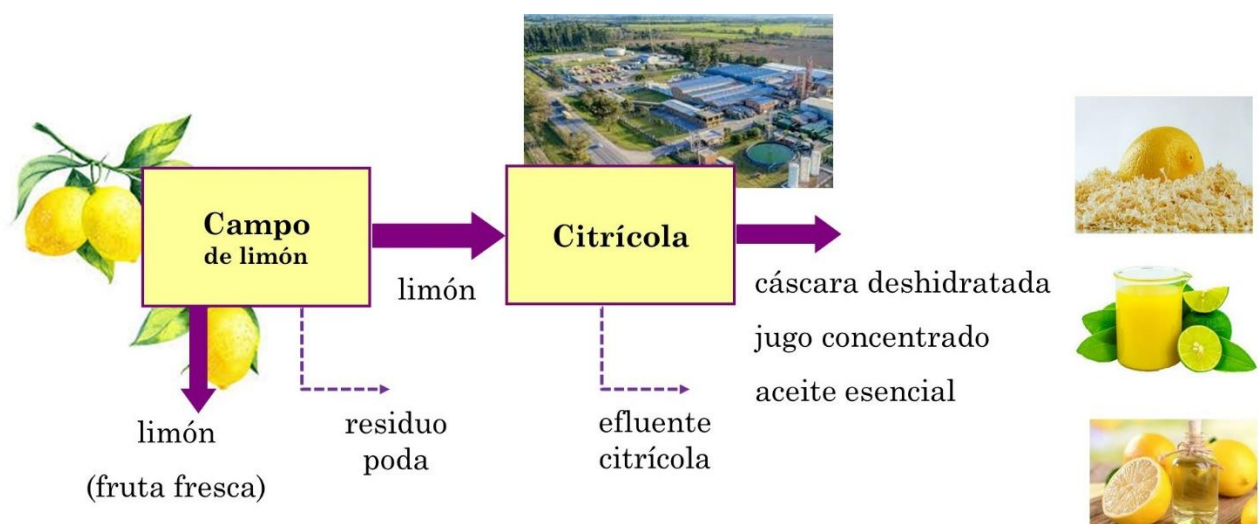


Figura 2.5 - Esquema simplificado de la actividad del limón

### 2.3.1 Campo de Limón

El proceso comienza con el cultivo del cítrico. Primeramente, se prepara el suelo para la plantación de los árboles de limón. Esto implica labores de limpieza, nivelación y adecuación de la tierra. A continuación, se procede a la plantación de los árboles (plantines), que provienen de viveros en los que se ha realizado su propagación en injerto. El limonero es una especie perenne por lo que las plantaciones contienen plantas de diferentes edades, con diferente capacidad productiva, y sólo se van renovando las más viejas, dando lugar a la plantación de nuevos plantines. Se llevan a cabo prácticas como riego, fertilización y control de plagas y enfermedades, para asegurar un crecimiento y



mantenimiento saludable de los árboles. La poda es una práctica habitual sobre los árboles de cierta edad para promover un buen desarrollo y una buena producción de frutas, generándose en el campo una biomasa residual aprovechable.

Una vez que la fruta ha alcanzado la madurez, se realiza la cosecha. Los limones se recolectan a mano. En Tucumán, la cosecha de cítricos generalmente se realiza entre los meses de mayo y octubre (zafra). Después de la cosecha, los cítricos se clasifican y seleccionan según su tamaño, calidad, color, variedad y otros criterios establecidos por los estándares de la industria y de los clientes. Se produce la eliminación de frutas dañadas, con alguna enfermedad o que sea de una calidad inferior a la estipulada.

Los limones pasan por una etapa de limpieza y lavado para eliminar la suciedad, los residuos de pesticidas y otros contaminantes superficiales, y se procede a clasificarlos en diferentes categorías. Luego, se empacan en cajas o mallas según los requisitos del mercado, realizándolo de forma manual o mediante sistemas automáticos. Estos limones embalados se almacenan en cámaras que mantienen condiciones de temperatura y humedad controladas para mantener su frescura y calidad. Luego, los limones se transportan a través de camiones, trenes y barcos hasta su destino final, que puede ser un mercado local, nacional o internacional. El limón que no cumple con los requisitos para ser vendido como fruta, se destina al sector industrial para su procesamiento.

### 2.3.2 Citrícola

Actualmente en Tucumán, existen nueve plantas industriales y más de 30 establecimientos de empaque de fruta fresca (*packings*), responsables de empacar la fruta adecuadamente y de transportarla en condiciones adecuadas hasta su comercialización dentro de la Argentina o para su exportación (IDEP, 2024). La Figura 2.6 muestra la distribución geográfica de las citrícolas en la provincia (M.E.P., 2023).

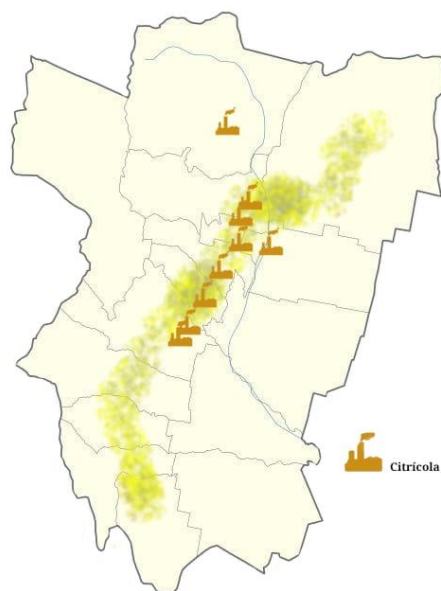


Figura 2.6 - Distribución de las citricolas en la provincia (figura adaptada de M.E.P., 2023)

Los cítricos pasan por un proceso de extracción de jugo que generalmente se lleva a cabo mediante máquinas que exprimen la fruta (extractoras). El resultado de este proceso es el jugo natural de limón. Este jugo puede pasar por procesos de clarificación para eliminar sólidos, pulpa u otras impurezas presentes en el líquido, lo cual se logra mediante filtración y ultrafiltración. Normalmente el jugo, ya sea turbio o clarificado, se comercializa en su forma concentrada, para lo cual se lleva a cabo un proceso de evaporación al vacío en múltiples efectos que reduce el contenido de agua. En las extractoras, ya sea por perforación de la cáscara o por rallado, se extrae el aceite esencial (Cerutti y Neumayer, 2004) en forma de emulsión acuosa. El aceite esencial se separa del agua, en frío, en un tren de centrífugas. Por su parte, la cáscara remanente del proceso de extracción se lava y seca para obtener cáscara deshidratada. Este proceso implica la eliminación del contenido de agua de la cáscara, generalmente mediante el uso de secadores rotativos.

El jugo concentrado, el aceite esencial y la cáscara deshidratada, se envasan de diferentes formas, para ser distribuidos tanto en el mercado nacional como en el mercado internacional.

Durante el procesamiento de la fruta en la industria, se obtiene un efluente industrial cuyas características se detallarán en la sección siguiente.

### 2.3.3 Residuos y Efluentes: poda y efluente de la citrícola

En cuanto a los residuos con potencial energético en esta industria, y que se considerará su aprovechamiento en esta Tesis, se tienen los residuos de la poda de las plantaciones de limones y el efluente líquido de la citrícola (Ver Figura 2.5).

Como se mencionó, en lo que respecta subsistema Campo de limón, se genera una biomasa residual, llamada poda, que se puede utilizar como una fuente de energía renovable para generar electricidad o calor. La biomasa de poda de limón consiste en los restos de los árboles de limón después de la poda, como ramas, hojas y otros materiales vegetales. La cantidad que se genera depende de varios factores, como la edad de la planta, el método de cultivo y las prácticas de manejo que se aplican.

La biomasa de poda de limón se puede chipear y quemar directamente en una caldera para generar calor, para luego usarse este calor para calefacción o para alimentar turbinas de vapor que generen electricidad. La humedad es una variable importante en el contenido energético de la biomasa de poda de limón. El poder calorífico es relativamente bajo en comparación con otros combustibles sólidos, como el carbón o la madera.

Así como el RAC y el bagazo —residuos sólidos de la industria sucroalcoholera— tienen beneficios ambientales potenciales si se usan como fuente de energía, la poda de limón también los tiene. Su uso como generador de energía hace que se reduzca la necesidad de otras fuentes de energía no renovables, disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Hay que tener en cuenta que es posible que se requiera cierto procesamiento de la biomasa de poda de limón, como trituración o secado, para mejorar su eficiencia y manejo.

Para ver su conveniencia, se debe realizar un análisis detallado considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales, conjuntamente.

El residuo de poda de limón tiene un poder calorífico aproximado de 13.500 kJ/kg (Carrillo-Parra *et al.*, 2020). Sin embargo, es importante tener en cuenta que este valor varía apreciablemente en función de la composición específica de la biomasa y el contenido de humedad.

El efluente citrícola es un efluente cuyas características principales son que posee alta carga orgánica, alta cantidad de sólidos suspendidos, bajo pH y alto contenido de nitrógeno

y fósforo, lo que lo hace inadecuado para ser volcado a los cursos de agua sin recibir un tratamiento previo. Para poder aprovechar el potencial energético de este efluente, previamente debe ser tratado en un digestor anaeróbico (en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno), para producir biogás (compuesto principalmente por metano, 50-70% y dióxido de carbono junto con trazas de otros gases como nitrógeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno). El metano es el componente principal y es el que proporciona el valor energético del biogás. Este biogás se alimentará a un sistema de cogeneración de energía en el cual se obtendrá electricidad y calor. En este sistema también se generará un subproducto llamado digestato, que es un material orgánico líquido rico en nutrientes que puede utilizarse como fertilizante.

La cantidad de biogás producido a partir del efluente de una citrícola puede variar dependiendo de varios factores, como el tamaño de la planta de procesamiento, la cantidad y composición de los residuos de cítricos, el sistema de digestión anaeróbica utilizado y las condiciones operativas. En general, el contenido de materia orgánica de estos efluentes es relativamente alto, lo que los convierte en una buena fuente de biogás. Se estima que, en promedio, se pueden obtener alrededor de 25 a 40 metros cúbicos de biogás por tonelada de efluente tratado en un sistema de digestión anaeróbica (Wambeck, 2007).

En este trabajo no se tendrá en cuenta el tratamiento previo que debería recibir el efluente de la citrícola antes de la digestión anaeróbica para mejorar la producción de biogás. Esto puede incluir la separación de sólidos, el ajuste del pH o la adición de cosustratos para equilibrar la relación carbono/nitrógeno.

La cantidad de energía que se puede obtener a partir de biogás de efluente de citrícola depende de varios factores, incluyendo la cantidad y calidad del biogás producido, así como el rendimiento del sistema de conversión de biogás en energía utilizable. El contenido energético del biogás varía con su composición, siendo el metano el componente más importante en términos de valor energético. Para estimar la energía obtenida a partir del biogás, se considera su composición en metano y el poder calorífico del metano, que es de aproximadamente 35,9 MJ/m<sup>3</sup>. Se estima que la eficiencia de la producción de electricidad de los generadores alimentados con biogás puede estar en el rango del 30 al 40%.

## 2.4. La Industria Papelera

A nivel mundial, la industria del papel es un pilar fundamental en la sociedad y ha constituido un medio de comunicación y expresión a lo largo de la historia, además de otros usos importantes del papel como en el embalaje de productos, higiene y materiales de construcción.

La Argentina se destaca como un país clave en la producción de papel. La industria nacional de papel es diversa y abarca una amplia gama de productos y procesos. Desde la producción de pasta de celulosa y papel *tissue* hasta la fabricación de papel de impresión y escritura, las papeleras han demostrado su capacidad para adaptarse a las demandas del mercado y ofrecer productos de alta calidad, tanto al mercado interno como a los mercados internacionales (Bercovich *et al.*, 1994). En los últimos años, la industria papelera argentina ha hecho una apuesta a la sostenibilidad, mediante el uso de tecnologías avanzadas y eficientes y el uso de energías renovables, han permitido reducir el consumo de agua y energía de origen fósil, contribuyendo de esta manera a la preservación del medioambiente (Toczyłowska-Mamińska, 2017).

Desde el punto de vista técnico, el papel se puede fabricar a partir de diferentes materias primas, siendo las dos más comunes la madera y el bagazo, que en ambos casos involucran una combinación de tecnología, maquinaria especializada y procesos químicos en la obtención del papel.

La producción de papel a partir de la madera es el método más extendido en la industria papelera mundial. La madera utilizada puede provenir de árboles de crecimiento rápido, como el eucalipto, el pino o el abeto. Este tipo de proceso tiene una serie de desventajas, como ser un mayor impacto ambiental en comparación con otras fuentes de materia prima, ya que implica la tala de bosques comerciales. Por otra parte, los árboles utilizados para la producción de papel a partir de madera requieren tiempo para crecer y ocupan espacio en comparación con otras fuentes de materia prima, como el bagazo. Pero la principal ventaja que tiene el uso de esta materia prima es que resulta ser una fuente de materia prima de suministro continuo, soslayando la regeneración de los factores productivos, garantizando una producción más estable y a largo plazo.

### 2.4.1 Proceso

El proceso que se describirá brevemente (ver Figura 2.7), y que se tendrá en cuenta en el caso de estudio de esta Tesis, es el de producción de papel a partir de bagazo basado en Fleck Gallas (2009). Como se expuso anteriormente, el bagazo es un residuo fibroso de la industria azucarera o sucroalcoholera, que se genera después de extraer el jugo a la caña de azúcar. Una vez recolectado el bagazo, se lleva a la planta de producción de papel y antes de que pase a su procesamiento, se lo somete a una serie de etapas:

**Trituración y desfibración:** el bagazo de caña se tritura en pequeñas partículas para facilitar el proceso de separación de las fibras. Luego, se somete a un proceso de desfibración, donde las partículas de bagazo se separan en fibras individuales. Esto se puede lograr mediante métodos mecánicos o químicos. En este trabajo se considerará la metodología química.

**Lavado y depuración:** Las fibras de bagazo desfibradas se someten a una serie de etapas de limpieza y de eliminación de impurezas. Esto implica la separación de materiales como piedras, metales y otros contaminantes que puedan estar presentes en el bagazo.

**Proceso de cocción:** Las fibras de bagazo se someten a un proceso de cocción en el que se añaden productos químicos, como hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, en un recipiente conocido como digestor. La cocción tiene como objetivo ablandar las fibras y separar la lignina, un compuesto que proporciona rigidez a las fibras de la planta. Durante esta etapa se genera un efluente líquido, llamado licor negro, que contiene disueltos ciertos componentes del bagazo, y se separa la celulosa, que es el principal componente utilizado para fabricar papel. El licor negro es una mezcla compleja y viscosa que contiene lignina residual, hemicelulosas, azúcares, productos químicos inorgánicos y otros compuestos orgánicos. Aunque el licor negro es considerado un subproducto, tiene un valor significativo en la industria papelera debido a sus componentes y contenido energético.

**Blanqueo:** Después de la cocción, las fibras se someten a un proceso de blanqueo para eliminar cualquier residuo de lignina y otras impurezas que puedan afectar la calidad del papel final, en particular su color. El blanqueo se realiza mediante el uso de productos químicos como peróxido de hidrógeno o hipoclorito de sodio. También se agrega carbonato

de calcio, como carga mineral, encolantes y aditivos de acuerdo al papel específico a producir.

**Formación de hojas de papel:** Las fibras blanqueadas se mezclan con agua para formar una suspensión acuosa conocida como pulpa. Esta pulpa se distribuye uniformemente sobre una pantalla plana o cilíndrica, donde el agua drena y las fibras se entrelazan para formar una hoja de papel en proceso.

**Prensado y secado:** La hoja de papel en proceso se pasa a través de rodillos de prensado, que eliminan el exceso de agua y comprimen las fibras para formar una hoja más densa. Luego, la hoja se seca mediante el uso de secadores industriales.

**Acabado y corte:** Una vez que el papel está seco, se somete a procesos de acabado para obtener las características deseadas, como suavidad, brillo y resistencia. Luego, el papel se corta en hojas de tamaño estándar o se enrolla en rollos, dependiendo de los requisitos de los clientes sobre el producto final.

**Embalaje y distribución:** El papel terminado se embala y se prepara para su distribución.

El proceso de obtención de papel a partir del bagazo puede variar según los equipos y las tecnologías utilizadas en cada planta de producción. En el caso de obtención de la pulpa de celulosa, existen diferentes métodos como el proceso *kraft* o químico y el proceso de pulpa mecánica, no todos generalizados para el procesamiento del bagazo.

El proceso *kraft*, conocido por su eficiencia en la producción de pulpa de alta calidad, implica la cocción del bagazo con una mezcla de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio, lo que permite eliminar la lignina y obtener una pulpa más resistente. Por otro lado, el proceso mecánico, que incluye métodos como la molienda, es menos costoso y más simple, pero produce pulpa de menor calidad y resistencia. La metodología considerada en este caso de estudio será el proceso químico.

Dado que el bagazo es un subproducto de la caña de azúcar, su uso para la producción de papel representa una forma de aprovechamiento que competiría con su uso para generar energía por combustión en calderas.

La producción de papel a partir de bagazo podría presentar ventajas respecto a la madera, como tener un menor impacto ambiental, reduciendo la presión sobre los recursos forestales y promoviendo el uso eficiente de los subproductos agrícolas.

Dentro de las desventajas, se puede mencionar que la calidad y las características del papel son diferentes en comparación con el papel producido a partir de madera, lo que puede limitar su uso a ciertos productos.

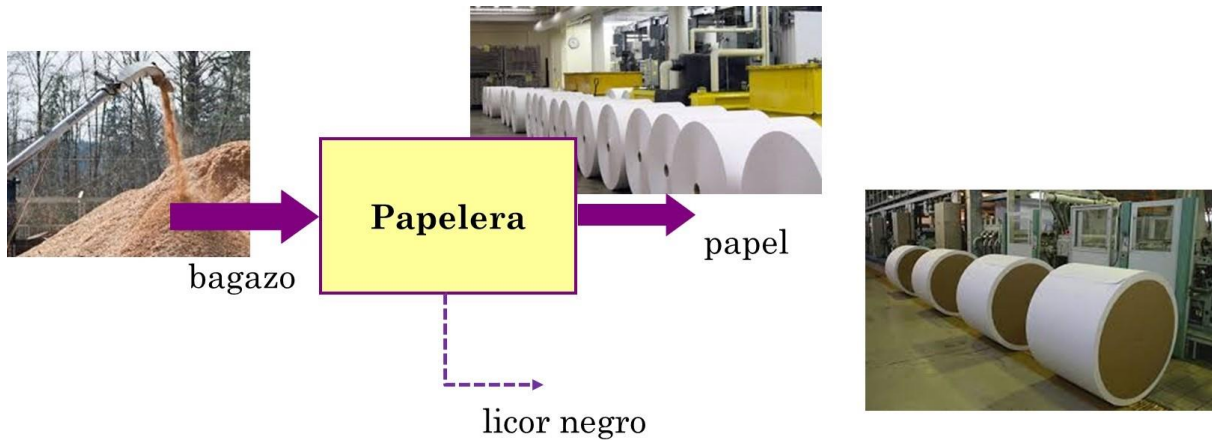


Figura 2.7 - Esquema simplificado de la actividad papelera

#### 2.4.2 Residuos y Efluentes: licor negro

En la etapa de cocción, como se mencionó anteriormente se genera un efluente llamado licor negro. El licor negro tiene un alto contenido de lignina y otros componentes orgánicos, lo que le confiere un poder calorífico apreciable.

El poder calorífico del licor negro tiene un valor aproximado de 14.150 kJ/kg (Gavrilescu, 2008). Este es una medida del contenido energético del licor negro y representa la cantidad de calor liberado cuando se quema completamente. El poder calorífico del licor negro puede variar en función de diversos factores, incluida la composición química específica del licor negro y las condiciones de combustión.

El licor negro se utiliza a menudo como una fuente de energía en las plantas de pulpa y papel. Se quema en calderas de recuperación para generar vapor (alimentando a las turbinas de vapor), el cual luego se utiliza para generar electricidad y proporcionar calor para el proceso de producción. El objetivo de esta práctica es aprovechar el poder calorífico del licor negro, reduciendo la dependencia de fuentes de energía externas y mejorar la eficiencia energética en la industria.



Es importante destacar que el uso del licor negro como fuente de energía no solo es beneficioso porque disminuye la cantidad de residuos generados por su reutilización, sino que también ayuda a reducir las emisiones de GEI asociadas con la producción de energía en la industria de papelera.

## 2.5 Descripción del Esquema Potencial de Simbiosis Industrial

La economía de la provincia de Tucumán depende fuertemente de dos agroindustrias: de la caña de azúcar y del limón. Estas industrias tienen potencial para hacerse más sustentables, tanto desde el punto de vista económico como ambiental (Machin Ferrero *et al.*, 2021a,2021b) y social, si se disponen a compartir recursos materiales y energéticos entre ellas (Nishihara Hun *et al.*, 2017).

Las tres plantas productivas que se tienen en cuenta para materializar la propuesta de esta tesis son dos relacionadas con la caña de azúcar (sucroalcoholera y papelera) y otra relacionada con el limón (citrícola). Lo que en este trabajo se propone es diseñar un esquema de SInd entre estas industrias, identificando, si fuera el caso, los beneficios que se obtienen, si estas trabajan separadamente frente a la posibilidad de que trabajen integradamente, intercambiando flujos de materiales y energía. Esta mejora no es trivial por lo que se debe analizar cuantitativamente esta alternativa. Por otra parte, si bien se pueden encontrar diversas formas de intercambio, en esta Tesis se propone determinar la mejor estrategia de intercambio usando herramientas de optimización de procesos. La Figura 2.8 representa esquemáticamente las industrias tenidas en cuenta, sus principales corrientes de entrada y salida para cada uno de los procesos y la Figura 2.9 muestra los sistemas de cogeneración acoplados a cada una de las industrias.

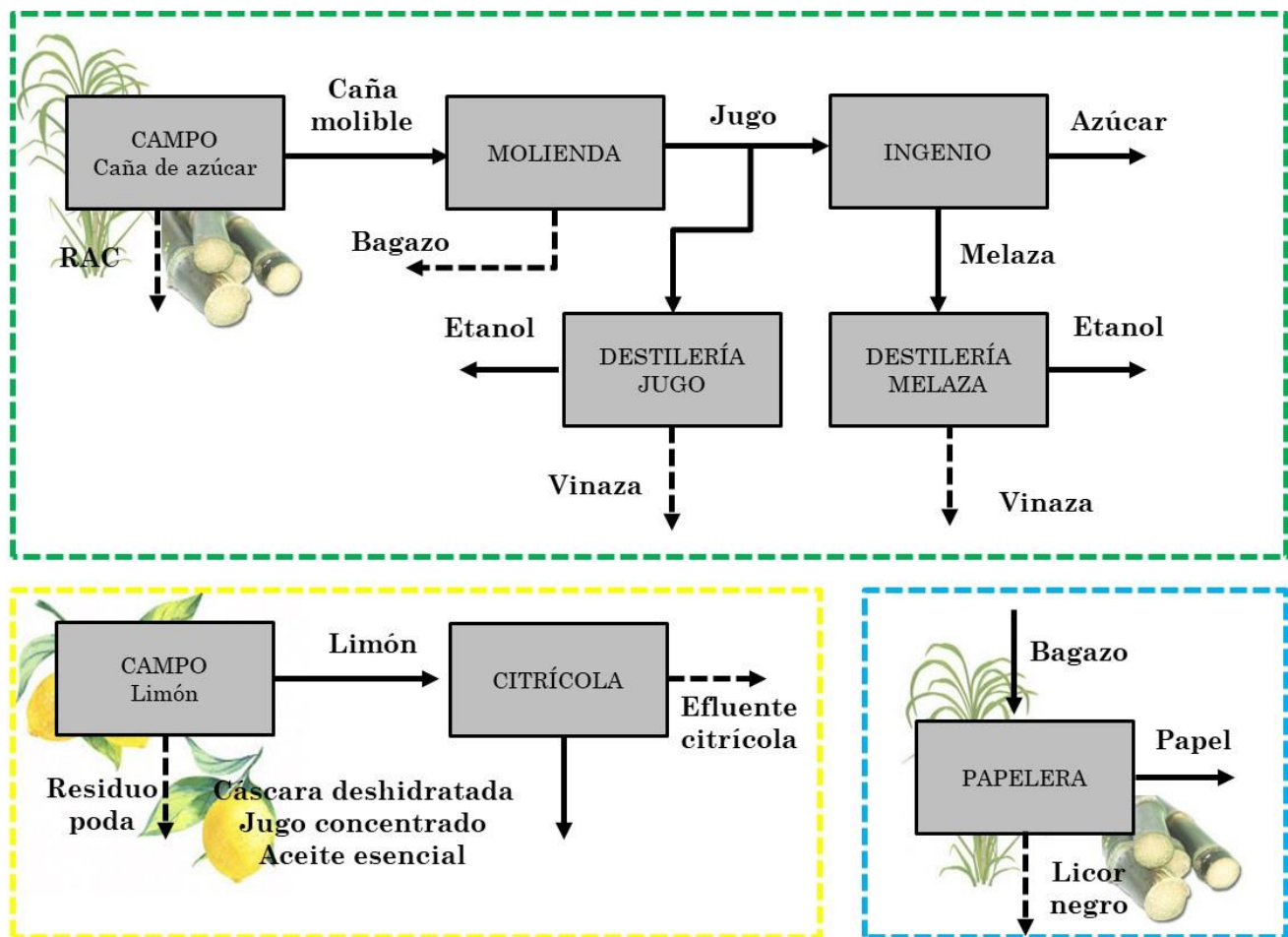


Figura 2.8 - Esquema simplificado de las tres industrias operando de manera independiente, antes de la integración

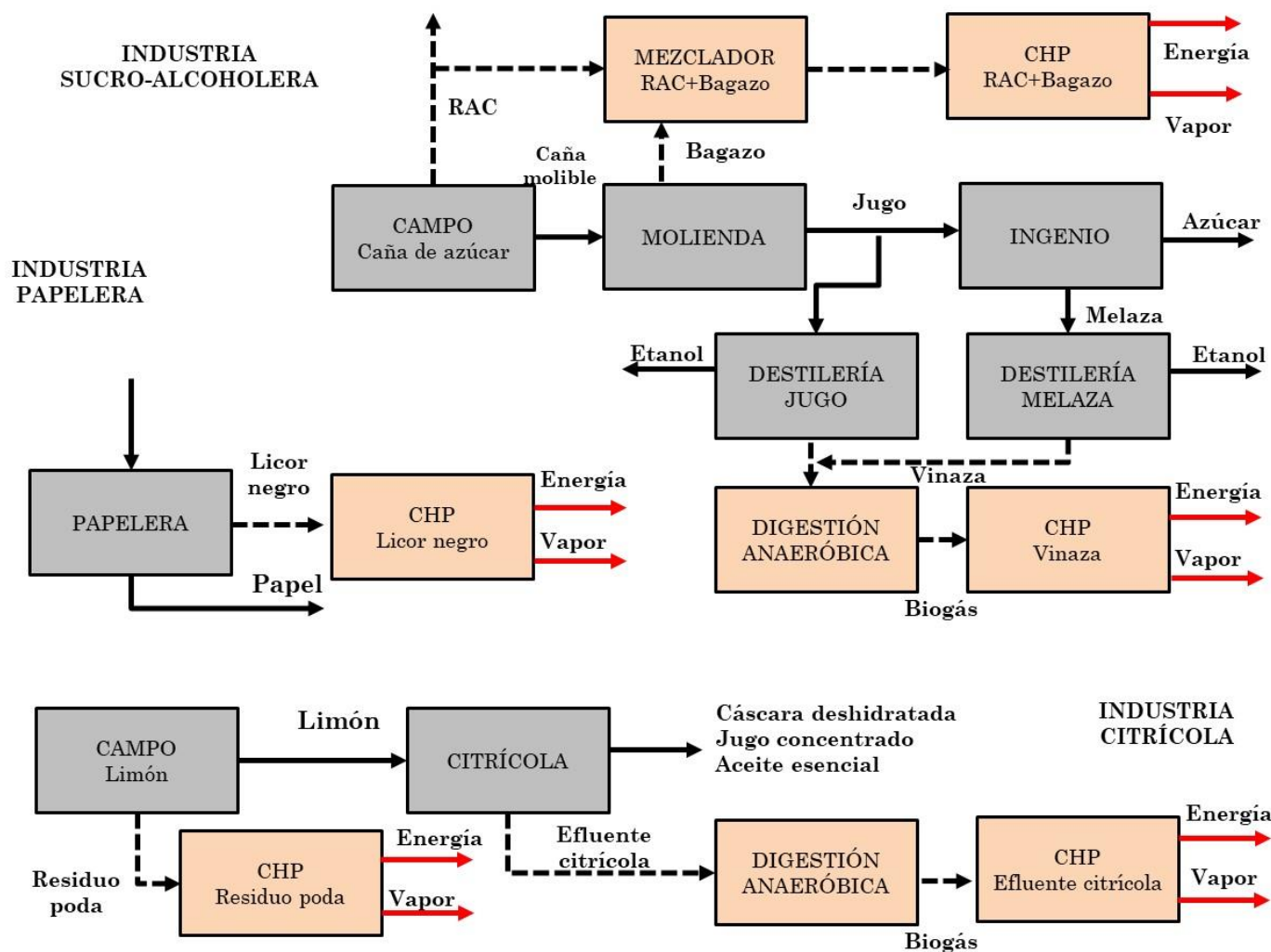


Figura 2.9 - Esquema de las industrias con los productos principales y sus sistemas de cogeneración acoplados

Una característica distintiva del modelo que se propone es que ofrece la posibilidad de instalar tecnologías para producir biogás a partir de desechos líquidos (efluentes líquidos industriales como vinaza y efluente de la citrícola) o para producir energía eléctrica a partir de residuos sólidos (materiales lignocelulósicos como RAC, bagazo, residuos de poda, licor negro), de manera tal de reducir el consumo de energía externa de las industrias involucradas.

Se han identificado y descrito las corrientes de biomasa residuales que poseen un potencial de energía y de materia, para ser aprovechada en el tejido productivo constituido por estas tres industrias. Resumiendo, en el caso de la industria sucroalcoholera, se identifican en el sector de campo el RAC (residuo agrícola de cosecha), mientras que en el

sector industrial el bagazo y el efluente líquido generado en la producción de bioetanol (vinaza); para la industria citrícola, se identificaron los residuos de la poda de los limoneros y el efluente industrial de la citrícola; mientras que, para la industria papelera, el efluente llamado licor negro.

Tabla 2.1 - Materia prima, azúcar, etanol, energía y residuos generados por una planta sucroalcoholera típica.

<b>Industria sucroalcoholera</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caña bruta	1.577.012*	t/año
Caña molible	1.339.857	t/año
RAC	237.155	t/año
Bagazo	355.330	t/año
Jugo (ingenio)	1.138.878	t/año
Azúcar	129.418	t/año
Melaza	49.179	t/año
Etanol (dest.melaza)	13.485	t/año
Vinaza (dest.melaza)	222.189	t/año
Jugo (dest. jugo)	200.979	t/año
Etanol (dest.jugo)	12.856	t/año
Vinaza (dest.jugo)	211.829	t/año
Energía (molienda)	45.555	MWh/año
Vapor (molienda)	239.834	t/año
Energía (ingenio)	18.377	MWh/año
Vapor (ingenio)	6.067.116	t/año
Energía (dest.jugo)	2.173	MWh/año
Vapor (dest.jugo)	63.702	t/año
Energía (dest.melaza)	2.279	MWh/año
Vapor (dest. melaza)	66.817	t/año

\*Los datos fueron proporcionados por una empresa sucroalcoholera de Tucumán

Determinar la configuración óptima de la SInd para este conjunto de plantas candidatas a trabajar integradamente es el objetivo principal, bajo ciertas restricciones de manera de maximizar las ganancias económicas y de minimizar los impactos ambientales.

En las Tablas 2.1 a 2.3, se consignan las cantidades de materia prima y las cantidades de producto principal asociadas a cada industria. Asimismo, se muestran las cantidades de biomasa residual y energía requerida en cada uno de los procesos unitarios y operaciones implicadas.

Tabla 2.2 - Materia prima, productos principales, energía, residuos generados por una planta citrícola típica.

Industria citrícola	Valor	Unidad	Referencia
Limón	150.000	t/año	M.H. (2018)
Limón (fruta fresca)	56.250	t/año	M.H. (2018)
Limón (industria	93.750	t/año	M.H. (2018)
Residuo poda	10.000	t/año	Díaz (2016)
Jugo concentrado	5.428	m <sup>3</sup> /año	Datos proporcionados por una empresa citrícola de Tucumán
Cáscara deshidratada	5.380	t/año	
Aceite esencial	429	t/año	
Efluente citrícola	328.152	m <sup>3</sup> /año	
Vapor citrícola	17.914	t/año	
Energía citrícola	2.084	MWh/año	

Tabla 2.3 - Materia prima, papel, energía requerida y efluente generado por una planta productora de papel típica.

Industria papelera	Valor	Unidad	Referencia
Bagazo	263.849	t/año	Fleck Gallas (2009)
Papel	108.446	t/año	
Efluente papelera (licor negro)	2.591.859	m <sup>3</sup> /año	
Energía papelera	59.645	MWh/año	

### 2.5.1 Sistema de Cogeneración de Energía

Las biomasas residuales generadas en los procesos descritos anteriormente son las que se analizarán desde el punto de vista de su aprovechamiento energético, y se las clasificará según sean residuos sólidos o efluentes líquidos.

En ambos casos se necesitará disponer de una planta de cogeneración de energía, también conocida como CHP, por sus siglas en inglés *Combined Heat and Power*.

El CHP es un sistema energético en el que se produce simultáneamente electricidad y calor útil a partir de una dada fuente de energía. Esto se logra a través de un proceso que aprovecha el uso de la energía generada (Lozano y Ramos, 2007) Los sistemas de cogeneración alcanzan rendimientos globales de aproximadamente el 85%, lo que los convierte en una solución energética altamente eficiente. (Verdezoto *et al.*, 2021).

La cogeneración utiliza la energía térmica de la biomasa residual para generar vapor en la caldera, que posteriormente alimenta a turbogeneradores para la producción de electricidad. El vapor residual, o de escape del turbogenerador se destina al proceso productivo, mientras que la energía eléctrica generada se utiliza por ejemplo internamente o puede llegar a ser vendida a la red de energía (Figura 2.10).

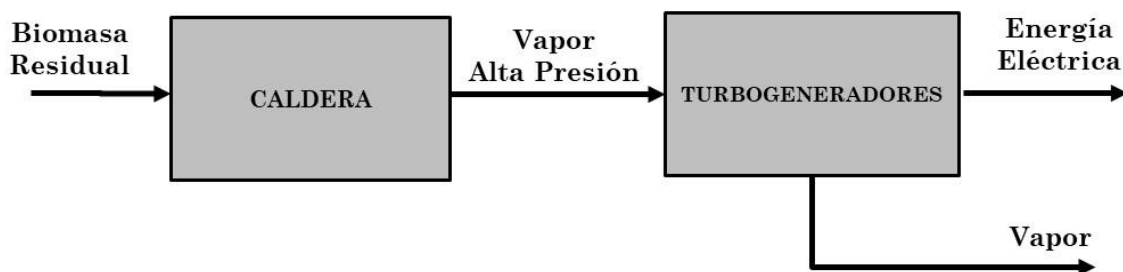


Figura 2.10 - Esquema simplificado de sistema de cogeneración de energía (ASOCAÑA, 2017)

#### 2.5.1.1 Potencial energético de los residuos sólidos

En este apartado lo que se considera es la cogeneración de energía a partir de los residuos sólidos que se generan en las tres industrias: RAC, bagazo, residuos de poda y en particular,

el licor negro, el cual se lo clasifica como un residuo sólido, por su composición y propiedades físicas.

Las biomasas residuales sólidas agrícolas, como los restos de cultivos, las hojas, las ramas y otros desechos vegetales, constituyen una valiosa fuente para la producción de electricidad y calor, simultáneamente. Este enfoque de cogeneración proporciona beneficios económicos y ambientales, al aprovechar los recursos naturales, disminuir la emisión de GEI y reducir la dependencia de combustibles fósiles. A su vez, es una práctica cada vez más utilizada en la industria para aprovechar los subproductos vegetales y convertirlos en energía útil.

Como primer paso, estos residuos deben ser acopiados para su posterior procesamiento, como la trituración, el tamizado u otras técnicas de preparación para reducir el tamaño de los residuos y facilitar su manejo. Luego estos residuos pasan a un sistema como el que se observa en la Figura 2.10.

En la Tabla 2.4 se muestran los poderes caloríficos de los residuos sólidos considerados en esta Tesis, para cada industria, y se incluye, a modo ilustrativo y para tener una referencia de comparación, los poderes caloríficos de la madera y del gas natural.

Tabla 2.4 - Poder calorífico inferior de residuos sólidos de las industrias consideradas

<b>Poder calorífico inferior</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia</b>
RAC	13.586	kJ/kg	Golato <i>et al.</i> (2017)
Bagazo	6.853	kJ/kg	Golato <i>et al.</i> (2017)
Residuo de poda	13.500	kJ/kg	Carrillo-Parra <i>et al.</i> (2020)
Licor negro	14.150	kJ/kg	Gavrilescu (2008)
Madera	14.000	kJ/kg	Curo Antezana (2019)
Gas natural	39.900	kJ/kg	Villaflor <i>et al.</i> (2008)

#### 2.5.1.2 Potencial energético de los efluentes líquidos

La cogeneración de energía a partir de biomasas residuales líquidas resultan ser una buena opción también para contribuir a la sostenibilidad energética y a la reducción del impacto

ambiental de las industrias. En este tipo de tecnología, el proceso básicamente consta de dos etapas importantes. En la primera de ellas, se obtiene biogás a partir del efluente líquido, mientras que, en la segunda etapa, se obtiene energía y el vapor a partir del biogás generado previamente, como se muestra en la Figura 2.11. Tanto la vinaza como el efluente de la citrícola, son efluentes con una alta carga orgánica de nutrientes que los convierten en una fuente potencial de energía.

Ambos efluentes se someten a un proceso de digestión anaeróbica, donde los microorganismos descomponen la materia orgánica presente en ausencia de oxígeno. Este proceso produce biogás, fuente renovable que puede ser utilizada para la generación de electricidad y calor, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. El biogás producido durante la digestión anaeróbica se utiliza como combustible en un motor de cogeneración de gas (EEAOC, 2023).

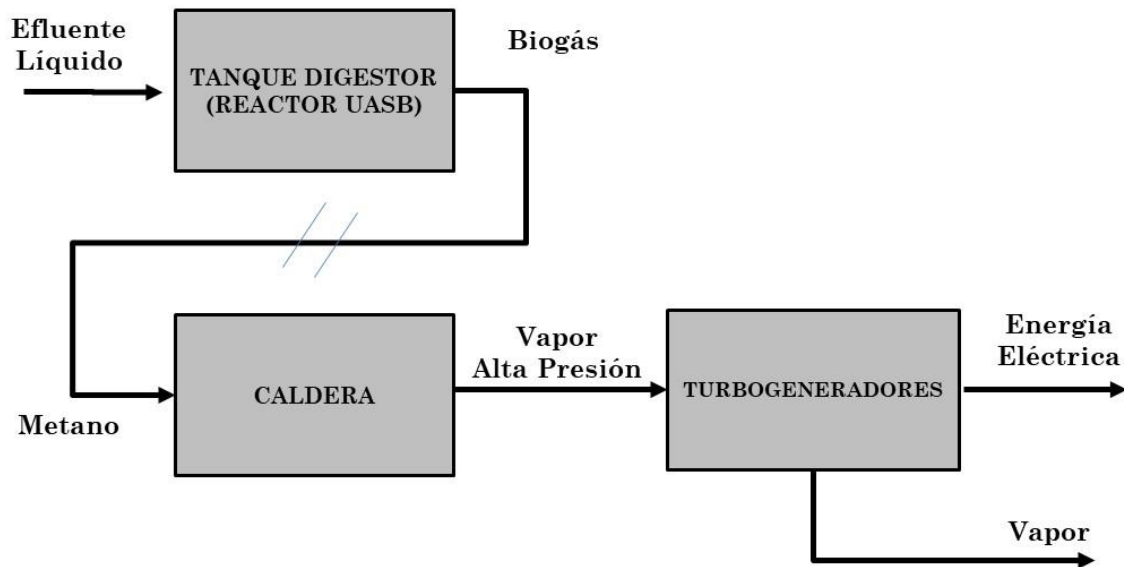


Figura 2.11 - Esquema simplificado de obtención de energía para los efluentes líquidos

En la Tabla 2.5 se adjunta información sobre los volúmenes de metano que se generan a partir de los efluentes líquidos en estudio y en la Tabla 2.6, la energía que potencialmente se obtiene a partir del gas metano que ingresa al sistema de cogeneración



Tabla 2.5 - Volumen de metano que se genera a partir de la vinaza y del efluente de la citrícola

Metano generado	Valor	Unidad	Referencia
Vinaza	17	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> vinaza	(EEAOC, 2023)
Efluente citrícola	3	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> efluente citrícola	

Tabla 2.6 - Energía generada a partir del metano que se obtiene de la vinaza y del efluente de la citrícola

Energía generada	Valor	Unidad	Referencia
Metano vinaza	21.6	MJ/m <sup>3</sup>	(EEAOC, 2023)
Metano efluente citrícola	21.6	MJ/m <sup>3</sup>	

### 2.5.2 Potencial de materia de las biomásas residuales

De las corrientes de residuos que se analizan en el caso de estudio, el bagazo es el que tiene un potencial de ser aprovechado o reutilizado como materia prima, es decir desde el punto de vista de masa, en la industria papelera para obtener papel.

Como se vio anteriormente, el bagazo es un residuo de la producción de azúcar a partir de la caña de azúcar al que se le reconoce su valor como fuente de fibra para la fabricación de papel, lo que ha llevado al desarrollo de tecnologías y procesos para su aprovechamiento.

Se compone principalmente de celulosa, lignina y hemicelulosas. El aprovechamiento de esta biomasa residual como materia prima en otras industrias es un enfoque prometedor que busca maximizar el valor de los residuos orgánicos, reducir la generación de residuos y minimizar el impacto ambiental.

La reutilización del bagazo será un aspecto más a estudiar y a tener en cuenta en los modelos de optimización de esta Tesis, en los que se espera que el modelo matemático indique si conviene usar y cuánto bagazo en la fabricación del papel y cuánto en la generación de energía eléctrica, en los sistemas de cogeneración vistos anteriormente.

## 2.6 Beneficios Ambientales

El aprovechamiento de las biomásas residuales generadas por las industrias representa una valiosa oportunidad para promover la sostenibilidad ambiental y energética. Los

residuos biomásicos, como el RAC, bagazo, vinaza, residuo de poda, efluente de la citrícola, licor negro, pueden brindar considerables beneficios ambientales si se los aprovecha adecuadamente (Galán Rivero, 2016)

En primer lugar, el aprovechamiento de las biomásas residuales contribuye a la reducción de emisiones de GEI al momento de la quema del combustible, en comparación con sus contrapartes fósiles, ya que devuelven CO<sub>2</sub> biogénico a la atmósfera. En el caso de los efluentes líquidos, si se aprovecha el biogás generado a partir de la descomposición de estos residuos mediante digestión anaeróbica, se evita la liberación directa de metano al medio ambiente, un gas con un alto potencial de calentamiento global. Esto no solo ayuda a disminuir el impacto ambiental en el cambio climático, sino que también reduce la dependencia de los combustibles fósiles no renovables, promoviendo la transición hacia una economía baja en energías no renovables.

En segundo lugar, el aprovechamiento de las biomásas residuales contribuye a la gestión sostenible de los desechos industriales. En lugar de tratarlos como residuos, se les otorga valor como recursos energéticos y de masa y es por ello que en la Tesis se los considera subproductos. Al convertir estos residuos en biogás, en energía, en materia prima y otros subproductos útiles, como fertilizantes orgánicos, se cierran los ciclos de materiales y técnicos, minimizando la generación de residuos y promoviendo la economía circular. Se minimiza el riesgo de contaminación del agua y el suelo, ya que reduce la presión sobre los vertederos y se mejora la calidad ambiental en las áreas industriales.

En tercer lugar, el aprovechamiento de las biomásas residuales de la industria fomenta la generación de energía renovable, se diversifica la matriz energética, disminuyendo la dependencia de los combustibles fósiles y promoviendo una mayor autosuficiencia energética. Esta energía renovable puede ser utilizada para alimentar procesos industriales, generar electricidad o incluso, en el caso de que se produzca un sobrante, vender a la red eléctrica externa, brindando beneficios sociales, ambientales y económicos (Pfau *et al.*, 2019).

Aunque el aprovechamiento de las biomásas residuales presenta beneficios ambientales, la viabilidad económica del proyecto es también un desafío importante. Será necesario realizar un análisis económico para evaluar la viabilidad financiera.

## 2.7 Desafíos de Usar las Biomosas Residuales

Así como en el apartado anterior se trató sobre los beneficios ambientales que tienen el uso de las biomosas residuales, en este apartado la intención es comentar brevemente sus desventajas, limitaciones y desafíos a enfrentar al momento de seleccionar esta opción de reúso de las corrientes residuales, tanto para su aprovechamiento energético como de materia.

La disponibilidad y calidad de las biomosas residuales pueden variar según la industria y los procesos de producción específicos. Algunas industrias pueden generar grandes volúmenes de biomosas residuales, como ser grandes volúmenes de vinaza, mientras que otras pueden tener cantidades limitadas, por lo que el almacenamiento o el acopio de ellas también es un punto a tener en cuenta, por las inversiones en infraestructura y tecnología que se necesiten.

Otro desafío a encarar es la estacionalidad de ciertos residuos, por ejemplo, la disponibilidad de bagazo está estrechamente relacionada con la temporada en la que funciona el ingenio, o en el caso del RAC y de los residuos de poda, dependerá del momento en que se produzca esta tarea.

Además, la composición y la calidad de las biomosas varían a menudo notablemente en términos de contenido de humedad, contenido de nutrientes y contenido energético. Estas variabilidades pueden afectar la eficiencia del proceso de aprovechamiento y requerir adaptaciones en la tecnología utilizada.

La selección de la tecnología de conversión adecuada es crucial para maximizar el aprovechamiento de las biomosas residuales. La elección de la tecnología dependerá de factores como la composición de la biomasa, el volumen de residuos generados y los requerimientos energéticos específicos de la industria. Identificar y adoptar la tecnología apropiada puede ser un desafío técnico y económico.

El aprovechamiento de las biomosas residuales puede generar subproductos, como digestato o cenizas, que requieren un manejo adecuado. Por ejemplo, el digestato resultante de la digestión anaeróbica puede contener nutrientes valiosos, pero también puede contener compuestos no deseables. Es importante implementar sistemas de gestión adecuados para estos subproductos, como su tratamiento para su uso como fertilizantes o

su disposición segura. La gestión de subproductos puede requerir inversiones adicionales en infraestructuras y tecnologías adecuadas.

## 2.8 Referencias

- Anschau, R., Flores Marco, N., Carballo, S., Hilbert, J. (2010). Evaluación del potencial de producción de biocombustibles en Argentina, con criterios de sustentabilidad social, ecológica y económica, y gestión ordenada del territorio. El caso de la caña de azúcar y el bioetanol. INTA.
- Ariza Calvo, D., Rincón Ravelo, M., Paz Cadavid, C. A., Gutiérrez-Montero, D. J. (2019). Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia. Revista Colombiana de Biotecnología, 21(2), 118-130. <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79555>
- ASOCAÑA, Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, (2017). <https://www.asocana.org/documentos/562017-bc7b477d-00ff00,000a000,878787,c3c3c3,0f0f0f,b4b4b4,ff00ff,2d2d2d.pdf>
- Bercovich, N., Chidiak, M. (1994). Reestructuración industrial y gestión ambiental en el sector de celulosa y papel en Argentina. Centro de Investigaciones para la Transformación. CENIT, Buenos Aires, Argentina.
- Carrillo-Parra, A., Núñez Retana, V., Prieto Ruiz, J., Garza Ocañas, F. (2020). Potencial energético de residuos de ocho cultivos agrícolas en México. Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Red Iberomasa. Universitat Politècnica de València.
- Centro azucarero argentino (CAA). <https://centroazucarero.com.ar/> (consultado en abril de 2023)
- Cerutti, M., Neumayer, F. (2004). Introducción a la obtención de aceite esencial de limón. Invenio: Revista de Investigación Académica, (12), 149-155.
- Curo Antezana, I. (2019). Poder calorífico del carbón de madera de tres especies forestales-Distrito Mariscal Cáceres-Huancavelica. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/5919>
- Díaz, G. (2016). Evaluación de una planta de gasificación de biomasa residual del cultivo del limón para el abastecimiento energético de una citrícola de Tucumán. Tesis de Maestría. Binacional en proyectos de ingeniería. Universidad Nacional de Tucumán, Hochschule Biberach.

- EEAOC. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Estado de situación y potencial de producción de biogás en la provincia de Tucumán, Mayo 2023.  
<https://www.eeaoc.gob.ar/wp-content/uploads/2023/07/Estado-de-situacion-y-potencial-de-produccion-de-biogas.pdf>
- EEAOC. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Gastos de plantación y producción en el cultivo de limón en Tucumán entre las campañas 2019/20 y 2023/24. Reporte agroindustrial. N° 318. 2024. ISSN 2346-9102.
- EEAOC. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán. Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2021 en Tucumán. Reporte agroindustrial. N° 217. 2021. ISSN 2346-9102.
- Federcitrus, 2021. Argentine Citrus Federation. The Argentine citrus industry.  
<https://www.federcitrus.org/estadisticas> (consultado en octubre de 2023).
- Fleck Gallas, J.C. (2009). Estudio de factibilidad económica del uso del bagazo de caña de azúcar para la obtención de papel de impresión y escritura en el Paraguay. Maestría en tecnología de la madera, celulosa y papel (orientación: celulosa y papel). Universidad Nacional de Misiones.
- Galán Riveros, X. F. (2016). Potencial energético de la biomasa residual agrícola en Colombia. Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América
- Gavrilesco, D. (2008). Energy from biomass in pulp and paper mills. Environmental Engineering and Management Journal, 5, 537-546.
- Giancola, S., Morandi, J., Gatti, N, Di Giano, S., Dowbley, M., Biaggi, M. (2012). Causas que afectan la adopción de tecnología en pequeños y medianos productores de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: enfoque cualitativo. Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales. INTA Ediciones. Estudios socioeconómicos de la adopción de tecnología; 01 (2012) ISSN: 2314-1727, 2362-6348. ISBN: 978-987-679-193-9.
- Golato, M. A., Feijóo, E. A., Franck Colombres, F. J., Paz, D., Cárdenas, G. J. (2017). Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bagaceras de Tucumán (Argentina). Revista industrial y agrícola de Tucumán, 94 (2), 21-31.  
[https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro\\_cadenas\\_de\\_valor\\_limon.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_cadenas_de_valor_limon.pdf)
- IDEP. Instituto de Desarrollo Productivo de Tucumán. <<https://idep.gov.ar/>> (consultado en octubre de 2024)

- Landa, R. I. (2014). Análisis de la producción y comercialización del limón en Argentina. <https://bibliotecadigital.uca.edu.ar/> (consultado en diciembre de 2022)
- Lozano, M. A., Ramos, J. (2007). Análisis energético y económico de sistemas simples de cogeneración. Información tecnológica, 18(5), 75-84. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642007000500010>
- Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., Nishihara Hun, A. L., Valdeón, D. H., Mele, F. D. (2021a) Water footprint assessment of lemon and its derivatives in Argentina: a case study in the province of Tucumán. International Journal Life Cycle Assessment, 26, 1505-1519. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-021-01939-5>
- Machin Ferrero, L.M., Araujo, P.Z., Valdeón, D. H., Nishihara Hun, A.L., Mele, F. D. (2021b) Water footprint of lemon production in Argentina. Science of the Total Environment, 816, 151614. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151614>
- Ministerio de Economía y Producción de Tucumán, M.E.P. Tucumán. <www.producciontucuman.gob.ar> (consultado en julio de 2023)
- Ministerio Hacienda, Presidencia de la Nación. Informe de cadena de valor de limón, julio 2018.
- Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D., Pérez, G. A. (2017). A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. The International Journal of Life Cycle Assessment, 22(4), 502-515. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>
- Nishihara Hun, A. L.; Mele, F. D.; Pérez, G. A. (2015). Perfil ambiental de la industria azucarera de la provincia de Tucumán obtenido a partir de la técnica del Análisis del Ciclo de Vida. Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales. INTA Ediciones. 2015 5(7), 62-75, 2015 (ISSN: 1853-7677).
- Nishihara Hun, A.L. (2014). Análisis de ciclo de vida y estudio de sensibilidad paramétrica de la industria del azúcar y del bioetanol a partir de caña de azúcar. Tesis de Maestría. Magíster en métodos numéricos y computacionales en ingeniería. Universidad Nacional de Tucumán.
- Pfau, S., Hanssen, S., Straatsma, M., Koopman, R., Leuven, R., Huijbregts, M. (2019). Life cycle greenhouse gas benefits or burdens of residual biomass from landscape management. Journal of Cleaner Production, Volume 20, 698-706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.001>.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGP), Ministerio de Economía Argentina. Informe de azúcar 2023.

[https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/HomeAlimentos/economias-regionales/producciones-regionales/informes/INFORME\\_DE\\_AZUCAR\\_2023.pdf](https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/HomeAlimentos/economias-regionales/producciones-regionales/informes/INFORME_DE_AZUCAR_2023.pdf)

(consultado en julio de 2025)

- Toczyłowska-Mamińska, R. (2017). Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 764-772. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.021>
- USDA 2021. United States department of agriculture. Foreign Agricultural Service. <https://www.fas.usda.gov/data/argentina-citrus-annual-5> (consultado en diciembre de 2022)
- Valeiro, A., Biaggi, C. (2019). Revisión crítica de la evolución tecnológica de la cosecha de la caña de azúcar en la Argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 45(1), 31-43.
- Valeiro, A., Portocarrero, R., Ullivarri, E., Vallejo, J., (2017) Los residuos de la Industria Sucro-alcoholera Argentina. *EEA INTA*, 3-9.
- Verdezoto Bayas, L. M., Parco Pilco, F. B., Jácome Pilco, C. R., Katan Kuja, W. A., Mora Morejon, A. N. (2021). Energía renovable a partir de la biomasa de la caña de azúcar. *Revista de Investigación Talentos*, 8(1), 9-26. <https://doi.org/10.33789/talentos.8.1.140>
- Villafior, G., Morales, G. V., Velasco, J. (2008). Variables significativas del proceso de combustión del gas natural. *Información tecnológica*, 19(4), 57-62. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642008000400008>
- Voora, V., Bermúdez, S., Larrea, C. (2020). Global market report: Sugar. Winnipeg, MB, Canada: International Institute for Sustainable Development.
- Wambeck, N. (2007). Biogas generation from POME and its application. *Revista Palmas*; Vol. 28 Núm. especial, (2007); 105-112.

---

# CAPÍTULO 3: Modelo de Optimización

*"La paciencia es la compañera de la sabiduría"*

*San Agustín*



## Resumen

Una economía circular es un sistema regenerativo en el que la entrada de recursos y la salida de desechos y emisiones, más las pérdidas de energía, se intentan disminuir al disminuir los consumos y en el que se promueven las recirculaciones de materiales y energía. Esto se puede lograr a través del diseño, el mantenimiento, la reparación, la reutilización, la refabricación, la restauración y el reciclaje, haciendo un claro contraste con una economía lineal que es un modelo de producción de extraer, fabricar y disponer. Se trata de un modelo económico cuyos principales objetivos desde lo ambiental son, disminuir los residuos generados y minimizar el uso de recursos naturales, sin dejar de lado lo económico. Es en este punto en el que aparece la simbiosis industrial (SInd) como el factor activador de la economía circular. En este capítulo se presenta el desarrollo del modelo de programación matemática de naturaleza lineal (LP del inglés *Linear Programming*), para resolver la SInd entre el conjunto de plantas candidatas a trabajar integradamente, y definidas en el capítulo anterior, teniendo en cuenta simultáneamente aspectos técnicos y económicos. Con la aplicación de este modelo, lo que se busca es tener una herramienta de apoyo en la toma de decisiones estratégicas sobre el tejido productivo involucrado.

### 3.1 Los Modelos Matemáticos de Optimización

Los modelos matemáticos de optimización se han consolidado como una herramienta clave para abordar problemas complejos en diversas áreas (Ehrgott *et al.*, 2005). Estos modelos permiten tomar decisiones, encontrando soluciones óptimas a distintos desafíos, entre los que se encuentran la optimización de los procesos industriales como se desarrolla en esta tesis (Linares *et al.*, 2001).

Los modelos de optimización representan una versión simplificada de problemas del mundo real (Coello, 2006) mediante la definición de sus diferentes elementos: variables de decisión, restricciones a verificar, y funciones-objetivo a optimizar, entre otros. Se utilizan técnicas y métodos matemáticos para encontrar la mejor solución posible a un problema determinado (Guillén-Gosálbez *et al.*, 2010). Esto permite maximizar objetivos deseados,

como los beneficios económicos, o minimizar los objetivos no deseados como los costos o los impactos ambientales (Gunantara 2018).

A menudo, los problemas de optimización consideran múltiples criterios simultáneamente y se analizan diferentes escenarios, llegando a obtener soluciones innovadoras, eficientes y en muchos casos con garantía de optimalidad.

Dentro de la optimización matemática, la optimización multiobjetivo (Grossmann *et al.*, 2010) es una rama en la que existen múltiples objetivos que deben ser considerados simultáneamente (Cheraghalipour *et al.*, 2018), buscando encontrar un conjunto de soluciones que equilibren de manera eficiente los diferentes objetivos. En la optimización tradicional —mono-objetivo—, en cambio, se busca encontrar la mejor solución para un solo criterio. Dentro de los problemas multiobjetivo, tienen especial interés aquellos casos en que los diferentes objetivos a optimizar son contradictorios entre sí, lo que significa que mejorar o maximizar un objetivo puede resultar en un deterioro o empeoramiento de otro. En esta tesis se plantea un modelo mono-objetivo que se desarrollará en este capítulo, el cual se extenderá luego hacia el caso multiobjetivo en el Capítulo 6.

El modelo mono-objetivo se compone básicamente de:

**Función objetivo:** es la expresión matemática que representa el criterio que se desea maximizar o minimizar. Es una función lineal o no lineal de las variables de decisión y parámetros involucrados.

**Variables de decisión:** son las incógnitas que se busca determinar para encontrar la solución óptima. Pueden ser variables continuas (conjunto de los números reales) o variables enteras.

**Restricciones:** son las condiciones o limitaciones que debe cumplir el modelo. Pueden estar expresadas mediante ecuaciones o desigualdades que son funciones de las variables de decisión y de los parámetros. Pueden ser lineales o no lineales.

**Parámetros:** son los datos del problema, es decir valores que permanecen inalterados durante la ejecución del modelo.

### 3.2 Modelo Matemático Mono-objetivo

Como punto de partida para el desarrollo del modelo matemático, se han analizado numerosos casos de la bibliografía (Gonella y Zhang, 2014; Mele *et al.*, 2011) a partir de ellos

cuales se ha diseñado la estructura conveniente para la situación que se quiere resolver en esta tesis.

A continuación, se describe el modelo, comenzando por los conjuntos y subconjuntos considerados, seguidos de los parámetros, las variables, las restricciones (entre las que se cuentan las ecuaciones de balance de materia y energía) y, finalmente, la función objetivo.

### **Conjuntos y subconjuntos**

El modelo considera esencialmente un conjunto de productos designados por  $i$  e  $i'$  y un conjunto de plantas productivas designadas por  $p$  y  $q$ .

Con  $i$  e  $i'$  se llama al conjunto de los productos que participan en cada proceso, a saber: caña bruta, residuo agrícola de cosecha (RAC), caña molible, bagazo, azúcar blanco, melaza, jugo de caña, etanol, vinaza, electricidad proveniente de la mezcla RAC+bagazo, vapor proveniente de la mezcla RAC+bagazo, biogás de vinaza, energía eléctrica de biogás de vinaza, vapor de biogás de vinaza, limón, residuos de poda de limoneros, jugo concentrado de limón, aceite esencial de limón, cáscara deshidratada de limón, efluente de cítricos, energía eléctrica de poda de limoneros, biogás de efluente de cítricos, energía eléctrica de biogás de efluente de cítricos, vapor de biogás de efluente de cítricos, papel, licor negro, energía eléctrica de licor negro, vapor de licor negro, energía eléctrica tomada de la red externa y vapor comprado a un proveedor externo. La nomenclatura usada luego en la formulación se explicita en la Tabla 3.1.

Con  $p$  y  $q$  se llama al conjunto constituido por las plantas o procesos de las industrias consideradas en el caso de estudio: campo productor de caña de azúcar, molienda de la caña, ingenio (procesamiento de la caña), destilería a partir de melaza, destilería a partir de jugo de caña, sistema de cogeneración (CHP) de la mezcla RAC+bagazo, campo productor de limones, planta cítrica, CHP de la poda de limoneros, digestión anaeróbica de vinaza, CHP del biogás de vinaza, digestión anaeróbica del efluente de la cítrica, CHP del biogás del efluente de la cítrica, planta papelería, CHP del efluente de la papelería.

Dentro de los conjuntos mencionados anteriormente se definen una serie de subconjuntos que se listan a continuación:

$IM_{i,p}$ , define el subconjunto que asocia un producto principal  $i$  con cada planta de proceso  $p$ . Estos son: la caña de azúcar con el campo, el jugo de caña con molienda, el azúcar blanco

con el ingenio, el etanol con las destilerías de melaza y de jugo, la energía eléctrica y el vapor con los diferentes sistemas CHP, el limón con el campo de limoneros, el jugo concentrado de limón con la industria citrícola, el biogás con los diferentes sistemas de digestión anaeróbica, y el papel con la industria papelera.

Tabla 3.1 -Equivalencias de los nombres usados en las ecuaciones para los elementos de los conjuntos de procesos  $p$  y de productos  $i$ .

Procesos o plantas, $p$		Productos, $i$	
Acrónimo	Significado	Acrónimo	Significado
<i>campc</i>	campo de cultivo de caña de azúcar	<i>canab</i>	caña bruta
<i>mol</i>	molienda	<i>RAC</i>	residuo agrícola de cosecha
<i>ing</i>	ingenio azucarero	<i>canam</i>	caña molible
<i>destm</i>	destilería de melaza	<i>bag</i>	bagazo
<i>destj</i>	destilería de jugo	<i>azbco</i>	azúcar blanco
<i>CHPbag</i>	cogeneración de calor y electricidad mediante una mezcla de RAC y bagazo	<i>mza</i>	melaza
<i>dig_vza</i>	digestión anaeróbica de vinaza	<i>en_bag</i>	electricidad proveniente del CHP de RAC+bagazo
<i>CHPvza</i>	cogeneración de calor y electricidad a partir de biogás de vinaza	<i>vap_bag</i>	vapor proveniente del CHP de RAC+bagazo
<i>camppl</i>	campo de cultivo de limón	<i>jugo</i>	jugo de caña de azúcar
<i>citr</i>	planta industrializadora de limones	<i>ol</i>	etanol
<i>CHPpoda</i>	cogeneración de calor y electricidad a partir de residuos de poda de limoneros	<i>vza</i>	vinaza
<i>dig_efcit</i>	digestión anaeróbica de efluentes de citrícola	<i>comb</i>	mezcla de RAC y bagazo
<i>CHPe fcit</i>	cogeneración de calor y electricidad a partir de biogás de efluentes de citrícola	<i>bgvza</i>	biogás de vinaza
<i>papel</i>	papelera	<i>en_vza</i>	electricidad proveniente del CHP de biogás de vinaza
<i>CHPlicor</i>	cogeneración de calor y electricidad a partir de licor negro	<i>vap_vza</i>	vapor proveniente del CHP de biogás de vinaza
		<i>lim</i>	limón
		<i>poda</i>	residuos de poda de limoneros
		<i>jlim</i>	jugo concentrado de limón
		<i>aclim</i>	aceite esencial de limón
		<i>caslim</i>	cáscara deshidratada de limón

<i>eflcitr</i>	efluente líquido de la industrialización de limones
----------------	---

Tabla 3.1 (continuación) - Equivalencias de los nombres usados en las ecuaciones para los elementos del conjunto de productos  $i$ .

<b>Productos, <math>i</math></b>	
<b>Acrónimo</b>	<b>Significado</b>
<i>en_poda</i>	electricidad proveniente del CHP de residuos de poda
<i>vap_poda</i>	vapor proveniente del CHP de residuos de poda
<i>bgefl</i>	biogás producido a partir del efluente líquido de la citrícola
<i>en_bgefl</i>	electricidad proveniente del CHP de biogás de efluentes de citrícola
<i>vap_bgefl</i>	vapor proveniente del CHP de biogás de efluentes de citrícola
<i>pap</i>	papel
<i>lic</i>	licor
<i>en_lic</i>	electricidad proveniente del CHP de licor negro
<i>vap_lic</i>	vapor proveniente del CHP de licor negro

$IC_i$  denota al subconjunto de los **productos continuos**, es decir, productos que se considera que no se pueden almacenar: energía eléctrica y vapor generados en los CHP que consumen mezcla RAC+bagazo, residuos de poda de limoneros, biogás de las digestiones anaeróbicas y licor negro.

$ID_i$  denota al subconjunto de los **productos discretos**, que son aquellos que por sus características pueden ser almacenados a diferencia de los continuos: caña bruta, RAC, caña molible, bagazo, azúcar blanco, melaza, jugo de caña, etanol, limón, jugo concentrado de limón, aceite esencial de limón, cáscara deshidratada de limón, biogás —de vinaza y de efluente de citrícola— y papel.

$waste_i$  representa el subconjunto del conjunto  $i$  que en la formulación se consideran desechos, corrientes residuales y efluentes: RAC, bagazo, vinaza, poda de limoneros, efluente de citrícola y licor negro.

$Raw_i$  define al subconjunto del conjunto  $i$  que en la formulación se considera materia prima: caña bruta y limón.

$Sold_i$  define al subconjunto de  $i$  que corresponde a los productos vendibles, es decir que pueden tener una demanda externa: azúcar blanco, etanol de las destilerías de melaza y de jugo, jugo concentrado de limón, aceite esencial de limón, cáscara deshidratada de limón, papel, energía eléctrica generada por los distintos sistemas CHP considerados.

## Parámetros

Los parámetros del modelo son los que se listan a continuación:

$dem_{i,p}$ : demanda del producto  $i$  producido en la planta  $p$  [t/año].

$IMM_p$ : asigna cuál es el producto principal de cada planta o proceso  $p$ .

$F_{i,p}$ : factor másico o de energía que relaciona un producto  $i$  con el producto principal de cada planta  $p$ . Tiene diferentes unidades según el producto de que se trate [t/t], [m<sup>3</sup>/t], [MWh/t], [t/m<sup>3</sup>], [MWh/m<sup>3</sup>].

$PCap_p$ : capacidad de producción de la planta  $p$  expresada en términos de su producto principal. Se expresa en unidades de [t/año], excepto para la energía eléctrica que está en unidades de [MWh/año] y el biogás en [m<sup>3</sup>/año].

$priceM_i$ : precio del producto vendible  $i$  en el mercado [USD/t].

$price_{i,p}$ : precio interno, dentro de sistema de SInd, del producto  $i$  producido en la planta  $p$  [USD/t].

$UPC_{i,p}$ : costo unitario de producción del producto  $i$  en la planta  $p$  [USD/t].

$USC_{i,p}$ : costo unitario de almacenamiento de  $i$  en la planta  $p$  [USD/t].

$WCost_{i,p}$ : costo de tratamiento de los residuos  $i$  en la planta  $p$  [USD/t].

$PriceExt_i$ : precio de la energía eléctrica y del vapor que se compra a proveedores externos, en [USD/MWh] y [USD/t], respectivamente.

## Variables de decisión

Las variables utilizadas en la formulación son las que se listan a continuación:

$XT_{i,p}$ : cantidad de producto  $i$  producido en la planta  $p$ ; es positiva para productos y negativa para insumos, en unidades de [t/año], [MWh/año] y [m<sup>3</sup>/año] según el producto.

$X_{i,p}$ : valor absoluto de la variable  $XT_{i,p}$ .

$S_{i,p}$ : ingresos por ventas del producto  $i$  procedente de la planta  $p$  [USD/año].

$W_{i,p}$ : flujos de residuos  $i$  generados en la planta  $p$  [t/año].

$Inv_{i,p}$ : cantidad almacenada de  $i$  en la planta  $p$ , en [t/año] o [m<sup>3</sup>/año].

$Tr_{i,p,q}$ : flujo transportado del producto  $i$  desde la planta  $p$  a la planta  $q$ , en [t/año], [MWh/año] o [m<sup>3</sup>/año], según la naturaleza del producto  $i$ .

$RM_{i,p}$ : flujo de materia prima en [t/año].

$RAC^{eff}$ : flujo efectivo de RAC que se mezcla con bagazo destinado a alimentar la unidad de CHP, en [t/año].

$Bagazo^{eff}$ : flujo efectivo de bagazo que se mezcla con RAC para alimentar la unidad de CHP, en [t/año].

$Inputs$ : ingresos por ventas de productos al mercado externo [USD/año].

$CO_{per}$ : costos de producción, almacenamiento y tratamiento de residuos [USD/año].

$ProdC$ : costos de producción [USD/año].

$StorC$ : costos de almacenamiento [USD/año].

$WastC$ : costos de tratamiento de residuos [USD/año].

$Purch$ : erogaciones debidas a la compra de materia prima [USD/año].

$PurchExt$ : compras de energía eléctrica y vapor a proveedores externos [USD/año].

$EXT_{i,p}$ : flujos de electricidad y vapor adquiridos de proveedores externos, en [MWh/año] o [t/año], respectivamente.

## **Función objetivo**

$FO\$$ : beneficios económicos expresados en [USD/año]. Es la variable que se maximiza en la formulación mono-objetivo.

La resolución del problema se aborda mediante la construcción de un modelo de programación lineal (LP). A continuación, se describen las restricciones de igualdad y desigualdad desarrolladas para este modelo matemático.

## **Restricciones de balances de materia y energía**

La disponibilidad (capacidad de producción) de materia prima que se produce en las etapas agrícolas, las demandas de los productos en el mercado externo, y los balances de materia y energía en cada planta productora, son los elementos que constituyen esencialmente las restricciones de este problema.

Como primera restricción, se considera que la cantidad vendida al mercado de un producto  $i$  producido en la planta  $p$ ,  $S_{i,p}$ , tiene que ser inferior a la demanda de dicho producto,  $dem_{i,p}$ , en el mercado (Ecuación 3.1).

$$S_{i,p} \leq dem_{i,p} \quad \forall i, p \quad (3.1)$$

Para calcular los flujos de materia y energía de los diferentes productos  $i$  que entran o salen de una planta  $p$ , se usan las Ecuaciones 3.2 a 3.4 (Mele *et al.*, 2011).

$$XT_{i,p} = \text{signo}(F_{i,p}) \cdot X_{i,p} \quad \forall i, p \quad (3.2)$$

$XT_{i,p}$  es el flujo de  $i$  en la planta  $p$ , positivo para productos y negativo para insumos, siendo  $F_{i,p}$  el factor másico o de energía que relaciona un producto  $i$  con el producto principal de cada planta  $p$ .

Otra de las restricciones del modelo es que el flujo de  $i$  en  $p$ ,  $X_{i,p}$ , debe ser menor o igual a la capacidad de producción de la planta  $p$  y mayor o igual a un valor mínimo de esa capacidad regulado por el parámetro  $\tau$ :

$$\tau \cdot PCap_p |F_{i,p}| \leq X_{i,p} \leq PCap_p \cdot |F_{i,p}| \quad \forall i, p \in IM_{i,p} \quad (3.3)$$

$X_{i,p}$  debe ser igual a la cantidad producida  $X_{i',p}$  de producto principal  $i'$  en cada planta de proceso  $p$ , definido por el subconjunto  $IM_{i',p}$ , que define el producto principal de cada planta:

$$X_{i,p} = |F_{i,p}| \cdot \sum_{i' \in IM_{i',p}} X_{i',p} \quad \forall i, p \quad (3.4)$$

Para los productos discretos (aquellos materiales que se pueden almacenar,  $i \in ID_i$ ), la suma de la cantidad desechada  $W_{i,p}$ , la cantidad almacenada  $Inv_{i,p}$ , la cantidad vendida al mercado  $S_{i,p}$  y la cantidad vendida a otras plantas  $q$ ,  $Tr_{i,p,q}$ , debe ser igual a la suma de la cantidad de producto comprado como materia prima  $RM_{i,p}$ , si  $i \in Raw_i$ , más la cantidad de producto producido  $XT_{i,p}$  y el que proviene de otras plantas  $q$ ,  $Tr_{i,q,p}$  (Ecuación 3.5).

$$W_{i,p} + Inv_{i,p} + S_{i,p} + \sum_{q \neq p} Tr_{i,p,q} = RM_{i \in Raw_i} + XT_{i,p} + \sum_{q \neq p} Tr_{i,q,p} \quad \forall i \in ID_i, p \neq CHPbag \quad (3.5)$$

Para los productos continuos (aquellos flujos que no se pueden almacenar,  $i \in IC_i$ , en este caso la energía eléctrica y el vapor), la ecuación de balance es similar (Ecuación 3.6),



eliminandose el término de almacenamiento. La suma de la cantidad desechada  $W_{i,p}$ , la cantidad vendida al mercado  $S_{i,p}$  y la cantidad vendida a otras plantas  $q$ ,  $Tr_{i,p,q}$ , debe ser igual a la cantidad de producto producido  $XT_{i,p}$ .

$$W_{i,p} + S_{i,p} + \sum_{q \neq p} Tr_{i,p,q} = XT_{i,p} \quad \forall i \in IC_i, p = CHPbag, CHPvza, CHPpoda, CHPeftcit, CHPlcor \quad (3.6)$$

La Ecuación 3.7 representa el balance total de vapor para todo el sistema y la Ecuación 3.8, el balance para la electricidad, siendo  $EXT_{i,p}$  los flujos de energía y vapor tomados de proveedores externos.

$$W_{vap\_bag,p} = XT_{vap\_bag,p} + Tr_{vap\_bag,CHPbag,p} + Tr_{vap\_vza,CHPvza,p} + Tr_{vap\_poda,CHPpoda,p} + Tr_{vap\_bgeftl,CHPeftcit,p} + Tr_{vap\_lic,CHPlcor,p} + EXT_{vap\_bag,p} \quad \forall p \quad (3.7)$$

$$W_{en\_bag,p} = XT_{en\_bag,p} + Tr_{en\_bag,CHPbag,p} + Tr_{en\_bgvza,CHPvza,p} + Tr_{en\_poda,CHPpoda,p} + Tr_{en\_bgeftl,CHPeftcit,p} + Tr_{en\_lic,CHPlcor,p} + EXT_{en\_bag,p} \quad \forall p \quad (3.8)$$

En este modelo, se ha considerado que la planta correspondiente al CHP de la mezcla RAC+bagazo ( $p = CHPbag$ ) consume un combustible ficticio  $i = comb$  constituido por una mezcla de RAC y de bagazo. El flujo consumido de este combustible ficticio  $XT_{comb,CHPbag}$  se calcula según la Ecuación 3.9. Esta ecuación representa la energía disponible por la combustión de RAC y de bagazo, donde  $PCI$  es el poder calorífico inferior medio de estos materiales.

$$PCI \cdot (Tr_{RAC,campc,CHPbag} + Tr_{bag,mol,CHPbag}) = XT_{comb,CHPbag} \quad (3.9)$$

Las Ecuaciones 3.10 y 3.11 representan la cantidad efectiva de RAC ( $RAC^{eff}$ ) y bagazo ( $Bagazo^{eff}$ ) que se transporta a la planta de cogeneración, desde el campo o la molienda, respectivamente.

$$Tr_{RAC,campc,CHPbag} = RAC^{eff} \quad (3.10)$$

$$Tr_{bag,mol,CHPbag} = Bagazo^{eff} \quad (3.11)$$

En estas ecuaciones,  $Tr_{RAC,campc,CHPbag}$  representa el RAC transportado desde el campo al sistema de cogeneración que consume la mezcla RAC+bagazo, y  $Tr_{bag,mol,CHPbag}$  representa el bagazo transportado desde el campo a tal sistema de cogeneración. Con la Ecuación 3.12, se restringe la proporción de RAC en la mezcla combustible RAC+bagazo a cierto valor límite, en este caso 25% (Golato *et al.*, 2017).

$$RAC^{eff} \leq 0,25 \cdot Bagazo^{eff} \quad (3.12)$$

La cantidad de energía total generada, *Energía*, va a estar dada por la energía producida en el sistema de cogeneración de la mezcla RAC+bagazo,  $XT_{en\_bag,CHPbag}$ , en el sistema de cogeneración de la vinaza,  $XT_{en\_bgvza,CHPvza}$ , del de poda,  $XT_{en\_poda,CHPpoda}$ , del efluente de la citrícola,  $XT_{en\_bgefl,CHPefcit}$ , y del licor negro,  $XT_{en\_licor,CHPlicor}$  (Ecuación 3.13).

$$Energía = XT_{en\_bag,CHPbag} + XT_{en\_bgvza,CHPvza} + XT_{en\_poda,CHPpoda} + XT_{en\_bgefl,CHPefcit} + XT_{en\_lic,CHPlicor} \quad (3.13)$$

De manera análoga, la cantidad de vapor total generado, *Vapor*, se calculan mediante la Ecuación 3.14.

$$Vapor = XT_{vap\_bag,CHPbag} + XT_{vap\_vza,CHPvza} + XT_{vap\_poda,CHPpoda} + XT_{vap\_bgefl,CHPefcit} + XT_{vap\_lic,CHPlicor} \quad (3.14)$$

### Función objetivo

La función objetivo a optimizar es de naturaleza económica. Se busca maximizar los beneficios económicos (*FO\$*) de la red de empresas o establecimientos participantes. Esta función objetivo viene dada por los ingresos por la venta de los productos (*Inputs*), menos los costos de operación (*COper*), las compras de materias primas (*Purch*), y las compras de energía y vapor a proveedores externos dadas por *PurchExt* como se indica en la Ecuación 3.15.

$$FO\$ = Inputs - COper - Purch - PurchExt \quad (3.15)$$

Los ingresos por las ventas dependen del precio de los productos ( $PriceM_i$ ) y de las cantidades vendidas al mercado ( $S_{i,p}$ ), según la Ecuación 3.16.

$$Inputs = \sum_{i,p} PriceM_i \cdot S_{i,p} \quad (3.16)$$

El costo *COper* surge de agrupar los costos de producción (*ProdC*), de almacenamiento (*StorC*) y de tratamiento de los residuos (*WastC*) (Ecuación 3.17):

$$COper = ProdC + StorC + WastC \quad (3.17)$$

A su vez, los costos de producción (*ProdC*), Ecuación 3.18, dependen del costo de producción unitario asociado al producto principal *i* de la planta *p* ( $UPC_{i,p}$ ) y de las cantidades producidas ( $X_{i,p}$ ).  $IM_{i,p}$  relaciona cada planta *p* con su producto principal.

$$ProdC = \sum_{i,p \in IM_{i,p}} UPC_{i,p} \cdot X_{i,p} \quad (3.18)$$

Los costos de almacenamiento ( $StorC$ ), Ecuación 3.19, están dados por el costo unitario de almacenamiento del producto  $i$  de la planta  $p$  ( $USC_{i,p}$ ) y por la cantidad almacenada de  $i$  en esa planta ( $Inv_{i,p}$ ):

$$StorC = \sum_{i,p} USC_{i,p} \cdot Inv_{i,p} \quad (3.19)$$

Los costos asociados al tratamiento de residuos ( $WastC$ ) se calculan con la Ecuación 3.20, en función de  $WCost_{i,p}$ , costo unitario de tratamiento del residuo  $i$  en la planta  $p$ , y de  $W_{i,p}$ , flujo de residuo  $i$  que sale de la planta  $p$ .

$$WastC = \sum_{i,p} WCost_{i,p} \cdot W_{i,p} \quad (3.20)$$

Las compras ( $Purch$ ) corresponden a dos erogaciones. La del primer término (Ecuación 3.21) depende de la cantidad transportada de un producto  $i$  dentro del sistema multiplicada por un precio interno de ese producto ( $PriceI_{i,q}$ ). Este término intenta representar el caso en el que las diferentes plantas que participan de un esquema de SInd no pertenezcan a la misma empresa por lo que hay que pagar un precio cuando una planta consume un producto que proviene de otra planta dentro del esquema. El segundo término se refiere a la compra de materiales considerados en el modelo como materias primas (v. gr.: limón, caña de azúcar). En este último caso, el parámetro es el precio unitario de la materia prima comprada al mercado ( $PriceRM_{i,p}$ ):

$$Purch = \sum_{i,p,q \neq p} PriceI_{i,q} Tr_{i,q,p} + \sum_{i,p} PriceRM_{i,p} \cdot RM_{i,p} \quad (3.21)$$

Las compras externas  $Purch Ext$  (Ecuación 3.22) dependen de los flujos de energía y vapor adquiridos de proveedores externos ( $EXT_{i,p}$ ) y del precio unitario de la energía y del vapor ( $PriceExt_i$ ).

$$Purch Ext = \sum_{i,p} PriceExt_i \cdot EXT_{i,p} \quad (3.22)$$

### 3.3 Superestructura de Optimización a Resolver. Potenciales Intercambios.

En el Capítulo 2, Figura 2.9, se presentó el esquema de las tres plantas industriales —sucroalcoholera, citrícola y papelera— trabajando de manera independiente, con sus

productos principales y sus sistemas de cogeneración acoplados, identificándose las corrientes de biomasa residuales que poseen un potencial de energía y de materia.

La Figura 3.1, en cambio, muestra un esquema de los establecimientos industriales con los potenciales intercambios de materia, energía y vapor a determinar en la red de procesos involucrados. Este esquema en el que se explicitan todos los intercambios posibles se conoce como **superestructura** y es sobre ella que se aplicará el modelo matemático de optimización. En el Capítulo 4 se describe la aplicación del modelo mono-objetivo y en el Capítulo 6, la extensión de este modelo a múltiples objetivos.

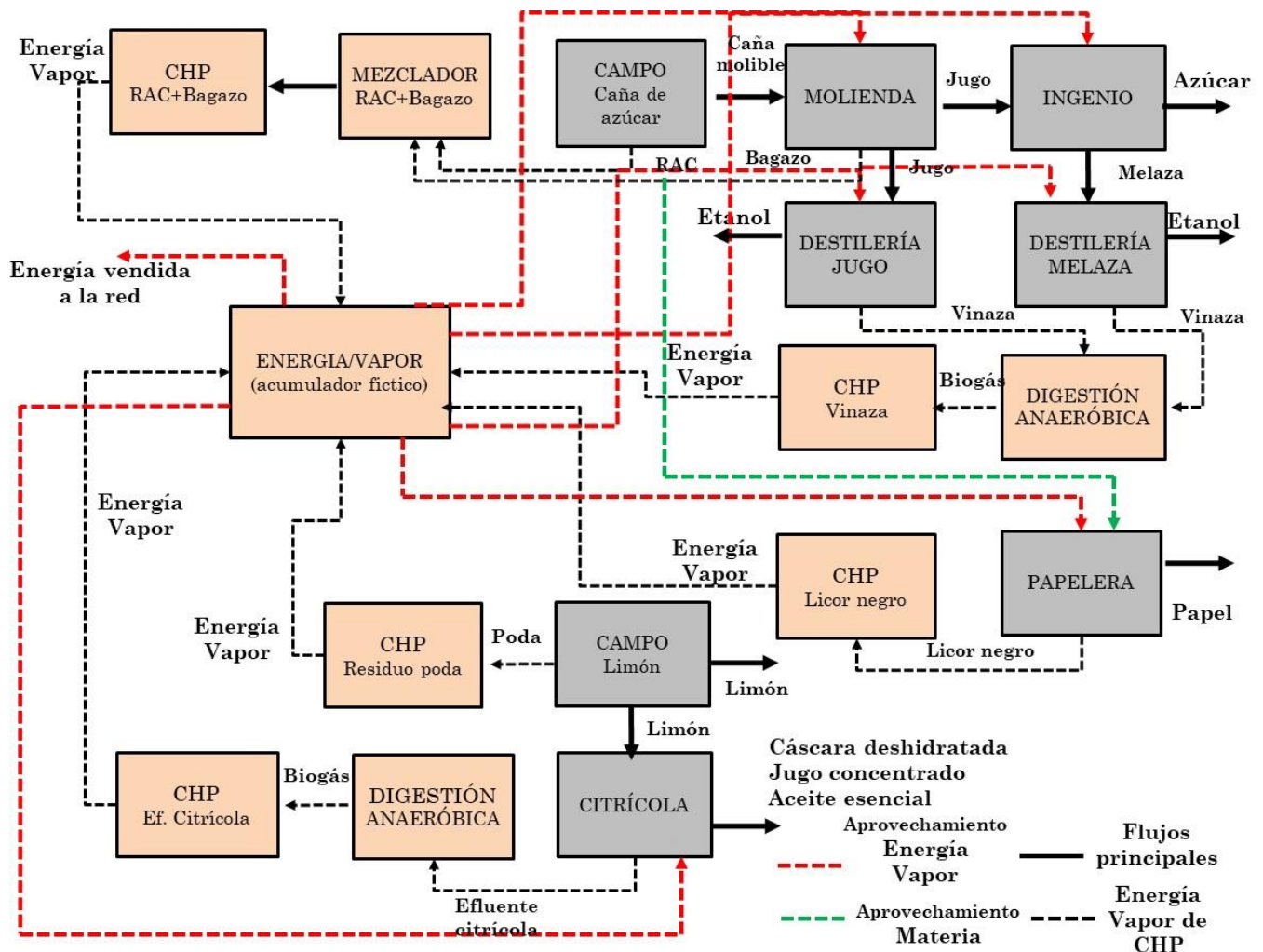


Figura 3.1 - Superestructura de los posibles intercambios de flujos de materia y energía/vapor en el tejido productivo.

### 3.4 Herramienta de Modelado y Optimización

Como herramienta de modelado y optimización se ha utilizado el programa de modelado algebraico GAMS®<sup>4</sup> junto con el *solver* CPLEX<sup>5</sup> de IBM® para resolver la formulación lineal, tanto para la versión mono-objetivo (Capítulo 4) como para la versión multiobjetivo (Capítulo 6).

Se ha considerado una red de establecimientos que contempla información desde la obtención de la materia prima en el campo hasta la puerta de las plantas industrializadoras: ingenio, destilería, citrícola y papelera, tomando en todos los casos una planta de producción de capacidad promedio de la provincia de Tucumán. El modelo considera un horizonte de optimización de un año, múltiples materias primas y múltiples productos, quedando como proyección su extensión a una formulación multi-período con la posibilidad de considerar más de una planta de cada tipo.

Para resolver el problema de SInd entre el conjunto de plantas industriales candidatas a trabajar integradamente, se ha propuesto la formulación de un modelo de programación matemática tipo LP. Este modelo permitirá determinar los flujos de materia y energía que pueden intercambiar estas diferentes industrias para maximizar las ganancias o minimizar el impacto ambiental.

El modelo matemático es muy intensivo en datos, ya que requiere una extensa recopilación de información sobre las industrias mencionadas referida a flujos de entrada/salida de materia y energía, rendimientos fabriles, como así también datos económicos de costos de operación y costos/precios de las diferentes materias primas, productos intermedios y productos finales. A esto se suma la información sobre factores de caracterización de impacto ambiental para el caso de considera funciones-objetivo ambientales en el modelo. En el Capítulo 4 se describe en detalle la información necesaria como así también los resultados y su discusión para el caso de una optimización mono-objetivo económica. En el Capítulo 5 se describe la obtención de información ambiental de las diferentes industrias —lo cual es un aporte importante de esta Tesis—, para finalmente, en el Capítulo 6, incorporar esta información a un modelo multiobjetivo económico-ambiental.

---

<sup>4</sup> <https://www.gams.com/>

<sup>5</sup> <https://www.ibm.com/es-es/products/ilog-cplex-optimization-studio>

### 3.6 Referencias

- Cheraghalipour, A., Paydar, M. M., Hajiaghaei-Keshteli, M.. (2018). A bi-objective optimization for citrus closed-loop supply chain using Pareto-based algorithms. *Applied Soft Computing*. 69, 33–59. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.04.022>
- Coello, C. C. (2006). Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(1), 28-36. <https://doi.org/10.1109/MCI.2006.1597059>
- Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria optimization*. Springer: Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/3-540-27659-9>
- Golato, M. A., Feijóo, E. A., Franck Colombres, F. J., Paz, D., Cárdenas, G. J. (2017). Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bagaceras de Tucumán (Argentina). *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 94(2), 21-31.
- Gonela, V., Zhang, J. (2014). Design of the optimal industrial symbiosis system to improve bioethanol production. *Journal of Cleaner. Production*, 64, 513-534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.059>
- Grossmann, I. E., Guillén-Gosálbez, G. (2010). Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. *Computers & Chemical Engineering*, 34 (9), 1365–1376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.012>
- Guillén-Gosálbez, G., Mele, F., Grossmann, I. E. (2010). A bi-criterion optimization approach for the design and planning of hydrogen supply chains for vehicle use. *AIChE Journal*, 56, 650–667. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.12024>
- Gunantara, N. (2018). A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 5(1), 1502242. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1502242>
- Linares, P., Ramos, A., Sánchez, P., Sarabia, A., Vitoriano, B. (2001). *Modelos matemáticos de optimización*. Madrid, España.
- 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. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(9), 4939-4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>

- Nishihara Hun, A. L., Pérez, G. A., Mele, F. D. Diseño óptimo de un esquema de simbiosis industrial en la provincia de Tucumán. 1<sup>er</sup> Congreso de Ciencia y Tecnología del NOA (CODINOA), Jujuy, Argentina, 28 y 29 de septiembre de 2023.
- Nishihara Hun, A. L.; Mele, F. D. (2022). Estrategias de simbiosis industrial para la industria sucroalcoholera. X Encuentro Argentino de Ciclo de Vida, IX Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica, ENARCIV 2022, 3-4 de noviembre de 2022, Córdoba, Argentina
- Taskhiri, M. S., Tan, R. R., Chui, A.S. (2011). MILP model for emergy optimization in EIP water networks. Clean Technologies and Environmental Policy, 13, 703-712.  
<https://doi.org/10.1007/s10098-010-0341-1>

---

# CAPÍTULO 4: Diseño óptimo de un esquema de simbiosis industrial en Tucumán, bajo criterios económicos

*"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad"*

*A. Einstein*



## Resumen

En este capítulo, se presenta la implementación del modelo matemático descrito en el Capítulo 3, desde una perspectiva estrictamente económica (Nishihara Hun *et al.*, 2023). De esta manera, se obtienen los resultados correspondientes al modelo mono-objetivo, dejando la versión más compleja, multiobjetivo, para el Capítulo 6. La dimensión económica es un aspecto fundamental en el análisis y la toma de decisiones dentro de cualquier sistema, ya que representa los intereses y metas relacionados con indicadores claves como las ganancias, los costos, los ingresos, entre otros. El enfoque mono-objetivo proporciona resultados más simples, rápidos y eficientes. No obstante, al centrarse únicamente en un objetivo, puede distorsionar la visión del problema, sin conducir a decisiones equilibradas respecto de la sostenibilidad.

Uno de los principales hallazgos, es la obtención de un tejido productivo autosuficiente, eliminando la dependencia de fuentes externas de energía y vapor para las tres industrias involucradas y el reuso de bagazo como materia prima en la industria paplera.

En este capítulo también se realiza un análisis de sensibilidad, con el fin de analizar la respuesta del modelo ante variaciones en parámetros como el precio del azúcar, del etanol y de la energía, analizando su impacto en la SInd,

### 4.1 Parámetros

Como se vio en el Capítulo 3, los modelos matemáticos se utilizan básicamente para representar y analizar fenómenos del mundo real. Estos modelos se componen no solo de variables, cantidades que pueden variar y que se desean determinar, sino también de parámetros. Los parámetros son valores constantes en cada ejecución del modelo matemático que intervienen en las ecuaciones y que representan características específicas del sistema o fenómeno bajo estudio.

En el modelo desarrollado en esta Tesis los parámetros están dados fundamentalmente por los coeficientes de balances de materia y energía, por los parámetros económicos (precios, costos unitarios) y por las capacidades y demandas de las tres industrias bajo estudio.

La correcta determinación de los parámetros es muy importante para la validez y utilidad del modelo matemático. Estos valores se estimaron a partir de datos experimentales, de entrevistas a personal de empresas, de publicaciones, reportes, entre otros. Asimismo, es importante documentar la fuente de los valores de los parámetros para comprender las limitaciones y supuestos del modelo, así como para evaluar su validez y aplicabilidad. Si los parámetros se derivan de fuentes confiables, el modelo adquiere credibilidad y por lo tanto los resultados serán confiables, y se podrá tomar decisiones acertadas en función de ellos. La falta de transparencia sobre la procedencia de los parámetros puede generar incertidumbre y poner en duda la fiabilidad de los resultados obtenidos a partir del modelo.

#### 4.1.1 Coeficientes de Balance de Materia y Energía

Los coeficientes de balance de materia y energía asociados a cada industria, proceso y producto se presentan en las Tablas 4.1 a 4.3. Estos coeficientes se utilizan en las ecuaciones del modelo para representar las tasas de consumo de materias primas, eficiencias de conversión y balances de materia y energía a nivel de cada etapa del proceso productivo.

Los datos industriales de la Tabla 4.4 fueron obtenidos mediante entrevistas realizadas en un ingenio-destilería ubicado en la provincia de Tucumán, Argentina, para la zafra 2020. Se complementó esta información con datos del trabajo de Nishihara *et al.* (2017). En cuanto a la actividad citrícola, los datos de la Tabla 4.5 provienen del trabajo publicado por Machin Ferrero *et al.* (2021a, 2021b). Por otro lado, los datos de la Tabla 4.6, relacionados con la industria papelera, provienen del trabajo de tesis de Fleck Gallas (2009).

Estas tablas incluyen también los coeficientes de materia y energía para los sistemas de digestión anaeróbica y de cogeneración de energía a partir de las biomásas residuales. Estos fueron calculados utilizando los datos presentados en el Capítulo 2, sección 2.4.1, buscando que sean representativos de los procesos correspondientes. Estos sistemas de tratamiento de residuos se integran al modelo con el fin de aprovechar el potencial energético y de masa de las corrientes de desecho y reducir de esta manera los impactos ambientales y el uso de recursos naturales.

Dichas tablas proporcionan los coeficientes para la producción de los diferentes productos. Por ejemplo, para producir:

- 1 tonelada de azúcar blanco, se necesitan 101,229 toneladas de jugo de caña (Ingenio, Tabla 4.1)
- 1 tonelada de etanol se necesitan 3,647 toneladas de melaza (Destilería melaza, Tabla 4.1)
- 1 tonelada de etanol se necesitan 15,663 toneladas de jugo de caña (Destilería jugo, Tabla 4.1)
- 1 tonelada de jugo concentrado de limón se necesitan 17,27 toneladas de limón (Citrícola, Tabla 4.2)
- 1 tonelada de papel se necesitan 1,7 toneladas de bagazo (Papelera, Tabla 4.3)

Tabla 4.1 - Coeficientes de balance de materia y energía de industria sucroalcoholera

	Campo caña de azúcar	Molienda	Ingenio	Destilería melaza	Destilería jugo	CHP RAC + bagazo	Digestión vinaza	CHP vinaza
caña bruta	1,1765 t							
RAC	0,1765 t							
caña molible	1t	1 t						
bagazo		0,312 t						
azúcar blanco			1 t					
agua imibición		0,302 m <sup>3</sup>						
melaza			0,38 t	3,647 t				
energía		0,034 MWh	0,1421 MWh	0,1685 MWh	0,1685 MWh			
vapor		0,1794 t	2,73 t	4,955 t	4,955 t			
jugo		1 t	101,229 t		15,663 t			
etanol				1 t	1 t			
vinaza				16,477 m <sup>3</sup>	16,477 m <sup>3</sup>		0,064m <sup>3</sup>	
mezcla combustible RAC + bagazo						65.816 MWh		
energía mezcla RAC + bagazo						1 MWh		
vapor mezcla RAC + bagazo						18,9 t		
biogás vinaza							1 m <sup>3</sup>	4.647,18m <sup>3</sup>
energía vinaza								1 MWh
vapor vinaza								18,9 t

Tabla 4.2 - Coeficientes de balance de materia y energía de industria citrícola

	Campo Limón	Citrícola	CHP residuo de poda	Digestión efluente citrícola	CHP efluente citrícola
limón	1 t	17,27 t			
poda	0,1075 t		4,87 t		
agua	344.87 m <sup>3</sup>	26,57 m <sup>3</sup>			
energía eléctrica		0,384 MWh			
vapor		3,3 t			
jugo concentrado limón		1 t			
aceite esencial		0,079 t			
cáscara deshidratada		0,991 t			
efluente citrícola		60,445 m <sup>3</sup>		0,064 m <sup>3</sup>	
energía residuos poda			1 MWh		
vapor residuos poda			18,9 t		
biogás efluente citrícola				1 m <sup>3</sup>	4.647,18 m <sup>3</sup>
energía efluente citrícola					1 MWh
vapor efluente citrícola					18,9 t

Tabla 4.3 - Coeficientes de balance de materia y energía de industria papelera

	Papelera	CHP licor negro
bagazo	1,7 t	
papel	1 t	
licor negro	18,4 m <sup>3</sup>	4,651 t
energía	0,552 MWh	
agua	31 m <sup>3</sup>	
energía licor negro		1 MWh
vapor licor negro		18,9 t

### 4.1.3 Parámetros de Capacidad y Demanda

Las capacidades y demandas de los productos considerados en el modelo se muestran en las Tablas 4.4 a 4.6.

Tabla 4.4 - Parámetros productivos - Industria sucroalcoholera

	Valor	Unidad	Referencia
Capacidad de producción de azúcar blanco	91.000	t/año	1
Capacidad de producción de etanol de melaza	18.000	t/año	
Capacidad de producción de etanol de jugo de caña	12.000	t/año	
Demanda de azúcar blanco	75.591	t/año	2
Demanda de etanol de melaza	14.400	t/año	
Demanda de etanol de jugo de caña	9.600	t/año	
<sup>1</sup> Se consideró un 20% más de la demanda informada			
<sup>2</sup> Valores obtenidos mediante entrevistas realizadas en un ingenio-destilería ubicado en la provincia de Tucumán, Argentina.			

Tabla 4.5 - Parámetros productivos - Industria citrícola

	Valor	Unidad	Referencia
Capacidad de cosecha de limón	180.000	t /año	3
Capacidad de producción de jugo concentrado de limón	11.000	t/año	
Demanda de jugo limón	8.685	t/año	Federcitrus (2021)
Demanda de cáscara de limón	8.610	t/año	
Demanda de aceite esencial	690	t/año	
<sup>3</sup> Se consideró un 20% más de la demanda informada por Federcitrus (2021), para una citrícola de Tucumán			

Tabla 4.6 - Parámetros productivos - Industria papelera

	Valor	Unidad	Referencia
Capacidad de producción de papel	150.000	t/año	Fleck Gallas (2009)
Demanda de papel	122.000	t/año	

#### 4.1.2 Parámetros Económicos

En las Tablas 4.7 a 4.9, se pueden observar los precios de venta de los productos y los principales costos unitarios asociados a cada industria y a cada producto principal. Los precios de venta de los diferentes productos finales sirven para calcular los ingresos generados por la producción de cada producto. Por otra parte, los costos incluyen los costos de producción (materias primas, energía, mano de obra, mantenimiento), los costos fijos y otros gastos indirectos asociados a cada industria.

Tabla 4.7 - Parámetros económicos. Industria sucroalcoholera

	Valor	Unidad	Referencia
Precio azúcar blanco	430,78	USD/t	Centro de Agricultores Cañeros de Tucumán (2023)
Precio etanol	874,52	USD/t	Secretaría de Energía de la Nación (2023)
Precio energía	62,7	USD/MWh	Ministerio de Economía de la Nación (2023)
Costo caña molible	824,73	USD/t	Pérez (2023)
Costo azúcar blanco	265	USD /t	Mele <i>et al.</i> (2011)
Costo etanol	317	USD /t	Mele <i>et al.</i> (2011)

Tabla 4.8 - Parámetros económicos. Industria citrícola

	Valor	Unidad	Referencia
Precio limón	782	USD /t	EEAOC (2022) 4
Precio aceite esencial	20.000	USD /t	
Precio jugo turbio	1.300	USD /t	
Precio jugo clarificado	1.400	USD /t	
Precio cáscara deshidratada	1.100	USD /t	
Costo limón	625	USD /t	5
Costo aceite esencial	15.600	USD /t	4
Costo jugo turbio	1.150	USD /t	
Costo jugo clarificado	1.250	USD /t	
Costo cáscara deshidratada	980	USD /t	

<sup>4</sup> Valores obtenidos mediante entrevistas realizadas en una planta citrícola ubicada en la provincia de Tucumán, Argentina.

<sup>5</sup> Se consideró un 80% del precio del limón.

Al integrar estos parámetros económicos en el modelo matemático, se puede obtener un análisis de los beneficios económicos de las diferentes alternativas de producción.

Tabla 4.9 - Parámetros económicos. Industria papelera

	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia</b>
Precio papel	1.050	USD /t	Fleck Gallas (2009)
Costo unitario papel	829,4	USD /t	

#### 4.2 Ejecución del Modelo. Función Objetivo Económica

El modelo planteado contiene 1.891 ecuaciones y 7.118 variables. Para su resolución, se empleó el software de modelado algebraico GAMS® (General Algebraic Modeling System, versión 24.5.4), utilizando el solver CPLEX 12.6.2 para problemas de programación lineal y lineal entera mixta. Los cálculos se ejecutaron en un equipo con un procesador Intel Core i5 y 8 GB de RAM. El tiempo de procesamiento (CPU) fue de aproximadamente 0,11 segundos.

#### 4.3 Resultados

Una vez ejecutado el modelo de optimización, se obtuvo, como parte de los resultados, cuáles son los intercambios más convenientes desde el punto de vista económico relacionados con la instalación de sistemas para producir energía y vapor o para aprovechar el bagazo, en el caso de la industria papelera. Estas opciones se traducen en ahorros sobre el consumo de gas natural, de electricidad y de vapor de la red externa o de materia prima en las plantas que conforman el tejido industrial.

Las demandas fueron satisfechas, en un 77,3% para el azúcar, 42,3% para el etanol de melaza, mientras que el etanol de jugo, el papel y los productos de la industria citrícola, jugo concentrado, aceite esencial y cáscara deshidratada fueron satisfechas en un 100%.

Como puede observarse en la Figura 4.1, los sistemas de cogeneración que están activos son los relacionados con la poda y el licor negro, mientras que los otros tres se hallan inactivos y en color gris. Además, en la figura se muestran las cantidades producidas del producto principal para cada industria.

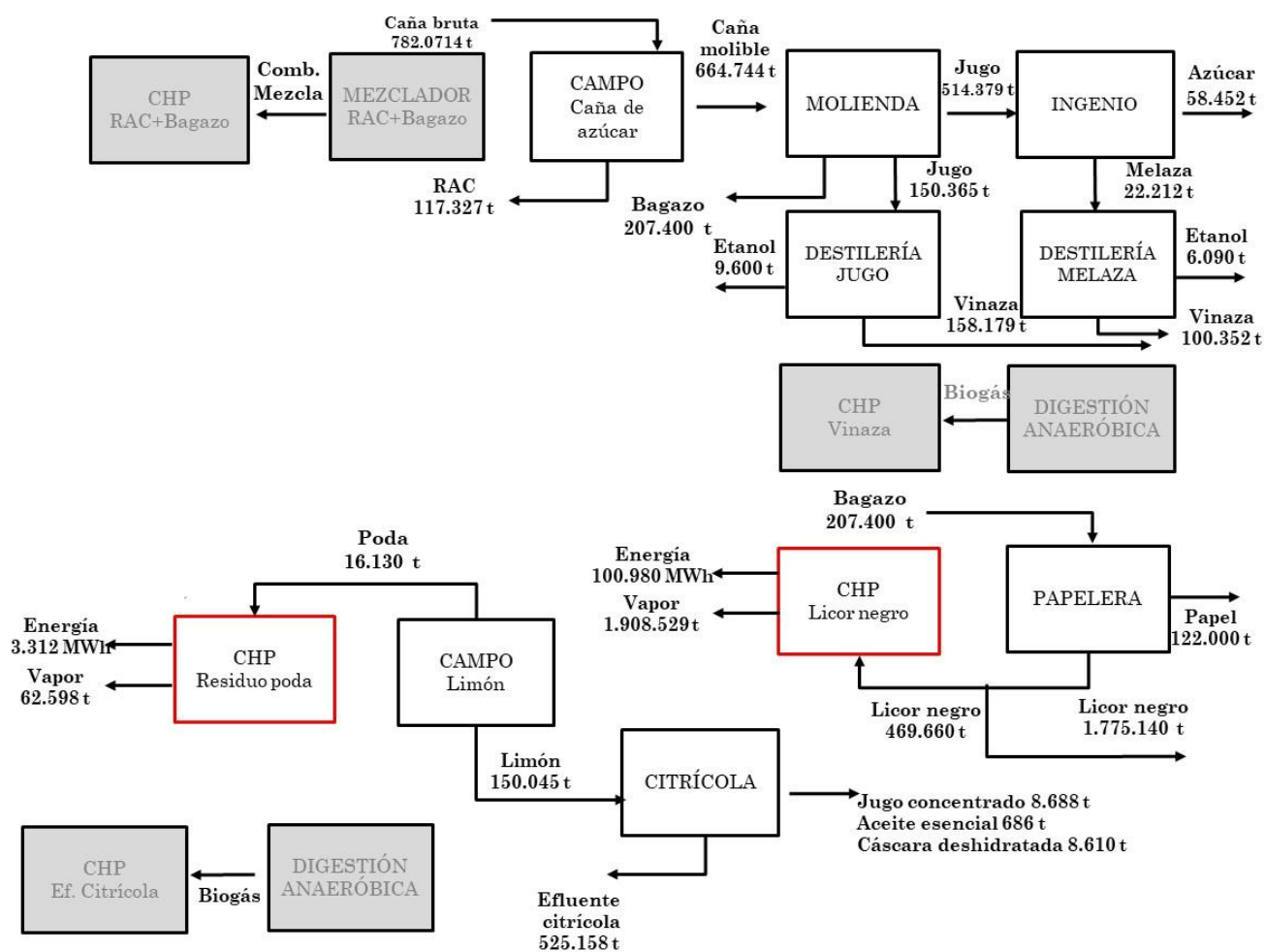


Figura 4.1 - Flujos de energía, vapor y de materia a intercambiar en el esquema de Simbiosis industrial. Los procesos que no se seleccionan, se muestran sombreados en gris. En rojo se destacan los procesos de generación de energía seleccionados.

El 100% de los requerimientos energéticos de las industrias que operan —104.291 MWh/año—, ingenio, destilería de melaza, destilería de jugo, citrícola y papelera, se satisface por cogeneración a partir de combustión de residuo de poda y de licor negro. Particularmente, el bagazo generado en la molienda se aprovecha íntegramente como materia prima para la producción de papel.

Cabe destacar que el modelo descartó económicamente otras opciones de cogeneración de energía como el biogás de vinaza y del efluente cítrico o la combustión de mezcla RAC-bagazo. Estos resultados demuestran que la simbiosis industrial óptima logra un aprovechamiento completo de los siguientes flujos residuales (bagazo, residuo de poda de limoneros y licor negro), estableciendo un sistema circular que maximiza las ganancias al



transformar subproductos en recursos valiosos. Los resultados mostraron el alto potencial de los sistemas de cogeneración a partir de los residuos de poda y del licor negro. La función objetivo para este caso dio como resultado un valor de  $2,61 \cdot 10^7$  USD/año.

#### 4.3.1. Aprovechamiento Energético de Corrientes Residuales

La cogeneración a partir de residuo de poda y del licor negro resultó rentable, consolidándose como la base del sistema energético integrado.

En el caso de la energía generada por el CHP de poda, se observa que esta energía, 3.312 MWh, alimenta a la papelera. El resto de la energía necesaria para esta industria, 64.093 MWh, proviene del CHP de licor negro.

Por otra parte, la energía generada por el CHP de licor negro alimenta a la molienda (22.601 MWh), al ingenio (8.306 MWh), a la destilería de melaza (1.026 MWh), a la destilería de jugo (1.617 MWh) y a la industria citrícola (3.336 MWh), disminuyendo en todos los casos en un 100% el consumo de energía de la red externa. Estas interacciones pueden visualizarse en la Figura 4.2.

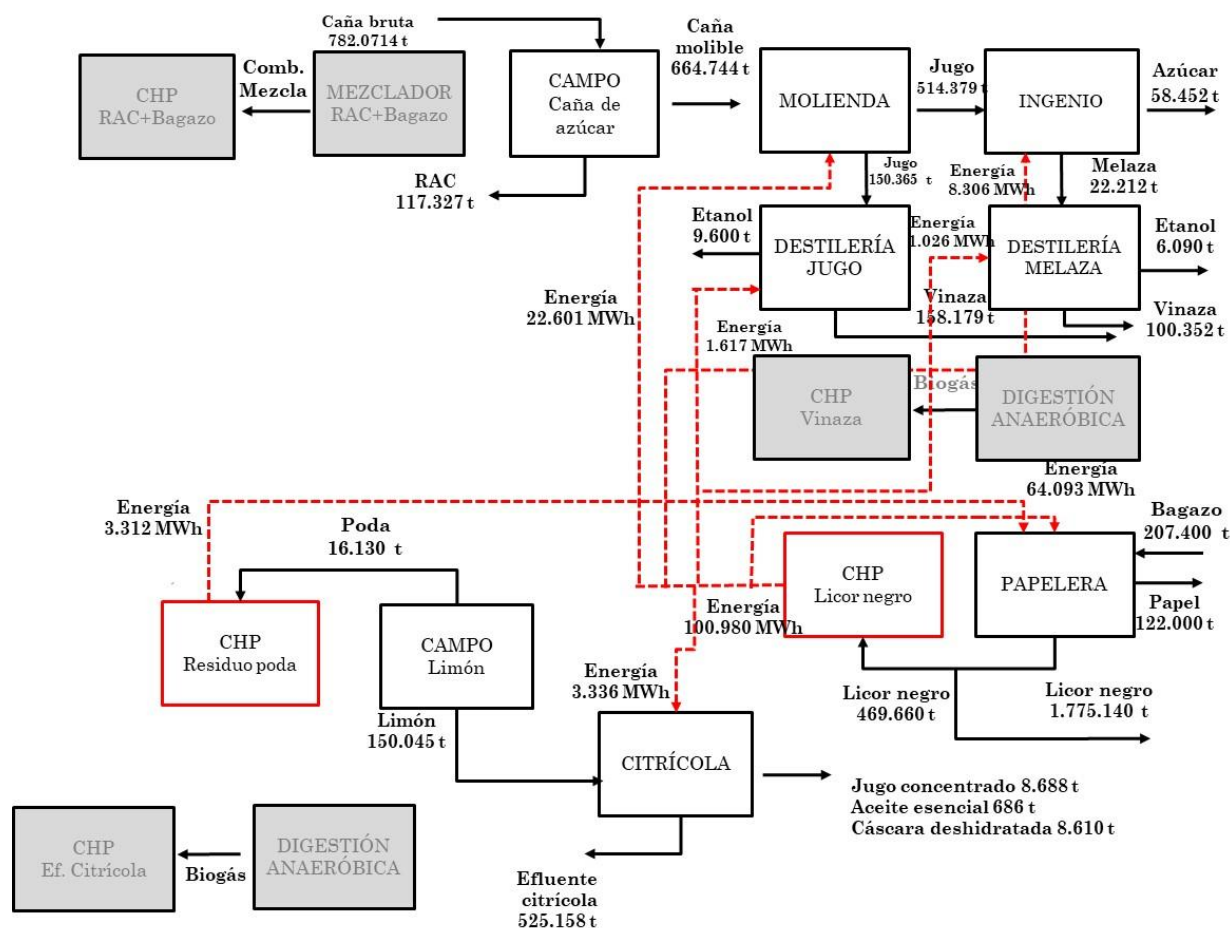


Figura 4.2 - Simbiosis industrial óptima, mostrando los flujos de energía eléctrica intercambiados.

El código de colores es idéntico al de la Figura 4.1

#### 4.3.2. Aprovechamiento de Vapor de Corrientes Residuales

Respecto del vapor generado por el CHP de poda, este alimenta con 62.598 t necesarias en la molienda, mientras que el resto de vapor necesario en este proceso, 56.657 t, provienen del vapor generado en el CHP de licor negro.

El vapor del CHP de licor negro sirve para alimentar con 159.574 t al ingenio, 30.179 t a la destilería de melaza, 47.568 t a la destilería de jugo, 28.671 t a la citrícola, quedando 1.585.880 t de vapor residual, con potencial de exportación a otro sistema cercano, como se ilustra en la Figura 4.3.

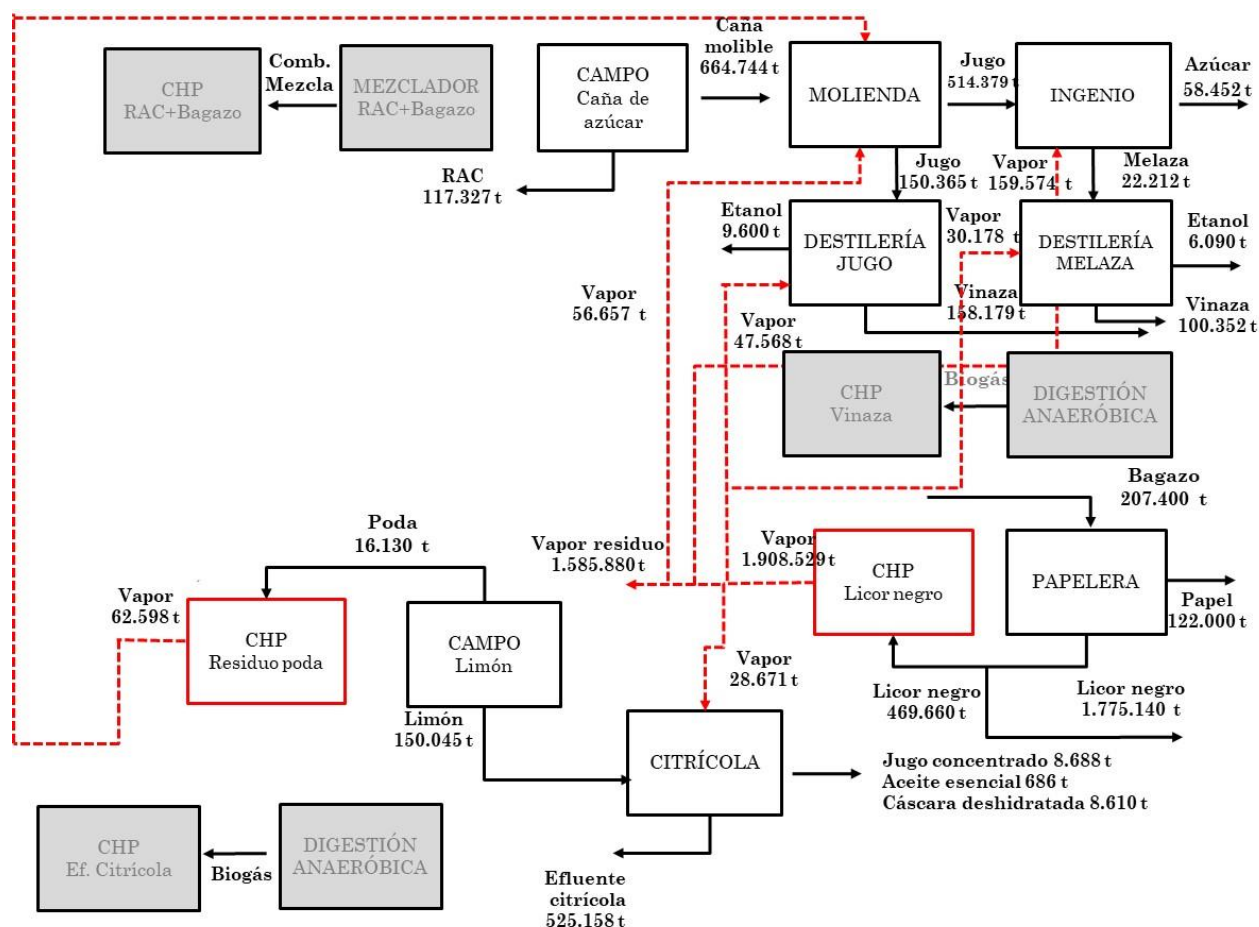


Figura 4.3 - Simbiosis industrial óptima, mostrando los flujos de vapor. El código de colores es idéntico al de la Figura 4.1

#### 4.3.3. Aprovechamiento Máxico de Corrientes Residuales

En el caso del bagazo, 207.400 t, se aprovecha en su totalidad para la producción de papel, sin excedentes disponibles para la generación de energía y vapor en la planta CHP correspondiente (Figura 4.4). La demanda de papel se satisface por completo.

#### 4.3.4. Esquema Integrado

En el esquema integrado, no se alcanzan las demandas de azúcar y de etanol de jugo, el resto de los productos fueron satisfechos en un 100%.

Esta situación está directamente vinculada al esquema de precios de los productos considerados en el modelo, el cual prioriza aquellos flujos con mayores ganancias económicas en la función objetivo de maximización de beneficio.

El modelo descarta los sistemas de cogeneración de energía de la mezcla RAC y bagazo, de vinaza y del efluente de la citrícola por sus bajos beneficios económicos, y no se presenta una demanda insatisfecha de energía y vapor que justifique su análisis.

Como resumen, la Figura 4.4 muestra los intercambios de materia, energía y vapor en la red de procesos involucrados.

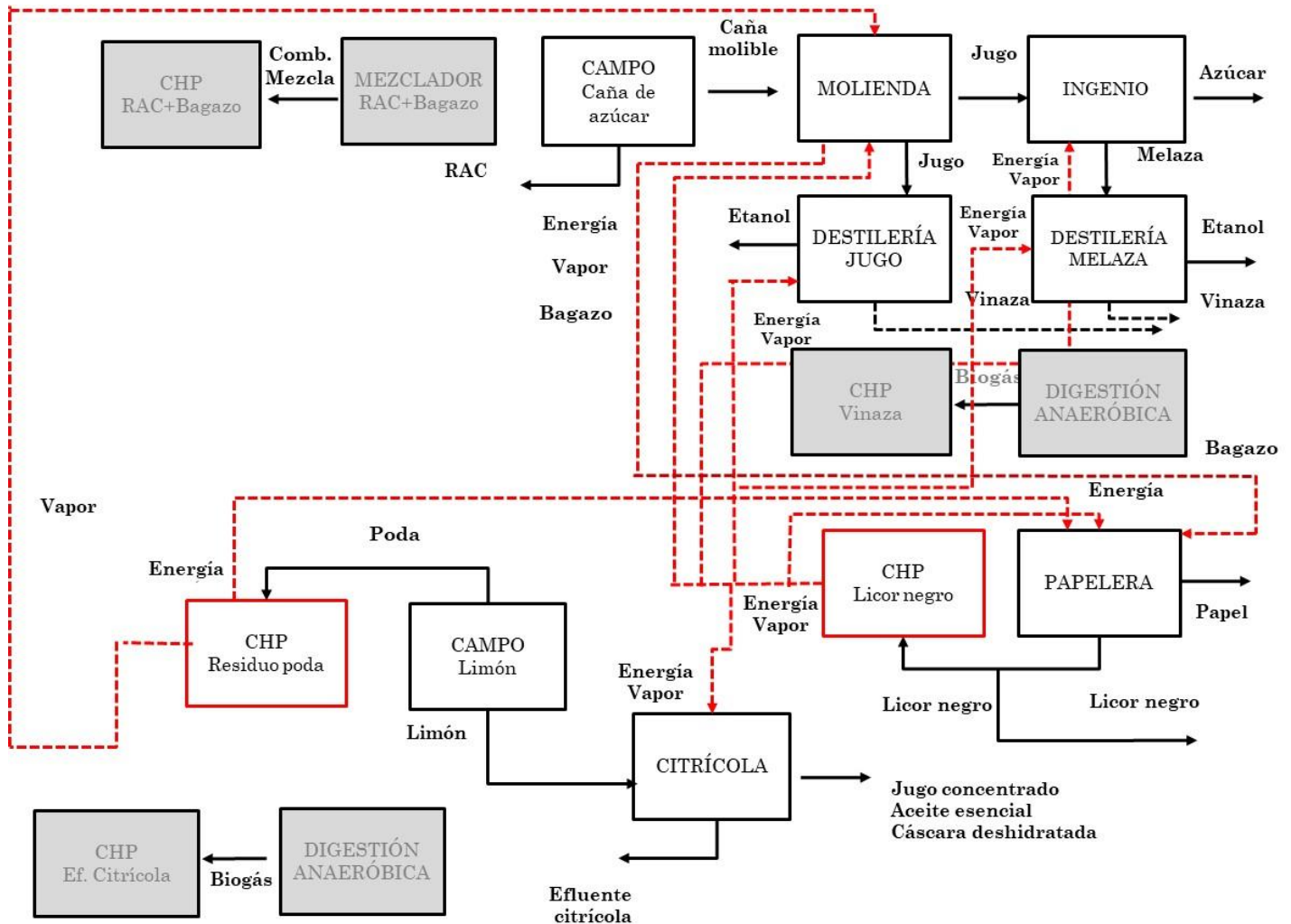


Figura 4.4 - Simbiosis industrial óptima en la que se muestran todos los flujos de materiales y energía intercambiados. El código de colores es idéntico al de la Figura 4.1

Por otra parte, la Tabla 4.10 muestra un resumen de los flujos que resultan de la optimización, indicando su origen.

Tabla 4.10 - Flujos resultantes de la optimización del esquema productivo (SInd).

Proceso	Requerimiento	Fuente	Unidad
Molienda	Energía – 22.601	CHP licor negro	MWh
	Vapor -119.255	CHP poda	t
		CHP licor negro	t
Ingenio	Energía – 8.306	CHP licor negro	MWh
	Vapor -159.574	CHP licor negro	t
Destilería de etanol a partir de melaza	Energía – 1.026	CHP licor negro	MWh
	Vapor – 30.179	CHP licor negro	t
Destilería de etanol a partir de jugo	Energía – 1.617	CHP licor negro	MWh
	Vapor – 47.568	CHP licor negro	t
Citricola	Energía – 3.336	CHP licor negro	MWh
	Vapor – 28.671	CHP licor negro	t
Papelera	Energía – 67.405	CHP licor negro	MWh
		CHP poda	MWh
	Bagazo – 207.400	Molienda	t

Se observa un buen aprovechamiento de las biomásas residuales que se generan en el proceso, lográndose la reducción en el consumo de recursos naturales, gas natural, energía eléctrica (proveniente de una matriz energética esencialmente fósil) y de bagazo, como materia prima para la producción de papel.

#### 4.4 Análisis de Sensibilidad

Esta sección analiza la capacidad del modelo para responder ante variaciones en parámetros clave, como el precio del azúcar, del etanol y de la energía, analizando su impacto en la SInd, la eficiencia en el uso de recursos (masa, vapor, energía) y la mejora económica del sistema.

El análisis de sensibilidad se centró en los precios de estos tres productos debido a que el modelo no satisface completamente la demanda definida para azúcar y para el etanol de melaza.

Otro parámetro que se analizó en esta sección es el precio de la energía, con el fin de poder determinar el umbral en el que resulta más rentable producirla internamente o adquirirla desde proveedores externos.

#### 4.4.1 Caso 1 - Variación del Precio del Azúcar

Tabla 4.11 - Caso 1 – Análisis de sensibilidad – Precio del azúcar

Variable	Caso Base	Caso 1	Unidad
FO\$	$2.61 \times 10^7$ t	$2.97 \times 10^7$ t	USD/año
Precio azúcar	<b>430,78</b>	<b>490</b>	USD/t
Caña azúcar	782.071	959.513	t/año
Bagazo	207.400	254.456	t/año
Azúcar	58.452	75.591	t/año
Etanol- destilería melaza	6.090	7.876	t/año
Etanol- destilería jugo	9.600	9.600	t/año
Melaza-destilería melaza	22.212	28.725	t/año
Energía molienda	22.601	27.729	MWh/año
Vapor molienda	119.255	146.312	t/año
Energía ingenio	8.306	10.741	MWh/año
Vapor ingenio	159.574	206.363	t/año
Energía destilería melaza	1.026	1.327	MWh/año
Vapor destilería melaza	30.179	39.027	t/año
Energía destilería jugo	1.617	1.617	MWh/año
Vapor destilería jugo	47.568	47.568	t/año
Papel	122.000	122.000	t/año
Energía papelera	67.405	67.405	MWh/año
Licor negro generado	2.244.800	2.244.800	t/año
Licor negro ingresa a CHP	469.660	506.236	t/año
Energía generada en CHP licor negro	100.980	108.845	MWh/año
Vapor generado en CHP licor negro	1.908.529	2.057.164	t/año
Vinaza - destilería jugo	158.179	158.179	t/año
Vinaza - destilería melaza	100.352	129.776	t/año
RAC	117.327	143.947	t/año

El precio del azúcar se modificó hasta un valor tal que la cantidad de azúcar satisfaga en un 100% la demanda. Cuando el precio del azúcar cambió a 490 USD/t, el modelo arrojó valores de producción de azúcar en el ingenio, que satisfacen en un 100% la demanda. La variación representó un aumento del precio en 13,7 %, produciéndose 75.591 t de azúcar. Respecto de las demandas de los demás productos principales, continuaron siendo satisfechas, a excepción del etanol de melaza que pasó de 42,3% a 54,7%.

La función objetivo aumentó un 6,8% respecto del caso base ( $FO\$ = 2,97 \times 10^7$  USD/año), debido al mayor valor económico del azúcar.

Los principales resultados de esta instancia del modelo pueden verse en la Tabla 4.11.

La cogeneración (CHP de licor negro y de poda) cubre el 100% de la demanda eléctrica, 112.157 MWh/año, por lo que no se hace necesario adquirir energía de proveedores externos; el sistema integrado se autoabastece totalmente.

Con respecto al vapor, se evidencia una sobrecapacidad en generación de vapor, el consumo total para este caso es de 467.941 t/año, lo generado por CHP de licor negro y de poda son 2.119.762 t/año, evidenciándose un excedente de vapor de 1.651.821 t/año que eventualmente podría venderse.

#### 4.4.2 Caso 2 - Variación del Precio del Etanol

En el caso base, el precio del etanol era de 874,52 USD/t y la producción anual en la destilería de melaza tenía un valor de 6.090 t/año mientras que en la destilería de jugo de 9.600 t/año, satisfaciéndose en un 42,3% y 100%, respectivamente. Al incrementar el precio del etanol en un 100%, es decir a 1.749 USD/t, la destilería de melaza pasó a satisfacer en un 54,7%, y cuando este se varió a 2.624 USD/t, es decir triplicando el valor del precio original, la demanda satisfecha se mantuvo en el mismo nivel, en un 54,7%. Por lo tanto, se observa que el precio del etanol tiene que aumentar demasiado para poder escalar la producción notablemente.

#### 4.4.3 Caso 3 -Variación del Precio de la Energía

Aunque el sistema es 100% autosuficiente para el Caso Base, así como para el Caso 1, vistos anteriormente, el sistema integrado no posee un sobrante de energía, por lo que cualquier aumento en la demanda no podría cubrirse sin aportes externos.

El precio de la energía para el caso base era de 62.7 USD/MWh, lo que se hizo en este escenario, fue disminuir el valor de energía hasta determinar en qué punto se hace necesaria la compra de energía a proveedores externos. Este punto se observó cuando el precio de la energía bajó a 15 USD/MWh.

La función objetivo se mantuvo en el mismo valor que para el caso base, es decir en  $2,61 \times 10^7$  USD/año.

Respecto de los resultados que arrojó el modelo, son idénticos a los del Caso Base en cuanto a producción de los productos principales, porcentaje de satisfacción de demandas, y energía y vapor necesarios en cada parte del proceso. Donde se observó diferencias es en el sistema de cogeneración del licor negro: la cantidad que ingresa al sistema es menor al del Caso Base, ya que al sistema integrado le conviene más adquirir energía a la red externa que producirla. Similar situación sucede con el vapor (Tabla 4.12).

Tabla 4.12 - Caso 3 – Análisis de sensibilidad – Precio de la energía eléctrica

<b>Variable</b>	<b>Caso Base</b>	<b>Caso 3</b>	<b>Unidad</b>
Precio energía	62,7	15	USD/MWh
Energía necesaria todo proceso	104.291	104.291	MWh/año
Energía de la red externa	0	83.908	MWh/año
Licor negro generado	2.244.800	2.244.800	t/año
Licor negro ingresa a CHP	469.660	79.399	t/año
Energía generada en CHP licor negro	100.980	17.071	MWh/año
Energía generada en CHP poda	3.312	3.312	MWh/año
Vapor generado en CHP licor negro	1.908.529	322.648	t/año
Licor negro - residuo	1.775.140	2.165.401	t/año

Tabla 4.13 - Caso 3 - Flujos resultantes de la optimización del esquema productivo (SInd).

<b>Proceso</b>	<b>Requerimiento</b>	<b>Fuente</b>	<b>Unidad</b>
Molienda	Energía - 22.601 Vapor - 119.255	Red Externa CHP poda (62.598) CHP licor negro (56.657)	MWh t
Ingenio	Energía – 8.306 Vapor - 159.574	Red Externa CHP licor negro	MWh t
Destilería de etanol a partir de jugo	Energía - 1.618 Vapor - 47.568	Red Externa CHP licor negro	MWh t
Destilería de etanol a partir de melaza	Energía – 1.026 Vapor – 30.178	Red Externa CHP licor negro	MWh t
Citrícola	Energía - 3.336 Vapor - 28.671	Red Externa CHP licor negro	MWh t
Papelera	Energía – 67.405	CHP licor negro (17.071) CHP poda (3.312) Red Externa (47.022)	MWh
	Bagazo – 207.400	Molienda	t

Como resultado de la integración, la Tabla 4.13 detalla los flujos combinados de materia y energía para este escenario, con aporte de electricidad externa.



## 4.5 Conclusiones

En este capítulo se resuelve, a través de una formulación de optimización mono-objetivo, el esquema de SInd óptimo para tres plantas: sucroalcoholera, citrícola y papelera. El modelo desarrollado ofrece la posibilidad de instalar tecnologías para producir biogás a partir de efluentes líquidos o para producir energía eléctrica a partir de residuos sólidos, de manera tal de reducir el consumo de energía externa y de vapor de las industrias.

Uno de los principales hallazgos, es la obtención de un tejido productivo autosuficiente, eliminando la dependencia de fuentes externas de energía y vapor.

También este modelo indica el uso en un 100% del flujo de bagazo a abastecer a la planta productora de papel. Todas estas estrategias son una clara implementación de la economía circular en los sistemas industriales.

Los resultados demuestran que la configuración del tejido productivo supera económicamente al de una operación independiente entre las diferentes instalaciones industriales, ya que se reduce en un 100% los requerimientos energéticos, de vapor y de materia prima para la papelera. Sin embargo, se descarta el CHP de la mezcla RAC y bagazo, el de vinaza y el del efluente de la citrícola, generándose flujos residuales no valorizados.

La versatilidad del modelo para la toma de decisiones a un nivel omnisciente se explora a través de un análisis de sensibilidad sobre distintos parámetros:

- Variación del precio del azúcar: el sistema mantiene su autosuficiencia en energía, vapor y materia prima, satisfaciendo todas las demandas excepto la producción de etanol a partir de melaza.
- Variación del precio del etanol: se evidencia que, para que el precio del etanol incentive un aumento significativo en la producción, este debe ser demasiado alto.
- Variación del precio de la energía externa: el sistema conserva su autosuficiencia hasta que el precio de la energía externa cae a USD 15/MWh; por debajo de este umbral, el modelo prefiere abastecerse de la energía generada por los sistemas CHP activos.

Es importante destacar que los resultados obtenidos dependen en gran medida de los valores asignados a los parámetros. Si bien se procuró que estos fueran lo más verosímiles

posible, muchos de ellos presentan cierto grado de incertidumbre, lo que puede hacer que los resultados no reflejen con precisión la realidad. El enfoque del trabajo ha estado centrado más en el desarrollo metodológico que en el caso de estudio en sí. En consecuencia, la solidez de los resultados concretos de la SInd estará directamente vinculada al nivel de certidumbre que se tenga en los parámetros empleados.

Por último, indicar que el modelo se caracteriza por representar los balances de materia y energía para un único período (un año) quedando como proyección su extensión a una formulación multi-período.

#### 4.6 Referencias

- Centro de Agricultores Cañeros de Tucumán. <https://www.cactutucuman.com/> (consultado en abril de 2023)
- EEAOC. Reportes técnicos de Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres [www.eeaoc.gob.ar/wp-content/uploads/2020/08/RA-193.pdf](http://www.eeaoc.gob.ar/wp-content/uploads/2020/08/RA-193.pdf) (consultado en octubre de 2022)
- Federcitrus, 2021. Federación Argentina de Citrus. La industria citrícola en Argentina. <<https://www.federcitrus.org/estadisticas>> (consultado en octubre de 2023)
- Fleck Gallas, J.C. (2009). Estudio de factibilidad económica del uso del bagazo de caña de azúcar para la obtención de papel de impresión y escritura en el Paraguay. Maestría en tecnología de la madera, celulosa y papel (orientación: celulosa y papel). Universidad Nacional de Misiones. <https://rid.unam.edu.ar/handle/20.500.12219/2454> (consultado en julio de 2023)
- Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., Nishihara Hun, A. L., Valdeón, D. H., Mele, F. D. (2021a) Water footprint assessment of lemon and its derivatives in Argentina: a case study in the province of Tucumán. International Journal Life Cycle Assessment, 26, 1505-1519. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-021-01939-5>
- Machin Ferrero, L.M., Araujo, P.Z., Valdeón, D. H., Nishihara Hun, A.L., Mele, F. D. (2021b) Water footprint of lemon production in Argentina. Science of the Total Environment, 816, 151614. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151614>
- 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. Industrial & Engineering Chemistry Research, 50(9),4939-4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>

- Ministerio de economía de la nación. [www.argentina.gob.ar/enre/cuadros\\_tarifarios](http://www.argentina.gob.ar/enre/cuadros_tarifarios) (consultado en abril de 2023)
- Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D., Pérez, G. A. (2017). A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. The International Journal of Life Cycle Assessment, 22(4), 502-515. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>
- Nishihara Hun, A.L., Pérez, G.A., Mele, F.D. Diseño óptimo de un esquema de simbiosis industrial en la provincia de Tucumán. 1er Congreso de Ciencia y Tecnología del NOA (CODINOA), Jujuy, Argentina, 28 y 29 de septiembre de 2023.
- Pérez, G. A. (2023). Informe Técnico. Evaluación económica del cultivo de caña de azúcar- Campaña 2021/2022. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Tucumán-Santiago del Estero. INTA EEAA Famaillá.
- Secretaría de Energía de la Nación, [glp.se.gob.ar/biocombustible/reporte\\_precios\\_bioetanol.php](http://glp.se.gob.ar/biocombustible/reporte_precios_bioetanol.php) (consultado en abril de 2023)

---

# CAPÍTULO 5: Evaluación Ambiental del Caso de Estudio

*“La disciplina es el puente entre las metas y los logros”*

*Jim Rohn*

## Resumen

En este capítulo se lleva a cabo la evaluación ambiental del tejido productivo en estudio, empleando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Se establecen los criterios fundamentales del estudio —objetivos, límites temporales y espaciales—, junto con la construcción de inventarios detallados que registran los flujos de materiales y energía. Adicionalmente, se cuantifican los indicadores ambientales seleccionados que pertenecen a tres modelos de impacto: ReCiPe, USEtox y CED. Los valores obtenidos funcionarán como parámetros ambientales para el modelo de optimización multiobjetivo presentado en el Capítulo 6.

### 5.1 Introducción al Análisis de Ciclo de Vida

Frente al creciente deterioro ambiental global, el Análisis de Ciclo de Vida (LCA, del inglés *Life Cycle Assessment*) se presenta como una herramienta clave para evaluar y abordar los impactos asociados a productos y procesos. El LCA, también conocido como Evaluación de Ciclo de Vida es un método sistemático para evaluar las cargas ambientales asociadas con un producto, proceso o actividad. Permite, de manera objetiva, calcular, estimar y evaluar los impactos que un producto o servicio puede tener sobre el ambiente durante todas las etapas de su vida (Guinée *et al.*, 2001). Este método cuantifica la energía y los materiales utilizados, así como los residuos generados a lo largo del ciclo de vida completo del producto, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los residuos, pasando por todas las etapas intermedias como pueden ser fabricación y transporte (Consoli *et al.*, 1993).

Según la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC, 2022), “El LCA es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando la energía y los materiales usados, y los residuos liberados al ambiente, y para evaluar e implementar oportunidades de hacer mejoras ambientales. La evaluación incluye el ciclo de vida completo del producto, proceso o actividad, comprendiendo la extracción y el procesamiento de las materias primas, fabricación, transporte y distribución; reúso, mantenimiento, reciclaje y disposición final de los residuos.”

El concepto “carga ambiental” se refiere a la cantidad de sustancias químicas, radiación, ruido y otros elementos liberados a o consumidos del ambiente, que pueden tener efectos nocivos potenciales o reales, como el agotamiento de recursos y el deterioro de la salud humana y ambiental. En cambio, un “impacto ambiental” es una medida de los efectos de estas cargas ambientales.

El enfoque de ciclo de vida que tiene el LCA, también se denomina “de la cuna a la tumba”, lo cual se refiere al análisis integral de todas las etapas involucradas en la producción de un producto, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final de los residuos (Mazzi, 2020). El LCA se utiliza con diversos propósitos, como la identificación de áreas susceptibles de mejora ambiental en un proceso, la obtención del perfil ambiental de un producto, proceso o también para la comparación entre productos y procesos desde un punto de vista ambiental.

El LCA se destaca por cuatro características. En primer lugar, como su nombre lo indica, adopta una perspectiva de ciclo de vida al considerar todas las etapas, desde la adquisición de materias primas hasta la eliminación de residuos. En segundo lugar, abarca una amplia gama de aspectos ambientales, permitiendo evaluar el impacto en diferentes áreas como, por ejemplo, el consumo de recursos naturales, la emisión de gases de efecto invernadero o la generación de residuos, intentando no soslayar aspectos ambientales que pueden ser importantes. En tercer lugar, es una herramienta cuantitativa que utiliza datos y modelos para realizar evaluaciones objetivas y comparativas. Por último, el LCA se basa en fundamentos científicos sólidos para asegurar la fiabilidad y validez de sus resultados (Hauschild *et al.*, 2018). Las normas de la serie ISO 14040 son las que establecen el marco flexible bajo el cual los estudios de LCA puedan conducirse de una manera técnica. Estas normas se conciben como una guía no determinante. No existe un único método o uso final para conducir estudios de LCA, sino que las organizaciones deberían tener la flexibilidad de implementar un LCA de forma práctica, sobre la base de una aplicación específica y los requerimientos del usuario.

A continuación, se listan algunas de las normas más importantes que estandarizan los estudios de LCA, como así también otros aspectos y herramientas relacionadas con el LCA:

- ISO 14.040: Gestión Medio Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Principios y Estructura (ISO 2006)

- ISO 14.044: Gestión Medio Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Requerimientos y guía (ISO 2006) (sustituye las anteriores normas ISO 14.041-14.042-14.043).
- ISO/TR 14.047: Gestión Medio Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Ejemplos ilustrativos de cómo aplicar la ISO 14044 a situaciones de evaluación de impactos (ISO 2012)
- ISO/TR 14.049: Gestión Medio Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Ejemplos ilustrativos de cómo aplicar la ISO 14044 a la definición de objetivos y alcance y al análisis de inventario (ISO 2012)
- ISO 14.046: Gestión Medio Ambiental - Huella de agua - Principios, requerimientos y directrices (ISO 2014)
- ISO 14.064 - 14.069: relacionadas con la cuantificación de gases de efecto invernadero y huella de carbono (ISO 2006-2013)
- ISO 14.072: Gestión Medio Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida – Requerimientos y directrices para el análisis de ciclo de vida organizacional (ISO 2024).
- Wolf, M., Chomkham Sri, K., Brandao, M., Pant, R., Ardente, F., Pennington, D., Manfredi, S., De Camillis, C., Goralczyk, M. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. EUR 24708 EN. Luxemburgo: Publications Office of the European Union; 2010. JRC48157.

## 5.2 Metodología del Análisis de Ciclo de Vida

La norma ISO 14040 (2006) estipula que un estudio de LCA consta de cuatro fases o etapas (Figura 5.1): (I) Definición de los objetivos y alcance del estudio, (II) Análisis de Inventario de Ciclo de Vida, (III) Análisis de Impacto de Ciclo de Vida y (IV) Interpretación de resultados.

### 5.2.1 Fase I: Definición de los Objetivos y el Alcance

En esta fase, se establece el objetivo del estudio, se responde a qué es lo que se desea estudiar, con qué profundidad se requiere el estudio, y qué variables se convertirán finalmente en criterios de decisión. Se establece también el alcance del estudio y sus límites, tanto temporales como espaciales.

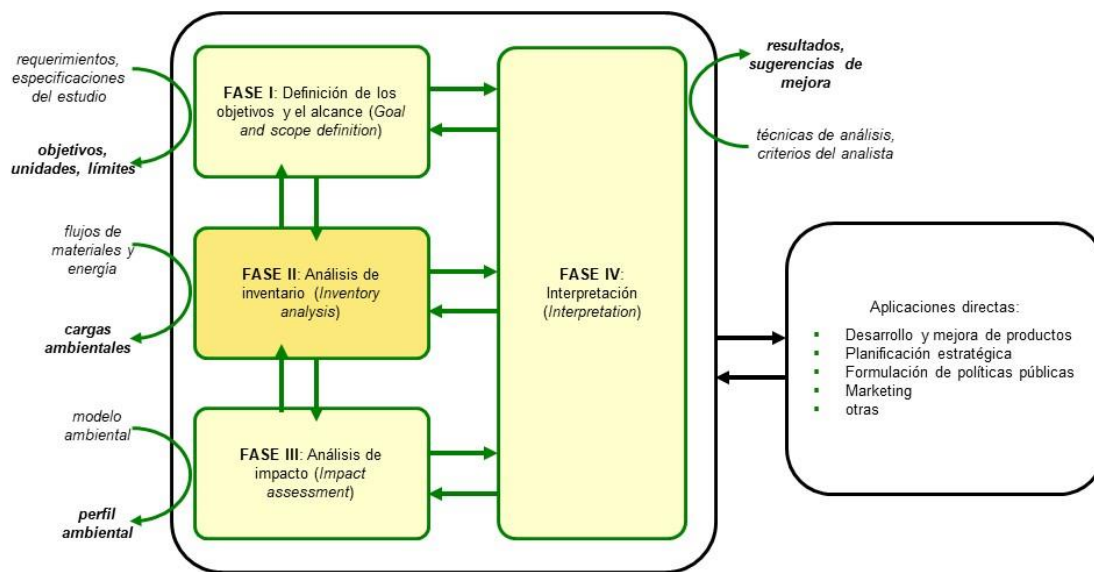


Figura 5.1 - Fases de un LCA (basado en ISO 14040)

El ámbito o alcance tiene que ver con las etapas del ciclo de vida que se tendrán en cuenta en el estudio. El alcance típico de un estudio de LCA de un producto abarca desde la extracción de la materia prima necesaria para generar todos los materiales, insumos y energía que contribuirán al producto, hasta los procesos de fin de vida del producto, pasando por todas las etapas intermedias de manufactura, transporte, almacenamiento, utilización, mantenimiento y reparación, reúsos y reciclaje. En cuanto a los límites del sistema, se define qué procesos u operaciones unitarias se van a tener en cuenta, qué entradas y salidas de energía o materiales se van a considerar, indicando cuál es el criterio de exclusión.

En esta fase se define la unidad funcional. Esta es una medida del comportamiento de las salidas funcionales de un sistema y su propósito es brindar una referencia para sus entradas y salidas. La unidad funcional asegura que la comparación de los sistemas se haga sobre una base común.

La calidad de los datos también se define en esta fase. Las fuentes de información pueden ser: datos reales medidos, calculados, estimados, o bien datos de publicaciones científicas y técnicas, de base de datos, de informes, etc. La completitud, reproducibilidad y representatividad de esta información condicionará la calidad del LCA.



### 5.2.2 Fase II: Análisis de Inventario

La finalidad de la fase de análisis de inventario (*Life Cycle Inventory*, LCI) es identificar y cuantificar todas las entradas y salidas de materiales y energía a través de los límites del sistema definidos como relevantes en la fase anterior, de todos los procesos que integran el ciclo de vida del proceso, producto o actividad que se está analizando.

Se construye un árbol de proceso o diagrama de flujo que permita visualizar todos los procesos intervinientes. El diagrama permitirá visualizar las entradas y salidas de materia y energía que atraviesan los límites del sistema desde y hacia la naturaleza (ecósfera), y desde y hacia otros procesos (tecnósfera), como así también las interrelaciones entre los procesos del mismo sistema.

Planteado este árbol de proceso, se recolectan los datos para cada flujo relevante: las emisiones de cada proceso y los recursos usados (hacia atrás, a las materias primas, y hacia adelante) a partir de las fuentes identificadas en la Fase I. El conjunto de las entradas y salidas del sistema bajo estudio se dispone en forma de lista y contiene valores que están en concordancia con la unidad funcional elegida. Esta lista recibe el nombre de tabla de inventario de ciclo de vida.

Existe un desafío al momento de repartir los impactos ambientales en un sistema que produce más de un bien económico (Weidema, 2000). En este sentido, la norma ISO 14046 ofrece las siguientes recomendaciones: (i) **subdivisión** del proceso en tantos procesos mono-producto como sea necesario, o (ii) **expansión** de los límites del sistema para incluir las funciones de los co-productos (producto evitado), (iii) **asignación**.

La subdivisión consiste en considerar cada producto individualmente y evaluar sus impactos ambientales de manera separada. Esta subdivisión permite una mayor precisión en la evaluación de los impactos ambientales específicos de cada bien económico producido. Este procedimiento no es posible de llevar a cabo si, dentro de un proceso, los subprocesos están interrelacionados mediante un uso compartido de recursos. La expansión considera la función del co-producto como un producto “evitado”, es decir, se evalúa su impacto ambiental como si hubiera sido producido y luego eliminado o tratado de manera adecuada según las prácticas estándares.

Y, por otra parte, la asignación, se aplicará solo si las dos estrategias anteriores no son aplicables. Consiste en definir un factor de asignación en base a un atributo de los productos del sistema multiproducto. Este atributo debería ser una propiedad física mensurable de los productos tal como la cantidad producida en unidades de masa, si se trata de materiales, o de energía, si los productos son flujos de energía o tendrán un uso energético (ej.: combustibles). Si no hay un atributo físico, pueden usarse otros como, por ejemplo, su valor económico. La siguiente Ecuación 5.1 muestra el cálculo del factor de asignación:

$$f_A = \frac{m_A}{m_A + m_B + \dots} \quad 5.1$$

donde  $f_A$  es el factor de asignación para el producto A, y  $m_A$ ,  $m_B$ , etc., son los valores del atributo elegido para hacer la asignación de los productos A, B, etc.

### 5.2.3 Fase III: Análisis de Impacto Ambiental

La fase de evaluación de impacto (*Life Cycle Impact Assessment*, LCIA) es la evaluación de los impactos potenciales a la salud humana y al ambiente asociados a los recursos ambientales y emisiones cuantificados en la Fase II (LCI) (ISO 14040, 2006). Esta fase de un estudio de LCA tiene como objeto caracterizar el tipo y severidad de los impactos ambientales teniendo en cuenta tres áreas de daño: salud humana, ecosistema y disponibilidad de recursos ambientales. Mediante la LCIA se transforma la tabla de inventario en un conjunto de indicadores de categorías de impacto (perfil ambiental), por ejemplo, formación de smog fotoquímico, calentamiento global, etc.

El resultado de la LCIA brinda una base más significativa para hacer comparaciones entre productos, procesos o actividades que el inventario de ciclo de vida, a través de la evaluación de impactos que potencialmente se producirán como consecuencia de las cargas ambientales. La LCIA se lleva a cabo a través de varias etapas (ISO 14044, 2006), algunas de ellas obligatorias: selección de categorías de impacto, clasificación y caracterización.

Las categorías de impacto que se usarán en un determinado estudio se seleccionan de acuerdo con los objetivos del estudio. Las categorías seleccionadas deben reflejar los efectos causados sobre la salud humana, el ecosistema y la disponibilidad futura de recursos, que sean de interés y relevancia para el estudio que se está llevando a cabo. La LCIA puede

hacer uso de categorías que se encuentran a nivel de impacto (más cerca del factor de estrés en la cadena causa-efecto) o a nivel de daño, clasificándose en indicadores de punto medio (nivel de impacto) y de punto final (nivel de daño). Los indicadores de puntos medio (*midpoint*) cuantifican efectos relacionados directamente con las emisiones al ambiente (por ejemplo, adelgazamiento de la capa de ozono). Los indicadores de punto final (*endpoint*), en cambio, representan el daño final ocasionado por las emisiones (relacionados con el adelgazamiento de la capa de ozono, son categorías de punto final: cáncer de piel, daño a los materiales plásticos, daño a los cultivos, daño a la vida marina, etc.). La Figura 5.2 muestra algunas categorías de impacto que se usan con frecuencia en estudios de LCA, en este caso, de punto medio. Cada categoría de impacto se mide en unidades que toman una sustancia como referencia. Por ejemplo, el calentamiento global se mide en kg CO<sub>2</sub> equivalente, la acidificación, mayormente en kg SO<sub>2</sub> equivalente, la formación de *smog*, en kg de NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) equivalente, y así con otras categorías de impacto<sup>6</sup>.

<b>ACIDIFICACIÓN</b>	Se debe a las emisiones de SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> y NH <sub>3</sub> a la atmósfera, que quedan absorbidas en la lluvia (lluvia ácida), generando daños en la naturaleza. Se expresa en kg de SO <sub>2</sub> equivalente.
<b>EUTROFIZACIÓN</b>	Se da cuando hay un aporte excesivo de nutrientes (como P y N) a un ecosistema, el cual queda severamente afectado por ello. Se expresa en kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> equivalente.
<b>CALENTAMIENTO GLOBAL</b>	Los impactos de esta categoría derivan de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI): vapor de agua, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O y gases fluorados, entre otros. Se expresa en kg CO <sub>2</sub> equivalente.
<b>USO DE LA TIERRA</b>	Se refiere a la ocupación y transformación física que sufren las áreas de terreno a raíz de una determinada actividad. Se expresa en m <sup>2</sup> .

Figura 5.2 - Algunas categorías de impacto frecuentes en estudios de LCA

Los resultados del LCI (cargas ambientales) se organizan y combinan en las categorías de impacto seleccionadas para el estudio: cada ítem de la tabla de inventario según la categoría de impacto a la que contribuya. Por ejemplo, si en la tabla de inventario figuran

<sup>6</sup> La sustancia de referencia está consensuada para algunas categorías de impacto, pero puede variar para otras de acuerdo con cuál sea el modelo ambiental considerado.

emisiones de CO<sub>2</sub>, se las clasificará como contribuyentes a la categoría de calentamiento global; si aparecen emisiones de NO<sub>2</sub>, se las clasificará como contribuyentes a las categorías de formación de *smog* y acidificación, y así se procede con cada entrada de la tabla de inventario, de acuerdo con las categorías seleccionadas. La Tabla 5.1 muestra, a modo de ejemplo, algunas categorías de impacto definidas por la Agencia de Protección del Ambiente de los EE. UU. (EPA, 2006). Cada fila contiene el nombre de la categoría de impacto, su alcance o escala, y ejemplos de entradas del inventario que contribuyen a esa categoría.

Tabla 5.1 - Resumen de categorías de impacto del modelo US EPA 2006 (EPA, 2006).

Categoría de impacto	Escala	Ejemplos de datos LCI	Factor de caracterización (FC)
Calentamiento global	Global	CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , cloro-flúor-carbonos (CFC), hidro-cloro-flúor- carbonos (HCFC), SF <sub>6</sub>	Potencial de calentamiento global (GWP)
Agotamiento del ozono estratosférico	Global	CFC, HCFC, halones, CH <sub>3</sub> Br	Potencial de agotamiento de ozono (ODP)
Agotamiento de los recursos	Global Regional Local	Minerales usados Combustible fósil usado	Potencial de agotamiento de recursos
Uso de la tierra	Global Regional Local	Cantidad eliminada en vertederos u otras modificaciones del suelo	Disponibilidad de tierra
Uso del agua	Regional Local	Agua usada Agua consumida	Potencial de escasez de agua
Salud humana	Global Regional Local	Emisiones totales al agua, aire o suelo	Concentración letal 50: LC <sub>50</sub>
Acidificación	Regional Local	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl, HF, NH <sub>3</sub>	Potencial de acidificación (AP)
Eutrofización	Local	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub>	Potencial de eutrofización (NP)
Smog fotoquímico	Local	Hidrocarburos no metánicos (NMHC)	Potencial de creación de oxidantes fotoquímicos
Toxicidad terrestre	Local	Sustancias tóxicas con dosis letal reportada para roedores	Concentración letal 50: LC <sub>50</sub>
Toxicidad acuática	Local	Sustancias tóxicas con dosis letal reportada para peces	Concentración letal 50: LC <sub>50</sub>

A continuación, se convierten y combinan los resultados del LCI en indicadores representativos de los impactos mediante los llamados factores de caracterización (o de

equivalencia). Los indicadores de impacto se caracterizan usando ecuaciones del tipo de la Ecuación 5.2. Los datos del inventario de la sustancia  $i$  ( $d_i$ ), ya sean emisiones o recursos, se multiplican por el factor de caracterización de la categoría de impacto  $j$  ( $FC_{i,j}$ ) y luego se suman para un mismo impacto.

$$\sum_i d_i \cdot FC_{i,j} = \text{Indicador de Impacto}_j \quad 5.2$$

Para algunas categorías de impacto, por ejemplo, calentamiento global y adelgazamiento de la capa de ozono, existe consenso en cuanto a los factores de caracterización. En el primer caso, los factores de caracterización que se utilizan son los proporcionados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2019). Para otras categorías, como ser agotamiento de recursos, el consenso está en desarrollo, es decir, diferentes instituciones y grupos elaboran modelos con diferentes valores del factor de caracterización.

#### 5.2.4 Fase IV: Interpretación

La interpretación del ciclo de vida es la última fase del proceso de LCA. Se trata de un procedimiento para identificar, cuantificar, verificar y evaluar la información conseguida a partir de los resultados del LCI y LCIA, y comunicarlos de manera efectiva, siempre de acuerdo con los objetivos y alcances que se hayan fijado en la Fase I para un dado estudio de LCA. Según las normas ISO 14044 (2006) los objetivos de esta fase son:

- Analizar los resultados, sacar conclusiones, explicar las limitaciones y brindar recomendaciones basadas en los hallazgos de las fases anteriores del LCA, de manera transparente.
- Proporcionar una presentación comprensible, completa y consistente de los resultados de un estudio de LCA, de acuerdo con la meta y el alcance del estudio.

Más detalles se pueden encontrar en la tesis de maestría de la autora de este trabajo de Tesis (Nishihara Hun, 2014) y en la bibliografía especializada (v. gr.: Hauschild *et al.*, 2018).

### 5.3 Fases I y II del LCA Aplicado al Caso de Estudio

Al inicio de este capítulo se ha abordado el marco conceptual de la metodología del LCA, así como las diferentes fases contempladas para su cálculo.

Respecto de publicaciones existentes en nuestro país sobre estudios de LCA, estos han aumentado en la última década sin ser muy abundantes. Considerando las industrias que se estudian en esta Tesis, sobre la producción de azúcar y bioetanol a partir de caña de azúcar, se puede mencionar los trabajos de Amores *et al.* (2013), Nishihara Hun *et al.* (2015), Garolera De Nucci *et al.* (2017), Nishihara Hun *et al.* (2017), Sánchez Collado *et al.* (2019). Sobre la industria citrícola, se pueden mencionar los de Machin Ferrero *et al.* (2021, 2022) y de Iñigo Martínez *et al.*, (2024) En otros países, se encontraron contribuciones relevantes desde 2009 referidas a la producción de azúcar y etanol (Luo *et al.*, 2009; Zah *et al.*, 2009; García *et al.*, 2011, Renouf *et al.*, 2011; Seabra *et al.*, 2011; Cavalett *et al.*, 2012, Hiloidhari *et al.*, 2021, Mendieta *et al.*, 2021, Khatri *et al.*, 2022). En lo que respecta a estudios de LCA de la actividad citrícola en otros países, se pueden mencionar las publicaciones de Becalli *et al.* (2009), Coltro *et al.* (2009), Iglesias *et al.* (2013), Pergola *et al.* (2013) y Cabot *et al.* (2023). Por otra parte, la relación entre economía circular y el LCA ha comenzado también a estudiarse en trabajos como el de Rigamonti y Mancini (2021) y de Peña *et al.* (2021).

A continuación, se detallará la aplicación de las Fases I y II del estudio de LCA (Ver Figura 5.1) al sistema bajo estudio en esta Tesis, de manera tal de obtener los impactos ambientales potenciales de las industrias consideradas, cuando estas industrias trabajan de manera independiente. Los impactos ambientales que resulten serán utilizados como parámetros ambientales del problema de optimización multiobjetivo, que se detalla en el Capítulo 6.

Respecto de la Fase I, los modelos que se desarrollan en esta Tesis buscan realizar una optimización del sistema productivo a nivel táctico. Las decisiones de diseño (estratégicas) se consideran resueltas puesto que se trabaja con plantas existentes en operación. Lo que se quiere determinar (nivel táctico), son los flujos que se intercambiará entre estas instalaciones. Como alcance temporal para la operación de las plantas consideradas, se ha establecido un año calendario, el cual incluye el período de zafra (cosecha), que va

aproximadamente entre los meses de mayo a octubre, tanto para el cultivo de caña de azúcar como de limón. Respecto de la industria papelera, se considera que esta produce papel de manera continua, ya que se prevé el almacenamiento del bagazo necesario. En cuanto al alcance geográfico, se trata de compañías ubicadas en territorio de la provincia de Tucumán. Como en este capítulo se busca obtener el perfil ambiental de cada industria por separado, las unidades funcionales definidas son: 1 tonelada de azúcar blanco (ingenio de caña), 1 tonelada de etanol (destilería), 1 tonelada de jugo de limón concentrado (estandarizado en 400 GPL<sup>7</sup>) (citrícola) y 1 tonelada de papel (papelera). Los indicadores ambientales que se utilizarán en esta Tesis se describen en la Sección 5.4.

Respecto de la Fase II, a continuación se describen las tablas de inventario de cada planta industrial que conforma el caso de estudio detallado en el CAPÍTULO 2: Descripción del caso de estudio), donde se pueden identificar los flujos de entrada y salida de materia y energía tanto cualitativa como cuantitativamente, considerando en lo posible elementos de la realidad provincial de Tucumán, especialmente para la información de primer plano. La fuente de información de los datos secundarios fue tomada mayormente de la base de datos Ecoinvent®.

### 5.3.1 Industria Sucroalcoholera

Para la recopilación de datos de esta industria se recurre a diversas fuentes de información (ver Tablas 5.2 a 5.7). En cuanto a las fuentes de datos primarios, el enfoque se centró en el relevamiento exhaustivo de una planta fabril (ingenio-destilería), que por su capacidad de producción y tecnología puede considerarse representativo de la producción en la provincia. Entre las fuentes de datos secundarios consultadas, se pueden citar las siguientes: Centro azucarero argentino (CAA, 2023), Manual del Cañero (Romero *et al.*, 2009), reportes técnicos del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y de la Estación Experimental Agroindustrial “Obispo Colombres” (EEAOC), datos de la base de datos Ecoinvent® y artículos científicos en revistas especializadas (ej.: FitzGerald *et al.*, 2023, Nishihara Hun *et al.*, 2015).

---

<sup>7</sup> Medida de la acidez y a su vez de la concentración del jugo de limón. GPL son gramos por litro de ácido cítrico.

Tabla 5.2 - Entradas y salidas para el proceso de producción de caña de azúcar en el campo. Flujo de referencia: 1 kg de caña de azúcar bruta.

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Área ocupada, cultivable, no irrigada	0,0136	ha a
Dióxido de carbono	849,7328	kg
Agua de pozo	0,0221	m <sup>3</sup>
Urea <sup>3</sup>	0,00726	kg
Triple superfosfato	6,28 10 <sup>-5</sup>	kg
Atrazina	2,99 10 <sup>-5</sup>	kg
Pesticida - Paraquat	7,84 10 <sup>-6</sup>	kg
Pesticida	5,02 10 <sup>-6</sup>	kg
2,4-D <sup>4</sup>	1,04 10 <sup>-5</sup>	kg
Metolaclor	1,13 10 <sup>-5</sup>	kg
Compuestos de bupiridilo	2,26 10 <sup>-6</sup>	kg
Diésel <sup>5</sup>	0,0017	kg
Dióxido de carbono en aire	0,9780	kg
<b>Salidas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caña de azúcar bruta	1	kg
<b>Emisiones al aire</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Dióxido de carbono fósil	0,0076	kg
Amoníaco	0,0005	kg
Monóxido de carbono fósil	1,41 10 <sup>-5</sup>	kg
Óxidos de di nitrógeno	0,0001	kg
Óxidos de nitrógeno	1,19 10 <sup>-4</sup>	kg
Dióxido de azufre	1,7010 <sup>-5</sup>	kg
Metano fósil	1,95 10 <sup>-5</sup>	kg
Partículas, > 10 µm	3,02 10 <sup>-6</sup>	kg
Partículas, > 2.5 µm, and < 10 µm	4,75 10 <sup>-6</sup>	kg
Dióxido de carbono no fósil	0,0775	kg
Dióxido de carbono fósil	0,0053	kg
<b>Emisiones al agua</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Sulfato	1,768 10 <sup>-4</sup>	kg
Cloruro	1,30 10 <sup>-4</sup>	kg
Ion Amonio	1,02 10 <sup>-6</sup>	kg
DBO <sub>5</sub> , demanda biológica de oxígeno	1,31 10 <sup>-5</sup>	kg
Aceites, sin especificar	2,60 10 <sup>-6</sup>	kg
Sólidos suspendidos	2,05 10 <sup>-6</sup>	kg
Atrazina	7,41 10 <sup>-7</sup>	kg
Nitrato	1,03 10 <sup>-4</sup>	kg
Fosfato	5,85 10 <sup>-6</sup>	kg
Metolaclor	1,90 10 <sup>-7</sup>	kg
<b>Emisiones al suelo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>



Ametrina	1,74 10 <sup>-7</sup>	kg
Acetoclor	8,43 10 <sup>-8</sup>	kg
2,4-D	1,77 10 <sup>-7</sup>	kg
MSMA	1,74 10 <sup>-7</sup>	kg
Paraquat	5,08 10 <sup>-8</sup>	kg
Aceites, no fósiles	2,71 10 <sup>-6</sup>	kg
Atrazina	2,63 10 <sup>-4</sup>	kg
2,4-D	2,22 10 <sup>-12</sup>	kg
Metolaclor	8,72 10 <sup>-11</sup>	kg

<sup>3</sup>Urea, as N {GLO} | market for | APOS, U. Polyethylene, high density, granulate {GLO} | market for | APOS, U. Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} | market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 | APOS, U (Proceso Ecoinvent)

<sup>4</sup>Phenoxy-compound {GLO} | market for | APOS, U. HDPE bottles E and Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} | market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 | APOS, U (Proceso Ecoinvent)

<sup>5</sup>Adapted to Argentina from Diesel, at refinery/CH U (Proceso Ecoinvent)

Tabla 5.3 - Entradas y salidas para el proceso de cosecha de caña de azúcar - Flujo de referencia: 1 tonelada de caña molible

Entradas	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Caña bruta</b>	1,1765	t
Salidas	Valor	Unidad
<b>Caña molible</b>	1,00	t
<b>RAC</b>	0,1765	t

Tabla 5.4 - Entradas y salidas para el proceso de molienda de la caña de azúcar. Flujo de referencia: 1 tonelada de jugo. Factor de asignación másico: 76% al jugo y 24% al bagazo

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caña molible	0,76	t
Agua de imbibición	0,229	m <sup>3</sup>
Electricidad	0,026	MWh
Vapor	0,136	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Jugo	1	t

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Caña molible	0,24	t
Agua de imbibición	0,0724	m <sup>3</sup>
Electricidad	0,008	MWh
Vapor	0,043	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Bagazo	0,312	t

Tabla 5.5 - Entradas y salidas para el proceso de obtención del azúcar blanco. Flujo de referencia: 1 tonelada de azúcar blanco. Factor de asignación másico: 19% al azúcar blanco y 81% a la melaza

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Jugo	1,672	t
Electricidad	0,027	MWh
Vapor	0,519	t
Azufre	1,7984	t
Cal	0,0260	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Azúcar blanco	1	t

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Jugo	7,128	t
Electricidad	0,115	MWh
Vapor	2,211	t
Azufre	7,6430	t
Cal	0,1100	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Melaza	0,38	t

Tabla 5.6 - Entradas y salidas para el proceso de obtención del etanol 96° GL a partir de melaza. Flujo de referencia: 1 tonelada de etanol, de densidad 0,789 kg/L.

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Melaza	3,647	t
Electricidad	0,169	MWh
Vapor	4,955	t
Urea	1,162	t
Fosfato diamónico	0,582	t
Sulfato de zinc	0,333	t
Sulfato de manganeso	0,283	t
Sulfato de magnesio	0,652	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Etanol 96 °GL	1	t
Vinaza	16,477	t

Tabla 5.7 - Entradas y salidas para el proceso de obtención del etanol 96° GL a partir del jugo de caña de azúcar. Flujo de referencia: 1 tonelada de etanol, de densidad 0,789 kg/L.

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Jugo	15,663	t
Electricidad	0,169	MWh
Vapor	4,955	
Urea	1,162	t
Fosfato diamónico	0,582	t
Sulfato de zinc	0,333	t
Sulfato de manganeso	0,283	t
Sulfato de magnesio	0,652	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Etanol 96 °GL	1	t
Vinaza	16,477	t

En las Figuras 5.3 y 5.4 puede observarse el esquema de las entradas y salidas correspondiente a la obtención de azúcar y etanol a partir de la caña de azúcar.

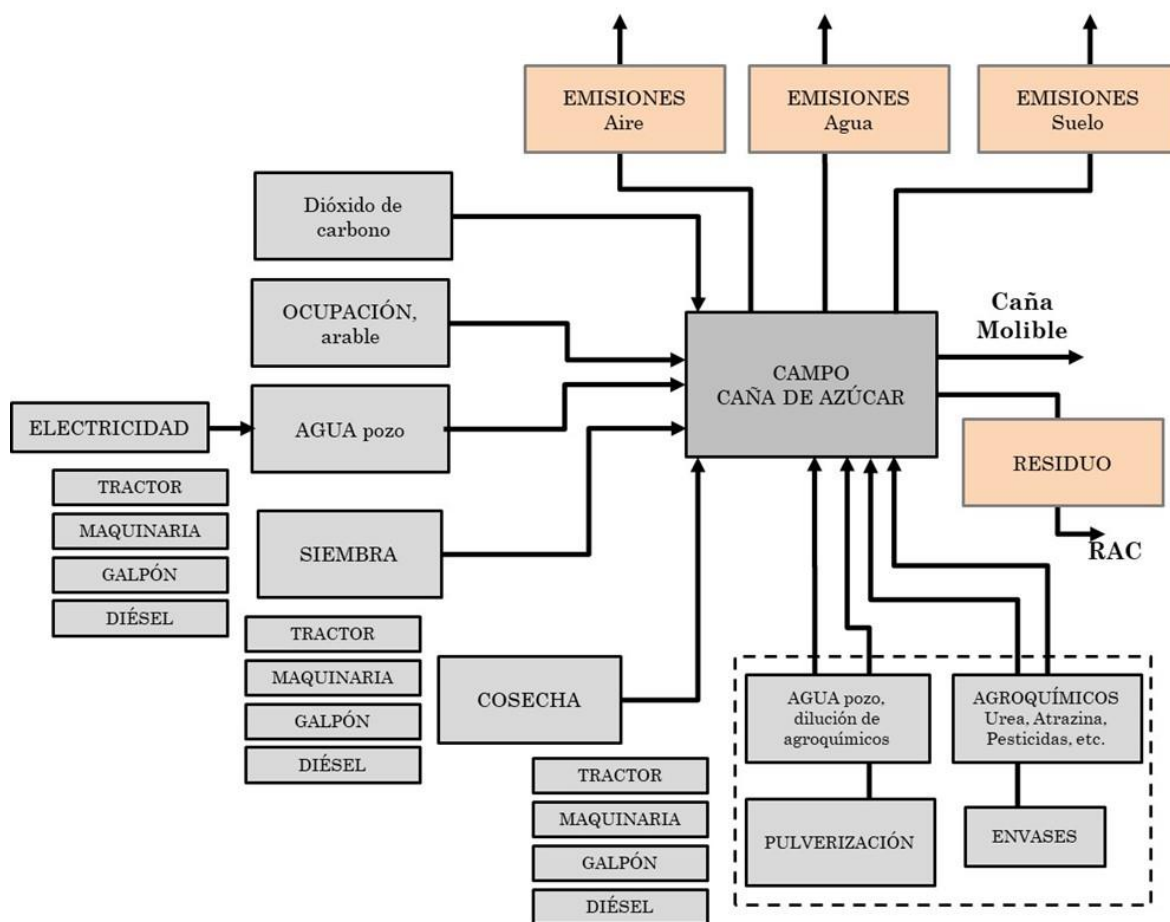


Figura 5.3 - Esquema de entradas y salidas para el proceso de producción de caña de azúcar en el campo

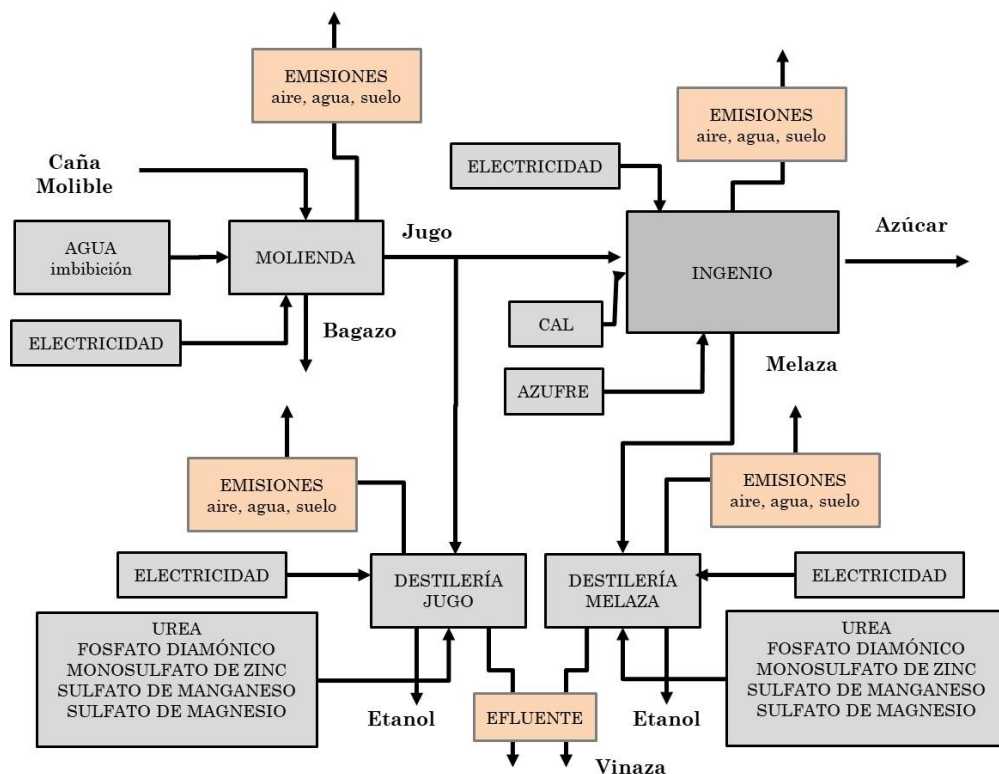


Figura 5.4 - Esquema resumido de entradas y salidas para los procesos correspondientes al ingenio azucarero y las destilerías

### 5.3.2 Industria Citrícola

Los datos necesarios para la caracterización ambiental de la industria del limón se obtuvieron de diversas fuentes de información, tanto primarias como secundarias (ver Tablas 5.8 y 5.9).

En lo que concierne a las fuentes de datos primarios, se consideró también una planta industrial representativa del sector citrícola en la provincia.

Las fuentes de datos secundarios que se consultaron incluyen: Federación Argentina de Citrus (Federcitrus), Asociación de cítricos del NOA (ACNOA), Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA), reportes técnicos del INTA y de la EEAOC, informes del Ministerio de agricultura, ganadería y pesca (MAGyP), datos de la base de datos de Ecoinvent® y artículos científicos en revistas especializadas.

Tabla 5.8 - Entradas y salidas para el proceso de producción de limón en el campo. Flujo de referencia: 1 t de limón.

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Área ocupada, arable	305,1655	m <sup>2</sup> a
Agua de lluvia	344,8706	m <sup>3</sup>
Agua de pozo	101,6	m <sup>3</sup>
Electricidad	8,6340	kWh
Diésel	5,223	kg
2,4-D	0,0816	kg
Abamectina	0,0015	kg
Aceite mineral	4,286	kg
Cloruro de potasio	0,5713	kg
Fosfato de amonio	0,3491	kg
Glifosato	0,2804	kg
Nitrato de amonio	2,8371	kg
Óxido de cobre (I)	2,0785	kg
Pyraclostrobin	0,0167	kg
Urea-nitrato de amonio	0,6598	kg
Urea	4,0874	kg
<b>Salidas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Limón	1	t
Residuo de poda	0,1075	t
<b>Emisiones al aire</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Compuestos orgánicos volátiles no metánicos NMVOC, origen inespecífico	0,0071	kg
Óxidos de nitrógeno	0,2987	kg
Monóxido de carbono, fósil	0,0134	kg
Dióxido de carbono, fósil	3,6296	kg
Dióxido de azufre	0,0012	kg
Metano, fósil	1,5 · 10 <sup>-4</sup>	kg
Benceno	8,5133 · 10 <sup>-6</sup>	kg
Partículas, < 2,5 µm	0,0024	kg
Cadmio	1,1669 · 10 <sup>-8</sup>	kg
Cromo	5,8555 · 10 <sup>-8</sup>	kg
Cobre	1,9851 · 10 <sup>-6</sup>	kg
Monóxido de dinitrógeno	0,3248	kg
Níquel	8,1811 · 10 <sup>-8</sup>	kg
Zinc	1,1669 · 10 <sup>-6</sup>	kg
Benzo[a]pireno	3,5050 · 10 <sup>-8</sup>	kg

Hidrocarburos aromáticos policíclicos PAH	$3,8455 \cdot 10^{-6}$	kg
Amoníaco	0,6449	kg
Selenio	$1,1669 \cdot 10^{-8}$	kg
<b>Emisiones al agua</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
2,4-D	0,0012	kg
Fosfato	0,0144	kg
Glifosato	0,0042	kg
Nitrato	0,4570	kg
Óxidos de cobre	0,0312	kg
Fungicidas	$2,5016 \cdot 10^{-4}$	kg
<b>Emisiones al suelo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Zinc	$4,3 \cdot 10^{-4}$	kg
Plomo	$7,55 \cdot 10^{-7}$	kg
Cadmio	$1,665 \cdot 10^{-7}$	kg
Plaguicidas, inespecíficos	$2,298 \cdot 10^{-5}$	kg

Tabla 5.9 - Entradas y salidas de materiales y energía para el proceso de industrialización convencional de limón. Flujo de referencia: 1 tonelada de jugo concentrado de limón. Factor de asignación másico: 48,3%

<b>Entradas</b>		
Limón	17,27	t
Electricidad	0,384	MWh
Agua de pozo	26,57	m <sup>3</sup>
Diésel	1,197	kg
Nafta	0,718	kg
Aceite lubricante	0,273	kg
Gas natural (equivalente a vapor: 3,3 t)	9997,03	MJ
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Jugo concentrado de limón	1,00	t

En las Figuras 5.5 y 5.6 pueden observarse los esquemas de las entradas y salidas correspondientes a la producción de limón y de sus productos derivados, respectivamente.

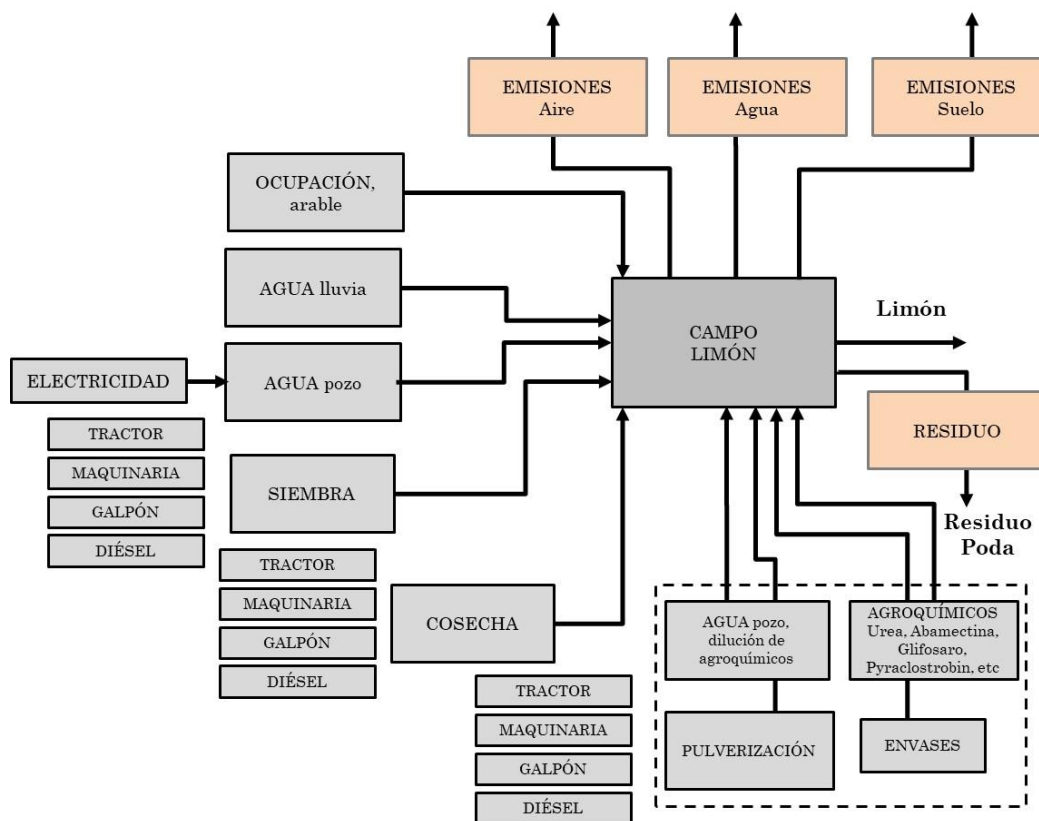


Figura 5.5 - Esquema de entradas y salidas para la producción de limón en el campo

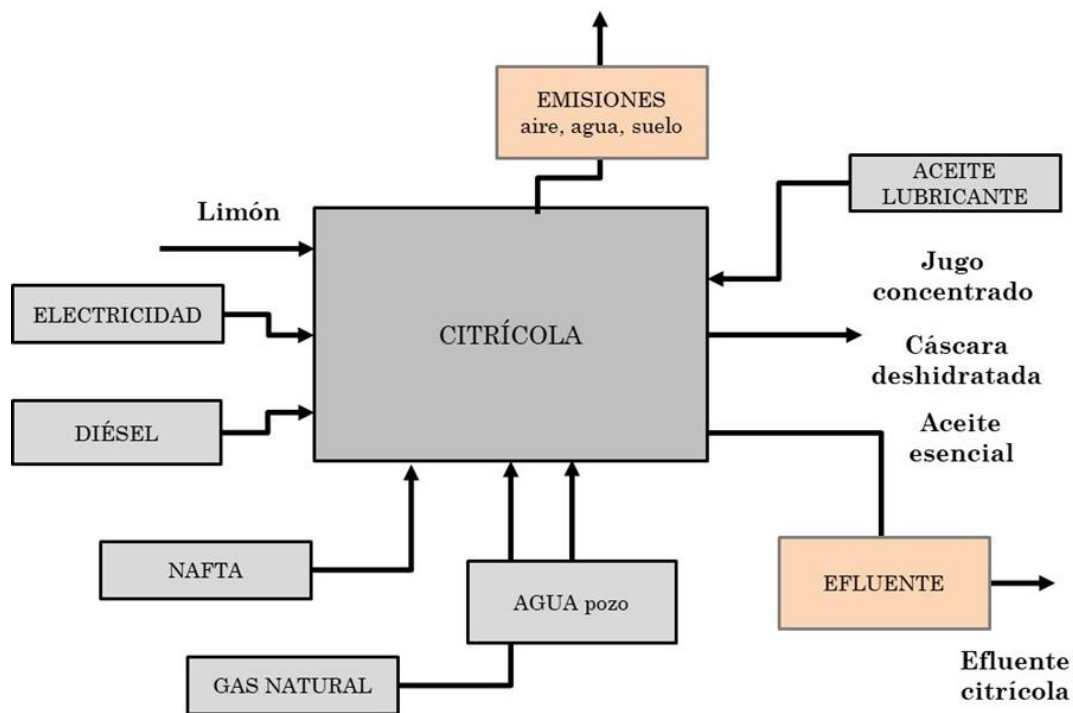


Figura 5.6 - Esquema resumido de entradas y salidas para la industria cítrica



### 5.3.3 Industria Papelera

Respecto de la fuente de datos para el estudio de LCA de la industria del papel, estos fueron obtenidos mayormente de la tesis de maestría de Fleck Gallas (2009). De allí se tomaron y adaptaron los flujos de materiales y energía para la obtención de papel a partir de bagazo (Tabla 5.10).

Tabla 5.10 - Entradas y salidas de materiales y energía para el proceso de producción del papel. Flujo de referencia: 1 tonelada de papel de impresión blanco. Factor de asignación másico: 100%.

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Bagazo	1,7	t
Electricidad	0,553	MWh
Agua de pozo	31,00	m <sup>3</sup>
Hidróxido de sodio	42,6	kg
Fuel oil	108	kg
Ácido sulfúrico	16,2	kg
Peróxido de hidrógeno	8	kg
Oxígeno	20,8	kg
Cal	1,2	kg
Sulfato de magnesio	0,96	kg
Cloruro de polialumnio	1,76	kg
Urea	1,76	kg
Ácido fosfórico	0,04	kg
Carbonato de calcio	100	kg
Agente encolante AKD	10	kg
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Papel	1,00	t
Licor negro	18,4	t

La Figura 5.7 muestra el esquema resumido de las entradas y salidas correspondiente a la industria papelera.

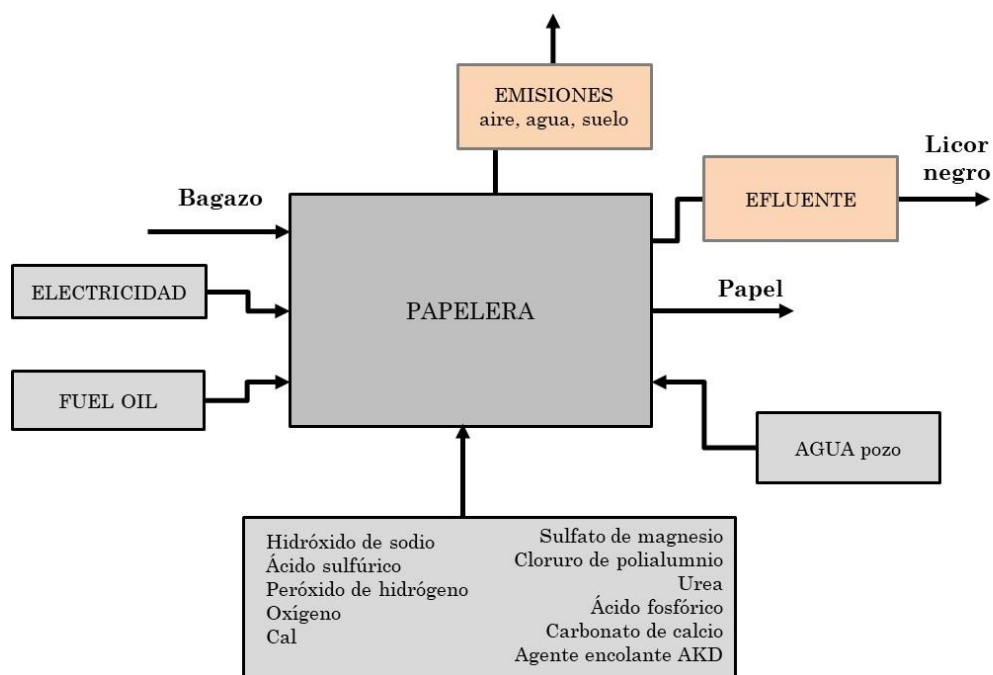


Figura 5.7 - Esquema resumido de entradas y salidas para la industria papelera

#### 5.3.4 Sistemas de Cogeneración

En esta subsección, se presentan las tablas de inventario relacionadas con los sistemas de cogeneración (a menudo mencionados como CHP, *combined heat and power*) analizados en el caso de estudio, específicamente en el contexto de los residuos sólidos y efluentes líquidos de las industrias sucroalcoholera, citrícola y papelera (Tablas 5.11 a 5.16). El enfoque aplicado en el análisis es el de puerta a puerta (*gate to gate*), por lo que los flujos de entrada que conectan a los sistemas de cogeneración con los sistemas proveedores del combustible presentan valores cero, lo que refleja la naturaleza del análisis centrado en los flujos de entrada diferentes de los flujos principales de combustibles y salida de materia y energía dentro de los límites definidos. En el caso de los efluentes líquidos, se ha considerado primero la inclusión de un proceso de digestión anaeróbica antes de su integración en el sistema de cogeneración. La información se ha recopilado de acuerdo con la realidad o prospecciones en el contexto de la provincia, pero en algunos casos se ha complementado con datos de la base de datos Ecoinvent®, que se indican al pie de la tabla correspondiente.

Tabla 5.11 - Entradas y salidas de materiales y energía para el proceso de cogeneración de la mezcla RAC más bagazo. Flujo de referencia: 1 MWh de electricidad

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
RAC ( <i>gate to gate</i> )	0	t
Bagazo ( <i>gate to gate</i> )	0	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Energía	1	MWh
Vapor	18,9	t
<b>Emisiones al aire</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Monóxido de carbono, biogénico	5,81 10 <sup>-6</sup>	kg
Dióxido de carbono, biogénico	0,0502	kg
Agua	0,0223	kg
Oxígeno	0,0166	kg
Óxidos de di nitrógeno	9,54 10 <sup>-6</sup>	kg
Dióxido de azufre	4,65 10 <sup>-6</sup>	kg

Tabla 5.12 - Entradas y salidas de materiales y energía para el proceso de cogeneración de residuos de poda. Flujo de referencia: 1 kWh de energía eléctrica

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Residuos de poda ( <i>gate to gate</i> )	0	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Energía	1	kWh
Vapor	18,9	t
<b>Emisiones al aire</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Monóxido de carbono, biogénico	0,0032	kg
Dióxido de carbono, biogénico	1,5268	kg
Agua	9,2562 10 <sup>-4</sup>	m <sup>3</sup>
Partículas < 2,5 µm	3,9760 10 <sup>-4</sup>	kg
Potasio	3,7215 10 <sup>-4</sup>	kg
Calcio	9,3039 10 <sup>-5</sup>	kg
NMVOC, compuestos orgánicos volátiles distintos del metano	5,5664 10 <sup>-5</sup>	kg
Hidrocarburos alifáticos insaturados	4,9303 10 <sup>-5</sup>	kg
Dióxido de azufre	3,9760 10 <sup>-5</sup>	kg
Monóxido de dinitrógeno	3,6579 10 <sup>-5</sup>	kg
Amoníaco	2,7514 10 <sup>-5</sup>	kg
Metano, biogénico	2,3856 10 <sup>-5</sup>	kg
Sodio	2,0675 10 <sup>-5</sup>	kg
Benceno	1,4472 10 <sup>-5</sup>	kg
Hidrocarburos alifáticos, alcanos, sin especificar	1,4472 10 <sup>-5</sup>	kg

Tabla 5.13 - Entradas y salidas de materiales y energía para el proceso de cogeneración de licor negro. Flujo de referencia: 1 MWh de energía eléctrica

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Licor negro ( <i>gate to gate</i> )	0	t
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Energía	1	MWh
Vapor	18,9	t
<b>Emisiones al aire</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Monóxido de carbono, biogénico	0,0132	kg
Dióxido de carbono, biogénico	0,0245	kg
Agua	0,0223	kg
Metano	$3,719 \cdot 10^{-4}$	kg
Sulfuro de hidrógeno	$9,596 \cdot 10^{-4}$	kg
Hidrógeno	$1,16 \cdot 10^{-3}$	kg

Tabla 5.14 - Entradas y salidas de materiales y energía para el proceso de digestión anaeróbica de la vinaza. Flujo de referencia: 1 m<sup>3</sup> de biogás

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Vinaza ( <i>gate to gate</i> )	0	m <sup>3</sup>
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Biogás	1	m <sup>3</sup>
<b>Emisiones al aire</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Metano	0,0535	kg
Dióxido de carbono, biogénico	0,0490	kg

Tabla 5.15 - Entradas y salidas de materiales y energía para el proceso de digestión anaeróbica del efluente de la citrícola. Flujo de referencia: 1 m<sup>3</sup> de biogás

<b>Entradas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Efluente citrícola ( <i>gate to gate</i> )	0	m <sup>3</sup>
<b>Salida</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Biogás	1	m <sup>3</sup>
<b>Emisiones al aire</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Metano	0,0535	kg
Dióxido de carbono, biogénico	0,0490	kg

Tabla 5.16 - Entradas y salidas de materiales y energía para el proceso de cogeneración del biogás obtenido de la vinaza y del efluente de la citrícola. Flujo de referencia: 1 kWh de energía eléctrica

Entradas	Valor	Unidad
Biogás ( <i>gate to gate</i> )	0	m <sup>3</sup>
Salidas	Valor	Unidad
Energía	1	kWh
Vapor	18,9	t
Emisiones al aire	Valor	Unidad
Dióxido de carbono, biogénico	0,6535	kg
Monóxido de carbono, biogénico	3,7575 10 <sup>-4</sup>	kg
Monóxido de di nitrógeno	1,9570 10 <sup>-5</sup>	
Metano, biogénico	1,8004 10 <sup>-4</sup>	kg
Óxidos de nitrógeno	1,1741 10 <sup>-4</sup>	kg
NMVOC Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano	1,5656 10 <sup>-5</sup>	kg
Platino	5,4796 10 <sup>-11</sup>	kg
Dióxido de azufre	1,9568 10 <sup>-4</sup>	kg

#### 5.4 Fase III del LCA. Indicadores Ambientales

En esta sección, se analizarán los indicadores ambientales de LCA seleccionados para los estudios llevados a cabo en esta Tesis (ver Tabla 5.17), decisión que corresponde a la Fase I pero que afecta directamente a la Fase III del LCA. Cuatro de estos indicadores pertenecen al modelo ReCiPe 2016 (Huijbregts *et al.*, 2017), uno al modelo USEtox (Rosenbaum *et al.*, 2008) y el resto al modelo CED (demanda acumulada de energía) (Frischknecht *et al.*, 2015), todos de punto medio.

Se ha computado el LCA de las tres industrias trabajando de manera independiente, sin simbiosis industrial, para lo cual, se ha utilizado el software SimaPro 9.5.0. (PRé Sustainability 2024)

Tabla 5.17 - Indicadores ambientales seleccionados

Indicador ambiental	Categoría de impacto ambiental	Modelo de impacto
Calentamiento Global a 100 años	<i>Global Warming, 100 year timescale</i>	ReCiPe (Huijbregts <i>et al.</i> , 2017)
Acidificación terrestre	<i>Terrestrial acidification</i>	
Eutrofización de agua dulce	<i>Freshwater eutrophication</i>	

Escasez de recursos fósiles	<i>Fossil resource scarcity</i>	
Toxicidad humana	<i>Human toxicity</i>	USEtox (Rosenbaum <i>et al.</i> , 2008)
Demanda de energía no renovable - fósil	<i>Non-renewable energy, fossil</i>	CED (Frischknecht <i>et al.</i> , 2015)
Demanda de energía no renovable - nuclear	<i>Non-renewable energy, nuclear</i>	
Demanda de energía no renovable - biomasa	<i>Renewable energy resources, biomass</i>	
Demanda de energía renovable - biomasa	<i>Renewable energy resources, biomass</i>	
Demanda de energía renovable – eólica, solar, geotérmica	<i>Renewable energy resources, solar, converted</i>	
Demanda de energía renovable – energía potencial del agua	<i>Renewable energy resources, potential (in barrage water), converted</i>	

## 5.5 Fase III del LCA. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación ambiental de cada industria, considerando el conjunto de indicadores ambientales de la Tabla 5.17. Esta evaluación se refiere a los sistemas industriales analizados de manera individual y sin simbiosis industrial, la cual se denominará “caso base” para distinguirla de la evaluación ambiental que se presentará en el sistema optimizado en el Capítulo 6.

Los resultados se organizaron en una matriz de 15×11 (Tabla 5.18). Esta matriz consta de 15 filas, que representan los diferentes procesos analizados, y 11 columnas, que corresponden a las categorías de impacto ambiental consideradas. Estos datos servirán como parámetros ambientales para el modelo matemático de optimización multiobjetivo descrito en el siguiente capítulo.

El análisis que se realizó considera el enfoque *gate to gate* (y no de la cuna a la puerta) ya que el objetivo es centrarse en los impactos ambientales asociados a un determinado proceso específico, excluyendo las etapas previas a ese proceso en sí.

Tabla 5.18 - Matriz con parámetros ambientales para las categorías de impacto seleccionadas de ReCiPe, USEtox y CED (demanda de energía acumulada)

	Calentamiento Global a 100 años GWP	Acidificación terrestre AP	Eutrofización de agua dulce EP	Escasez de recursos fósiles EF	Toxicidad humana TH	CED - energía no renovable - fósil CED-F	CED - energía no renovable - nuclear CED-N	CED - energía no renovable - Biomasa CED-B1	CED - energía renovable - Biomasa CED-B2	CED - energía renovable - eólica, solar, geotérmica CED-R	CED - energía renovable - energía potencial del agua CED-A
Campo caña azúcar	0,0601	0,0011	0,0000	0,0071	4,01 10 <sup>-12</sup>	0,3231	0,0022	0,0000	0,0021	0,0005	0,0015
Molienda caña azúcar	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ingenio	1726,6596	175,8992	0,0105	503,4728	6,16 10 <sup>-8</sup>	23045,9299	80,1610	0,8853	10,1975	11,7563	46,7197
Destilería melaza	4861,3180	32,3354	0,2352	1629,946	3,52 10 <sup>-7</sup>	74614,3056	1694,1394	11,2393	964,2326	361,7746	1020,3298
Destilería jugo	4861,3180	32,3354	0,2352	1629,946	3,52 10 <sup>-7</sup>	74614,3056	1694,1394	11,2393	964,2326	361,7746	1020,3298
CHP- RAC+bagazo	0,0003	0,0000	0,0000	0,0002	1,82 10 <sup>-14</sup>	0,0096	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002
Digestión anaeróbica - vinaza	1,9260	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CHP – biogás vinaza	12,6125	0,2392	0,0000	0,3288	1,44 10 <sup>-11</sup>	15,0561	0,2523	0,0002	0,0390	0,0404	0,1063
Campo limón	60,4943	2,1690	0,0127	22,4125	2,79 10 <sup>-9</sup>	1026,0745	37,3707	0,0352	5,7037	6,8204	47,4029
Citrícola	2,1552	0,0075	0,0000	2,6691	8,06 10 <sup>-11</sup>	122,2154	0,6027	0,0004	0,0843	0,0960	0,2389
CHP – residuos poda	12,2803	0,9541	0,0033	0,2296	2,67 10 <sup>-9</sup>	10,5100	0,3346	0,0011	0,0461	0,0424	0,1680
Digestión anaeróbica - efluente citrícola	1,9260	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CHP – biogás efluente citrícola	12,6125	0,2392	0,0000	0,3288	1,44 10 <sup>-11</sup>	15,0561	0,2523	0,0002	0,0390	0,0404	0,1063
Papelera	264,3423	0,9503	0,0087	162,2367	6,94 10 <sup>-8</sup>	7431,4356	170,3301	35,2929	731,4434	31,5310	86,6571
CHP - licor negro	0,0137	0,0000	0,0000	0,0002	1,82 10 <sup>-14</sup>	0,0096	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002





## 5.6 Referencias

- ACNOA, 2021. Asociación de citrus del NOA. <<https://acnoa.com.ar/productos/limon/>>. (consultado en mayo de 2021)
- Amores, M. J., Mele, F. D., Jiménez, L., Castells, F. (2013). Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(7):1344–1357. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0584-2>
- Beccali, M., Cellura, M., Iudicello, M., Mistretta, M. (2009). Resource consumption and environmental impacts of the agrofood sector: life cycle assessment of Italian citrus-based products. *Journal of Environmental Management*, 43:707–724. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9251-y>
- Cabot, M. I., Lado, J., Sanjuán, N. (2023). Multi-season environmental life cycle assessment of lemons: A case study in south Uruguay. *Journal of Environmental Management*, 326, 116719. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116719>
- Cavalett, O., Junqueira, T., Dias, M., C., Mantelatto, P., Cunha, M., Franco, H., Cardoso, T., Maciel Filho, R., Rossell, C., Bonomi, A. (2012). Environmental and economic assessment of sugarcane first generation biorefineries in Brazil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14, 399-410. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-011-0424-7>
- Centro azucarero argentino (CAA). <<https://centroazucarero.com.ar/>> (consultado en abril de 2023)
- Coltro, L., Mourad, A.L., Kletecke, R.M., Mendonça, T.A., Germer, S.P. (2009). Assessing the environmental profile of orange production in Brazil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(7):656–664. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0097-1>
- Consoli, F., SETAC (Europe). (1993). Guidelines for life-cycle assessment: A code of practice, SETAC workshop at Sesimbra, Portugal, 1993. Bruselas.
- Ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <[www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)> (Consultado en diciembre de 2023).
- EEAOC. Reportes técnicos de Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/> (consultado en enero de 2023)
- Environmental Protection Agency (EPA), (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. Cincinnati, Ohio, EE. UU.
- Federcitrus, 2021. Federación Argentina de citrus: la industria del citrus en Argentina. <<https://www.federcitrus.org/estadisticas>> (consultado en octubre de 2022).

- FitzGerald D., Bourgault G., Vadenbo C., Sonderegger T., Symeonidis A., Fazio S., Mutel C., Müller J., Dellenbach D., Stoikou N., Baumann D., Clementi M., Ioannou I., Cirone F., Superti V., Beckert P., Treichel A., Kaarlela O., Kunde S., Valsasina L., Moreno Ruiz E (2023). Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3. 10. database, 3(10).  
[https://www.researchgate.net/profile/PaulBeckert/publication/386086666\\_Documentation\\_of\\_changes\\_implemented\\_in\\_the\\_ecoinvent\\_database\\_v310/links/6742fac56dedd318c899cc21/Documentation-of-changes-implemented-in-the-ecoinvent-database-v310.pdf](https://www.researchgate.net/profile/PaulBeckert/publication/386086666_Documentation_of_changes_implemented_in_the_ecoinvent_database_v310/links/6742fac56dedd318c899cc21/Documentation-of-changes-implemented-in-the-ecoinvent-database-v310.pdf)  
(consultado en diciembre de 2024)
- Fleck Gallas, J. C. (2009). Estudio de factibilidad económica del uso del bagazo de caña de azúcar para la obtención de papel de impresión y escritura en el Paraguay. Maestría en tecnología de la madera, celulosa y papel (orientación: celulosa y papel). Universidad Nacional de Misiones. <<https://rid.unam.edu.ar/handle/20.500.12219/2454> > (consultado en julio de 2023)
- Frischknecht, R., Wyss, F., Büsser Knöpfel, S., Lützkendorf, T., Balouktsi, M. (2015). Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach. The International Journal of Life Cycle Assessment, 20, 957-969. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0897-4>
- García, C., Fuentes, A., Hennecke, A., Riegelhaupt, E., Manzini, F., Masera, O. (2011). Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. Applied Energy, 88, 2088-2097. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.072>
- Garolera De Nucci, L. P.; Mele, F. D.; Nishihara Hun, A. L.; Cárdenas, G. J. Estudio comparativo de diferentes mezclas nafta/etanol de caña de azúcar usando el enfoque de Ciclo de Vida. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, Tomo 94 (2), 47-58, 2017 (ISSN 0370-5404).
- Guinée JB, Gorrae M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, Oers L, Wegener Sleeswijk A, Suh S, Haes HA, de Bruijn H, van Duin R, Huijbregts M (2001) Life cycle assessment: an operational guide to ISO standards. Life Cycle Assessment: An Operational Guide to ISO Standards.
- Hauschild, M., Rosenbau, R. K., Olsen, S. I., Al, E. (2018). Life Cycle Assessment - Theory and Practice. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Hiloidhari, M., Banerjee, R., Rao, A. B. (2021). Life cycle assessment of sugar and electricity production under different sugarcane cultivation and cogeneration scenarios in India. Journal of Cleaner Production, 290, 125170. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125170>

- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F. (2017) ReCiPe 2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22:138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Iglesias, D. J., Quiñones, A., Font, A., Martínez-Alcántara, B., Forner-Giner, M. Á., Legaz, F., Primo-Millo, E., Carbon balance of citrus plantations in Eastern Spain, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 171, 2013, 103-111, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.03.015>.
- Iñigo Martínez, M. E., Díaz, G. F., Machado, D., Garolera De Nucci, P., Paz, D., Arena, P. (2024). Life cycle assessment of energy saving and circular economy strategies: contributions to the environmental footprint lemon and by-product production in Argentina. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(6), 2033-2057. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02693-y>
- INTA <https://inta.gob.ar/documentos/superficie-implantada-con-citrus-en-tucuman-2019> (consultado en mayo de 2021)
- INTA <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/18139> (consultado en enero de 2023)
- IPCC (2019). Updates Methodology for Greenhouse Gas Inventories: <https://www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/>.
- ISO 14040 (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organisation for Standardisation. Geneva, Switzerland.
- ISO 14044 (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organisation for Standardisation. Geneva, Switzerland.
- Khatri, P., Pandit, A. B. (2022). Systematic review of life cycle assessments applied to sugarcane bagasse utilization alternatives. *Biomass and Bioenergy*, 158, 106365. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106365>
- Luo, L., Van der Voet, E., Huppes, G. (2009). Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1613-1619. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.024>
- Machin Ferrero, L. M., Wheeler, J., Mele, F. D. (2022). Life cycle assessment of the Argentine lemon and its derivatives in a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 672-684. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.014>
- Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., Nishihara Hun, A. L., Valdeón, D. H., Mele, F. D. (2021a) Water footprint assessment of lemon and its derivatives in Argentina: a case study

- in the province of Tucumán. *International Journal Life Cycle Assessment*, 26, 1505-1519.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-021-01939-5>
- Mazzi, A. (2020). Introduction. Life cycle thinking. In *Life cycle sustainability assessment for decision-making* (pp. 1-19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00001-4>
  - Mendieta, O., Castro, L., Escalante, H., Garfí, M. (2021). Low-cost anaerobic digester to promote the circular bioeconomy in the non-centrifugal cane sugar sector: A life cycle assessment. *Bioresource technology*, 326, 124783.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124783>
  - Ministerio de Agricultura. Ganadería y Pesca - MAGyP (2019) Secretaría de Alimentos y Bioeconomía, Dirección Nacional de Alimentos y Bebidas. Cadena del limón resumen. <http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos> (consultado en mayo de 2021)
  - Nishihara Hun, A. L., Mele, F. D., Pérez, G. A. (2017). A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(4), 502-515.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3>
  - Nishihara Hun, A. L.; Mele, F. D.; Pérez, G. A. (2015) Perfil ambiental de la industria azucarera de la provincia de Tucumán obtenido a partir de la técnica del Análisis del Ciclo de Vida. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*. INTA Ediciones, 5(7), 62-75, 2015 (ISSN: 1853-7677).
  - Nishihara Hun, A.L. (2014). Análisis de ciclo de vida y estudio de sensibilidad paramétrica de la industria del azúcar y del bioetanol a partir de caña de azúcar. Tesis de maestría. Magister en Métodos Numéricos y Computacionales en Ingeniería. Universidad Nacional de Tucumán.
  - Peña, C., Civit, B., Gallego Schmid, A., Druckman, A., Caldeira-Pires, A., Weidema, B., ... Motta, W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *Life cycle initiative*. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01856-z>
  - Pergola M, D'Amico M, Celano G, Palese A, Scuderi A, Di Vita G, Pappalardo G, Inglese P (2013) Sustainability evaluation of Sicily's lemon and orange production: an energy, economic and environmental analysis. *Journal of Environmental Management*, 128:674–682. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.007>
  - PRé Sustainability (2024) User Manual. Amersfoort, The Netherlands: PRé Sustainability B.V. Available at: <https://simapro.com>

- Renouf, M., Pagan, R., Wegener, M. (2011). Life cycle assessment of Australian sugarcane products with a focus on cane processing. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 125-137. <http://doi.org/10.1007/s11367-010-0233-y>
- Rigamonti, L., Mancini, E. (2021). Life cycle assessment and circularity indicators. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(10), 1937-1942. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01966-2>
- Romero, E., Digonzelli, P., Scandaliaris, J. (2009). *Manual del Cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres*. ISBN 978-987-21283-7-1.
- Rosenbaum, R. K., Bachmann, T. M., Gold, L. S., Huijbregts, M. A., Jolliet, O., Juraske, R., Hauschild, M. Z. (2008). USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 532-546. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>
- Sánchez Collado, F.E, Nishihara Hun, A.L., Mele, F.D. Evaluación ambiental de tratamientos de vinazas de la industria sucroalcoholera usando Análisis de Ciclo de Vida. XIV Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA (Ed. Manzano, E.), S. M. de Tucumán, Argentina, 5-6 septiembre 2019. FACET, UNT. ISBN: 978-987-754-203-5. p. 170.
- Seabra, J., Macedo, I., Chum, E., Faroni, C., Sarto, C. (2011). Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 5, 519-532. <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.289>
- SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry. <<https://www.setac.org> > (consultado en julio de 2022).
- USDA (2020) United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service. *Citrus Annual*. <<https://www.fas.usda.gov/data/argentina-citrus-annual-5>>, <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/citrus.pdf> (consultado en enero de 2021)
- Weidema, B. P. (2000). Avoiding co-product allocation in life cycle. *Journal of Industrial Ecology*, 4(3), 10-34. <https://doi.org/10.1162/108819800300106366>
- Zah, R., Faist, M., Reinhard, J., Birchmeier, D. (2009). Standardized and simplified life-cycle assessment (LCA) as a driver for more sustainable biofuels. *Journal of Cleaner Production*, 17, S102-S105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.04.004>

---

# CAPÍTULO 6: Optimización Multiobjetivo y Estrategias de Simbiosis Industrial

*“Dios proporciona el viento, el hombre debe izar la vela”*

*San Agustín*

## Resumen

En los capítulos anteriores se realizó un análisis detallado del sistema bajo estudio bajo criterios económicos y ambientales de forma independiente, además de presentarse las bases conceptuales y metodológicas necesarias para abordar la optimización. Sin embargo, la realidad indica que estos aspectos se encuentran estrechamente interrelacionados y deben ser considerados de manera integral.

En el Capítulo 3 se detalló el modelo matemático de optimización desde la perspectiva económica, incluyendo sus conjuntos, parámetros, variables, restricciones, ecuaciones y función objetivo. Posteriormente, el Capítulo 4 aplicó dicho modelo al enfoque económico (Nishihara Hun *et al.*, 2023 a), incorporando un análisis de sensibilidad de ciertos parámetros clave, como el precio del papel, del azúcar y de la energía. Por último, el Capítulo 5 evaluó el desempeño ambiental individual de cada industria, proceso mediante la técnica del análisis de ciclo de vida (LCA) (Nishihara Hun, *et al.*, 2023 b), cuyo resultado fue la matriz de parámetros ambientales.

En este capítulo, se aborda el problema de optimización desde un enfoque integral. En primer lugar, se desarrolla el modelo matemático desde la perspectiva ambiental, incorporando las variables, parámetros, restricciones y ecuaciones adicionales al modelo económico previamente establecido. A continuación, se aplica el modelo de optimización multicriterio, que considera simultáneamente los objetivos económicos y ambientales. De este modo, se obtiene un conjunto de soluciones que optimizan ambos objetivos, logrando un balance integral que permite identificar las alternativas que representan el mejor compromiso posible entre estos dos aspectos fundamentales. Además, se analizan las relaciones de compromiso (en inglés *trade-offs*) entre el desempeño económico y el desempeño ambiental, obteniendo soluciones que consideran ambos aspectos.

Adicionalmente, en este capítulo se lleva a cabo un análisis de sensibilidad con el objetivo de evaluar la robustez de las soluciones óptimas resultantes del análisis de Pareto. Asimismo, se vuelve a aplicar la metodología del LCA, con el fin de comparar el impacto ambiental, en la categoría de potencial de calentamiento global (GWP), entre uno de los escenarios ( $\varepsilon_2$ ) con simbiosis industrial y aquel en el que las industrias operan de manera aislada.

Los hallazgos de este capítulo, junto con los resultados de los anteriores, proporcionan una visión completa e integrada de los aspectos claves a considerar para la implementación exitosa de la simbiosis industrial en el caso de estudio. Sienta las bases para la toma de decisiones fundamentadas y la transición hacia modelos de producción más sostenibles.

## 6.1 Introducción

En un contexto de creciente preocupación por el impacto ambiental y social de las actividades industriales, la optimización multiobjetivo aplicada al diseño de sistemas de simbiosis industrial es una herramienta importante y fecunda en el campo de la ingeniería y de la gestión ambiental.

En el caso específico, en Tucumán, las agroindustrias de la caña de azúcar y el limón son pilares económicos, pero con alto consumo de recursos y generación de residuos, lo que exige enfoques innovadores para mejorar eficiencia y reducir impactos. Esta tesis propone estrategias de simbiosis industrial (SInd) optimizadas en lo económico y ambiental (Mele *et al.*, 2011), alineadas con la economía circular y la gestión de recursos, que podrían replicarse en otras regiones. La SInd, apoyada en modelos matemáticos y análisis de ciclo de vida (LCA), resulta clave para optimizar el intercambio de recursos entre empresas. A diferencia de muchos estudios previos que tratan lo económico y ambiental por separado, aquí se integran ambos aspectos para identificar soluciones más sostenibles y adecuadas al caso de estudio (Gonela y Zhang, 2014; Ng *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015; Vahidzadeh y Bertanza, 2022 y Khan *et al.*, 2023).

## 6.2 Modelo Matemático

### 6.2.1 Incorporación de Criterios Ambientales

El modelo de optimización económica desarrollado en el Capítulo 3 se amplía en este capítulo mediante la incorporación de componentes ambientales, permitiendo un análisis multicriterio. A continuación, se detallan los nuevos elementos matemáticos introducidos: conjuntos, parámetros, variables, ecuaciones, función objetivo.



## Conjuntos

Se denomina  $e$  al conjunto integrado por las once categorías de impacto ambiental seleccionadas:  $GWP$ ,  $AP$ ,  $EP$ ,  $TH$ ,  $CED - F$ ,  $CED - N$ ,  $CED - B1$ ,  $CED - B2$ ,  $CED - R$ ,  $CED - A$ .

$GWP$ : Calentamiento global a 100 años [kg CO<sub>2</sub> eq/t]

$AP$ : Acidificación terrestre [kg SO<sub>2</sub> eq/t]

$EP$ : Eutrofización de agua dulce [kg P eq/t]

$EF$ : Escasez de recursos fósiles [kg petróleo eq/t]

$TH$ : Toxicidad humana [casos/t]

$CED - F$ : Demanda de energía acumulada - energía no renovable – fósil [MJ/t]

$CED - N$ : Demanda de energía acumulada - energía no renovable – nuclear [MJ/t]

$CED - B1$ : Demanda de energía acumulada - energía no renovable – biomasa [MJ/t]

$CED - B2$ : Demanda de energía acumulada - energía renovable – biomasa [MJ/t]

$CED - R$ : Demanda de energía acumulada - energía renovable – eólica, solar, geotérmica [MJ/t]

$CED - A$ : Demanda de energía acumulada - energía renovable – energía potencial del agua [MJ/t]

$IM_{i,p}$ , define el conjunto constituido por el producto principal en cada planta de proceso  $p$ , la caña de azúcar para el campo, el jugo de caña para la molienda, el azúcar blanco para el ingenio, el etanol para las destilerías, la energía y vapor del sistema de cogeneración de la mezcla RAC y bagazo, el limón para el campo de limoneros, el jugo concentrado para la industria citrícola, la energía y vapor del sistema de cogeneración de residuos de poda, el biogás del sistema de digestión de vinaza, la energía y vapor del sistema de cogeneración del biogás de vinaza, biogás del sistema de digestión del efluente de la citrícola, la energía y vapor del sistema de cogeneración del biogás de efluente de la citrícola, el papel de la planta papelería, la energía y vapor del sistema de cogeneración del licor negro.

## Parámetros

Los valores de los parámetros ambientales correspondientes a  $\omega PR_{p,e}$  se detallan en la matriz del Capítulo 5, Tablas 5.18.

$\omega PR_{p,e}$  es el valor de impacto ambiental de producción de la categoría  $e$  en la planta  $p$ , en unidades especificadas para el conjunto  $e$ . Estos parámetros están dados por los impactos ambientales, puerta a puerta [kg CO<sub>2</sub> eq/t], [kg SO<sub>2</sub> eq/t], [kg P eq/t], [kg petróleo eq/t], [casos/t], [MJ/t].

$\omega TR_{i,e}$  es el valor de impacto ambiental de transporte de la categoría  $e$  para el producto  $i$ , desde la planta  $p$  a  $q$  [kg CO<sub>2</sub> eq/t km], [kg SO<sub>2</sub> eq/t km], [kg P eq/t km], [kg petróleo eq/t km], [casos/t km], [MJ/t km].

$\omega EXT_{i,e}$  es el valor de impacto ambiental de la energía y vapor adquiridos a proveedores externos, de la categoría  $e$ , para la energía en unidades [kg CO<sub>2</sub> eq/MWh], [kg SO<sub>2</sub> eq/MWh], [kg P eq/MWh], [kg petróleo eq/MWh], [casos/MWh], [MJ/MWh] y para el vapor [kg CO<sub>2</sub> eq/t], [kg SO<sub>2</sub> eq/t], [kg P eq/t], [kg petróleo eq/t], [casos/t], [MJ/t]

$dist_{p,q}$ : distancia entre la planta  $p$  y la planta  $q$  [km].

## Variables

$XT_{i,p}$ : cantidad de  $i$  en  $p$ , positiva para productos y negativa para insumos en unidades de [t/año], [MWh/año] y [m<sup>3</sup>/año].

$X_{i,p}$ : es el valor absoluto de la variable  $XT_{i,p}$ .

$Tr_{i,p,q}$ : flujo transportado de  $i$  desde la planta  $p$  a la planta  $q$  [t/año], [MWh/año], [m<sup>3</sup>/año].

$EXT_{i,p}$ : flujos de energía y vapor adquiridos a proveedores externos [MWh/año], [t/año].

$EnvImpPR_e$ : valor de impacto ambiental de producción de la categoría  $e$ , en el año, unidades de [kg CO<sub>2</sub> eq/año], [kg SO<sub>2</sub> eq/año], [kg P eq/año], [kg petróleo eq/año], [casos/año], [MJ/año].

$EnvImpTR_e$ : valor de impacto ambiental de transportar  $i$  desde la planta  $p$  a  $q$  [kg CO<sub>2</sub> eq/año], [kg SO<sub>2</sub> eq/año], [kg P eq/año], [kg petróleo eq/año], [casos/año], [MJ/año].

$EnvImpEXT_e$ : valor de impacto ambiental de adquirir energía y vapor a proveedores externos [kg CO<sub>2</sub> eq/año], [kg SO<sub>2</sub> eq/año], [kg P eq/año], [kg petróleo eq/año], [casos/año], [MJ/año].

$EnvImp_e$ : impacto ambiental total en el año, unidades de [kg CO<sub>2</sub> eq/año], [kg SO<sub>2</sub> eq/año], [kg P eq/año], [kg petróleo eq/año], [casos/año], [MJ/año].

## Ecuaciones

Para representar el impacto ambiental de la producción de los diferentes productos a partir de producto principal de una planta  $p$ ,  $EnvImpPR_e$ , se usa la Ecuación 6.1

$$EnvImpPR_e = \sum_{i,p \in IM_{i,p}} X_{i,p} \cdot \omega PR_{p,e} \quad (6.1)$$

donde  $X_{i,p}$  es el valor absoluto de la variable  $XT_{i,p}$ .  $XT_{i,p}$  es la cantidad de  $i$  en la planta  $p$ , positiva para productos y negativa para insumos, siendo  $IM_{i,p}$  el conjunto constituido por el producto principal en cada planta de proceso y  $\omega PR_{p,e}$  el valor de impacto ambiental de producción de la categoría  $e$  en la planta  $p$ .

Por otra parte, el impacto ambiental por el transporte,  $EnvImpTR_e$ , viene dado por el impacto ambiental de transportar  $i$  desde la planta  $p$  a  $q$ ,  $Tr_{i,p,q}$ , por el valor de impacto ambiental de transporte  $\omega TR_{i,e}$  de la categoría  $e$  del producto  $i$  y por el parámetro  $dist_{p,q}$ , la distancia entra la planta  $p$  y  $q$  (Ecuación 6.2).

$$EnvImpTR_e = \sum_{i,p,q} Tr_{i,p,q} \cdot \omega TR_{i,e} \cdot dist_{p,q} \quad (6.2)$$

El impacto ambiental de adquirir vapor y energía de la red externa,  $EnvImpEXT_e$ , viene expresado en función de  $EXT_{i,p}$ , flujos de energía y vapor adquiridos y de  $\omega EXT_{i,e}$ , valor de impacto ambiental de la energía y vapor externa de la categoría  $e$  (Ecuación 6.3).

$$EnvImpEXT_e = \sum_{i,p} EXT_{i,p} \cdot \omega EXT_{i,e} \quad (6.3)$$

El impacto ambiental total será la suma de los impactos ambientales de la producción, del transporte y de la adquisición de energía y vapor de la red externa, como se ve en la Ecuación 6.4.

$$FOA = EnvImpPR_e + EnvImpTR_e + EnvImpEXT_e \quad (6.4)$$

## Función Objetivo

En este apartado, se plantea la función objetivo a optimizar desde el punto de vista ambiental, planteándose la minimización de los impactos ambientales de esta red de empresas. En este caso, la función objetivo que se quiere minimizar es  $FOA$ .

*FOA*: función objetivo que minimiza los impactos ambientales  $\text{kg CO}_2 \text{ eq/año}$ ,  $[\text{kg SO}_2 \text{ eq/año}]$ ,  $[\text{kg P eq/año}]$ ,  $[\text{kg petróleo eq/año}]$ ,  $[\text{casos/año}]$ ,  $[\text{MJ/año}]$ .

## 6.2.2 Matriz y Mapa de Distancias

Para poder calcular el impacto ambiental por el transporte,  $EnvImpTR_e$ , definido en la Ecuación 6.2, se hace necesario tener los datos de los parámetros  $dist_{p,q}$ , la distancia entre la planta  $p$  y  $q$ . En la Figura 6.1 y en la Tabla 6.1 se muestran estos valores.

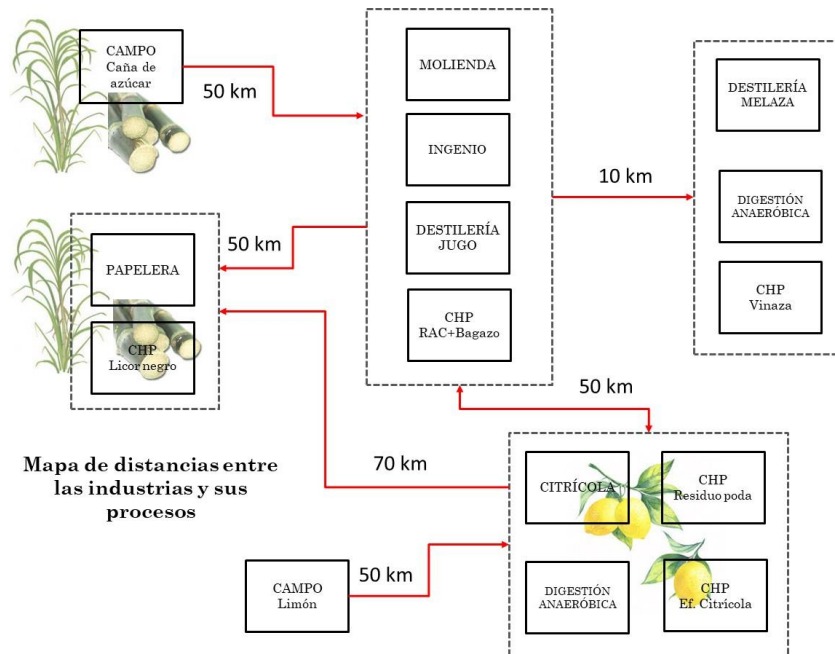


Figura 6.1 - Mapa con las distancias entre las industrias y procesos

Tabla 6.1 - Matriz de distancias entre las industrias y sus procesos, en unidades de km.

	Campo caña azúcar		Molienda caña azúcar	Ingenio	Destilería melaza	Destilería jugo	CHP- RAC+bagazo	Digestión anaeróbica - vinaza	CHP – biogás vinaza	Campo limón	Citrícola	CHP – residuos poda	Digestión anaeróbica - efluente citrícola	CHP – biogás efluente citrícola	Papelera	CHP - licor negro
Campo caña azúcar	0		50	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Molienda caña azúcar	50		0	1	10	1	1	10	10	0	0	0	0	0	50	0
Ingenio	0		1	0	10	1	1	10	10	0	0	0	0	0	0	0
Destilería melaza	0		10	10	0	10	10	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Destilería jugo	0		1	1	10	0	1	10	10	0	0	0	0	0	0	0
CHP- RAC+bagazo	50		1	1	10	1	0	10	10	100	50	50	50	50	50	50
Digestión anaeróbica - vinaza	0		10	10	1	10	10	0	1	0	50	50	50	50	50	50
CHP – biogás vinaza	0		10	10	1	10	10	1	0	0	60	60	60	60	60	60
Campo limón	0		0	0	0	0	100	0	0	0	50	50	50	50	0	0
Citrícola	0		0	0	0	0	50	50	60	50	0	1	1	1	0	0
CHP – residuos poda	0		0	0	0	0	50	50	60	50	1	0	1	1	70	70
Digestión anaeróbica - efluente citrícola	0		0	0	0	0	50	50	60	50	1	1	0	1	70	70
CHP – biogás efluente citrícola	0		0	0	0	0	50	50	60	50	1	1	1	0	70	70
Papelera	0		50	0	0	0	50	50	60	0	0	70	70	70	0	1
CHP - licor negro	0		0	0	0	0	50	50	60	0	0	70	70	70	1	0



## 6.3 Problema de Optimización Multiobjetivo

### 6.3.1 Definición

El problema de optimización multiobjetivo que se quiere resolver se puede representar de manera general como se muestra en la Ecuación 6.5.

$$\begin{aligned} \min \quad & \{f_1(x, y), \dots, f_k(x, y), \dots, f_N(x, y)\} \\ \text{s. t:} \quad & h(x, y) = \Theta \\ & g(x, y) \leq \Theta \\ & x \in \mathfrak{R}^n, \quad y \in \{0; 1\} \end{aligned} \tag{6.5}$$

En este caso,  $f_k(x, y)$  representa las distintas funciones-objetivo que componen el problema en particular ( $k = 1, \dots, N$ );  $h$  y  $g$  son los vectores de restricciones de igualdad y desigualdad, respectivamente; y  $x$  e  $y$  son las variables reales y binarias del problema, respectivamente. Para el problema planteado en esta Tesis, en particular, la Ecuación 6.5 estaría integrada por la función objetivo económica  $FO\$$  y por la función objetivo ambiental  $FOA$  (Ecuación 6.6)

$$\min \quad \{(-FO\$), FOA\} \tag{6.6}$$

Para homogenizar el sentido de optimización (minimización de todas las  $FO$ ), se aplicó un cambio de signo a la  $FO\$$ . Así, el problema transformado busca minimizarla, lo que equivale a maximizar las ganancias.

La Ecuación 3.15 del Capítulo 3, define la función objetivo económica, mientras que la Ecuación 6.4, la ambiental.

### 6.3.2 Resolución. Método de la Restricción $\varepsilon$

En problemas de optimización con múltiples objetivos, las funciones suelen presentar conflictos, donde la mejora de un objetivo implica el deterioro de otro. Entre los diversos métodos que podrían aplicarse para resolver problemas de optimización multiobjetivo, el método de la restricción  $\varepsilon$  se emplea para transformar un problema multiobjetivo en uno

mono-objetivo (Ecuación 6.7), optimizando un objetivo principal mientras los demás se convierten en restricciones acotadas por parámetros  $\varepsilon$  (Mesquita-Cunha *et al.*, 2023).

$$\begin{aligned} \min \quad & \{f_n(x, y)\} \\ \text{s. t: } \quad & f_k(x, y) \leq \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, \dots, N, k \neq n \\ & x \in \mathbb{R}^n, \quad y \in \{0; 1\} \end{aligned} \quad (6.7)$$

## 6.4 Aplicación de la Optimización Multiobjetivo. Resultados

Para resolver el problema multiobjetivo, se implementó el método de la restricción  $\varepsilon$  mediante el siguiente procedimiento.

### **Cálculo del valor de base ambiental:**

Se ejecutó el modelo maximizando únicamente la función objetivo económica, obteniéndose el escenario con mayores ganancias, pero también con el máximo impacto ambiental. Este último valor sirvió como referencia para definir los límites de las restricciones ambientales.

### **Generación de rangos ( $\varepsilon$ ):**

El impacto ambiental total calculado anteriormente se dividió en diez intervalos equidistantes, definiendo puntos de restricción ( $\varepsilon_1$  a  $\varepsilon_9$ ) que acotan gradualmente el impacto.

### **Optimización multiobjetivo:**

El LCA desarrollado en el Capítulo 5 contempla once categorías de impacto ambiental. Sin embargo, tras una evaluación preliminar de los resultados, se observó que el comportamiento entre todas estas categorías se correlacionaba, mostrando patrones similares entre los beneficios económicos y reducción de impactos.

Así, para reducir el análisis que se expone en esta Tesis, se seleccionaron cuatro categorías representativas, dos del modelo de ReCiPe, uno de USEtox y otro de CED. Esta selección permite abarcar distintos tipos de efectos ambientales, tanto globales como locales, directos e indirectos, además de incluir categorías de impacto características en estudios relacionados con biomasa. Las categorías fueron las siguientes:

- Calentamiento global (GWP).
- Acidificación.



- Toxicidad humana.
- Demanda de energía acumulada - Energía no renovable - Fósil.

Esta selección permitió evitar redundancias en el análisis (dada la correlación observada entre categorías) y abordar dimensiones ambientales críticas con enfoques complementarios.

### Frontera de Pareto:

Para cada  $\varepsilon$  y cada categoría ambiental seleccionada se resolvió el modelo en GAMS®, obteniéndose el valor de la función económica (FO\$) y ambiental (FOA). A partir de estos datos se generaron las curvas de Pareto (Figura 6.2 a Figura 6.5) correspondientes a las cuatro categorías analizadas. Estas curvas permiten visualizar el conflicto entre pares de objetivos, uno económico y uno ambiental.

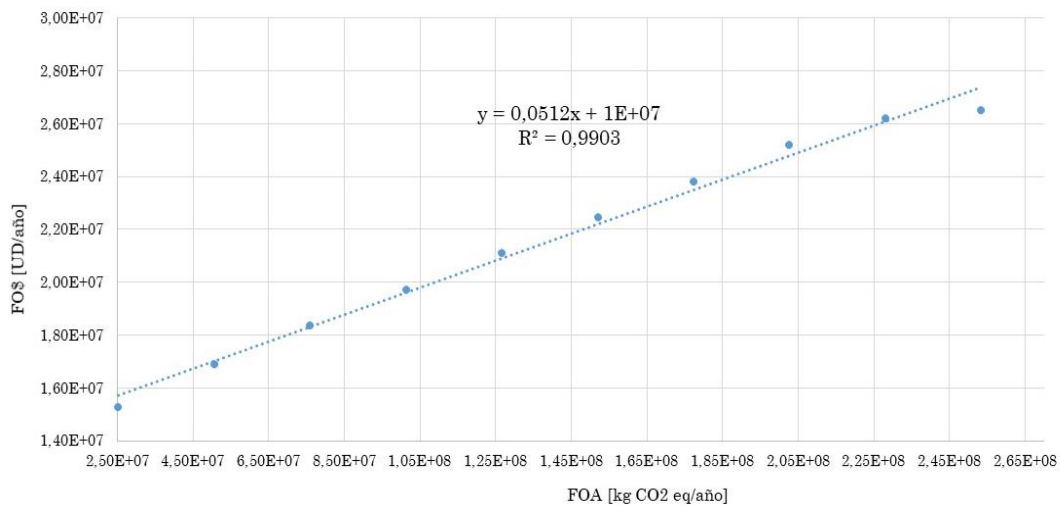


Figura 6.2 - Puntos de Pareto entre FO\$ y FOA para Calentamiento Global

La Figura 6.2 y la Tabla 6.2 muestran los valores de las funciones objetivo económica y para la categoría de impacto GWP. Cada punto en la figura representa una solución de Pareto obtenida con un valor diferente del parámetro  $\varepsilon$ , evidenciando el conflicto entre los dos objetivos: a mayor beneficio económico, se observa un incremento en el impacto ambiental, y viceversa. En esta gráfica también se muestra el ajuste lineal realizado de estos puntos y el valor del coeficiente de determinación  $R^2$  correspondiente. Las Figuras 6.3 a 6.5 representan los puntos de Pareto correspondientes al objetivo económico versus

acidificación, toxicidad y consumo de energía fósil, respectivamente. También cada una de ellas muestra la función lineal de ajuste de los puntos de Pareto y el valor de  $R^2$ .

Como complemento a las curvas de Pareto, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de las soluciones óptimas obtenidas entre la función objetivo económica y las funciones-objetivo ambientales. Al disminuir los valores de las abscisas (indicadores ambientales) en un 10%, se cuantificaron los valores del impacto marginal que estos cambios tienen en la función objetivo económica, identificándose qué categorías de impacto ejercen una mayor influencia en la viabilidad económica del sistema y, por lo tanto, cuáles requieren una atención prioritaria en las estrategias de mitigación.

La sensibilidad de la función económica a cambios en la categoría de impacto “Toxicidad Humana” fue del 100%, en “Acidificación” fue del 42,78%. La variación en la categoría de impacto GWP resultó en una modificación del 8,52% en la función objetivo económica y la categoría de “Demanda de energía acumulada” demostró ser la menos sensible, con una variación de solo 0,58%.

Tabla 6.2 - Categoría de impacto GWP – Valores de las funciones-objetivo

Valor Función Objetivo	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\varepsilon_4$	$\varepsilon_5$	$\varepsilon_6$	$\varepsilon_7$	$\varepsilon_8$	$\varepsilon_9$
FOA	253.466.300	228.119.670	202.773.040	177.426.410	152.079.780	126.733.150	101.386.520	76.039.890	50.693.260	25.346.630
FO\$	26.510.140	26.193.710	25.191.180	23.793.490	22.449.570	21.105.640	19.707.950	18.364.020	16.880.600	15.273.790

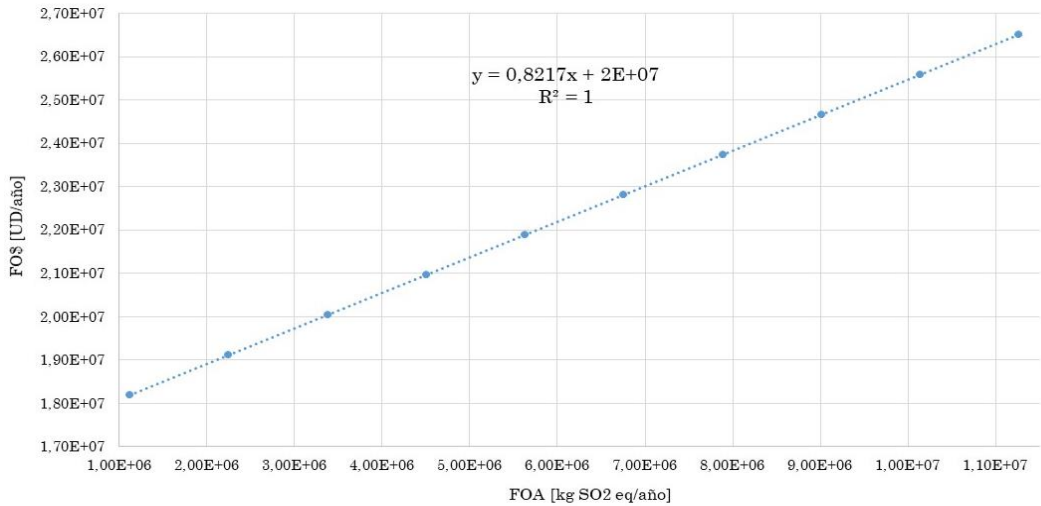


Figura 6.3 - Puntos de Pareto entre FO\$ y FOA para Acidificación

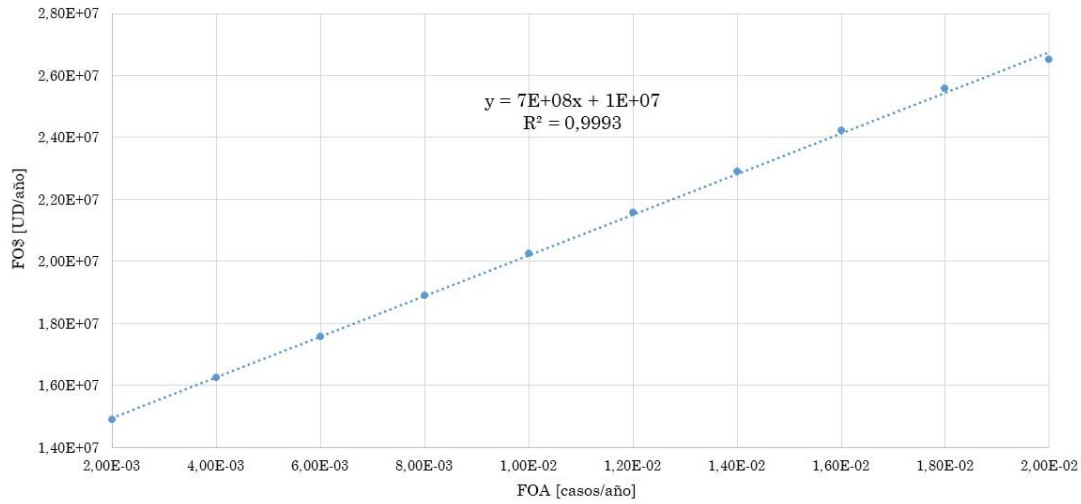


Figura 6.4 - Puntos de Pareto entre FO\$ y FOA para Toxicidad Humana

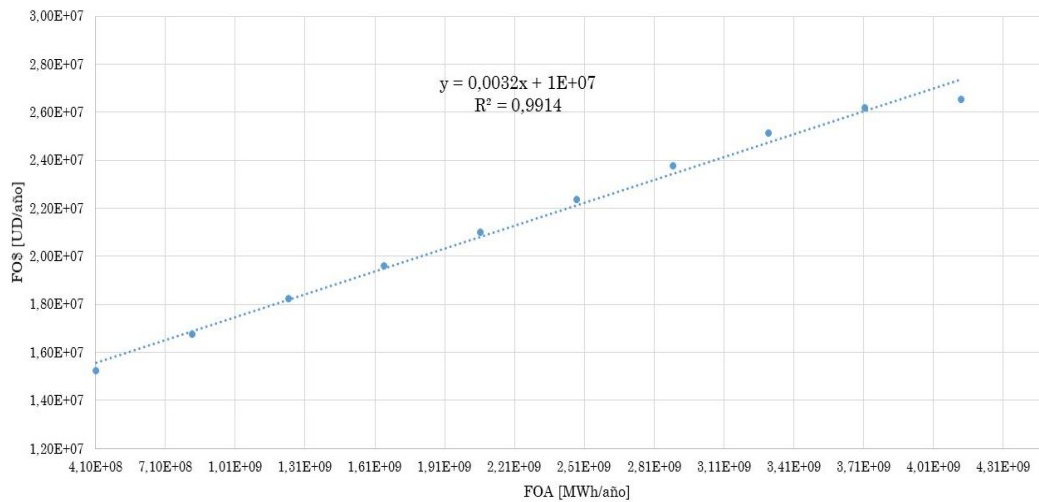


Figura 6.5 - Puntos de Pareto entre FO\$ y FOA para Demanda de Energía Fósil

### Flujos intercambiables:

Para el caso de optimización biobjetivo entre  $FO\$$  y  $FOA = \text{GWP}$ , se analizaron los resultados en términos de los siguientes componentes claves, parte de los cuales se resumen en las Tablas 6.3 a 6.5:

- flujos intercambiables dentro del tejido productivo
- porcentaje de satisfacción de la demanda de los productos principales de cada industria
- flujos de energía necesarios a adquirir a proveedores externos

- cantidad de residuos generados y no aprovechables

El análisis se restringe a los escenarios:  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_4$ ,  $\varepsilon_7$  y  $\varepsilon_9$ . El escenario  $\varepsilon_0$  es el de mayores ganancias económicas, pero también el de mayor impacto ambiental. Esto se refleja en que es el escenario con mayor satisfacción de la demanda de productos en cada industria, así como en el único escenario con consumo de energía proveniente de la red externa. Además, en este escenario se prioriza menos el reúso de las biomasas residuales y se genera la mayor cantidad de residuos. En el extremo opuesto se encuentra el escenario  $\varepsilon_9$ , el cual presenta el menor impacto ambiental.

Tabla 6.3 - Porcentaje de satisfacción de la demanda de los productos principales

Satisfacción de la demanda (%)	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_4$	$\varepsilon_7$	$\varepsilon_9$
Azúcar	77,33	69,04	43,76	6,10	0
etanol melaza	42,30	37,76	23,94	3,34	0
etanol jugo	100	100	100	100	29,08
jugo citrícola	100	100	100	100	100
aceite esencial de limón	99,47	99,47	99,47	99,47	99,47
cáscara deshidratada	100	100	100	100	100
Papel	100	91,70	66,41	28,73	6,5

Tabla 6.4 - Flujos de energía adquiridos a proveedores externos

Energía de proveedores externos (MWh/año)	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_4$	$\varepsilon_7$	$\varepsilon_9$
Molienda	22.601	0	0	0	0
Ingenio	8.306	0	0	0	0
Destilería Melaza	1.026	0	0	0	0
Destilería Jugo	1.618	0	0	0	0
Citrícola	3.336	0	0	0	0
Papelera	47.021	0	0	0	0
Molienda	22.601	0	0	0	0

Tabla 6.5 - Cantidad de residuos generados

Residuos (t/año)	$\varepsilon_0$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_4$	$\varepsilon_7$	$\varepsilon_9$
RAC	117.327	107.593	77.922	33.706	7.718
vinaza-destilería melaza	100.352	89.593	56.796	7.922	0
vinaza-destilería jugo	158.179	158.179	158.179	158.179	45.998
residuo poda-limoneros	0	16.130	16.130	16.130	16.130
efluente-citrícola	525.158	525.158	525.158	525.158	525.158
licor negro-papelera	2.165.401	1.612.883	1.165.241	498.167	102.418
vapor-CHP licor negro	0	1.456.077	1.060.406	470.778	133.494

Los resultados obtenidos se complementan con representaciones gráficas de los intercambios de corrientes entre las unidades productivas (Figura 6.6 a Figura 6.10). En estas se puede observar que en el escenario  $\varepsilon_0$  se hallan activos los sistemas de cogeneración de energía y vapor para los residuos de poda y para el licor negro, mientras que, para el resto de los escenarios, solamente se halla activo el del licor negro. Por otra parte, en el escenario de  $\varepsilon_9$  se observa que se inactiva el ingenio y la destilería de melaza, eliminando por lo tanto la producción de azúcar y etanol de melaza.

Entre los escenarios  $\varepsilon_0$  y  $\varepsilon_2$ , se puede observar que la satisfacción de la demanda disminuye ligeramente; la generación de residuos también se reduce, ya que son aprovechables para generar energía y vapor; hay un consumo nulo de energía de la red externa, por lo que es un escenario que demuestra ser atractivo frente al caso base. Los gráficos ayudan a visualizar los flujos energéticos y los cambios en la configuración productiva, permitiendo evaluar *trade-offs* entre eficiencia, sostenibilidad y continuidad operativa. El análisis presentado describe los resultados de diferentes escenarios en un sistema de producción que incluye cogeneración de energía y vapor a partir de residuos, así como la producción de azúcar y etanol de melaza. El escenario  $\varepsilon_9$ , más restrictivo, desactiva por completo el ingenio y la destilería, eliminando la producción de esos derivados.



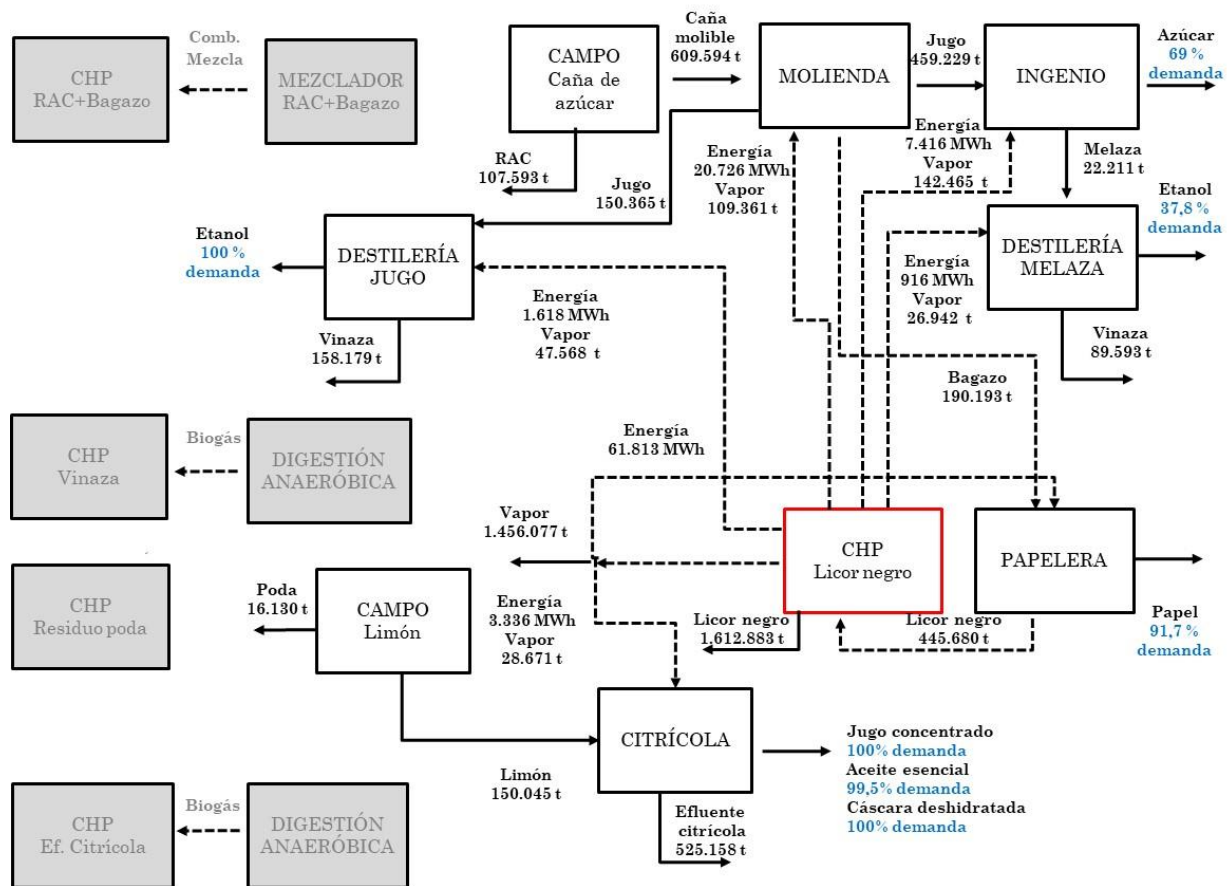


Figura 6.7 - Flujos intercambiables – GWP –  $\varepsilon_2$ . El código es idéntico al de la Figura 6.6

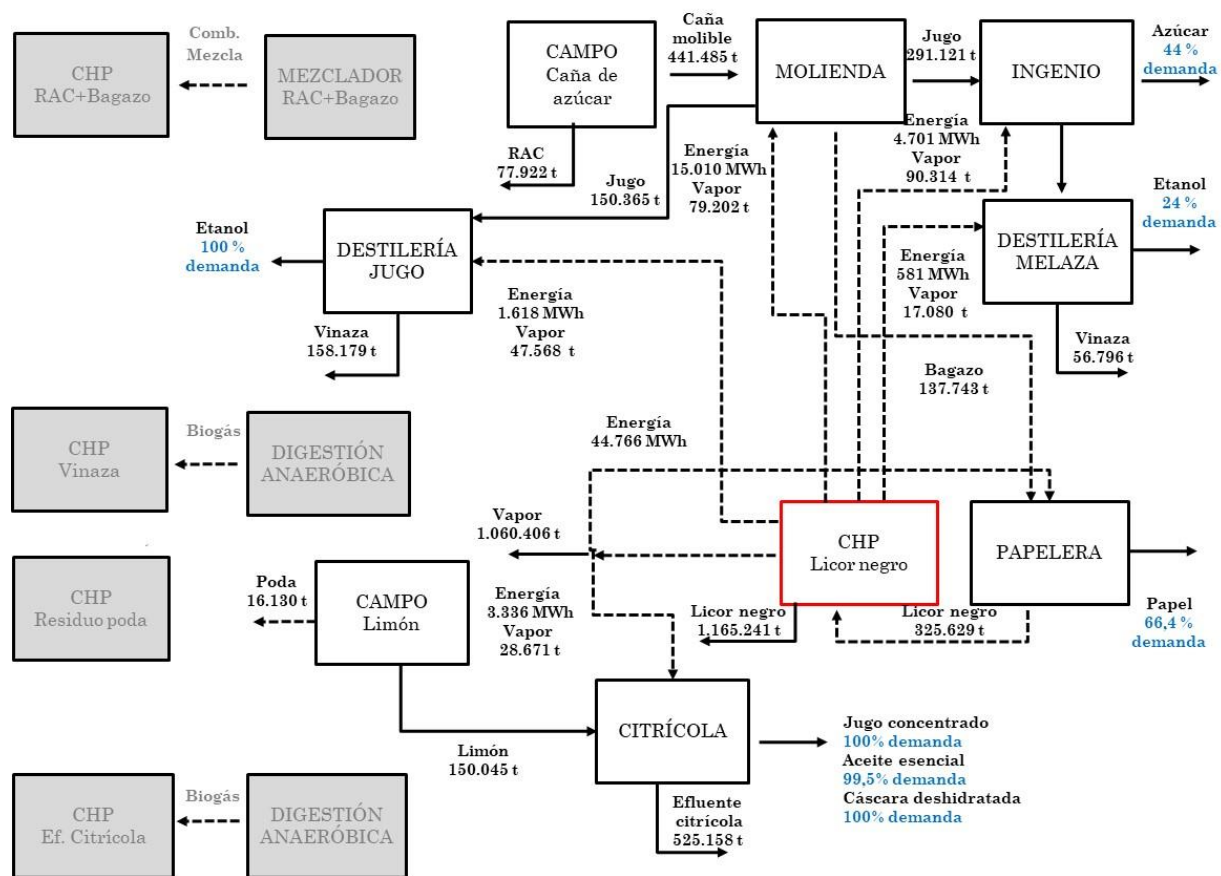


Figura 6.8 - Flujos intercambiables – GWP –  $\varepsilon_4$ . El código es idéntico al de la Figura 6.6



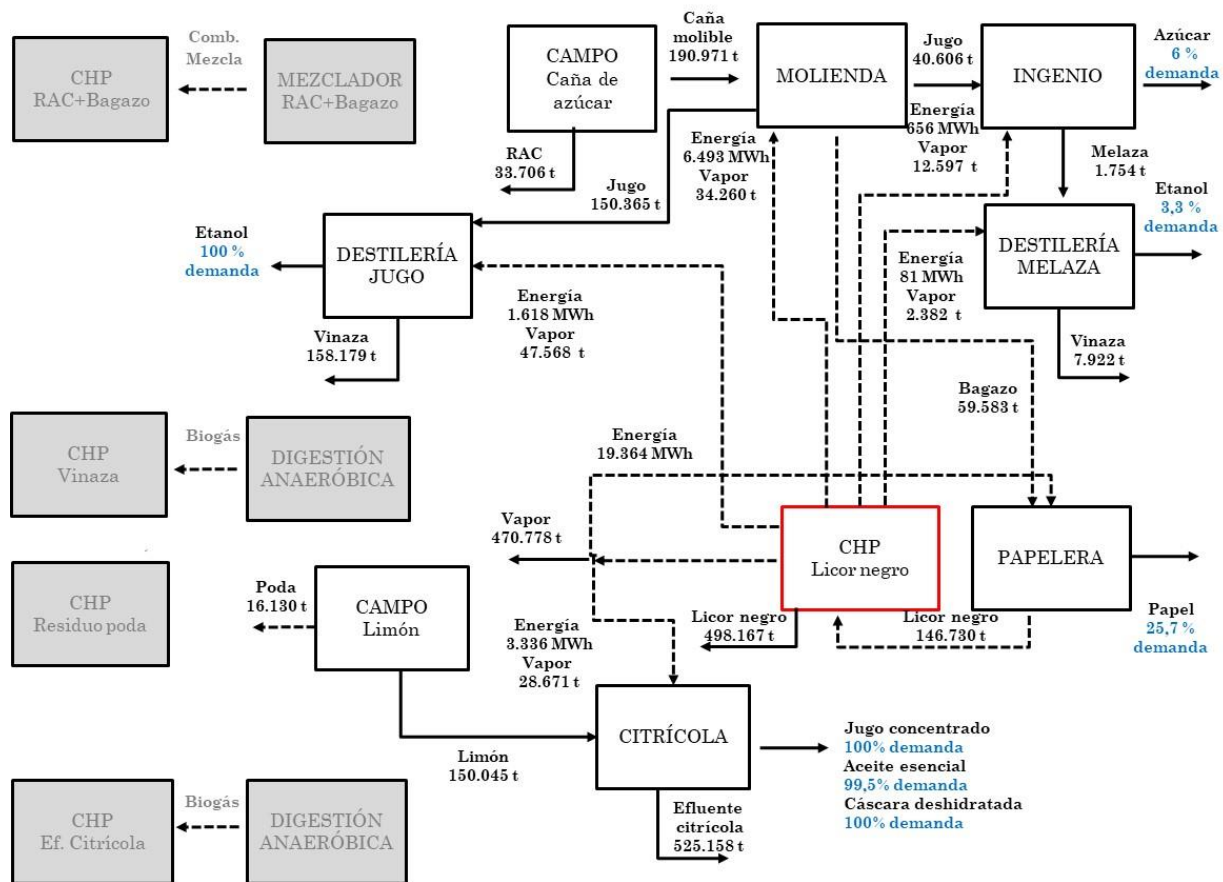


Figura 6.9 - Flujos intercambiables – GWP –  $\varepsilon_7$ . El código es idéntico al de la Figura 6.6

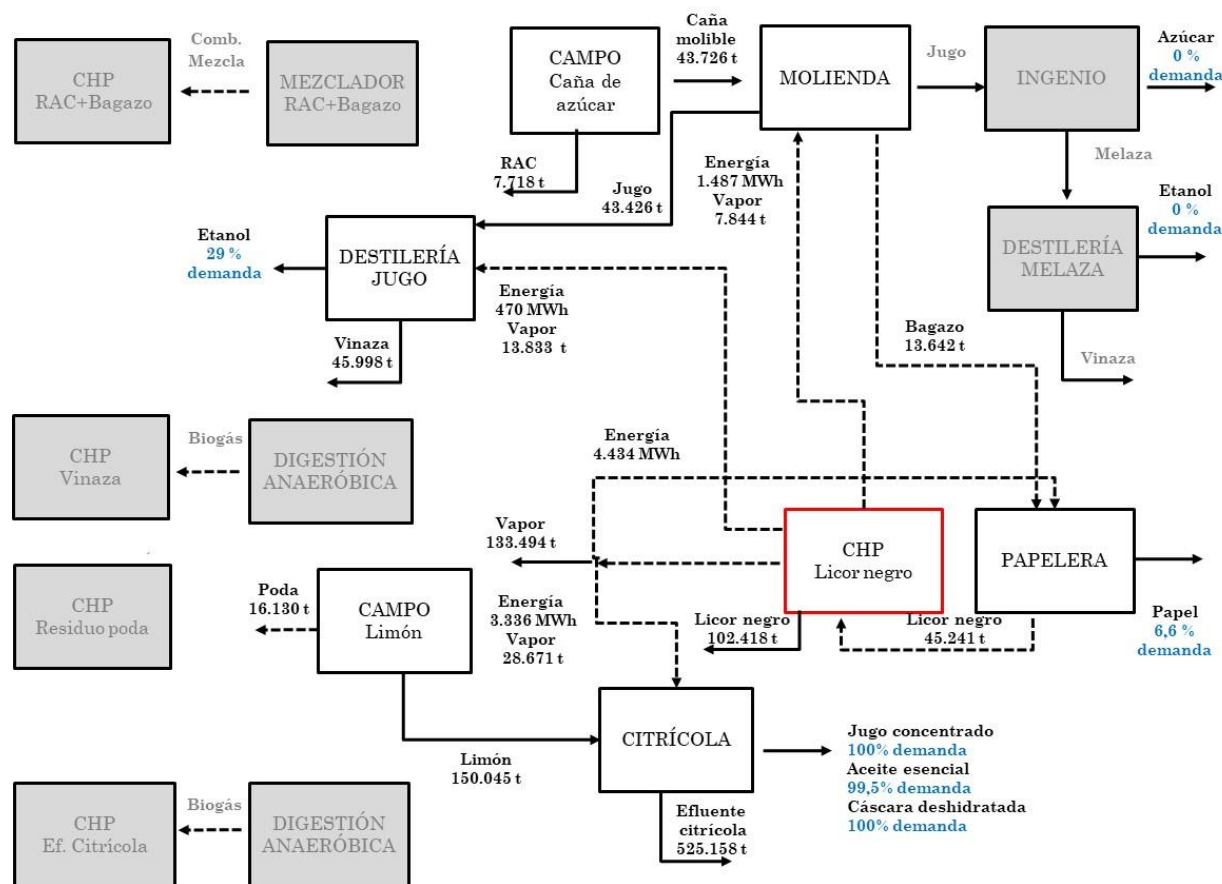


Figura 6.10 - Flujos intercambiables – GWP –  $\varepsilon_g$ .

El código es idéntico al de la Figura 6.6

El modelo de optimización contiene 1.918 ecuaciones y 7.144 variables. Para su resolución, se empleó el software de modelado algebraico GAMS® (General Algebraic Modeling System, versión 24.5.4), utilizando el solver CPLEX 12.6.2 para problemas de programación lineal. Los cálculos se ejecutaron en un equipo con un procesador Intel® Core™ i5-5200U CPU @ 2.2 GHz y 8 GB de RAM. El tiempo de procesamiento (CPU) necesario para calcular una solución de Pareto oscila entre 0,031 y 0,094 segundos.

## 6.5 Análisis de Ciclo de Vida - Comparativo

Tras resolver el modelo matemático multiobjetivo (mediante el método de la restricción  $\varepsilon$ ) y definir las sinergias de SInd entre la industria citrícola, papelería y el ingenio-destilería, se procedió a reevaluar el desempeño ambiental donde las industrias operan de manera independiente. Para ello, se realizó un segundo estudio de LCA.

Se tomó como referencia para la comparación el escenario  $\varepsilon_2$  ya que satisface en gran parte las demandas de los productos principales con flujos de azúcar, derivados de limón y papel. Para el análisis del sistema operando en forma independiente —sin SInd—, a cada establecimiento se le acopló su sistema de cogeneración específico, como se ilustran en los esquemas desde la Figura 6.11 a la Figura 6.13. En estas se observan los requerimientos de energía y vapor necesarios para alcanzar los niveles de producción definidos, junto con el potencial de aprovechamiento de las corrientes residuales para suplir dicha demanda.

En el caso de la industria sucroalcoholera, los requerimientos de energía y vapor se cubren principalmente aprovechando el RAC y el bagazo, ya que este sistema de cogeneración, genera en la práctica habitual la energía y el vapor necesarios para la molienda de la caña, la fabricación de azúcar y las destilerías de alcohol. Cabe destacar que la vinaza y una parte del RAC son corrientes residuales no aprovechadas en el escenario sin SInd, siendo la primera destinada a fertirriego.

Por su parte, en la industria citrícola, la energía proveniente del sistema de cogeneración a partir del efluente de la citrícola, resulta ser insuficiente, por lo que es necesario el suministro con energía proveniente de la red eléctrica externa. En este caso, se considera la práctica habitual en la que el residuo de poda no se aprovecha energéticamente.

En cuanto a la industria papelera, se integró al esquema, el proceso de molienda para obtener el bagazo necesario como materia prima. Respecto a la energía, su sistema de cogeneración aprovecha solo una parte del licor negro, de modo que produce la cantidad de energía necesaria para abastecer a la molienda y a la industria del papel, destinándose una porción significativa del licor restante a disposición final en el campo.

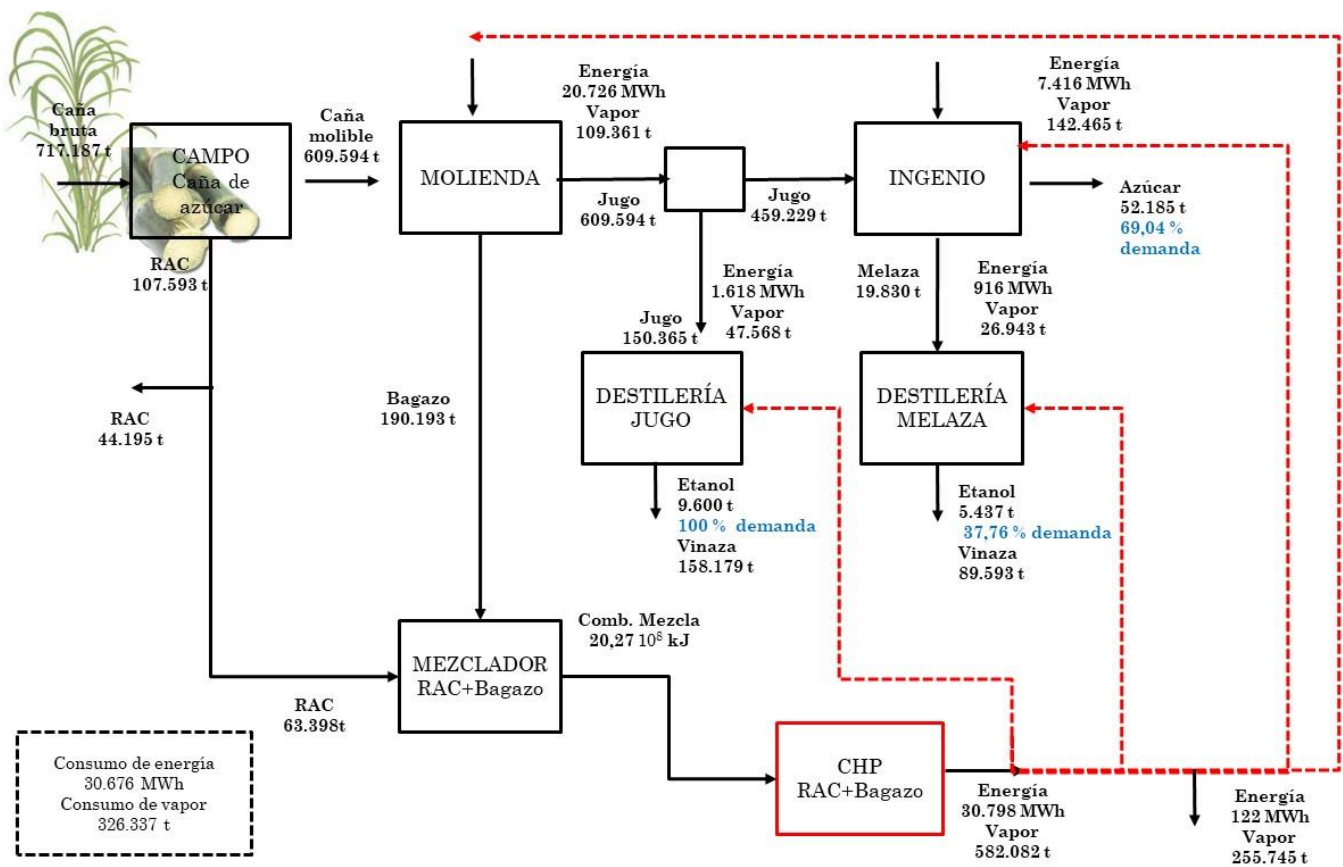


Figura 6.11 - Entradas y salidas de materiales y energía para la industria sucroalcoholera – escenario  $\varepsilon_2$  sin SInd. En rojo se destaca el proceso de generación de energía seleccionado y las corrientes de energía y vapor a aprovechar

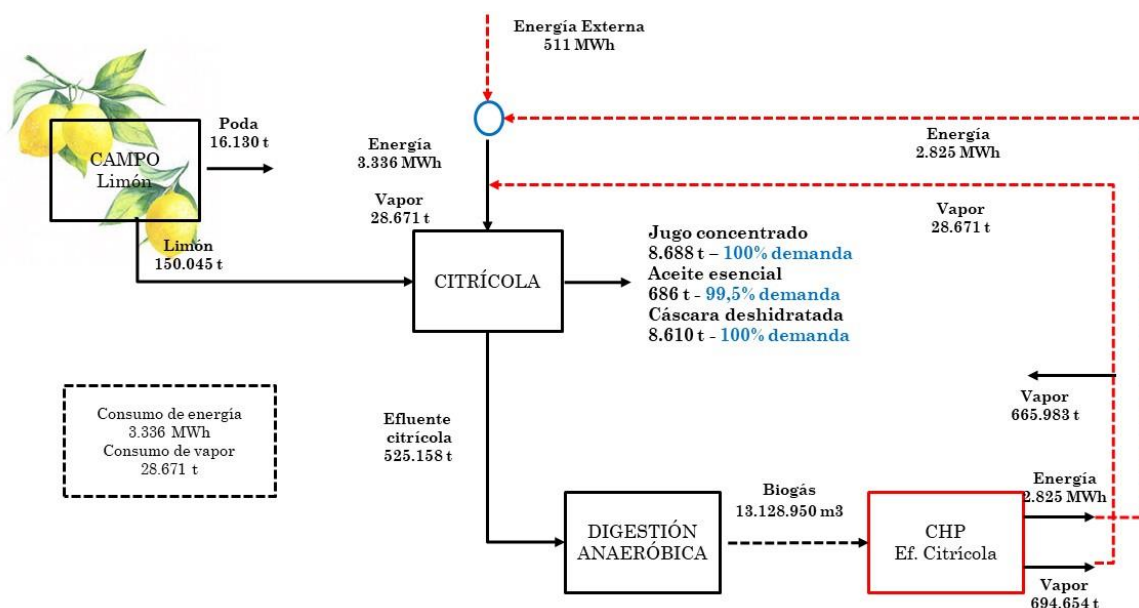


Figura 6.12 - Entradas y salidas de materiales y energía para la industria cítrica – escenario  $\varepsilon_2$  sin SInd. El código de colores es idéntico al de la Figura 6.11

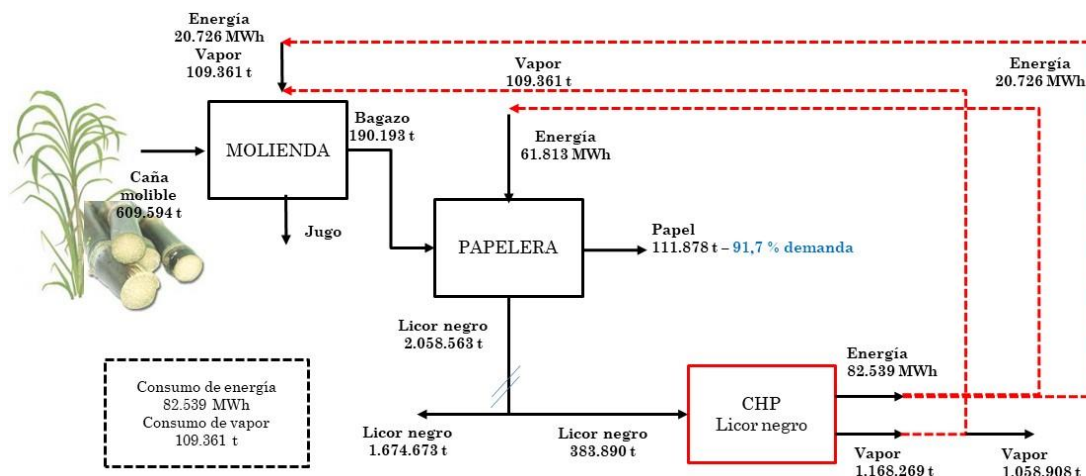


Figura 6.13 - Entradas y salidas de materiales y energía para la industria papelera – escenario  $\varepsilon_2$  sin SInd. El código de colores es idéntico al de la Figura 6.11

Se calculó la categoría de impacto de potencial de calentamiento global (GWP), para las tres industrias operando de manera independiente, utilizando el software SimaPro®.

Para cada industria por separado, el valor de GWP, expresado en kg CO<sub>2</sub> eq/t, arrojó los valores de 3,349 para la industria de la caña de azúcar, 3,776 para la del limón y 0,683 para la papelera. Posteriormente, cada uno de estos valores se multiplicó por los respectivos

datos de producción de azúcar, jugo de limón y papel, obteniéndose el impacto ambiental individual en esta categoría para cada industria trabajando independiente. Finalmente se sumaron los impactos individuales para obtener el impacto total en ausencia de simbiosis, lo que dio como resultado un valor de  $284 \cdot 10^6$  kg CO<sub>2</sub> eq.

La implementación del modelo de SInd demuestra una mejora significativa en la sostenibilidad ambiental del clúster analizado. Al comparar los escenarios, se observa que la huella de carbono total (medida como potencial de calentamiento global) se redujo de  $284 \cdot 10^6$  kg CO<sub>2</sub> eq equivalente en el escenario de operación independiente a  $204 \cdot 10^6$  kg CO<sub>2</sub> eq. en el esquema de simbiosis correspondiente a  $\varepsilon_2$  (ver Tabla 6.2). La reducción absoluta de  $81 \cdot 10^6$  kg CO<sub>2</sub> eq. representa una disminución relativa del 28,6%, lo que valida la eficacia del modelo multiobjetivo propuesto para minimizar el impacto ambiental.

La aplicación del LCA al sistema simbiótico confirma que, para este caso, la integración multiindustria reduce significativamente los impactos ambientales agregados, por ejemplo, en la categoría GWP que se muestra. Esta confirmación deberá realizarse para cada caso que se analice y no es generalizable para otros sistemas ni para otras categorías de impacto.

## 6.6 Conclusiones

El estudio abordó el problema multiobjetivo de beneficios económicos versus impacto ambiental en un sistema de producción basado en biomasa mediante el método de la restricción  $\varepsilon$ . El análisis de las curvas de Pareto para las cuatro categorías de impacto seleccionadas reveló las relaciones de compromiso entre los objetivos planteados, evidenciando cómo la SInd, a través del intercambio de subproductos y energía, puede modular las compensaciones entre ellos.

Esta dualidad entre los objetivos planteados, quedó plasmada tanto en las curvas de Pareto como en los escenarios extremos analizados ( $\varepsilon_0$  vs.  $\varepsilon_9$ ). Los escenarios con restricciones ambientales más estrictas ( $\varepsilon_9$ ) favorecieron modelos circulares, con mayor reutilización de biomasa residual (reducción de residuos) y menor dependencia de energía fósil externa, pero a costa de una disminución progresiva en la capacidad de satisfacer demanda productiva y la inactivación de procesos no rentables bajo dichas restricciones. En contraste, el escenario  $\varepsilon_0$  priorizó la productividad, logrando cobertura total de demanda

en la mayoría de los casos, pero con externalidades ambientales significativas: generación de residuos aumentada y alta dependencia energética externa.

Por último, a través del LCA se pudo corroborar que la integración de los flujos de materiales y energía entre las distintas industrias conduce a una notable disminución de los impactos ambientales, tal como se puso de manifiesto en la categoría de cambio climático. Estos hallazgos destacan el potencial de las estrategias de SInd como vía para mejorar la sostenibilidad en parques industriales de naturaleza diversa, en un enfoque que demuestra ser efectivo para abordar los desafíos de sostenibilidad en diversos sectores industriales. Dentro de este marco, el desarrollo de modelos matemáticos se vuelve fundamental para apoyar la toma de decisiones y optimizar los procesos de intercambio de recursos entre empresas, es decir se busca tener una herramienta de apoyo en la toma de decisiones estratégicas sobre el tejido productivo involucrado.

## 6.7 Referencias

- GAMS Development Corporation. (2025). GAMS – The Solver Manuals. Washington, DC. Available at: <https://www.gams.com>
- Gonela, V., Zhang, J. (2014). Design of the optimal industrial symbiosis system to improve bioethanol production. Journal of Cleaner. Production, 64, 513-534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.059>
- Khan, Z., Chowdhury, S., Mitra, B., Mozumder, M., Elhaj, A., Salami, B., Rahman, M., Rahman, S. (2023). Analysis of industrial symbiosis case studies and its potential in Saudi Arabia, Journal of Cleaner Production, Volume 385, 135536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135536>
- 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. Industrial & Engineering Chemistry Research, 50(9), 4939-4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>
- Mesquita-Cunha, M., Figueira, J., Barbosa-Póvoa, A. (2023). New  $\epsilon$ -constraint methods for multi-objective integer linear programming: A Pareto front representation approach. European Journal of Operational Research, 306, 286-307. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.07.044>

- Ng, R. T. L., Ng, D. K. S., Tan, R. R. (2015). Optimal planning, design and synthesis of symbiotic bioenergy parks. *Journal of Cleaner. Production*, 87, 291–302. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.045>.
- Nishihara Hun, A. L., Pérez, G. A., Mele, F. D. (2023 a) Diseño óptimo de un esquema de simbiosis industrial en la provincia de Tucumán. 1er Congreso de Ciencia y Tecnología del NOA (CODINOA), Jujuy, Argentina, 28 y 29 de septiembre de 2023.
- Nishihara Hun, A. L., Machin Ferrero, L. M., Pérez, G. A., Mele, F. D. (2023 b) Estrategias de economía circular aplicadas a la agroindustria de Tucumán. XI Encuentro Argentino de Ciclo de Vida, X Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (ENARCIV 2023), Tucumán, Argentina, 17 y 18 de noviembre de 2023.
- Vahidzadeh, R., Bertanza, G. (2022). Industrial symbiosis and eco-industrial parks, *Environmental Sustainability and Industries*. Chapter 17, 405-431. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90034-8.00012-9>
- Zhang, Y., Zheng, H., Chen, B. (2015). A review of industrial symbiosis research: theory and methodology. *Frontiers of Earth Science*, 9, 91-104. <https://doi.org/10.1007/s11707-014-0445-8>.



---

# CAPÍTULO 7: Conclusiones

*“La paciencia es necesaria, uno no puede cosechar inmediatamente lo que ha plantado”*

*Søren Kierkegaard*

Este capítulo consolida las contribuciones de una investigación que demuestra cómo las herramientas matemáticas de la Ingeniería de Procesos proporcionan soluciones efectivas para la planificación estratégica de sectores industriales, en este caso basados en biomasa, facilitando simbiosis industriales (SInd) que impulsan la economía circular. Se exponen las conclusiones generales, su alineación con los objetivos e hipótesis planteados en el plan de tesis, las principales contribuciones y aportes a la actividad industrial, los desafíos y limitaciones que se afrontaron y las posibles líneas de trabajo futuras. El caso de estudio analizado confirma el potencial de la SInd como paradigma productivo transformador. Las configuraciones óptimas obtenidas mostraron cómo industrias que operaban de forma independiente pueden establecer redes colaborativas donde los residuos se convierten en recursos, maximizando las ganancias desde lo económico y disminuyendo los impactos ambientales.

## 7.1 Conclusiones Generales

El objetivo general de esta tesis fue el de realizar tareas de investigación y desarrollo en el área de soporte a la toma de decisiones para la implementación de intercambios de masa y de energía entre diferentes plantas industriales —estrategia conocida como SInd—, teniendo en cuenta simultáneamente aspectos técnicos, económicos y ambientales. Tanto este objetivo como los objetivos específicos se abordaron a lo largo de los diferentes capítulos que componen este trabajo.

Se desarrollaron estrategias de optimización basadas en programación matemática para resolver cuestiones relacionadas con la SInd de un determinado tejido productivo de industrias que originalmente operaban de manera independiente.

La SInd fomenta la colaboración estratégica entre las empresas, donde los subproductos y residuos de un proceso se convierten en materias primas valiosas para otro, buscando así la eficiencia y la sostenibilidad, aunque el logro de esto debe comprobarse en cada caso. Las empresas deberían lograr un círculo virtuoso de recursos, donde los flujos de residuos y subproductos se transformen en oportunidades, reduciendo los impactos ambientales y mejorando las ganancias desde lo económico. Uno de los principales hallazgos fue la identificación de varios puntos de operación de este esquema de SInd, todos óptimos, la mayoría de ellos autosuficientes desde el punto de vista energético, excepto en el caso de

mayores ganancias económicas, eliminando la necesidad de fuentes externas de energía y vapor. Este modelo logra, además, la valorización integral del flujo de bagazo, utilizando este subproducto de la molienda de la caña de azúcar, como recurso único para cubrir la totalidad de la principal materia prima en la planta de producción de papel. Estas estrategias representan una aplicación concreta de la economía circular en los procesos industriales.

El método de la restricción  $\varepsilon$  permitió encontrar que variando los límites ambientales (parámetro  $\varepsilon$ ) el sistema se redefine estructuralmente, modificándose desde la selección de materias primas hasta la operación de los procesos. Cada solución obtenida resultó óptima en el sentido de Pareto, lo que convierte la ponderación entre sostenibilidad y viabilidad económica en el criterio clave para la toma de decisiones.

El análisis de los puntos de Pareto para cuatro categorías de impacto estudiadas reveló las relaciones de compromiso entre los objetivos, evidenciando cómo la SInd, mediante el intercambio de subproductos y energía, puede modular estos equilibrios. Por otra parte, el análisis de sensibilidad, permitió determinar que las estrategias de mejora deben enfocarse específicamente en la mitigación de las categorías de Toxicidad Humana, Demanda de Energía Acumulada y GWP para optimizar el desempeño ambiental global.

Por un lado, los escenarios con restricciones ambientales más exigentes ( $\varepsilon_9$ ) promovieron modelos circulares, con una mayor reutilización de biomasa residual, reduciendo desechos, y una menor dependencia de energía fósil externa. Sin embargo, esto implicó una disminución progresiva en la capacidad de cubrir la demanda productiva, inactivando procesos que dejaban de ser rentables bajo esas condiciones. Por otro lado, el escenario de mayor beneficio económico ( $\varepsilon_0$ ) priorizó la productividad, logrando satisfacer casi toda la demanda, pero a costa de externalidades ambientales significativas: mayor generación de residuos y una elevada dependencia de fuentes energéticas externas. Así, el estudio destaca el delicado balance entre eficiencia operativa y sostenibilidad, donde cada ajuste en las restricciones ambientales redefine no solo el desempeño del sistema, sino también su arquitectura fundamental.

El análisis de ciclo de vida (LCA) confirmó que la integración de flujos materiales y energéticos entre industrias genera una reducción significativa en los impactos ambientales agregados, particularmente evidente en la categoría de cambio climático.

Estos resultados resaltan el potencial de la simbiosis industrial como estrategia para mejorar la sostenibilidad en parques industriales, demostrando ser un enfoque efectivo para enfrentar desafíos ambientales en múltiples sectores productivos.

Es importante resaltar también que esta Tesis constituye el primer estudio de caso sobre SInd realizado en el contexto argentino, según la revisión bibliográfica llevada a cabo. Representa un valioso aporte pionero para el desarrollo sostenible del sector industrial, destacándose que, hasta ahora, no se han utilizado herramientas sistemáticas para aplicar la SInd en la red productiva de la región, ni se han considerado las restricciones técnicas, económicas y ambientales en la toma de decisiones. Estos aspectos son los enfoques innovadores que se abordaron en este trabajo, que resultan importantes en una provincia en la que estas industrias coexisten en un espacio geográfico relativamente reducido con el potencial de compartir recursos, maximizar ganancias y minimizar residuos.

La SInd es un ejemplo tangible de cómo la colaboración puede convertir los desafíos ambientales en oportunidades económicas, allanando el camino hacia un futuro más sostenible y próspero.

## 7.2 Principales Contribuciones y Aportes a la Actividad Industrial

Con respecto a las principales contribuciones y aportes, se puede decir que esta Tesis abordó la implementación de estrategias de SInd en sistemas productivos, con el objetivo de evaluar su sostenibilidad a través de una mayor integración de los flujos de materia, vapor y energía eléctrica, poniendo especial foco en las corrientes de biomasa residuales de cada uno de los procesos productivos, dada su relevancia en el contexto regional.

Otra contribución importante de mencionar es que se aplicaron dos metodologías, la optimización multiobjetivo y el LCA, lo que permitió demostrar la utilidad práctica de los algoritmos y métodos que se desarrollaron mediante aplicaciones académicas e industriales, con especial intensidad en el sector productivo.

Se desarrolló un modelo matemático lineal que posibilitó evaluar el desempeño de potenciales estrategias de SInd desde múltiples perspectivas. Este modelo incorporó aspectos técnicos, económicos y ambientales permitiendo determinar los flujos de materia y energía que pueden intercambiar estas diferentes industrias, considerando sus

restricciones y funciones objetivos planteadas, en las soluciones óptimas. Para resolver la optimización multiobjetivo se aplicó el método de la restricción  $\varepsilon$ , evaluando los frentes de Pareto de categorías de impacto seleccionadas, analizándose, para diferentes puntos de estos frentes, los porcentajes de satisfacción de demanda, los flujos de energía a consumir de la red externa, los flujos de residuos generados y no aprovechados y los flujos de energía y materia intercambiados en el tejido productivo.

La aplicación de la metodología de LCA, permitió demostrar, una vez más, su solidez metodológica, al sustentarse en una base científica y cuantitativa. Esto facilitó la comparación de los impactos ambientales entre el escenario de simbiosis industrial y el escenario, donde cada industria opera de manera independiente. Los resultados evidenciaron una disminución significativa de dichos impactos en el escenario colaborativo, reforzando la validez del enfoque propuesto.

### 7.3 Desafíos y Limitaciones

Si bien el modelo matemático demostró su utilidad, aplicabilidad y versatilidad para representar el tejido productivo planteado, es importante reconocer algunos desafíos y limitaciones y que deben ser considerados.

En cuanto al modelado, se tuvo en cuenta el impacto ambiental producido por la mayoría de los flujos de residuos sobrantes, no obstante, algunos de ellos no, por considerarlos despreciables a sus impactos. La inclusión del impacto ambiental de la disposición final de estos residuos refinaría las conclusiones que se pueden extraer. Tampoco se ha considerado la posibilidad de vender vapor o electricidad sobrante ya que hubiera requerido de un estudio más profundo del mercado de la energía que por el momento se dejó de lado. La consideración de este último aspecto presumiblemente requeriría incluir variables binarias en el modelo.

El modelo matemático desarrollado es muy intensivo en datos. Contar con valores precisos de parámetros económicos como precios y costos, información de capacidades de producción y demandas, rendimientos fabriles, entre otros, requiere una extensa recopilación de información sobre las industrias consideradas. A esto se suma el proceso de obtención de parámetros ambientales que constituye una parte importante del volumen de trabajo de esta

Tesis, detallado en el Capítulo 5. La disponibilidad y calidad de los datos utilizados como insumo para los análisis restringe la representatividad de los resultados. Contar con una robusta base de datos es fundamental para alimentar al modelo y obtener resultados confiables que puedan respaldar la toma de decisiones.

#### 7.4 Posibles Líneas de Trabajo Futuras

Los hallazgos de esta investigación tienen importantes implicaciones prácticas que van más allá de las tres industrias analizadas, ya que pueden facilitar la adopción e implementación efectiva de estrategias de SIInd en una amplia variedad de sectores productivos. Es decir, todo lo desarrollado tiene el potencial de extrapolar este trabajo a nuevos tejidos productivos, nuevos parques industriales, por ejemplo, identificando industrias a agrupar por áreas geográficas con una alta concentración industrial, o también el agrupamiento de industrias que pertenezcan a una misma cadena de valor.

También se recomienda a las empresas considerar la aplicación de los enfoques y herramientas desarrollados en esta tesis, con el fin de mejorar la sustentabilidad de sus procesos, implementando estrategias de simbiosis que les permitan aprovechar de manera más eficiente los recursos disponibles, reducir los residuos generados y los impactos ambientales, disminuir el consumo de energía eléctrica de la red externa. Como se indica en el estudio, esto no es trivial y debe analizarse en cada caso. La adopción de intercambios de materiales y energía, la instalación de plantas de cogeneración, el transporte de residuos, activa procesos cuyo impacto ambiental puede minar la intención primaria de disminuir el impacto ambiental global de la red como así también volver no rentable la actividad.

Sería conveniente que desde organismos públicos se promuevan políticas y programas de apoyo que faciliten la implementación de estas estrategias y su análisis a nivel regional, provincial y nacional.

Como líneas de trabajo futuras, además de las mencionadas en la sección anterior referidas a superar las limitaciones de este estudio, se incluye: la incorporación de técnicas de optimización que aborde la incertidumbre paramétrica de los modelos y el desarrollo de modelos que integren entre sus objetivos aspectos sociales.

Respecto de este último punto, puede estudiarse si la SInd es capaz de generar nuevas oportunidades de empleo en la comunidad local, contribuyendo al desarrollo económico local ya que la nueva estructura puede requerir la adquisición de nuevas habilidades y conocimientos por parte de las empresas participantes. Los beneficios sociales demostrarán cómo la SInd puede tener un impacto positivo más allá de los aspectos económicos y ambientales, contribuyendo al desarrollo social y al bienestar de las comunidades locales.

## 7.5 Publicaciones y Trabajos de la Autora Relacionados con la Tesis

### En revistas:

- Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., **Nishihara Hun, A. L.**, Valdeón, D. H., Mele, F. D. (2021 a). Water footprint assessment of lemon and its derivatives in Argentina: a case study in the province of Tucumán. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 1505-1519. [DOI: 10.1007/s11367-021-01939-5](https://doi.org/10.1007/s11367-021-01939-5)
- Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., Valdeón, D. H., **Nishihara Hun, A.L.**, Mele, F. D. (2021 b). Water footprint of lemon production in Argentina. *Science of the Total Environment*. [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151614](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151614)
- **Nishihara Hun, A. L.**, Mele, F. D., Pérez, G. A. (2017). A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 (4), 502–515. [DOI: 10.1007/s11367-016-1047-3](https://doi.org/10.1007/s11367-016-1047-3)
- Garolera De Nucci, L. P., Mele, F. D., **Nishihara Hun, A. L.**, Cárdenas, G. J. (2017). Estudio comparativo de diferentes mezclas nafta/etanol de caña de azúcar usando el enfoque de Ciclo de Vida. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*. Tomo 94 (2), 47-58, (ISSN 0370-5404).
- **Nishihara Hun, A. L.**, Mele, F. D., Pérez, G. A. (2015). Perfil ambiental de la industria azucarera de la provincia de Tucumán obtenido a partir de la técnica del Análisis del Ciclo de Vida. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*. INTA Ediciones. 2015 5(7), 62-75, (ISSN: 1853-7677).

### En jornadas y congresos:

- **Nishihara Hun, A. L.**, Machin Ferrero, L. M., Pérez, G. A., Mele, F. D. Estrategias de economía circular aplicadas a la agroindustria de Tucumán. XI Encuentro Argentino de Ciclo de Vida, X Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (ENARCIV 2023), Tucumán, Argentina, 17-18 de noviembre de 2023.
- **Nishihara Hun, A. L.**, Pérez, G. A., Mele, F. D. Diseño óptimo de un esquema de simbiosis industrial en la provincia de Tucumán. 1<sup>er</sup> Congreso de Ciencia y Tecnología del NOA (CODINOA), Jujuy, Argentina, 28-29 de septiembre de 2023.
- **Nishihara Hun, A. L.**, Mele, F. D. Estrategias de simbiosis industrial para la industria sucroalcoholera. X Encuentro Argentino de Ciclo de Vida, IX Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica (ENARCIV 2022), Córdoba, Argentina, 3-4 de noviembre de 2022.
- Araujo, P. Z., Machin Ferrero, L. M., **Nishihara Hun, A. L.**, Mele, F. D. Estudio de la huella hídrica de la producción de limón en la provincia de Tucumán. Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida (CILCA 2019). Cartago, Costa Rica, 15-20 de julio de 2019.
- Sánchez Collado, F. E, **Nishihara Hun, A. L.**, Mele, F. D. Evaluación ambiental de tratamientos de vinazas de la industria sucroalcoholera usando Análisis de Ciclo de Vida. XIV Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA, S. M. de Tucumán, Argentina, 5-6 de septiembre de 2019. FACET, UNT. ISBN: 978-987-754-203-5. p. 170.