

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Tucumán
Escuela de Posgrado

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA
PRODUCCIÓN DE BIOETANOL EN TUCUMÁN**

Ing. Lorena Patricia Garolera De Nucci

Trabajo Final Integrador para optar al Grado Académico Superior
de Especialista en Ingeniería Bioenergética

Tutor: Dr. Ing. Fernando Daniel Mele

San Miguel de Tucumán

Año 2016

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar el perfil ambiental del bioetanol de caña de azúcar bajo condiciones particulares del cultivo caracterizadas por una cosecha integral en verde, sin quema en el campo y fertilización sintética reducida. Estas condiciones hacen a este estudio diferente de estudios previos en la temática. De esta manera se evaluarán un conjunto de impactos relevantes sobre el medioambiente, mediante la técnica del Análisis de ciclo de vida (LCA – *Life Cycle Assessment*).

El estudio realizado tiene una marcada relevancia por ser la producción de bioetanol de caña de azúcar una de las actividades productivas más importantes de la provincia de Tucumán y de la región NOA.

El LCA es una herramienta adecuada para estimar las cargas ambientales asociadas a un producto o proceso, durante su ciclo de vida completo desde la cuna (extracción de materias primas) a la tumba (disposición final). Se realiza según los procedimientos comprendidos en la norma ISO 14040.

El estudio permite disponer de información acerca del impacto de la actividad sucroalcoholera para las distintas etapas del proceso productivo y a través de distintas categorías de impacto, lo que en conjunto constituye la huella ambiental de los biocombustibles, y que muchas veces se deja de lado sin analizar.

La sustentabilidad de los biocombustibles depende en gran medida de las acciones y desarrollos tecnológicos que se instrumenten para paliar el impacto ambiental de las etapas de producción de biocombustibles, siendo estas acciones inseparables de los aspectos económicos y sociales.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
MATERIALES Y MÉTODOS	4
CASO DE ESTUDIO	6
Fase 1. Definición del objetivo y alcance del estudio	6
Fase 2. Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV)	10
Fase 3. Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)	11
Fase 4. Interpretación.....	13
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
CONCLUSIONES	15
BIBLIOGRAFÍA	16
APÉNDICE	19

INTRODUCCIÓN

Debido al agotamiento de los recursos energéticos fósiles y al impacto ambiental asociado a su explotación, surge la necesidad de sustituirlos por biocombustibles, una alternativa importante en la transición a una economía baja en carbono dado que éstos tienen su origen en recursos renovables.

Dada la volatilidad de los precios del petróleo, además de la inestabilidad geopolítica de los países que tienen las mayores reservas de este recurso, el uso de biocombustibles líquidos ha ido en aumento. Así, la seguridad energética es uno de los factores principales detrás de este aumento, especialmente en el sector del transporte (Cremonese *et al*, 2015).

La Argentina sancionó en 2006 la Ley 26.093 que proporciona el marco para la inversión, producción y comercialización de biocombustibles con el objetivo principal de reducir las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEI), diversificar el suministro de energía y promover el desarrollo de economías regionales, especialmente en beneficio de los pequeños y medianos productores agrícolas. Esta disposición nacional entiende por biocombustibles “al bioetanol, biodiésel y biogás que se producen a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, y que cumplen los requisitos de calidad que establece la autoridad de aplicación”. Es decir, que los biocombustibles derivan directa o indirectamente de la biomasa (materia orgánica originada en un proceso biológico), poseen un potencial energético y pueden ser utilizados en aplicaciones térmicas y mecánicas, mediante su alimentación en calderas para generación de calor o electricidad, y en motores de combustión interna, por ejemplo.

Los biocombustibles más importantes son el bioetanol derivado de la caña de azúcar, maíz y materiales celulósicos, entre otros; el biodiesel, que puede obtenerse de aceites y grasas; y el biogás, que proviene de la biodegradación anaeróbica de desechos orgánicos. Todos ellos se utilizan de manera aislada o en mezclas con combustibles fósiles, principalmente en el sector transporte. Los que han tenido mayor aceptación y desarrollo son el bioetanol de caña de azúcar y maíz y el biodiésel derivado de aceites vegetales, los cuales han logrado integrarse en los sistemas logísticos de transporte existentes.

Particularmente, uno de los biocombustibles líquidos apto para sustituir parcial o totalmente a la nafta es el bioetanol. Puede usarse hidratado (96° GL)

directamente en los motores de explosión convencionales con algunas modificaciones, y deshidratado (anhidro) en mezclas con nafta, hasta un 27,5% en etanol¹ en motores sin modificaciones. Ambas situaciones se presentan en la actualidad en Brasil, donde el 90% de los vehículos de ciclo Otto son de tecnología "flex": pueden operar mezclas nafta-etanol anhidro o bien con 100% de etanol hidratado (Mesquita, 2009). El uso del bioetanol en vehículos con motor Otto no es nuevo sino que fue propuesto por primera vez por H. Ford en 1896 (Mele *et al.*, 2011), retomándose esta iniciativa en la década del 70 del pasado siglo debido a la crisis del petróleo. Actualmente, Brasil y EEUU son los principales productores de bioetanol en el mundo (OCDE/FAO, 2013).

En la Argentina, parte del etanol se obtiene a partir de caña de azúcar como co-producto del azúcar, y su mercado principal es el interno. Se produce en 16 destilerías -de las cuales no todas deshidratan el alcohol producido- anexas a ingenios azucareros ubicados en el noroeste del país, que utilizan mieles del proceso de fabricación de azúcar y a veces parte del jugo directo de la caña, como materia prima. Todos estos ingenios producen electricidad a partir del bagazo para su propio consumo y algunos venden el excedente a la red eléctrica.

El modelo productivo argentino de etanol se basa principalmente en un sistema de cultivo de caña de azúcar con uso extensivo de tierras agrícolas, moderada aplicación de fertilizantes y pesticidas, y escaso riego suplementario. Los productores de bioetanol se enfrentan al reto de analizar más detenidamente el comportamiento ambiental de sus productos con el fin de cumplir con criterios de sustentabilidad (Farrell *et al.*, 2006).

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA –*Life Cycle Assessment*) es una técnica idónea para determinar el perfil ambiental de un producto. Dicha metodología requiere de una compilación y evaluación exhaustiva de las entradas, salidas de materia y energía y de los impactos ambientales potenciales asociados de un sistema a través de su ciclo de vida completo. Permite conocer y cuantificar el impacto de cualquier sistema sobre el medio ambiente, identificar áreas susceptibles de mejoras en un proceso y realizar comparaciones entre procesos y productos, entre otras posibilidades. Según la *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), la evaluación se realiza abarcando el ciclo de vida completo del

¹Dr. Octavio Antonio Valsecchi, 2015. Universidade Federal de São Carlos. Comunicación personal.

proceso o actividad bajo estudio, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, su industrialización, transporte, distribución, uso, reciclado, reutilización y disposición final (Consoli *et al.*, 1993). Por lo tanto, el LCA consiste en un tipo de contabilidad ambiental en la que se cargan a los productos los efectos ambientales adversos, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida. Tradicionalmente, este enfoque suele llamarse “de la cuna a la tumba”. Su aplicación constituye una herramienta de sumo interés para guiar las medidas a tomar en relación a aumentar la sustentabilidad del bioetanol producido.

Los estudios de LCA conducidos en la Argentina sobre biocombustibles se refieren mayormente a biodiésel (Asal *et al.*, 2006; Panichelli *et al.*, 2009; Piastrellini *et al.* 2015), mientras que los conducidos sobre la producción de bioetanol son algo más recientes. Algunos aportes relevantes en este último punto corresponden a la Universidad Nacional de Tucumán (Mele *et al.*, 2011; Amores *et al.*, 2013) en cuanto a etanol de caña, mientras que el etanol de maíz argentino fue considerado por Pieragostini *et al.* (2014).

Hay numerosas contribuciones importantes referidas a la sustentabilidad de la producción de bioetanol en otros países. Brasil se destaca en la aplicación del bioetanol como combustible principal para los automóviles; es así que los análisis ambientales comparativos de las industrias brasileñas de etanol versus petróleo son abundantes (ej.: Luo *et al.*; 2009; Ometto *et al.*; 2009; Cavalett *et al.*, 2013). También hay estudios comparativos en otros países. En México, por ejemplo, se ha realizado el cálculo de las emisiones de GEI y los balances energéticos de la producción de etanol de caña de azúcar y su comparación con el caso brasileño y la producción de nafta (García *et al.*, 2011). En España un trabajo técnico del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) aborda el LCA comparativo del biodiesel y el diesel (Lechón *et al.*, 2007). En todos estos casos, con ciertas diferencias metodológicas, se usa la técnica del LCA. Sin embargo, estos estudios no son comparables al caso de la Argentina ya que analizan situaciones y prácticas geográficamente específicas.

OBJETIVOS

Por ser la producción de bioetanol de caña de azúcar una de las actividades productivas más importantes de la provincia de Tucumán y de la región NOA, el objetivo de este trabajo es presentar el perfil ambiental del bioetanol de caña de azúcar bajo condiciones particulares del cultivo caracterizadas por una cosecha integral en verde, sin quema en el campo y fertilización sintética reducida. Estas condiciones hacen a este estudio diferente de estudios previos en la temática. De esta manera se evaluarán un conjunto de impactos relevantes sobre el medioambiente, mediante la técnica del LCA.

MATERIALES Y MÉTODOS

La técnica de LCA está descripta por las normas ISO de la serie 14040:

- **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). Esta norma sustituye las anteriores normas ISO 14.041, 14.042, 14.043.

Además, se han elaborado documentos técnicos para ayudar en el análisis:

- **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).

Otras normas relacionadas con el LCA son:

- **ISO 14.046.** Gestión Medio Ambiental – Huella de agua - Principios, requerimientos y guía (ISO 2014).
- **ISO 14.064 - 14.069.** Gases de efecto invernadero. “Huella de carbono” (ISO 2006).

Un estudio de LCA comprende cuatro fases interrelacionadas (Figura 1):

- Fase 1: Definición del objetivo y alcance del estudio.

- Fase 2: Análisis de inventario del ciclo de vida.
- Fase 3: Evaluación de impacto del ciclo de vida.
- Fase 4: Interpretación.

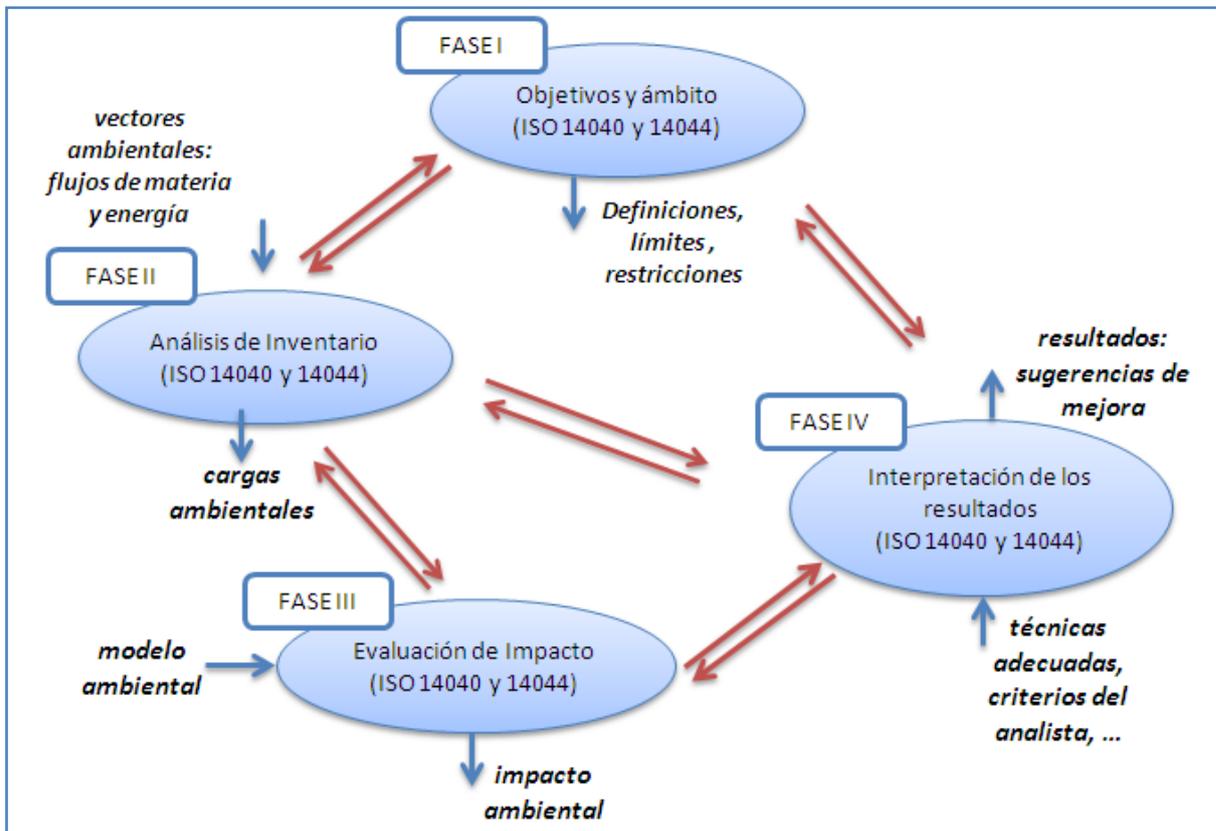


Figura 1. Fases de un LCA (adaptado de Mele, 2006).

Los estudios de LCA requieren una gran cantidad de datos, además de la resolución de balances de materia y energía, por lo que se ha trabajado con un instrumento informático de soporte: SimaPro® (PRéConsultants, 2016). Se trata de una herramienta específica para el desarrollo de estudios de LCA, cuya estructura se adecua a la norma ISO 14040. El programa permite gestionar el LCA mediante la utilización de bases de datos, ya sea creadas por el propio usuario o de otro origen; entre estas últimas, se destaca Ecoinvent v3 (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2015) como una de las más extensas. La herramienta incluye además la información necesaria para la implementación de diversos métodos de evaluación de impacto: Eco-indicator 99, CML 2001, ReCiPe, etc.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio se describe en el marco de las cuatro fases de un estudio de LCA (Figura1).

Fase 1. Definición del objetivo y alcance del estudio

Se definió como objetivo del estudio estimar el impacto ambiental de la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar en la provincia de Tucumán. Se usó el enfoque “de la cuna a la puerta”, es decir, desde la extracción de materia prima (cultivo de caña) hasta la producción de etanol anhidro en la puerta de la destilería.

Los límites del sistema considerado para la producción de bioetanol se muestran en la Figura 2.

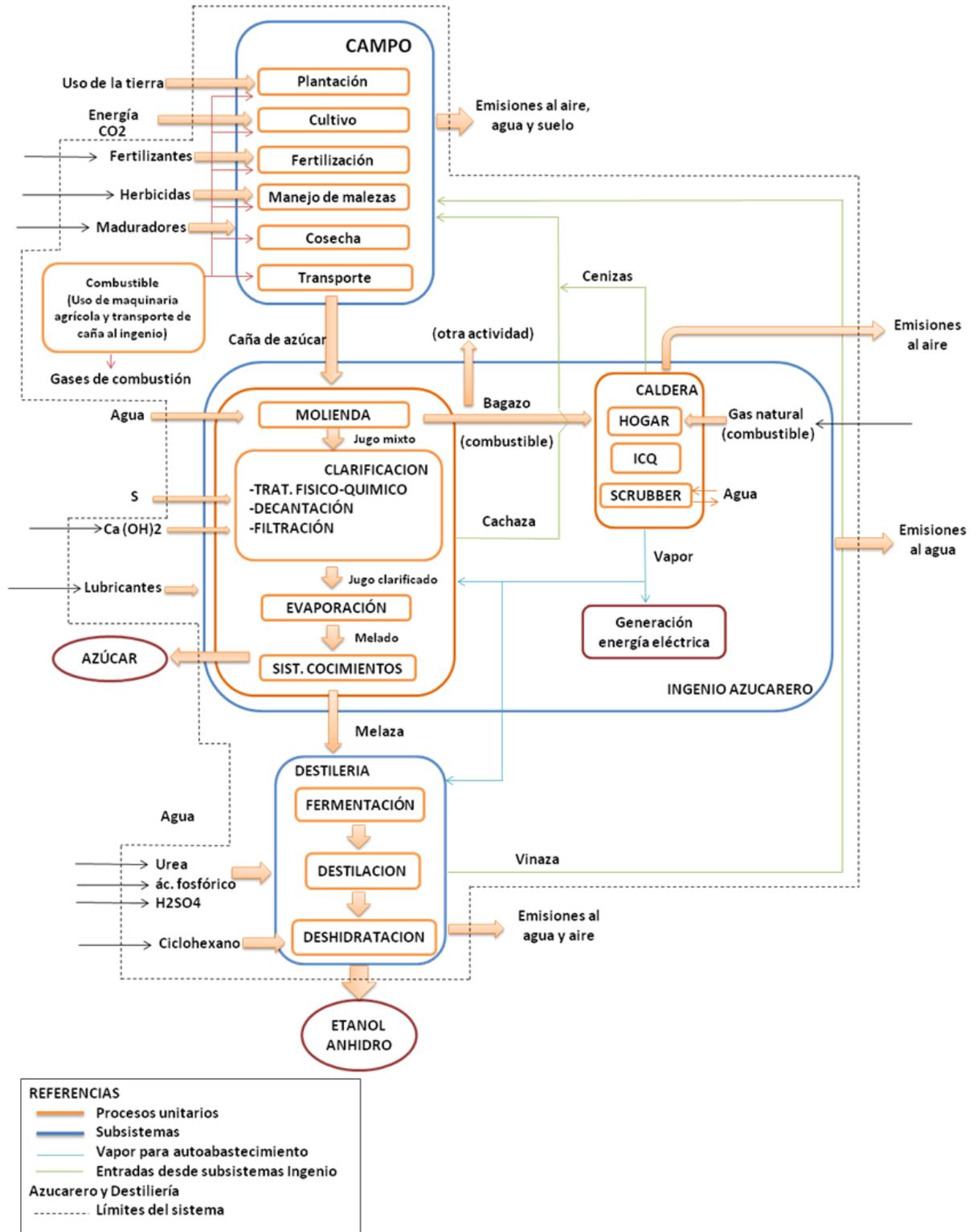


Figura 2. Límites del sistema considerado.

El estudio es de alcance provincial y los datos son representativos de Tucumán y corresponden a la zafra 2013/2014. El horizonte temporal es de un año. En todo estudio de LCA debe definirse lo que se conoce como “unidad funcional”, es decir una referencia a la cual remitir, en un sentido matemático, los datos de entrada y salida. La unidad funcional en este trabajo se ha definido en 1 MJ de etanol anhidro. En un principio se hicieron todos los cálculos tomando como flujo de referencia 1 kg de etanol para luego pasar los resultados a la referencia elegida como unidad funcional. La unidad funcional describe la función que cumple el sistema producto (etanol anhidro) y se cuantifica como la energía que aporta el producto.

Los datos usados para la confección de los inventarios han sido en su mayoría recolectados directamente de campo, ingenios y destilerías, a través de entrevistas con expertos tanto de la agroindustria como de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) y de bibliografía disponible.

En un estudio de LCA, cada una de las entradas de la tecnósfera al sistema tiene asociado su proceso productivo con su respectivo consumo de materiales y energía, y la correspondiente liberación de emisiones. A modo de ejemplo, si el sistema bajo estudio requiere urea, con este material se estarán incorporando al inventario del ciclo de vida las emisiones debidas a los procesos de producción y transporte de la urea, que a su vez incluye el proceso de fabricación de amoníaco y CO₂ utilizados como materia prima, y así sucesivamente. De esta manera, en el desarrollo del LCA, se tienen en cuenta los impactos producidos por todos los procesos relacionados. Muchas veces esta información no está disponible a nivel local o es bastante incompleta e inexacta, por lo cual, para el presente estudio se adoptaron procesos similares a partir de bases de datos internacionales (ej. Ecoinvent v3). También se realizaron balances de materia y energía para estimar ciertos valores como las emisiones GEI en la combustión de combustibles fósiles. El origen de los datos se ha documentado apropiadamente durante el desarrollo de la etapa de inventario.

De manera similar a estudios previos (Mele *et al.*, 2011), el sistema global analizado se ha dividido en tres subsistemas.

El subsistema CAMPO corresponde a un sistema particular de producción sustentable de caña de azúcar usado en la provincia de Tucumán (si bien este sistema no es el más frecuente, es el adoptado por empresas tendientes a

incorporar nuevas tecnologías y prácticas más sustentables) y comprende la plantación de tipo manual y mecanizada, empleo de agroquímicos convencionales (fertilizantes, herbicidas e insecticidas) y de biofertilizantes, cosecha integral en verde y transporte de caña de azúcar al ingenio azucarero. La cosecha es mecanizada en su totalidad y al realizarse sin quema de material vegetal, también se obtiene materia verde residual disponible o RAC (residuo agrícola de cosecha). El aprovechamiento energético del RAC no se considera en el presente estudio, por lo que éste no es un flujo de salida del subsistema ya que se deja como cobertura en el campo. La caña de azúcar se propaga mediante la plantación de trozos de caña o estacas en los surcos. La primera cosecha de caña se denomina “caña planta” y corresponde al primer año de crecimiento del cultivo. El cañaverol que rebrota luego del primer corte se denomina “caña soca” (soca 1) existiendo sucesivos rebrotes según la edad del cultivo (soca 2, soca 3, etc.) hasta la próxima renovación del cañaverol. Típicamente se considera una vida útil de cinco años para los cañaverales comerciales, pudiendo variar este número según las condiciones agroecológicas y el manejo agronómico del cultivo. En el caso de estudio planteado se consideró una vida útil del cañaverol de 7 años.

El subsistema INGENIO AZUCARERO corresponde a la etapa de producción de azúcar y comprende la molienda de la caña de azúcar, el tratamiento físico-químico del jugo, su evaporación y un sistema de tres cocimientos con producción de melaza, siendo esta última la materia prima en la etapa de obtención de bioetanol. El bagazo -residuo de la molienda-, es quemado en calderas para generar vapor y energía eléctrica para autoabastecimiento del ingenio. Las cenizas de la combustión del bagazo y la cachaza (residuo del proceso de clarificación, rica en materia orgánica e inorgánica), se disponen en el campo.

El subsistema DESTILERÍA abarca la etapa de producción de etanol anhidro a partir de melaza, considerando que toda la melaza producida se destina a la producción de etanol. Comprende las etapas de fermentación, destilación y deshidratación, usando ciclohexano como agente deshidratante. La fermentación es del tipo *batch* con cubas abiertas. La etapa de destilación utiliza dos columnas: destiladora y rectificadora, siendo todo el alcohol producido destinado para combustible. La vinaza, residuo de este proceso productivo, se dispone en el campo como fuente de nutrientes y mejorador de las condiciones del suelo.

Fase 2. Análisis de inventario de ciclo de vida (ICV)

Los datos de las entradas y salidas de los subsistemas se muestran en las Tablas A1 a A4 en el Apéndice. El subsistema INGENIO AZUCARERO es un sistema de múltiples salidas con valor económico (bagazo, azúcar y melaza). En este caso la metodología del LCA establece asignar las cargas ambientales a cada producto, para lo cual se usó el criterio del contenido de masa. Así, teniendo en cuenta que por cada kg de azúcar se producen 0,4 kg de melaza y 0,3 kg de bagazo (Tabla 2), el factor de asignación resultante para azúcar, melaza y bagazo es de 59% (f_{az}), 23% (f_{me}) y 18% (f_{ba}), respectivamente.

A modo de ejemplo, a continuación se describe cómo se ha calculado uno de los ítems de la tabla de inventario. Se ilustra el procedimiento con el caso del CO₂.

El CO₂ del subsistema CAMPO, en kg CO₂/kg caña, viene dado por:

$$CAM = -fot + emis_{CAM} + \sum_{proc} Y_{CAMproc} CO_{2CAMproc}$$

donde fot representa los kg CO₂ captados por fotosíntesis, $emis_{CAM}$ representa los kg CO₂ emitidos por el propio sistema CAMPO, $CO_{2CAMproc}$ representa los kg CO₂ provenientes de cada uno de los procesos conectados a este sistema debido a algún insumo o materia prima que el sistema consume, tales como fertilizantes, diésel, etc. $Y_{CAMproc}$ es un factor de masa expresado en kg insumo/kg caña.

Del mismo modo, el CO₂ del subsistema INGENIO AZUCARERO, en kg CO₂/kg melaza, viene dado por:

$$ING = emis_{ING} + \sum_{proc} Y_{INGproc} CO_{2INGproc}$$

Donde $emis_{ING}$ representa los kg CO₂ emitidos por el ingenio por kg de melaza producida, $CO_{2INGproc}$ representa los kg CO₂ provenientes de otros procesos conectados al ingenio –excepto el de producción de caña–, tales como producción de cal y azufre, consumo de gas natural, etc. $Y_{INGproc}$ es el factor de kg insumo/kg melaza.

El CO₂ del subsistema DESTILERÍA (kg CO₂/kg etanol) viene dado por:

$$DES = emis_{DES} + \sum_{proc} Y_{DESproc} CO_{2DESproc}$$

con variables análogas a las descritas para los subsistemas anteriores.

Finalmente, el CO₂ total, en kg CO₂/MJ energía generada en el motor, está dado por:

$$CO_{2total} = \left[DES + f_{me} \frac{kg\ melaza}{kg\ etanol} \left(ING + \frac{kg\ caña}{kg\ melaza} CAM \right) \right]$$

donde se suman las contribuciones de todos los subsistemas al subsistema DESTILERÍA. El factor de asignación f_{me} tiene en cuenta que INGENIO AZUCARERO es un subsistema multiproducto. En esta ecuación, CAM lleva en sí el CO₂ asociado al subsistema CAMPO y los procesos dependientes a través de los insumos utilizados (agroquímicos, labores agrícolas, maquinaria, combustible, etc.). Esta variable, afectada por un factor que transforma los kg de caña en kg de melaza se suma a ING para obtener la contribución total de los subsistemas CAMPO e INGENIO en conjunto (kg de CO₂/kg melaza). Multiplicando este resultado por el factor que cambia la referencia de kg de melaza a kg de etanol, se obtiene un término que puede sumarse a la variable DES, para obtener la cantidad de CO₂ totales debida a los subsistemas DESTILERÍA, INGENIO AZUCARERO y CAMPO, en kg CO₂/kg etanol y que corresponde al flujo de referencia escogido, es decir 1 kg de etanol anhidro, desde la “cuna a la puerta”.

Fase 3. Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)

En la fase de evaluación de impactos se traducen los resultados del inventario (ICV) en impactos ambientales.

Se deben seleccionar categorías de impactos (como ser calentamiento global, acidificación, eutrofización, etc.) a las cuales se asignan los resultados del inventario. Por ejemplo el CO₂ y el CH₄ se pueden asignar a la categoría “calentamiento global”, mientras que el SO₂ y el NH₃ a la categoría “acidificación”. Luego, los valores de estas cargas ambientales se deben multiplicar por factores de caracterización que surgen de un modelo físico-químico-matemático del impacto de un flujo con respecto a una categoría particular, como ser el modelo del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) para cambio climático, y reflejan la contribución relativa de un valor del inventario a una categoría de impacto y este

resultado es el indicador de categoría. Una lista posible de las categorías de impacto a considerar en un estudio de LCA es la siguiente²:

1. Consumo de recursos
 - a) recursos abióticos
 - b) recursos bióticos
 - c) uso de la tierra
2. Calentamiento global
3. Disminución del espesor de la capa de ozono estratosférico
4. Toxicidad
 - a) impacto ecotoxicológico
 - b) impacto toxicológico humano
5. Formación de oxidantes fotoquímicos (*smog* fotoquímico)
6. Acidificación
7. Eutrofización
8. Ambiente de trabajo

Los factores de caracterización son extraídos de alguna base de datos como ser CML (por las siglas en holandés de *Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden*), ya calculadas en base a los principios fisicoquímicos detrás de cada una de las categorías de impacto. En el caso del calentamiento global, el factor de caracterización es el GWP (*global warming potencial*) de cada GEI: 1 para el CO₂, 21 para el CH₄, etc., expresados en kg CO₂ equivalente/kg emisión. También hay índices de contaminación para el agua y para el aire, que indican la toxicidad relativa o los efectos sobre la salud de distintos contaminantes; e índices que miden el efecto ecológico de la extracción de recursos naturales.

En el presente estudio se utilizaron las categorías de impacto correspondientes al modelo ReCiPe Midpoint V1.12 (Goedkoop *et al.*, 2008). Este método estima el impacto ambiental a través de dieciocho categorías de impacto (indicadores de punto medio), que luego pueden ser agrupadas en tres tipos de daños (indicadores de punto final): a la salud humana, a los ecosistemas y a los recursos (ReCiPe Endpoint).

²Dr. Alejandro Pablo Arena, 2013. UTN – Fac. Regional Mendoza. Comunicación personal.

Fase 4. Interpretación

Como parte de esta etapa, se analizan los resultados obtenidos en las fases anteriores. Es la fase final y combina los resultados del inventario y la evaluación de impacto para evaluarlos de manera conjunta y congruente con los objetivos definidos para el estudio, a fin de establecer conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. Permite determinar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales y por lo tanto qué puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se describen los resultados obtenidos sobre el caso de estudio descrito usando el método ReciPe Midpoint V1.12.

La Figura 3 muestra cómo se compone el impacto ambiental asociado a la producción de 1 MJ de etanol anhidro en la provincia de Tucumán. En abscisas se muestran doce de las categorías de impacto de la metodología ReciPe Midpoint y en ordenadas, la contribución de los procesos intervinientes, en cada categoría, expresada en porcentaje. Dicha contribución sólo es comparable dentro de cada categoría de impacto, es decir, el gráfico no muestra cuál es el mayor impacto en el sistema analizado (no hay una cuantificación absoluta del impacto). Los colores representan a los diferentes procesos que intervienen directamente en la producción de etanol carburante.

En todas las categorías predomina la contribución del proceso de fabricación de melaza (en rojo) –co-producto de la producción de azúcar– el cual lleva consigo, además del impacto del ingenio mismo, el impacto ambiental heredado de la caña de azúcar (subsistema CAMPO). Otros procesos que también contribuyen al impacto son la producción de urea, ácido fosfórico, ácido sulfúrico y ciclohexano que pueden observarse principalmente en las categorías “toxicidad humana”, “ocupación de suelo urbano” y “agotamiento de metales”. La producción de ciclohexano no presenta una gran contribución en ninguna de las categorías.

El impacto propio de la destilería (azul) es evidente en la categoría formación de oxidantes fotoquímicos (*smog*). Esto se debe a la evaporación del etanol en las

cubas de fermentación. En la misma categoría también contribuye la producción de melaza con emisiones de CO biogénico debido a la combustión del bagazo.

En la categoría “cambio climático”, la producción de melaza contribuye con sus emisiones de CO₂ provenientes del uso de maquinaria agrícola en la producción de caña de azúcar y del gas natural usado en el ingenio azucarero, como también de las emisiones de N₂O provenientes del uso de fertilizantes nitrogenados.

La producción de melaza también contribuye notablemente en la categoría “acidificación” debido a las emisiones de amoníaco producto de la nitrificación de la urea (fertilizante sintético).

En cuanto a las categorías “ecotoxicidad” y “toxicidad humana” se observan las contribuciones debidas al uso de agroquímicos: alaclor, atrazina y 2,4 D.

En la categoría “formación de material particulado” contribuyen al impacto las emisiones de amoníaco y óxidos de nitrógeno, como así también las de material particulado, provenientes de la fertilización de la caña de azúcar y de la combustión en calderas respectivamente.

El uso de gas natural y gasoil se ve reflejado en la categoría “agotamiento de recursos fósiles”.

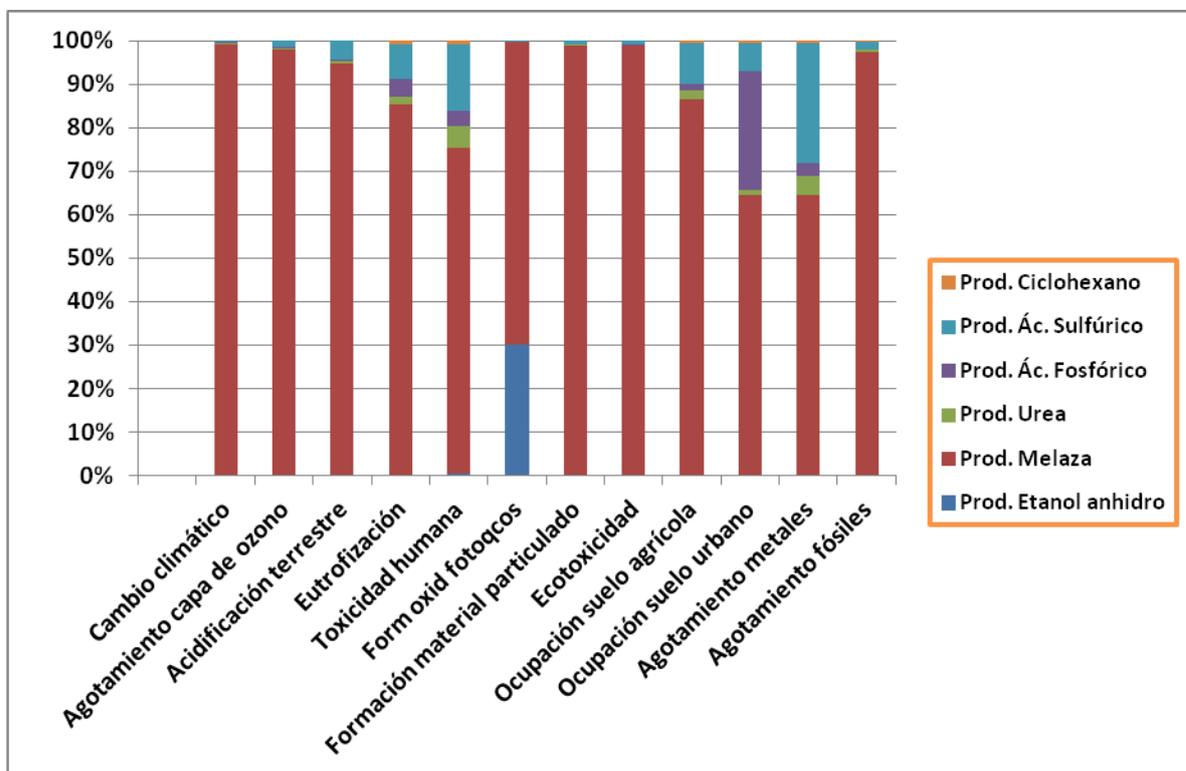


Figura 3. Perfil ambiental del bioetanol tucumano, analizado para 1 MJ de etanol anhidro.

La Tabla 1 muestra las categorías de impacto tenidas en cuenta y los valores de la caracterización, en valor absoluto, expresadas en kg de la sustancia equivalente correspondiente a cada impacto.

Tabla1. Resultados de la etapa de caracterización, en kg de sustancia equivalente.

	Prod. Etanol anhidro	Prod. Melaza	Prod. Urea	Prod. Ác. Fosfórico	Prod. Ác. Sulfúrico	Prod. Ciclohexano	Unidad
Cambio climático	0,00	$3,17 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$9,16 \cdot 10^{-5}$	$2,19 \cdot 10^{-5}$	kg CO ₂ eq
Agotamiento capa de ozono	0,00	$4,14 \cdot 10^{-9}$	$2,05 \cdot 10^{-11}$	$4,32 \cdot 10^{-12}$	$6,23 \cdot 10^{-11}$	$1,40 \cdot 10^{-12}$	kg CFC-11 eq
Acidificación terrestre	0,00	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$7,92 \cdot 10^{-7}$	$3,10 \cdot 10^{-7}$	$6,19 \cdot 10^{-6}$	$8,56 \cdot 10^{-8}$	kg SO ₂ eq
Eutrofización	0,00	$6,13 \cdot 10^{-7}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$	$2,93 \cdot 10^{-8}$	$5,61 \cdot 10^{-8}$	$6,61 \cdot 10^{-9}$	kg PO ₄ ³⁻ eq
Toxicidad humana	$3,28 \cdot 10^{-6}$	$4,82 \cdot 10^{-4}$	$3,21 \cdot 10^{-5}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$9,87 \cdot 10^{-5}$	$5,46 \cdot 10^{-6}$	kg 1,4-DB eq
Form. Oxid. fotoquím.	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$2,10 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$	kg NMVOC
Formación material particulado	0,00	$1,59 \cdot 10^{-4}$	$2,44 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$1,39 \cdot 10^{-6}$	$4,33 \cdot 10^{-8}$	kg PM10 eq
Ecotoxicidad	$5,88 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-8}$	$5,81 \cdot 10^{-4}$	$9,30 \cdot 10^{-7}$	$9,69 \cdot 10^{-7}$	$4,96 \cdot 10^{-6}$	kg 1,4-DB eq
Ocupación suelo agrícola	0,00	$7,41 \cdot 10^{-5}$	$1,73 \cdot 10^{-6}$	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$8,03 \cdot 10^{-6}$	$5,62 \cdot 10^{-7}$	m ² a
Ocupación suelo urbano	0,00	$1,74 \cdot 10^{-5}$	$3,70 \cdot 10^{-7}$	$7,35 \cdot 10^{-6}$	$1,73 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-7}$	m ² a
Agotamiento metales	0,00	$8,01 \cdot 10^{-5}$	$5,49 \cdot 10^{-6}$	$3,71 \cdot 10^{-6}$	$3,42 \cdot 10^{-5}$	$6,74 \cdot 10^{-7}$	kg Fe eq
Agotamiento fósiles	0,00	$7,69 \cdot 10^{-3}$	$4,06 \cdot 10^{-5}$	$9,44 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$	kg crudeoq

CONCLUSIONES

A través del estudio realizado se obtuvo el perfil ambiental del bioetanol de la provincia de Tucumán bajo las condiciones de manejo agrícola particulares descriptas en la sección Caso de Estudio. La evaluación se ha realizado por medio de una herramienta adecuada para este propósito: el LCA.

El uso de fertilizantes sintéticos y herbicidas, el empleo de combustibles fósiles en la maquinaria agrícola y el uso de gas natural en el ingenio azucarero, son las principales actividades que contribuyen al impacto ambiental

Las emisiones de CO₂ por el uso de combustibles fósiles (diesel en tareas agrícolas y gas natural en ingenio) podrían disminuir si se reemplazaran éstos por combustibles de origen renovable.

La sustitución de fertilizantes sintéticos por otros compuestos más amigables con el medio ambiente y que puedan alcanzar rendimientos de caña de azúcar similares que con la fertilización tradicional, podría disminuir las emisiones de compuestos nitrogenados los cuales se caracterizan por su elevado potencial de calentamiento global entre otros efectos ambientales.

El estudio permite disponer de información acerca del impacto de la actividad sucroalcoholera para las distintas etapas del proceso productivo y a través de distintas categorías de impacto, lo que en conjunto constituye la huella ambiental de los biocombustibles, y que muchas veces se deja de lado sin analizar. La sustentabilidad de los biocombustibles depende en gran medida de las acciones y desarrollos tecnológicos que se instrumenten para paliar el impacto ambiental de las etapas de producción de biocombustibles, siendo estas acciones inseparables de los aspectos económicos y sociales.

Bibliografía

- Amores, M. A.; F. D. Mele; L. Jiménez; F. Castells. 2013. Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (7): 1344-1357.
- Asal, S.; R. Marcus and J. A. Hilbert. 2006. Opportunities for and obstacles to sustainable biodiesel production in Argentina. *Energy for Sustainable Development* 10(2): 48-58.
- Cavalett, O; Chagas, M.F.; Seabra, J.E.A.; Bonomi, A. 2013 Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *Int. J. Life Cycle Assess* 18: 647-658.
- Consoli, F.; Allen, D.; Boustead, I.; Fava, J.; Franklin, W.; Jensen, A.; De Oude, N.; Parrish, R.; Perriman, R.; Postlethwaite, D.; Quay, B.; Séguin, J.; Vigon, B. (Eds). 1993. *Guidelines for Life-cycle Assessment: A Code of Practice*. SETAC-Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Bruselas y Pensacola.
- Cremonez, P.A.; Feroldi, M.; Feiden, A.; Teleken, J.G; Gris, D.J.; Dieter, J.; de Rossi, E.; Antonelli, J. 2015. Current scenario and prospects of use of liquid biofuels in South America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43: 352–362.

- Farrell, A. E.; R. J. Plevin; B. T. Turner; A. D. Jones; M. O'Hare; D. M. Kammen. 2006. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 311 (5781):506–508.
- García, C.; A. Fuentes; A. Hennecke, E. Riegelhaupt; F. Manzini and O. Masera. 2011. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy* 88: 2088-2097.
- Goedkoop M.J.; Heijungs R.; Huijbregts M.; De Schryver A.; Struijs J.; Van Zelm R.; ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation; 6 January 2009, <http://www.lcia-recipe.net>.
- Lechón, Y.; Cabal, H.; de la Rúa, C.; Lago, C.; Izquierdo, L.; Sáez, R.; San Miguel, M. 2007. Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. CIEMAT. Ed. Centro de Pub. Secretaría Gral. Técnica, Ministerio de Medio Ambiente, Spain. ISBN: 84-8320-376-6.
- Luo, L.; van der Voet, E.; Huppes, G. 2009. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugar cane in Brazil. *Renew SustEnergy Rev* 13: 1613-1619.
- Mele, F. D. 2006. A multi-agent approach for modeling and analysis of supply chain networks. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Mele, F. D.; A. Kostin; G. Guillén-Gosálbez; L. Jiménez. 2011. Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugarcane Industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chem. Res.* 50: 4939–4958.
- Mesquita, D. L. 2009. O processo de construção da tecnologia flexfuel no Brasil: uma análise sob a ótica da “plataforma de negócio (business platform)”. Tesis de maestría. Universidade Federal de Lavras.
- OCDE/FAO (2013) OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022, Texcoco, Mexico, Universidad Autónoma Chapingo. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2013-es (consultado 21 Abril 2014).
- Ometto, A.R.; Hauschild, M.Z.; Roma W.N.L. 2009. Life cycle assessment of fuel ethanol from sugar cane in Brazil. *Int. J. Life Cycle Assess* 14:236-247.
- Panichelli, L.; A. Dauriat and E. Gnansounou. 2009. Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export. *Int J Life Cycle Assess* 14:144–159.

-
- Piastrellini, R.;Civit, B.M.;Arena, A.P.Influence of Agricultural Practices on Biotic Production Potential and Climate Regulation Potential. A Case Study for Life Cycle Assessment of Soybean (Glycine max) in Argentina. Sustainability 2015, 7(4), 4386-4410; doi:10.3390/su7044386.
 - Pieragostini, C.; Aguirre, P.; Mussati, M.C. 2014. Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina. Science of the Total Environment 472: 212–225.
 - PRéConsultants. SimaPro® v8. Disponible en www.pre-sustainability.com/simapro-lca-software (consultado 15 abril 2016).
 - Swiss Centre for Life Cycle Inventories. 2015. EcoInvent Database v3.1, Dübendorf, Switzerland. Disponible en: www.ecoinvent.org (consultado 12 diciembre 2015).

APÉNDICE

Tabla A1. Inventario para el subsistema CAMPO – Caña Planta (CP). (Flujo de referencia: 1 tonelada de caña).

ENTRADAS	Unidad	Cantidad	SALIDAS	Unidad	Cantidad
De la Naturaleza			Caña de azúcar	t	1,00
Ocupación de la tierra	ha	0,0109	Emisiones al agua		
CO ₂	t	0,440	Glifosato	kg	0,000248
Energía	MJ	4947,8	2,4 D	kg	0,000133
			Atrazina	kg	0,000264
			Alaclor	kg	0,000196
			Dicamba	kg	0,000033
			Nitratos	t	0,000051
De la tecnósfera			Emisiones al aire		
Glifosato	kg	0,0165	CO ₂	kg	10,479
2,4-D	kg	0,0044	SO ₂	kg	0,014
Atrazina	kg	0,0196	NH ₃	kg	0,117
Alaclor	kg	0,0130	N ₂ O	kg	0,033
Dicamba	kg	0,0022	NO _x	kg	0,164
Coadyuvante	kg	0,0009	Emisiones al suelo		
Diésel	l	4,1466	Atrazina	kg	0,00935
Cachaza	t	0,1955	2,4-D	kg	0,00231
Cenizas	t	0,009	Glifosato	kg	0,00332

Tabla A2. Inventario para el subsistema CAMPO – Caña Soca (CS) (Flujo de referencia: 1 tonelada de caña)

ENTRADAS	Unidad	Cantidad	SALIDAS	Unidad	Cantidad
De la Naturaleza			Caña de azúcar	t	1.00
Ocupación de la tierra	ha	0,014	Emisiones al agua		
CO ₂	t	0,440	2,4 D	kg	0,000110
Energía	MJ	4947,8	Atrazina	kg	0,000378
			Fluoroxipir	kg	0,000050
			Dicamba	kg	0,000036
			Nitratos	kg	0,000921
De la tecnósfera			Emisiones al aire		
Fluoroxipir	kg	0,0034	CO ₂	kg	6,6030
2,4-D	kg	0,0074	SO ₂	kg	0,0085
Atrazina	kg	0,0252	NH ₃	kg	0,00211
Dicamba	kg	0,0024	N ₂ O	kg	0,00060
Coadyuvante	kg	0,0012	NO _x	kg	0,00298
Diésel	l	2,61	Emisiones al suelo		
			Atrazina	kg	0,00935
			2,4-D	kg	0,00231

Tabla A3. Inventario para el subsistema INGENIO AZUCARERO (Flujo de referencia: 1 t azúcar)

ENTRADAS	Unidad	Cantidad	SALIDAS	Unidad	Cantidad
Materia prima			Azúcar	t	1,0
			Bagazo	t	0,3
			Melaza	t	0,4
Caña de azúcar	t	10,0	Cachaza	t	0,45
De la naturaleza			Emisiones al aire		
Azufre	t	0,0046	CO ₂	t	2,0
Agua	m ³	80,0	CO	t	0,0663
			NO	t	0,0006
			Partículas >2,5µm <10µm	t	0,0014
De la tecnósfera			Emisiones al agua		
Ca(OH) ₂	t	0,013	DBO (como O ₂)	t	4,5121
Gas natural	Nm ³	51,6	Cenizas	t	1,3319
Lubricantes	kg	0,6	Materia orgánica	t	3,1093
			Ca	t	0,2061
			Mg	t	0,0665
			Na	t	0,0665
			K	t	0,0122
			CaCO ₃	t	0,7878
			Partículas (< 10µm)	t	0,0004
			Agua	m ³	90,0

Tabla A4. Inventario para el subsistema DESTILERÍA (Flujo de referencia: 1 litro etanol)

ENTRADAS	Unidad	Cantidad	SALIDAS	Unidad	Cantidad
Materia prima			Etanol 99 GL		
Melaza	kg	3,48		l	1,0
De la naturaleza			Emisiones al aire		
Agua	l	172,75	CO ₂	kg	2,262
			Etanol	kg	0,005
De la tecnósfera			Emisiones al agua		
Urea	kg	5,14·10 ⁻⁴	Agua	kg	4,165
Ác. Fosfórico 85%	kg	3,08·10 ⁻⁴	Emisiones al suelo^a		
H ₂ SO ₄	kg	1,85·10 ⁻²	C	kg	0,045
Ciclohexano	kg	1,76·10 ⁻⁴	Ca	kg	0,022
			Mg	kg	0,007
			Na	kg	0,012
			K	kg	0,156

^aAnálisis de vinaza: sólo los componentes disponibles en la base de datos Ecolnvent de SimaPro® fueron informados.