



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE SORGO GRANÍFERO EN LA PLANTA DE PAYSANDÚ DE LA EMPRESA ALCOHOLES DEL URUGUAY (ALUR)

Israel Herrera
Ana R. Gamarra
Yolanda Lechón
Cristina de la Rúa
Natalia Caldés

Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos
Departamento de Energía
CIEMAT

19/04/2017

Indice

Pág.

INDICE	1
SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN.	3
1 CONTEXTO	3
2 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	7
SECCIÓN II. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).	10
1. OBJETIVO DEL ESTUDIO	10
2. ALCANCE DEL ESTUDIO	11
Función del sistema estudiado	11
Unidad funcional	11
Sistemas estudiados.....	11
Límites de los sistemas	13
Descripción de los productos estudiados	14
Cuantificación de la unidad funcional	17
Reglas de asignación	17
3 DATOS NECESARIOS. REQUISITOS DE CALIDAD DE LOS MISMOS.	18
4 HERRAMIENTA INFORMÁTICA UTILIZADA.....	20
SECCIÓN III. ANÁLISIS DE INVENTARIO	22
1 INTRODUCCIÓN	22
2 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL SISTEMA A1. FASE AGRÍCOLA: CULTIVO DE SORGO GRANÍFERO.	23
3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL SISTEMA A2. OBTENCIÓN DEL ETANOL.	31
SECCIÓN IV. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA	38
1 IMPACTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO	39
SISTEMA A1. FASE AGRÍCOLA: CULTIVO DE SORGO GRANÍFERO.....	40
SISTEMA A2. OBTENCIÓN DEL ETANOL.....	41
2 BALANCE ENERGÉTICO.....	44
SISTEMA A1. PRODUCCIÓN DE SORGO.....	44
SISTEMA A2. OBTENCIÓN DEL ETANOL.....	45

SECCIÓN V. INTERPRETACIÓN	47
1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	47
2 ÁREAS DE MEJORA	58
SECCIÓN V. CONCLUSIONES.....	60
REFERENCIAS	63

SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN.

1 Contexto

Las tendencias actuales en el suministro y uso suministro energético son insostenibles económica, social y ambientalmente. Las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía podrían duplicarse en 2050 [IEA, 2011]. A nivel mundial el interés en los biocombustibles como parte de la solución a la problemática ambiental generada por las emisiones atribuibles a los combustibles fósiles, es creciente y cada vez más, apoyada en los avances científicos.

En el caso de América Latina, el establecimiento de políticas que promueven el uso de biocombustible se dispara debido al hecho del gran potencial con el que cuenta la región [PNUMA, 2012]. De acuerdo con las previsiones del Banco Interamericano de Desarrollo, en 2030, la demanda energética en América Latina y el Caribe podría aumentar en un 75%, al tiempo que la energía producida a partir de fuentes renovables podría representar la mitad de esa demanda total [IVACE, 2014]. Estos países están en un nivel intermedio de desarrollo; por tanto tienen la gran oportunidad de desarrollar sus sistemas de transporte en forma consistente con el planteamiento de desarrollo sostenible. Ahora bien, aunque las emisiones de gases efecto de invernadero de los países de la región son modestas (del orden del 4.61% del valor global), la expectativa de crecimiento económico y motorización motiva la acción en mitigación. En América Latina el sector del transporte en cuanto a emisiones de GEI, puede pasar de contribuir menos de 5% al total global, al doble en los próximos 20 años, fundamentalmente producidas por los vehículos circulando por carretera [FTS, 2011].

También para Uruguay, uno de los principales retos ambientales a los que se enfrenta, sigue siendo su compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asumido con la ratificación del protocolo de Kioto [SNRCC, 2010] y del

Acuerdo de París [Parlamento de Uruguay, 2016]. En Uruguay, el transporte junto con la industria, son los sectores que más energía consumen, alcanzando el transporte el 28% del consumo total, si bien esto representa el 55% de las emisiones del sector energético [BEN, 2016] dada la alta proporción de fuentes renovables en la generación de energía eléctrica. En el año 2002 fue aprobada la Ley de Producción de Combustibles Alternativos, Renovables y Sustitutivos de los Derivados del Petróleo (Ley Nº 17.567), en la cual se declara de interés nacional la producción de combustibles renovables y sustitutos de los derivados del petróleo elaborados con materia prima nacional de origen tanto animal como vegetal. Cinco años después, fue promulgada la Ley de agrocombustibles, que tiene por objeto el fomento y la regulación de la producción, la comercialización y la utilización de agrocombustibles (etanol y biodiesel), para lo cual se establece, entre otros elementos, la organización institucional del mercado, las metas de incorporación, las normativas de calidad y los incentivos económicos para su producción con materias primas nacionales. Concretamente, estableció la obligatoriedad de utilizar Bioetanol en un 5% como mínimo para mezclar con las gasolinas a partir del 31/12/2014 [Ley 18.195, 2007]. La normativa ambiental instaurada desde agosto de 2008, obliga la adopción de la tecnología Euro III (Norma 1998/69/ CE de la Comunidad Económica Europea) en los motores de los vehículos de transporte de peso bruto mayor de cinco toneladas que sean incorporados.

Los biocarburantes constituyen la principal alternativa disponible a los carburantes de origen fósil con presencia significativa en el mercado. Además de reducir la dependencia energética y ayudar a combatir el cambio climático, presentan otras ventajas, como su contribución al desarrollo del medio rural. La publicación de las directivas (2009/28/CE y 2009/30/CE) del Parlamento Europeo y del Consejo relativas a la promoción del uso de las energías renovables y de los biocarburantes en el transporte, ha suscitado un debate importante sobre los beneficios ambientales reales de los diferentes combustibles alternativos a los combustibles fósiles actualmente utilizados en el transporte. Por una parte la Directiva de fomento de energías renovables obliga a que el 10% del consumo final de energía en el transporte, en 2020, proceda de fuentes renovables pero al mismo tiempo exige que para el cumplimiento

de esta obligación, los biocarburantes deben cumplir unos criterios de sostenibilidad descritos en las Directivas mencionadas. Uno de los criterios de sostenibilidad es la reducción mínima del 35% de las emisiones GEI de los biocarburantes en comparación con los carburantes fósiles, a los que sustituyen. Estas Directivas incluyen la metodología para el cálculo de esta reducción de los GEI a lo largo de ciclo de vida de los biocarburantes. En 2012, la polémica se incrementó con la propuesta de Directiva (COM (2012) 595 final), que recogía que a partir del 1 de Julio de 2014 el ahorro de emisiones de los biocarburantes con respecto a los combustibles convencionales debía alcanzar el 60% para aquellas plantas que comenzaran a operar a partir de dicha fecha y dónde sólo el 5% de los biocarburantes puede ser cubierto con cultivos energéticos. Finalmente, la Directiva aprobada en 2015, por la que se modifican la Directiva 98/70/CE, relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo, y la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, especifica que la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero derivada del uso de biocarburantes y biolíquidos será de un 60 % como mínimo en el caso de los biocarburantes y biolíquidos producidos en instalaciones que empiecen a estar operativas después del 5 de octubre de 2015. En el caso de las instalaciones que estén operativas el 5 de octubre de 2015 o antes de esa fecha, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero derivada del uso de biocarburantes y biolíquidos será de un 35 % como mínimo hasta el 31 de diciembre de 2017, y del 50 % como mínimo a partir del 1 de enero de 2018.

Las propias directivas reconocen en sus consideraciones que el incremento del uso de los biocarburantes debería ir acompañado de un análisis detallado de su impacto medioambiental, económico y social para determinar la conveniencia de este incremento frente a los combustibles tradicionales. Este impacto depende en gran medida de las condiciones particulares en las que la introducción de los biocarburantes se realice en cada país, en especial las materias primas que se usen para su obtención, los procesos de producción a partir de estas materias primas y el uso final, bien como aditivos o bien como mezcla en mayores porcentajes, pueden determinar el balance medioambiental de la introducción de estos combustibles.

En este contexto la empresa Alcoholes de Uruguay (ALUR), ha solicitado al CIEMAT el apoyo técnico para la realización del Análisis de Ciclo de Vida de la cadena de

transformación del sorgo. La utilización de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida de las diferentes opciones planteadas permitirá al final del estudio disponer de una misma base para la comparación de todas ellas.

2 Introducción al Análisis de Ciclo de Vida

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta de gestión medio ambiental de “recopilación y evaluación de las entradas, resultados y los impactos ambientales potenciales de un sistema o producto durante su ciclo de vida” (ISO, 2006a).

Esta metodología describe y analiza las corrientes que entran desde la naturaleza al sistema estudiado y las que salen del sistema a la naturaleza a lo largo del ciclo de vida, es decir, desde la extracción de materias primas y su agotamiento hasta emisiones al aire, agua y suelo así como los cambios de uso del terreno.

Por lo tanto, el ACV es una herramienta adecuada para:

- identificar las oportunidades de reducción de impactos ambientales o bien de consumos energéticos y materiales en un producto o proceso dentro de las distintas etapas de su ciclo de vida
- informar a los responsables de tomas de decisiones tanto a nivel industrial como público
- mejorar el posicionamiento en el mercado de ciertos bienes y servicios mediante la difusión de sus beneficios ambientales asociados.

Un ACV consta de 4 fases:

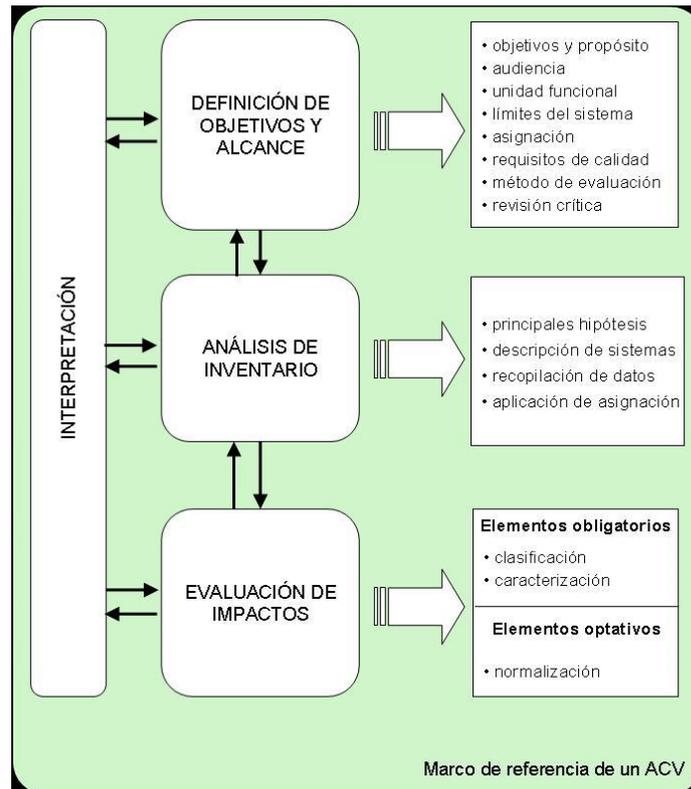


Figura 1. Etapas del ACV. Fuente: Elaboración propia

1. Definición del objetivo y alcance del estudio. En esta fase se definen:

- Objetivo y propósito del estudio
- Sistemas estudiados, límites del sistema y unidad funcional
- Reglas de asignación
- Requisitos de calidad y método de evaluación
- Audiencia y grupo revisor

2. Análisis de inventario del ciclo de vida

En esta etapa se recopilan todos los datos tanto cualitativos como cuantitativos que van a ser necesarios para alcanzar los objetivos que se han definido anteriormente.

3. Evaluación de los impactos del ciclo de vida (EICV)

Según la norma ISO 14040:2006, esta etapa tiene por objeto evaluar la importancia de los impactos ambientales potenciales a partir de los resultados del análisis de inventario.

La norma ISO 14040:2006 distingue dos elementos en esta etapa: (i) elementos obligatorios, que comprende la clasificación de impactos y la caracterización de impactos, y (ii) elementos optativos - la normalización de los impactos. En la Figura 2 se muestra un esquema de los elementos de esta etapa.

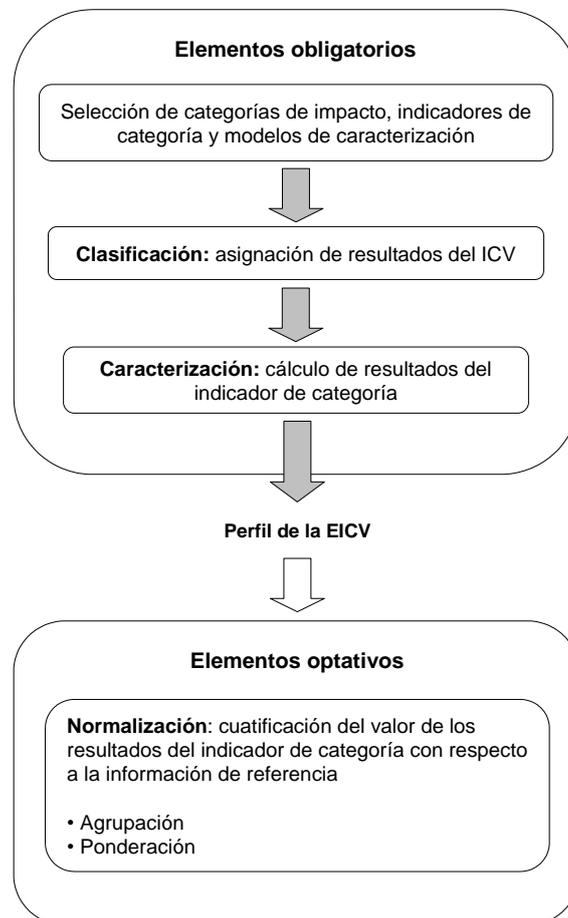


Figura 2. Elementos de la fase de EICV. Fuente: ISO 14040:2006

4. Interpretación del ciclo de vida

En esta fase se analizan los resultados de las etapas anteriores así como todos los supuestos e hipótesis que se han realizado a lo largo del estudio. Se deben identificar los supuestos principales y comprobar la robustez de los resultados. En este sentido, el análisis de sensibilidad analiza cómo pueden variar los resultados cuando los datos, las hipótesis y supuestos que se han escogido para el ACV varían. El último paso de la etapa de interpretación es la formulación de conclusiones y de recomendaciones. Éstas se harán teniendo en cuenta la audiencia a la que va dirigido el estudio y en basadas en los resultados obtenidos en las etapas previas.

SECCIÓN II. Definición del objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

1. Objetivo del estudio

Este informe al igual que los anteriores son parte del proyecto: *Externalidades sociales, Económicas y huella de Carbono de los Biocombustibles en Uruguay*, llevado adelante por la Dirección Nacional de Energía, la Empresa ALUR, y un equipo de consultores nacionales e internacionales, en el marco del Fondo Sectorial de Energía- ANII.

Los sistemas evaluados en este estudio, corresponden a los productos generados en toda la cadena de transformación del sorgo granífero en la planta de Paysandú.

El objetivo del estudio puede resumirse en:

- Cuantificar y evaluar los impactos ambientales potenciales generados en la transformación del sorgo, desde el cultivo hasta la obtención del etanol y los subproductos de destilería comercializados.
- Cuantificar los impactos asociados la cadena de transformación para las categorías de cambio climático y balance energético.
- Identificar y evaluar las oportunidades para reducir dichos impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida, una vez cuantificados los impactos en cada etapa de la cadena de transformación (obtención de materias primas, transformación y distribución)

La audiencia esperada para este ACV está formada en principio por los responsables de la empresa ALUR, que darán a los resultados del estudio la difusión y utilización que consideren oportuna. Por su parte, el CIEMAT pretende publicar los resultados obtenidos en revistas científicas de difusión internacional y en congresos nacionales e internacionales.

2. Alcance del estudio

En el alcance del estudio se define la función del sistema, la unidad funcional y los límites establecidos.

Función del sistema estudiado

El sistema estudiado cumple la función de, a partir del cultivo de sorgo y de su posterior transformación, producir etanol anhidro y co-productos de destilación del grano.

Unidad funcional

La unidad funcional es una medida del comportamiento de las salidas funcionales de un sistema y su propósito es proporcionar una referencia para las entradas y salidas del mismo. Esta referencia es necesaria para asegurar que la comparación de los sistemas se hace sobre una base común. La unidad funcional seleccionada debe estar definida y ser mensurable. Teniendo en cuenta los procesos estudiados, la unidad funcional que se ha elegido es la siguiente:

1 MJ de etanol

Sin embargo, y como parte de análisis, se han utilizado los siguientes flujos de referencia:

- 1 t de grano de sorgo húmedo
- 1 t de sorgo seco
- 1 t de etanol
- 1 t de DGS (en húmedo y en seco)

Sistemas estudiados

Una vez establecida la función del sistema y la unidad funcional, es necesario definir los sistemas y subsistemas que conforman la cadena a analizar. En la Figura 3 se ha representado esquemáticamente las etapas principales de los sistemas estudiados:

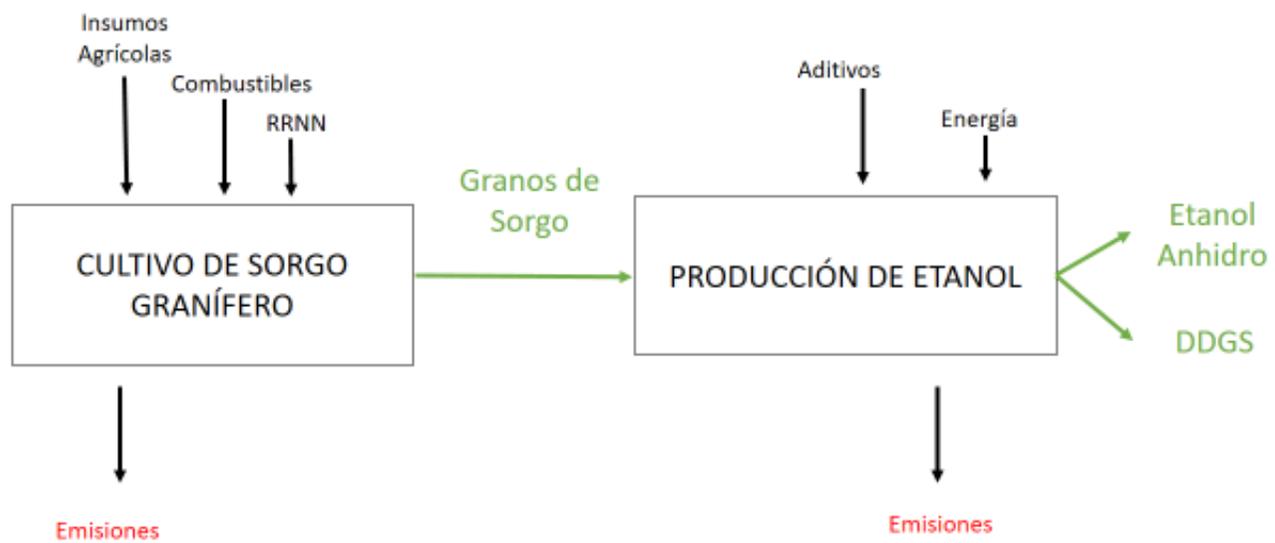


Figura 3. Diagrama general de la cadena de transformación del sorgo granífero a etanol

Los sistemas estudiados en el Análisis de Ciclo de Vida son los siguientes:

- Sistema A1. Fase Agrícola: Cultivo de Sorgo
- Sistema A2. Fase Industrial: Producción de Etanol

En los sistemas estudiados se incluyen el cultivo, el transporte de la materia prima hasta la planta de acopio y secado, de ésta a la planta de transformación de Paysandú, y la transformación en la misma para obtener los productos y los subproductos. Asimismo, se considera el transporte de productos terminados, productos intermedios (co-productos) y residuos.

Son, al menos dos, los productos obtenidos a lo largo de las etapas que componen el ciclo de vida de esta cadena productiva, por lo que se hace necesaria la distribución de las entradas y salidas del sistema entre todos los productos obtenidos, para distribuir las cargas ambientales a lo largo de todo el proceso.

El estudio, se ha realizado según la metodología normalizada de Análisis de Ciclo de Vida, siguiendo para ello la serie de normas internacionales UNE-EN-ISO 14040/44 y las recomendaciones de la Plataforma Europea de Análisis de ciclo de vida (ILCD Handbook, 2010). Así mismo, se han seguido las instrucciones de la metodología descrita en la *Directiva 2009/28/CE* relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (en su anexo V), y la *Directiva 2009/30/CE*, relativa a la Calidad de Carburantes (en su anexo IV).

Límites de los sistemas

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV, qué cargas ambientales se estudiarán y a qué nivel de detalle.

Límites geográficos. El ACV realizado se limita a la transformación del sorgo en dos productos comercializables: etanol anhidro y subproducto de destilación (Granos y Solubles de Destilería, DGS en sus siglas en inglés).

El ciclo de vida de estos productos, incluye todas las etapas involucradas en su extracción, producción, transporte y transformación, por lo tanto los límites geográficos se ven expandidos al tener en cuenta insumos producidos fuera del territorio nacional.

Para la mayor parte de las operaciones se han usado, en la medida de lo posible, información primaria aportada por ALUR y, cuando han estado disponibles, datos originales de los procesos reales. Para las operaciones no controladas por la empresa se ha usado datos medios representativos de la industria o datos reportados en bases de datos (BD) de reconocido prestigio internacional y que representan los escenarios de los procesos estudiados.

Límites temporales. El límite temporal considerado es el año 2015, aunque esto no excluye procesos o etapas desarrolladas con anterioridad.

Etapas excluidas del análisis. Para este estudio, las cargas ambientales relativas a la producción de la maquinaria e infraestructuras necesarias para el desarrollo de los procesos involucrados, se han excluido del análisis porque su contribución al balance global es muy pequeña, menor del 1%, tal como se desarrolló en los estudios anteriores.

Descripción de los productos estudiados

Las características de los productos estudiados utilizadas en el presente estudio se describen a continuación:

Etanol

El etanol, o alcohol etílico, es una sustancia con fórmula molecular C_2H_6O , que puede ser utilizada como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo Otto) de dos maneras: 1) en mezclas de gasolina y etanol anhidro; o 2) como etanol puro, generalmente hidratado [BNDES, 2008].

El bioetanol es un combustible de origen vegetal que se produce a partir de cualquier biomasa que contenga cantidades significativas de almidones o azúcares (RFA, 2008). También puede obtenerse de biomasa lignocelulósica a través de procesos enzimáticos de transformación, mucho más complejos. La materia prima utilizada en la planta de

Paysandú, es el sorgo granífero, un cereal rico en almidón, y uno de los cultivos óptimos para la aplicación industrial [Zhan et al., 2003].

La biomasa puede ser convertida a etanol a por vías biotecnológicas y termoquímicas [EBTP, 2011]. El proceso termobioquímico de obtención de etanol a partir de semillas de cereal ha sido ampliamente descrito. El grano es molido para extraer el almidón, el cual es enzimáticamente tratado para romper el almidón, descomponerlo en sustancias más sencillas, y posteriormente llevar la mezcla obtenida a fermentación. En general, se suceden las etapas de licuefacción, sacarificación y fermentación [Sánchez y Cardona, 2008]. En la etapa de licuefacción se consigue que el almidón se disgregue, acortando las cadenas que lo forman, en una mezcla de dextrinas, y comienzan a aparecer pequeñas cantidades de glucosa. En la sacarificación busca la liberación máxima de los azúcares fermentables, principalmente glucosa [AAE, 2011]. El proceso implica la adición de enzimas, y el acondicionamiento de la mezcla hasta condiciones idóneas para favorecer el proceso de fermentación con aditivos y aportes de temperatura y agua. Se utilizan diferentes configuraciones para la optimización del proceso, como la sacarificación y fermentación simultánea (SSF, en sus siglas en inglés).

El principal proceso bioquímico que describe la producción de etanol es la reacción de fermentación realizada por levaduras [EBTP, 2011]:



El alcohol producido en la planta de Paysandú cumple con los requerimientos técnicos, en términos de deshidratación y grado alcohólico (99.6%). El etanol también puede sintetizarse a través de rutas no bioquímicas, a partir de la hidratación del etileno, obtenido de la industria petroquímica, en una reacción catalizada por un ácido [EBTP, 2011]. El etanol presenta características similares al etanol sintético, la gasolina y otros carburantes de origen fósil. La principal utilización del etanol es como sustituto de la gasolina, como componente de mezcla en las gasolinas, y como materia prima para ETBE (Etil-terbutyl-eter) [EBTP, 2011]. La Tabla 1 resume las principales características del etanol y de una gasolina típica.

Tabla 1. Propiedades del etanol

Parámetro	Unidad	Gasolina	Etanol
Poder Calorífico Inferior (PCI)	kJ/kg	43500	28225
	kJ/l	32180	22350
Densidad	kg/l	0.72-0.78	0.794
Octanaje RON	-	90-100	102-130
Octanaje MON	-	80-92	89-96
Calor latente de vaporización	kJ/kg	330-400	842-930
Relación estequiométrica aire/combustible	-	14.5	9.0
Presión Vapor	kPa	40-65	115-17
Temperatura de ignición	°C	220	420
Solubilidad	% volumen	0	100

Fuente: BNDES, 2008.

En la tabla anterior se observa que algunas de las propiedades como carburante del etanol son mejores que las de la gasolina. El etanol presenta un valor más alto de octanaje, lo que evidencia una capacidad antioxidante mayor que la de la gasolina, y por tanto, menor riesgo de detonación prematura por compresión en uso del combustible en motores de ignición.

Por otro lado, también se desprende que la densidad energética de la gasolina es mayor que la del etanol, al fijarnos en los valores de los valores de PCI.

Granos y solubles de destilación (DGS)

Existen dos tipos de molienda del grano en la industria, húmeda y seca. Durante la molienda húmeda, los componentes de los granos son separados, por lo que el almidón es transformado en etanol y los compuestos recuperados vendidos como co-productos de la molienda húmeda. Sin embargo, durante la molienda seca, los granos no son fraccionados, todos los componentes entran en el proceso, y son concentrados en la etapa de destilación posterior a la fermentación, generando así una corriente de proceso separada del etanol. Dicho producto de destilación es tratado, principalmente

mediante procesos físicos de separación (centrifugación, secado, etc.) y para lograr un producto concentrado en mayor o menor grado. Se trata de un producto comercializado, siendo utilizado comúnmente como alimento animal.

Cuantificación de la unidad funcional

La obtención de 1 t de etanol, implica la producción de 0,817 t de DDGS. Durante la etapa de análisis de inventario, serán establecidas las relaciones de estos productos respecto a los flujos de referencia y la unidad funcional definida (1 MJ de etanol).

Reglas de asignación

De acuerdo con la normativa relacionada [ISO 2006a, ISO 2006b], “asignación” es la distribución de los flujos de entrada y salida de un proceso o sistema de producto, entre el sistema y los productos generados por él. Para los sistemas que tienen más de un producto siempre que sea posible se evitará la asignación por medio de:

- División del proceso en dos o más procesos
- Extensión de los límites del sistema o cargas evitadas

Si no se puede evitar la asignación, porque en el proceso no se pueda separar la contribución de cada corriente a cada producto; o porque no exista un proceso que reemplazar con el co-producto generado, se realiza **asignación de cargas** a través de los siguientes procedimientos:

- Basado en la relación física (de forma que se refleje como se modifican las entradas y salidas por cambios cuantitativos en los productos).
- Basado en otras medidas como el valor económico, la masa o la energía

El producto principal analizado en el estudio es el etanol. Sin embargo, a lo largo de las etapas que componen el ciclo de vida se obtienen otros productos. Esto hace necesario asignar las cargas ambientales generadas, en la proporción que corresponda, a todos los productos y co-productos. De acuerdo con la DER (2009/28/CE), si en un proceso de producción de combustible se produce, de manera combinada, el combustible sobre el que se calculan las emisiones y uno o más productos diferentes (denominados «coproductos»), las emisiones de gases de efecto invernadero se repartirán entre el combustible o su producto intermedio y los coproductos, proporcionalmente, respecto al criterio de asignación establecido. En el caso de

asignación energética, se repartirán respecto al contenido energético de todos los productos y coproductos (determinado por el valor calorífico inferior en el caso de los coproductos distintos de la electricidad). [DER, Anexo V, punto 17]. En este estudio en particular, se ha establecido asignación económica en todos los procesos que tienen como resultado más de un producto.

3 Datos necesarios. Requisitos de calidad de los mismos.

Una vez definido el objetivo y alcance de este ACV, es necesario definir las fuentes de información más importantes que se han utilizado y las bases de datos consultadas, de manera que de acuerdo con la normativa relacionada, los datos recopilados cumplan con los criterios de calidad establecidos.

Se ha partido de los datos proporcionados por la empresa ALUR, para cada una de las etapas que conforman la cadena productiva estudiada.

Se han seleccionado los procesos cuya contribución a los flujos de masa y energía se sabe que son importantes y cuyas emisiones son relevantes para el medio ambiente. Estos procesos son los incluidos en la producción agrícola de las materias primas, el transporte y tratamiento, y los procesos de producción de energía y de otras materias primas de origen diferente al agrícola (aditivos). Para los procesos en los cuales no se dispone de datos primarios, se ha recurrido a la utilización de datos de fuentes ya publicadas.

Se han utilizado bases de datos publicadas y disponibles en la herramienta informática SIMAPRO™ (<http://www.pre.nl/simapro>) para los procesos más comunes como transportes, combustibles y productos químicos básicos. Las bases de datos usadas son las siguientes:

- ECOINVENT.

Ecoinvent, es la base de datos líder en el mundo con inventarios de ciclo de vida consistentes y transparentes de más de 10000 procesos. Incluye escenarios de agricultura, energía, transporte, biocarburantes y biomateriales, productos químicos a granel y de especialidad, materiales de construcción, materiales de embalaje, metales, procesamiento de metales, tecnologías de la información y electrónica, así como el

tratamiento de residuos. Los datos de los escenarios, se basan en información industrial y han sido recopilados por distintos institutos de investigación reconocidos internacionalmente y por consultores de Análisis de Ciclo de Vida. Los datos están disponibles en el formato de datos EcoSpold, y son compatibles con las principales herramientas informáticas de ACV y ecodiseño (www.ecoinven.ch)

- ETH-ESU

ETH Zurich, Ökoinventare von Energiesysteme [Frischknecht et al. 2004]. Inventario de datos para Suiza y Europa occidental de procesos relacionados con el suministro de energía. Contiene datos sobre materiales (construcción, sustancias químicas, metales, combustibles, plásticos, etc.), energía, transporte, tratamiento de residuos y otros.

En este estudio se utilizó para los procesos de generación de energía y en los procesos donde intervienen sustancias químicas. También para construir una base de datos, específica y actualizada del mix eléctrico Uruguayo.

- BUWAL 250.

BUWAL, Ökoinventare für Verpackungen [BUWAL, 2012]. Inventario de materiales de embalaje realizado y soportado por EMPA para el Instituto Suizo de Embalaje.

Contiene datos sobre materiales (sustancias químicas, metales, combustibles, plásticos, etc.), energía, transporte, tratamiento de residuos y otros. En el actual estudio se utilizará en los procesos donde intervienen aditivos, embalajes y transporte.

Además, para algunos procesos de las actividades agrícolas se ha utilizado la base de datos:

- AGRI-FOOTPRINT

Base de datos desarrollado por Blonk Consultores TM. Esta base de datos contiene datos de Análisis de ciclo de vida específicos para productos alimenticios y/o del sector agroalimentario (<http://www.agri-footprint.com/about/>).

- USLCI

Es la base de datos de Inventario de análisis de Ciclo de Vida de los Estados Unidos. Contiene módulos de datos que cuantifican los flujos de materiales y energía que entran y salen para los procesos unitarios comunes. Se actualizó en 2013.

- IDEMAT 2001

Base de datos desarrollada por el Departamento de Diseño Industrial de la Universidad de Tecnología de Delft, en el marco del Proyecto IDEMAT. Se centra en la producción de materiales. Los datos son, en su mayoría, originales (no proceden de otras bases de datos), y proceden de una amplia variedad de fuentes.

<http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/idemat/index.htm>

Al igual que en el caso de las bases de datos que soportan información sobre los procesos involucrados en el análisis, se ha hecho uso de la bases de datos de métodos de evaluación de impactos de ciclo de vida. Este estudio en concreto, se ha cuantificado el inventario de ciclo de vida de gases de efecto invernadero y el consumo de energía fósil, a través de los métodos IPCC, 2013 y demanda acumulada de energía, respectivamente (CED, 2013) [Pre et al, 2016].

A la hora de caracterizar los impactos es preciso seleccionar un método en base a los objetivos del análisis. Se han utilizado los siguientes métodos

- Demanda acumulada de energía (Cumulative Energy Demand)

Este método calcula la demanda de energía acumulada (CED) y se basa en el método publicado por Ecoinvent versión 1.01 y ampliado por PRé [Frischknecht, et al, 2007]. Define los recursos energéticos consumidos y disponibles en la base de datos SimaPro. Cuantifica la energía total, de fuentes fósiles y renovables.

- IPCC 2013

IPCC 2013 es una actualización del método del IPCC de 2007 elaborado por el Panel Internacional sobre el Cambio Climático. Este método se enumera los factores de cambio climático del IPCC con un plazo de 20 y 100 años.

4 Herramienta informática utilizada.

El presente estudio de ACV ha utilizado una herramienta informática comercial denominada SIMAPRO™ (<http://www.pre.nl/simapro>).

SimaPro v8.2 es una herramienta desarrollada por Pré Consultants analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto o proceso de una manera sistemática y consistente cumpliendo las recomendaciones de las normas ISO 14040 e ISO 14044.

SECCIÓN III. Análisis de inventario

1 Introducción

El análisis de inventario es un proceso de cuantificación de los flujos de energía y materiales que entran y salen de una actividad durante su ciclo de vida. Un análisis del inventario es fundamentalmente un balance de materia y energía del sistema, aunque también puede incluir otros parámetros como: utilización de suelo, radiaciones, ruido, vibraciones, biodiversidad afectada, entre otros aspectos [Herrera et al, 2011].

Los aspectos a tener en cuenta en la realización de un análisis de inventario de ciclo de vida, son aquellos que relacionan los flujos de materiales y energía con la unidad funcional, la necesidad de asignación y los métodos de asignación disponibles, y la disponibilidad de los datos. Estos aspectos se mencionan a continuación:

- Descripción de los procesos unitarios (Balance de materia y energía)
- Procedimientos de cálculo (Deben estar referidos a la unidad funcional) Criterios de asignación (Asignación de flujos a productos y co-productos según lo establecido en la definición de objetivo y alcance)
- Procedimientos de recopilación de datos
 - Los datos deben recopilarse para cada proceso unitario incluido dentro de los límites del sistema
 - Realización de cálculos

La metodología seguida en este análisis de inventario, usa la aproximación conceptual del análisis de sistemas, en el sentido en que traza una frontera alrededor del sistema analizado y cuantifica las entradas y salidas a través de esa frontera [Lechón et al, 2011].

No siempre es posible tener todos los datos necesarios para la elaboración del inventario, por lo que es necesario, partir de una serie de suposiciones e hipótesis que permitan completar dichos datos. A continuación se detallan algunas de las principales hipótesis metodológicas que sustentan el desarrollo del inventario y facilitan su análisis.

Tal como se estableció en la definición de objetivo y alcance, la cadena productiva de producción de etanol, se compone de 2 subsistemas: **Fase Agrícola (Cultivo de sorgo)** y **Fase Industrial (Producción de Etanol)**. Para cada uno de ellos se ha desarrollado el escenario que representa las principales corrientes de entrada y salida y a partir de las cuales se definen las cargas ambientales asociadas.

2 Análisis de inventario del sistema A1. Fase Agrícola: Cultivo de sorgo granífero.

Igual que en los estudios anteriores, se desarrolló el escenario del cultivo del sorgo, a partir de información primaria, reportada por la empresa ALUR, y de información secundaria obtenida a través de una rigurosa revisión bibliográfica y de bases de datos disponibles y relacionadas con los procesos productivos involucrados en el sistema. La Figura 4, representa esquemáticamente las entradas y las salidas del sistema cultivo de sorgo.

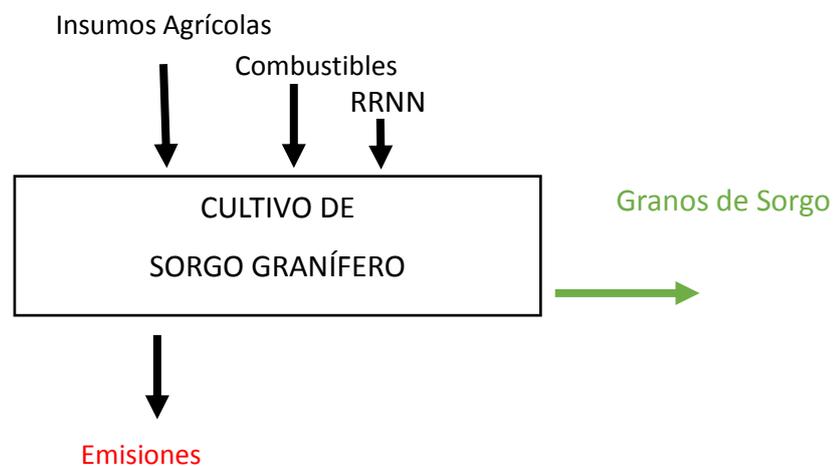


Figura 4. Diagrama esquemático de entradas y salidas del sistema cultivo.

Para la realización del inventario se han tenido en cuenta las labores agrícolas realizadas y los procesos asociados a la producción y transporte de las materias primas necesarias en el cultivo tales como fertilizantes y fitosanitarios. Al margen de la fase agrícola se ha analizado el transporte del sorgo cosechado a la planta de acopio y

secado, siendo incluida esta etapa en el sistema de producción de etanol, enmarcado dentro de la fase industrial.

Labores agrícolas

Las labores agrícolas consideradas en este estudio son las siguientes:

- **Labores del terreno.** Incluye las tareas agrícolas de preparación del terreno realizadas con diferentes aperos.
- **Labores de cultivo.** Se han computado las labores de siembra y mantenimiento. No existe riego, se trata de un cultivo de secano.
- **Labores de fertilización.** Se realiza la fertilización con maquinaria. Una primera fertilización junto con la siembra, y una segunda fertilización en el ciclo.
- **Tratamientos con fitosanitarios.** Contempla las labores de aplicación de los productos herbicidas e insecticidas con maquinaria.
- **Cosecha.** Se incluyen las labores de cosecha con maquinaria.
- **Transporte insumos.** Se incluye el transporte local de los insumos: fertilizantes y fitosanitarios. No se incluye el transporte de la semilla.

Los datos de partida del cultivo de sorgo, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos del cultivo de sorgo.

Descripción	Unidad	Cantidad/	Comentarios
Especie cultivada	-	Sorgo grano BT	Se trata de Sorgo Granífero Bajos Taninos (BT)
Duración del cultivo	días	150	
Superficie cultivada	Há	31500	
Rendimiento	Kg/Há	3.800	Rendimiento promedio en la Zona influencia a la Planta
Semilla para siembra	Kg/Há	10	

Fuente: Información reportada por la empresa Alcoholes de Uruguay (Alur).

Otros procesos

Producción de fertilizantes. Los datos del proceso de producción de los fertilizantes, desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación del producto final así

como la realización de las infraestructuras necesarias para su producción han sido tomados de la base de datos de Ecoinvent y Agri-foodprint.

Producción de fitosanitarios. Los datos del proceso de producción de los productos fitosanitarios aplicados, desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación del producto final, así como la realización de las infraestructuras necesarias para su producción han sido tomados de la base de datos de Ecoinvent. Los datos para el transporte desde la zona de producción hasta la zona de almacenamiento también proceden de Ecoinvent. El transporte a nivel regional ha sido calculado a partir de los datos reportados por la empresa Alur.

Producción del Diesel (Gas Oil). Esta etapa de proceso incluye la extracción de las primeras materias, los procesos de refinamiento del petróleo y el transporte del producto de la refinería hasta el usuario final. Así mismo se consideran las operaciones de almacenamiento y las realizadas en gasolineras. También se considera las emisiones procedentes de las evaporaciones y tratamiento de efluentes. El proceso utilizado para la modelización de esta etapa es *Diesel at regional storage* de la base de datos Ecoinvent. El transporte desde refinería hasta el sitio de uso ha sido reportado por ALUR.

Consumo de combustible y emisiones asociadas. Las emisiones asociadas a este consumo han sido calculadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$GR[g/ha]=CB[kg_{\text{combustible}}/ha]*FE[g_{GR}/kg_{\text{combustible}}] \quad [\text{Nemececk et Kägi, 2007}]$$

Dónde:

GR son los gases residuales

CB representa el consumo de combustible y

FE son los factores de emisión de los distintos gases.

Los factores de emisión utilizados son los indicados en Nemececk et Kägi, 2007. El poder calorífico inferior utilizado en los cálculos procede de la norma UNE EN 590 para el diesel, cuyas características principales quedan recogidas en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del Diesel

PROPIEDADES	DIESEL UNE EN 590
DENSIDAD 20°C (KG/M3)	820-845
VISCOSIDAD 40°C (CST)	2,0-4,5
PCI (MJ/kg)	42,8
NC	51 (mín)
POFF (°C)	-10
Azufre (ppm)	50 (máx)
Residuo carbonoso 10% (%)	0,30 (máx)
PUNTO INFLAMACIÓN (°C)	55 (MÍN)

Fuente: Norma UNE EN 590

Aplicación de fertilizantes. La aplicación de fertilizantes a los suelos de cultivo implica la producción de emisiones resultantes de la interacción entre los compuestos químicos y el propio suelo [Brentrup et al, 2001]. La utilización de fertilizantes produce diferentes tipos de emisiones a los diferentes medios, en este análisis se cuantifican las emisiones al aire de óxido nitroso (N₂O).

Emisiones de N₂O en campo

Todos los suelos (agrícolas, forestales, en barbecho, debido a la actividad bacteriana del suelo) emiten N₂O, pero estas emisiones se ven incrementadas con la fertilización. Las emisiones de N₂O a la atmósfera contribuyen de una manera significativa al cambio climático [Houghton et al, 1990] y participan también en la destrucción de la capa de ozono.

El N₂O emitido por los suelos se produce principalmente debido a la acción de los microorganismos que viven en él, mediante los procesos de nitrificación y desnitrificación. Son procesos muy complejos en los que tienen influencia el tipo de cultivo, el tipo de fertilizante y la dosis de aplicación del nitrógeno. Asimismo, diferentes factores relacionados con el tipo de suelo, como el contenido en carbono, el pH y la textura intervienen también en las emisiones de N₂O. Existen numerosas metodologías de cálculo, pero presentan un alto grado de incertidumbre en la actualidad, en parte debido a la gran cantidad de factores que intervienen en la

generación de estas emisiones [Nemecek, t. & Kägi, t. 2007; Crutzen et al, 2007; Stehfest, e. & Bouwman, l. 2006].

Al igual que en los estudios anteriores, no se cuenta con medidas experimentales en campo en Uruguay de los factores de emisión por aplicación del fertilizante en el cultivo de sorgo. Por lo anterior, las emisiones de N₂O del cultivo se han calculado mediante la Calculadora Global de óxido nitroso (*Global Nitrous Oxide Calculator* (GNOC), <http://gnoc.irc.ec.europa.eu/>), que cuantifica las emisiones de N₂O de suelos de cultivos que sirven como materia prima para biocombustibles. En dicha calculadora, las emisiones indirectas están representadas por la deposición del N volatilizado, la lixiviación y la escorrentía [Köble R, 2014].

Los datos utilizados para la cuantificación de las emisiones de N₂O, se presentan en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 1. Parámetros de entrada para el cálculo de N₂O.

The screenshot shows the GNOG - Global Nitrous Oxide Calculator interface. The header includes the European Commission logo and the text 'JOINT RESEARCH CENTRE GNOG - Global Nitrous Oxide Calculator'. Below the header, there is a search bar and a 'Reset Form' button. The main content is divided into three sections: 'Select/Insert Parameters', 'Crop Residue Parameters', and 'Environmental Parameters'. Each section contains various input fields and dropdown menus for different parameters.

Section	Parameter	Value
Select/Insert Parameters	Crop	Sorghum (grain)
	Soil Type	mineral
	Irrigation	no
	Fresh Yield [kg ha ⁻¹]	3800
	Mineral Fertilizer F _{SN} [kg N ha ⁻¹]	73.2
Crop Residue Parameters	Dry matter fraction of harvested product DRY [kg d.m. (kg fresh weight) ⁻¹]	0.89
	Slope factor - a - to estimate above-ground residue dry matter AG _{DM} [dimensionless]	0.88
	Intercept - b - to estimate above-ground residue dry matter AG _{DM} [dimensionless]	1.33
	Fraction of above-ground residues removed from field Frac _{Remove} [kg d.m. (kg AG _{DM}) ⁻¹]	0.2
	Fraction of crop area burnt annually Frac _{burnt} [ha (ha) ⁻¹]	0.23
	Combustion factor C _r [dimensionless]	0.8
	Ratio of belowground residues to above-ground biomass R _{BG-BIO} [kg d.m. (kg d.m.) ⁻¹]	0.22
	Ratio of above-ground residues dry matter to harvested yield for crop R _{AG} [kg d.m. (kg d.m.) ⁻¹]	0.9999
	N content of above-ground residues N _{AG} [kg N (kg d.m.) ⁻¹]	0.007
	N content of below-ground residues N _{BG} [kg N (kg d.m.) ⁻¹]	0.006
Environmental Parameters	IPCC EQ 11.7A	0.89
	Eco-Climatic Zone	Tropical Moist
	Climate Class	Tropical
	Vegetation Class	Cereals
	Soil pH	5.5 - 7.3
Soil Organic C (%)		1.3
Soil Texture		Fine
Leaching		no
Fixed amount of crop residues [kg N ha ⁻¹]		0.9999

Ilustración 2. Resultados del cálculo de N₂O.

[Show/change GNOC default values](#)

Result: Total N₂O Emissions

Location ID	1464 - 1468	
Country name	URUGUAY	
Total soil N ₂ O emissions [kg N ₂ O-N ha ⁻¹]	0.9484	
Total soil N ₂ O emissions [g CO ₂ eq MJ ⁻¹ _{crop}]	7.5910	

Result details - values are given in [kg N₂O-N ha⁻¹] unless specified differently

Direct N ₂ O emissions from fertilizer application N ₂ O _(dir,F)	0.5770	
Direct N ₂ O emissions from drained/managed organic soils N ₂ O _{OS}	0.0000	
Indirect N ₂ O emissions produced from leaching and runoff from fertilizer application N ₂ O _(L,F)	0.0000	
Indirect N ₂ O emissions produced from atmospheric deposition of N volatilised N ₂ O _(ATD)	0.0732	
Above-ground residue dry matter AG _{DM} [kg d.m. ha ⁻¹]	4306.1600	
Annual amount of N in crop residues F _{CR} [kg N ha ⁻¹]	29.8258	
N input from sugarcane vinnasse and filtercake F _{VF} [kg N ha ⁻¹]	0.0000	
Direct N ₂ O emissions from N in crop residues N ₂ O _(dir,CR)	0.2983	

La Tabla 4, presenta en forma resumida, la emisión del N₂O para el cultivo sorgo por hectárea cultivada.

Tabla 4. Emisión del N₂O para el cultivo sorgo por hectárea cultivada

Procesos de Emisión	Emisión (kgN ₂ O/há)
Emisiones directas (ED) de N₂O por fertilización	0,58
ED de N₂O por deposición atmosférica	0,07
ED de N₂O del n contenido en los residuos de los cultivos	0,30

Fuente: Elaboración propia, a partir de resultados obtenidos de GNOC.

Etapas y procesos no considerados en el estudio. Quedan fuera del sistema, los envases y embalajes de los agroquímicos aplicados en las operaciones de fertilización y sus ciclos de vida asociados, debido a la gran variedad de tipologías de envases detectadas y por considerar que su contribución relativa a las diferentes categorías de impacto es mínima en el sistema estudiado [Herrera et al, 2012]. Tampoco han sido considerados los procesos de producción de la maquinaria agrícola, de acuerdo con lo establecido en las directivas (2009/28/CE y 2009/30/CE) del Parlamento Europeo y del Consejo relativas a la promoción del uso de las energías renovables y de los biocarburantes en el transporte. Se considera la gestión de los residuos líquidos

producidos en los diversos sistemas en estudio, pero no aquellos generados en los procesos de producción de los insumos utilizados.

Las labores realizadas en el cultivo de sorgo, así como la maquinaria agrícola utilizada y los insumos consumidos se resumen en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5. Descripción de labores y maquinaria

Etapa	Tratamiento o labor	Maquina	Cantidad	
			l diesel/ha	kg diesel/ha
Laboreo. Preparación de la chacra		Tractor con Excéntrica	15	12,6
		Tractor con Disquera	9	7,56
		Tractor con Rastra	4	3,36
Siembra	Siembra	Sembradora	8	6,72
	Auxiliar siembra	Tractor con zorra	0,5	0,42
	Tratamientos fitosanitarios	Pulverizadora	1	0,84
	Tratamientos fertilizantes	Fertilización acoplada a la siembra. No se utiliza maquinaria adicional.	-	-
Mantenimiento	Tratamientos fitosanitarios	Pulverizadora	1	0,84
	Tratamientos fertilizantes	Fertilizadora	1	0,84
Cosecha y carga en camión	Cosecha	Cosechadora	12	10,08
	Carga a camión	Tolva	1	0,84

Tabla 6. Descripción de insumos agrícolas

FITOSANITARIOS					
Principios Activos	Nombre comercial	Etapa	Aplicación	Cantidad total	
			l/ha	kg/ha	
Glifosato	Panzer Gold	Siembra	4,00	5,27	
	Pampa Premium				
	Power Rango				
	Gliserb Supra II				
Atrazina	Maizal	Siembra	3,00	3,60	
	Atrazina Gold				
Alfa Metolaclor / Metolaclor	Dual Gold	Siembra	1,5	1,68	
	Invicto				
Clorpirifos	Lorsban	Mantenimiento	1,00	1,07	
	Pyriban				
Diflubenzurón	Diflubenzurón Agrin	Mantenimiento	0,08	0,09	
	Diflulín				
	Dimilín				
FERTILIZANTES					
Nombre	Etapa	Aplicación	Cantidad		
		kg/ha	KgN/ha	Kg P2O5/ha	Kg K2O/ha
Fosfato de Amonio	Siembra	100	18,00	46,00	0,00
Urea	Mantenimiento	120	55,20	0,00	0,00

Vinculación con la unidad funcional

El balance de entradas y salidas del sistema cultivo, a partir de los datos de cultivo y del análisis del inventario, se presenta de forma resumida en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos del cultivo de Sorgo.

Producto	cantidad	unidad
Grano de sorgo	3,8	t
Recursos naturales		
ocupación de suelo	10000	m ²
Materiales/combustibles		
Diésel	44,1	kg
Fertilizante p (fosfato de amonio)	46	kg
Fertilizante n (urea)	55,20	kg
Fertilizante n (fosfato de amonio)	18	kg
Productos fitosanitarios	11,70	kg
Transporte de insumos agrícolas	81,68	tkm
Semillas	10	kg
Emisiones al aire		
N ₂ O por emisiones de la aplicación de fertilizantes	0,95	kg
N ₂ O por combustión de diesel	5,29	g
CO ₂ por combustión de diesel	137,6	kg
CH ₄ por combustión de diesel	5,69	g

3 Análisis de inventario del sistema A2. Obtención del etanol.

Se elaboró el escenario del proceso de obtención del etanol, a partir de información primaria, reportada por la empresa ALUR y de información secundaria obtenida a través de una rigurosa revisión bibliográfica y de bases de datos relacionadas con los procesos productivos involucrados en dicho sistema. La obtención del etanol como sistema incluye el total de la identificada como fase industrial, contemplando los procesos que se suceden una vez el grano de sorgo ha salido de la chacra, incluyendo el proceso de acopio y secado del grano, previo a su traslado a la planta de transformación.

En la planta de transformación se produce el etanol a partir de los granos de sorgo, incluida la producción de DDGS como co-producto.

La Figura 5, representa esquemáticamente las entradas y salidas del proceso de obtención del etanol, incluyendo la producción de DDGS, y de los procesos auxiliares de funcionamiento de la planta.

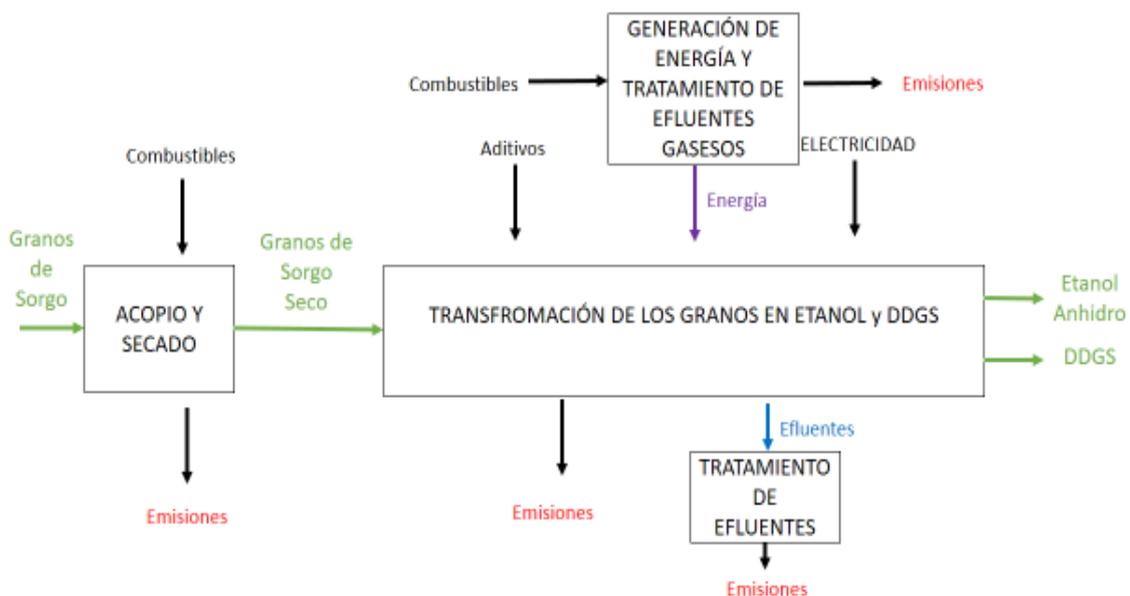


Figura 5. Diagrama esquemático de entradas y salidas del proceso de obtención del etanol¹.

¹ Incluye la producción de DDGS y los procesos auxiliares de funcionamiento de la planta.

Se ha asimilado el 0,4% de solar a la generación eólica

El escenario de obtención de etanol, incluye varios procesos a ser modelados como parte del proceso:

- El transporte desde el sitio de cultivo a la planta de acopio y secado del grano, y el propio proceso de secado.
- La generación de energía y la unidad para el tratamiento de efluentes gaseosos en la planta.
- El secado, y acopio del grano, y transporte de éste a la planta de transformación de Paysandú.
- La energía eléctrica usada en Uruguay (mix eléctrico del país).

Energía eléctrica

En el caso de la electricidad necesaria para el funcionamiento, se ha desarrollado un escenario de generación eléctrica para Uruguay para el año 2015, a partir de datos de la Dirección Nacional de Energía Planificación, Estadística y Balance del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM).

El escenario que representa el mix energético para el año de estudio es el siguiente:

Tabla 8. Escenario eléctrico 2015.

Fuente	Participación (%)
Generación Térmica	7.20
Generación Con Biomasa	18.0
Generación Hidráulica	58.9
Generación Eólica	15.9

Fuente: <http://www.miem.gub.uy/documents/15386/7730255/BALANCE%20PRELIMINAR%202015.pdf>

Transporte, acopio y secado del sorgo

Adicional al proceso de producción, se incluye el transporte de la materia prima sorgo a la planta de acopio y secado, y el propio proceso de acopio y secado. En este proceso el grano que contiene una humedad del 18%, es sometido a un proceso por el cual se logra un grano cuya humedad es del 14%, adecuado para ser trasladado a la planta de transformación. El proceso conlleva un consumo de combustible y por tanto unas

emisiones al medio. Los datos de consumo de combustible y pérdida de humedad han sido proporcionados por ALUR.

La Figura 6 muestra las entradas y salidas del proceso.

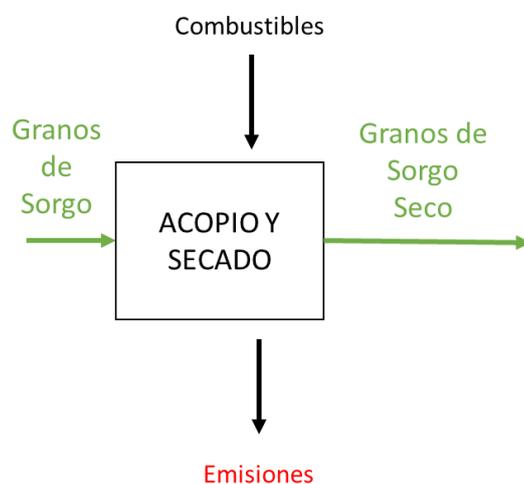


Figura 6. Diagrama esquemático de las entradas y salidas del proceso de acopio y secado.

Se ha desarrollado un escenario de la producción de biomasa forestal (cultivo de eucalipto) utilizada para usarlo en la caldera. Las entradas y salidas que representan este escenario, se presentan en la Tabla 9 [Mackay , 2014; Gabrielle, 2013]

Tabla 9. Balance de entradas y salidas en el proceso de acopio y secado del grano.

Productos	Cantidad	Unidad
Biomasa forestal (Eucalipto)	1	kg
Recursos naturales		
Energía en forma de biomasa	1,28	MJ
Ocupación de suelo	10000	M2
Materiales		
Fertilizante P2O5	0,653	g
Fertilizante K2O	0,597	g
Fertilizante Lima	0,389	g
Pesticida	0,1	g
Diésel	0,979	g
Emisiones		
CO ₂	3,0545	g
N ₂ O	0,0001175	g
CH ₄	0,0001265	g

Vinculación con la unidad funcional

A continuación se muestran las entradas y salida de materiales y combustibles para la generación de 1 tonelada de sorgo seco, siendo necesaria la entrada en planta de 3,099 toneladas de grano seco procedente de la planta de acopio para la producción de una tonelada de etanol anhidro.

Tabla 10. Balance de entradas y salidas en el proceso de acopio y secado del grano.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Grano de sorgo seco	1	t
<i>Materiales/combustibles</i>		
Grano de sorgo de la chacra	1,04	t
Transporte de la chacra a la planta de acopio (80 km)	83,2	tkm
Gas licuado del petróleo (LPG)	6	kg
Biomasa forestal	64	kg
<i>Emisiones al aire</i>		
Emisiones de CO ₂	17,91	kg
Emisiones de CH ₄	30,23	g
Emisiones de N ₂ O	4,02	g

Transformación de los granos de sorgo en etanol y co-producto

Posteriormente, el grano seco es trasladado a la planta de transformación de Paysandú. Allí se suceden las etapas para disgregar el almidón del grano, rompiendo su estructura, y a partir de allí, los azúcares liberados son fermentados con levaduras y la corriente resultante se destila para su purificación. A continuación, en la Figura 7 se puede ver el esquema específico para la producción de etanol en la planta, las materias primas y los aditivos para producir una tonelada de etanol anhidro. Se muestran también los procesos de soporte necesario tales como la generación de energía y el tratamiento de los efluentes.

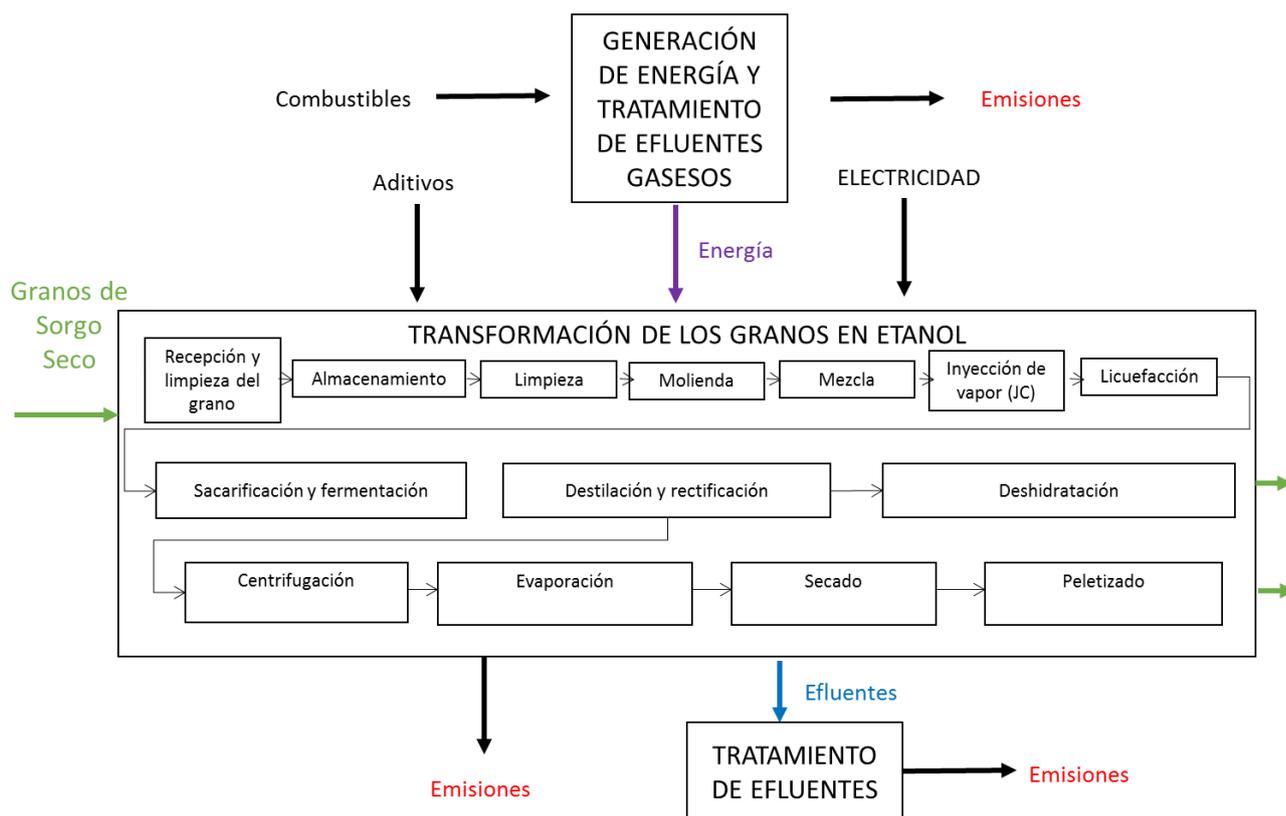


Figura 7. Diagrama esquemático de las entradas y salidas en el proceso en la producción de etanol.

Como se muestra en la figura, de manera simultánea al proceso, se producen co-productos de destilación, los cuales son llevados a un proceso de concentración y acondicionamiento para su salida comercial como alimento animal. Este alcohol bruto, se emplea como materia prima en la elaboración de etanol combustible, vía deshidratación. Se obtiene entonces un alcohol de 99,6% -conocido como etanol - que se mezcla con gasolina para ser utilizado en los vehículos.

Los consumos energéticos en la planta de transformación de Paysandú se dividen en consumo de combustibles y consumo de electricidad procedente de la red eléctrica del país. Las unidades donde se consumen combustibles son la caldera y la unidad de tratamiento de efluentes gaseosos o RTO (*Regenerative Thermal Oxidizer*). Los consumos de combustibles utilizados en cada unidad han sido proporcionados por ALUR.

Vinculación con la unidad funcional

Este apartado presenta las entradas y las salidas del inventario del sistema producción de etanol de sorgo y su vinculación con la unidad funcional (1 t de Etanol anhidro).

Tabla 11. Balance de materiales y combustibles para la transformación del sorgo grano en etanol².

Producto	Cantidad	Unidad
Etanol Anhidro 99,6%	1	t
DDGS	0,8147	t
Materiales/Combustibles		
Grano de Sorgo seco	3,099	t
Alfa amilasa	1,48E+00	kg
Glucosa amilasa	1,14E+00	kg
Proteasa	1,14E-01	kg
Levaduras	4,06E-01	kg
Urea	1,10E+01	kg
DAP	3,68E+00	kg
Soda cáustica	8,24E+00	kg
Antiespumante	7,73E-01	kg
Antibiótico	6,34E-03	kg
3D TRASAR® 3dt187 (TR)	1,14E-01	kg
NALSPERSE® 7308 (TR)	3,80E-02	kg
Ácido clorhídrico HCl	5,07E-02	kg
Polímero Flopam 4190	6,34E-03	kg
Sulfato de Aluminio en solución	2,53E+00	kg
Hipoclorito de Sodio	1,09E+00	kg
Antiincrustante K78	1,01E-02	kg
Carbonato de sodio	2,03E-01	kg
RT-18P1	2,53E-02	kg
AMINAS RT 350	7,60E-02	kg
HIDRACINA RT 119H	1,05E-04	kg
Clorito de sodio FR C-25 (NaClO₂)	7,41E-05	kg
Agua que ingresa al proceso	2,20E+00	m ³
Transporte Grano seco a Transformación	1,86E+02	tkm
Transporte Biomasa a Planta	2,91E+02	tkm
Transporte del lodo	1,96E-01	tkm
Transporte del DDGS	1,33E+02	tkm

² Adicionalmente a otros procesos de soporte en la planta necesarios para la misma (Suministros energético y tratamiento de efluentes).

Transporte del Etanol	3,27+02	tkm
Gas Licuado de Petróleo usado en RTO*	1,65E-03	t
Gas Natural usado en RTO*	2,80E+00	m ³
Biomasa usada en la caldera	1,82E+00	t
Diesel usado en la caldera	7,66E-04	t
Electricidad	3,87E-01	MWh
Emisiones Al Aire		
CO2 procedente de fermentación	8,52E-01	t
CO2 procedente de ETE	5,87E-03	t
CO2 Caldera	1,68E+00	t
CO2 RTO	8,80E-03	t
Emisiones Al agua		
Agua a cauce de ETA y ETE	2,73E+00	m ³
Agua a cauce RT	1,33E+00	m ³
Residuos		
Lodo Aguas residuales	6,48E-03	m ³
Agua residual Purga	1,33E-01	t

*El consumo de energía en RTO se distribuye en un 90% y 10% en GLP y GN, respectivamente

Procedimiento de asignación

En el sistema de producción del etanol, además del combustible, se produce DDGS. Tal como se describe en la metodología, es necesario establecer el criterio de asignación para repartir las cargas ambientales entre estos dos productos. Al igual que en los estudios anteriores, y siguiendo las directrices relacionadas con el tipo de asignación a elegir, se ha seguido el criterio de asignación económica, los datos de partida y los porcentajes de asignación establecidos, se presentan en la Tabla 11.

Tabla 12. Calculo de la asignación económica para el escenario de referencia (caso base).

Producto	%
Etanol	93,25%
DDGS	6,75%

SECCIÓN IV. Evaluación del impacto del ciclo de vida

La fase de evaluación de impacto tiene como misión evaluar la magnitud de los impactos ambientales, a partir de las cargas identificadas en el inventario de los procesos implicados, a lo largo todo el ciclo.

La Norma relacionada con el ACV, UNE-EN-ISO9 14.040:2006 establece una serie de pasos en la etapa de evaluación de impacto:

- Clasificación: cada carga ambiental se asigna a una o varias categorías de impacto
- Caracterización: la contribución de cada carga ambiental a cada una de las categorías de impacto se calcula multiplicando las cargas por unos factores de caracterización. Los resultados dentro de cada una de las categorías de impacto se suman para dar un resultado de cada categoría
- Normalización. Cada resultado de cada categoría se normaliza para obtener una estimación de la importancia del resultado en las diferentes categorías.
- Valoración. El resultado normalizado se multiplica por un factor de ponderación que representa la importancia relativa de cada categoría de impacto. Los resultados ponderados se pueden entonces sumar para dar un resultado final del impacto ambiental del sistema estudiado.

La Norma señala una serie de elementos obligatorios y otros opcionales. Los elementos obligatorios son los siguientes:

- Selección de las categorías de impacto, de los indicadores de categoría y de los modelos de caracterización.
- Asignación de los resultados del Inventario de Ciclo de Vida a las categorías de impacto (clasificación)
- Cálculo de los resultados de los indicadores de categoría (caracterización) que es el perfil de la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.

Como elementos opcionales señala los siguientes:

- Cálculo de la magnitud de los resultados de los indicadores con relación a una información de referencia (normalización)
- Agrupación: ordenación y posible clasificación de las categorías de impacto

- Ponderación. Conversión y posible agregación de resultados de los indicadores de categorías de impacto usando factores numéricos basados en valoraciones subjetivas

- Análisis de calidad de los datos

La Norma no señala ninguna metodología específica para realizar esta etapa de evaluación de impacto y en la literatura científica sobre el tema no existe un acuerdo unánime sobre cuál es la metodología más apropiada.

Considerando las recomendaciones de los diferentes métodos de evaluación de impacto (normativa ISO 14040/44 de 2006) se acordó para la realización de la evaluación de impacto:

- Realizar solamente las etapas de clasificación y caracterización, debido al enorme grado de subjetividad que conlleva las dos siguientes etapas; Normalización y valoración.
- Seleccionar las siguientes categorías de impacto y métodos de evaluación:

Tabla 13. Indicadores de impacto aplicados

Tipo de impacto	Categoría de impacto	Método y fuente
Recursos	Energía	Demanda acumulada de energía (Frischknecht, et al, 2007)
Contaminación	Cambio climático	IPCC 2013 (IPCC, 2014)

1 Impactos sobre el cambio climático

Los impactos sobre el cambio climático están producidos por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En cuanto a estas emisiones, se presentan los resultados del inventario realizado para el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄), a lo largo de todo el ciclo de vida. Para el cálculo del impacto generado por estas emisiones, en equivalentes de CO₂ (CO₂eq), se han utilizado los siguientes factores de caracterización, que expresan el potencial de calentamiento global de cada una de las sustancias consideradas. Los potenciales usados se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Potenciales de calentamiento global

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
100 años	1	28	265

Fuente: IPCC, 2014

Sistema A1. Fase Agrícola: Cultivo de sorgo granífero.

Las emisiones de gases de efecto invernadero originadas en la fase agrícola de producción de sorgo granífero se han calculado para cada una de las corrientes implicadas. Los resultados se muestran en la Tabla 15 expresados en g de CO₂eq/kg sorgo húmedo.

Tabla 15. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de producción de sorgo (gCO₂eq/kg sorgo).

TOTAL	Combustible	Emisiones directas	Fertilizante P2O5	Fertilizante urea	Fertilizante N	Tratamientos fitosanitarios	Transporte de Insumos	Semilla
193,55	4,85	102,88	17,04	18,91	11,91	30,34	2,34	5,27

De forma gráfica, la Figura 8 presenta la contribución porcentual de las diferentes etapas al calentamiento global.

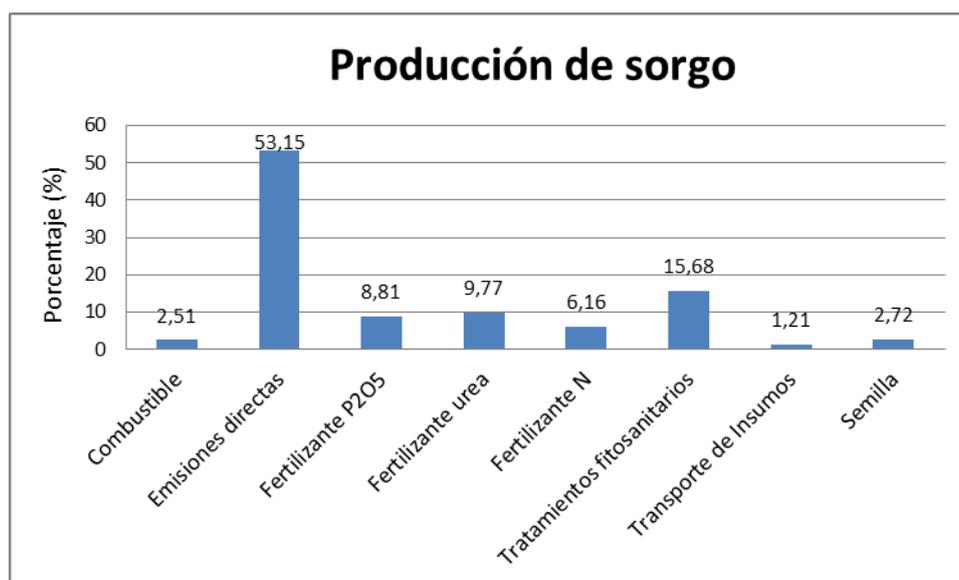


Figura 8. Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de sorgo. Contribución por entradas

De acuerdo con estos resultados, las entradas que más contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero en el cultivo, son las emisiones directas, a las que contribuye las emisiones de N_2O debidas a la aplicación de fertilizantes y a la quema de combustible fósil usado en las labores de cultivo, con más del 53%. La fabricación de fertilizantes y fitosanitarios, presenta una contribución cercana al 40%. Las emisiones totales ascienden a un total de 193,55 gCO_2eq/kg de sorgo húmedo. A pesar de que no existe un valor de referencia considerado por la Comisión europea en los valores por defecto de las emisiones de gases de efecto invernadero para la producción de etanol de sorgo y tampoco del cultivo de sorgo, es posible comparar con valores reportados para escenarios de producción de sorgo en Argentina y en USA. En estos casos, las emisiones son 348,13 gCO_2eq/kg de sorgo y 498,41 gCO_2eq/kg de sorgo, respectivamente.

Las principales diferencias con dichos proceso se observan en el consumo de electricidad de riego, la cuantificación del CO_2 emitido por cambio de uso del suelo y el proceso de secado, que en los dos escenarios comparados, se considera como parte del proceso de obtención del grano. Los valores considerados en dichos escenarios son 59 gCO_2eq/kg de sorgo en el caso de Argentina y 70 gCO_2eq/kg de sorgo en el caso de USA., por consumo eléctrico en riego; 30 gCO_2eq por cambio de uso del suelo y aproximadamente 60 gCO_2eq/kg de sorgo por el secado.

Sistema A2. Obtención del etanol

Esta etapa comprende los procesos de obtención de etanol a partir de grano de sorgo procedente del cultivo, e incluye la etapa de secado de los granos para retirar humedad y de la transformación hasta la obtención de alcohol anhidro y los DGS secos. Los resultados de emisiones de gases de efecto invernadero de esta fase se muestran en la Tabla 16 y en la Figura 9.

Tabla 16. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de producción de etanol
(gCO₂eq/MJ)

Unidades	Cultivo		Transformación				Distribución
	Total	Cultivo	Secado	Procesamiento	Energía	Transporte insumos	Distribución
gCO ₂ eq/MJ	33,45	21,68	2,31	1,80	3,41	2,23	2,03
%	100,00	64,81	6,90	5,38	10,19	6,65	6,07

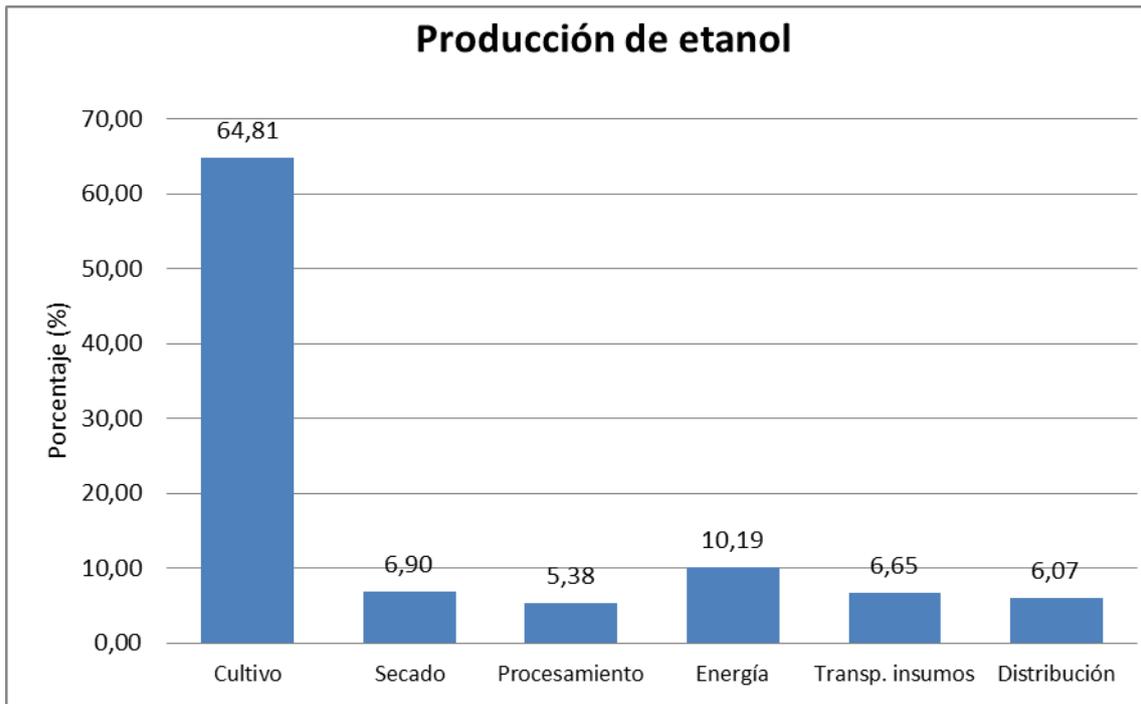


Figura 9. Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de etanol. Contribución por entradas

Las emisiones totales de la producción de etanol (incluyendo todas las etapas anteriores) ascienden a 33,45gCO₂eq/MJ de etanol. El porcentaje de ahorro frente a la producción y uso de un combustible fósil de referencia (cuyas emisiones se estiman en 83,8gCO₂eq/MJ tal y como establece la Directiva CE/28/2009) es de un 60,085%.

La mayor parte de las emisiones provienen del cultivo (64,81%), mientras que el resto de emisiones, se reparten entre la transformación (29,12%) -incluyendo el secado (6,69%), la energía consumida en el proceso (10,19%), el transporte (6,65%)-. Cabe señalar que la etapa de distribución (6,07%) comprende el transporte del producto

principal, por tanto, en este caso la distribución se refiere al transporte del etanol desde la planta de producción hasta la ubicación de los clientes.

En la Figura 10 se muestran los resultados del ACV realizado para la producción de etanol por la empresa ALUR en Uruguay y la comparación con los valores obtenidos en el estudio hecho para el etanol de caña de azúcar.

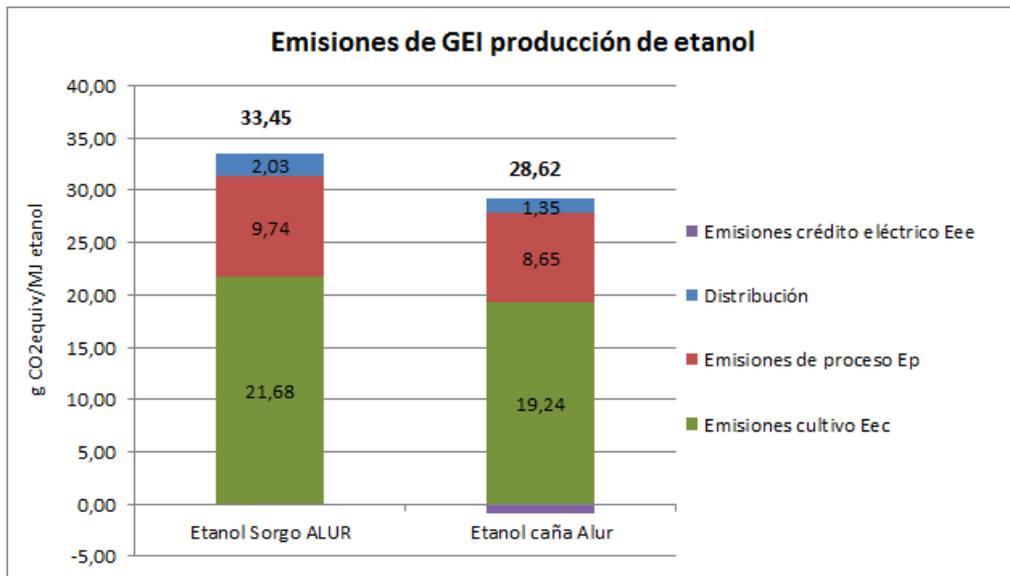


Figura 10. Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de etanol. Comparación con etanol de caña de la empresa Alur.

Como se puede observar las emisiones tanto la etapa de cultivo como las de obtención de etanol, son superiores respecto al caso de etanol de caña de azúcar. El rendimiento del cultivo y la producción de electricidad en el caso del etanol de caña, que funcionan como un crédito eléctrico, puede explicar con relativa claridad dichas variaciones.

A efectos de comparación, la siguiente tabla muestra las emisiones de gases de efecto invernadero de dos procesos de obtención de bioetanol en USA. Los procesos se refieren a obtención de etanol a partir de grano de sorgo, con DDGS como co-producto y usando como fuente de energía gas natural en el primer caso y gas natural en ciclo combinado, en el segundo caso.

Tabla 17. Comparación y emisiones de gases de efecto invernadero y porcentaje de ahorro de la etapa de producción de etanol.³

Proceso	GEI (gCO ₂ eq/MJ)	% ahorro (DER)
Caso base Alur	33,45	60,02
Proceso DDGS con GN	72,78	13,16
Proceso DDGS con GN y ciclo combinado	69,89	16,60

2 Balance energético

El balance energético se obtuvo en base al cálculo de la energía primaria total consumida por los procesos. Dicha energía total incluye la energía no renovable (fósil y nuclear) y la energía renovable (solar, eólica, hídrica y bioenergía) consumida. Sin embargo, y siguiendo lo descrito en los estudios anteriores, sólo se analizará el consumo de energía fósil por cada una de las etapas de ciclo de vida para las distintas etapas del proceso de producción de etanol.

Sistema A1. Producción de sorgo

El consumo de energía fósil en la producción agrícola del sorgo se ha calculado para cada una de las entradas implicadas. Los resultados se muestran en la Tabla 18, expresados en MJ fósil/kg sorgo, en MJ fósil/MJ etanol producido

Tabla 18. Consumo de energía fósil de la etapa de producción sorgo.

Unidades	TOTAL	Prod. del combustible	Fert. P2O5	Fert. urea	Ferti. N	Trat. fitosanitarios	Transporte de Insumos	Semilla
MJ fósil/kg sorgo	2,37	0,61	0,20	0,78	0,23	0,47	0,03	0,05
MJ fósil/MJ etanol	0,27	0,07	0,02	0,09	0,03	0,05	0,004	0,005
%	100	25,59	8,54	32,89	9,89	19,70	1,41	1,99

³ Summary Lifecycle Analysis Greenhouse Gas Results for the U.S. Renewable Fuels Standard Program

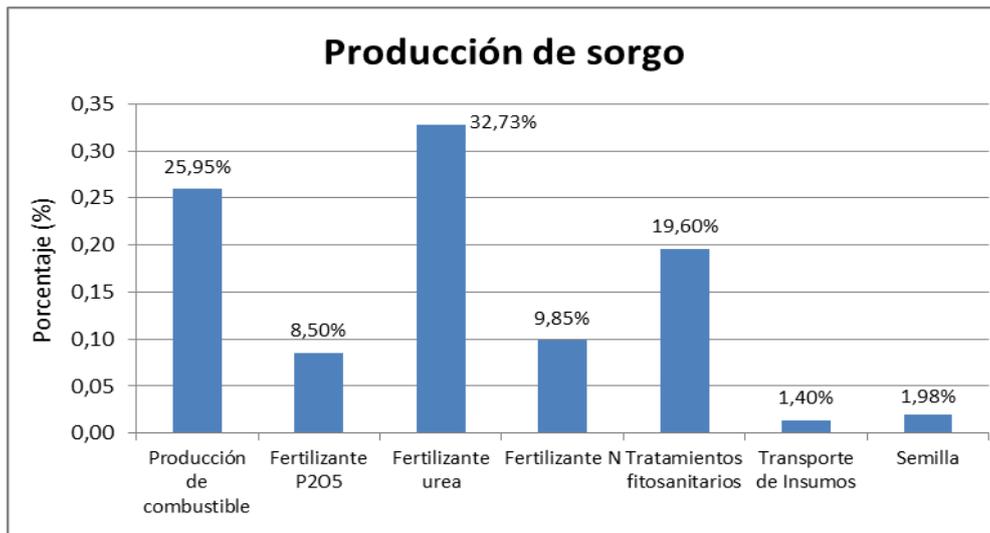


Figura 11. Contribución al consumo de energía fósil de la producción de sorgo

Como se puede observar, las entradas con mayor consumo de energía fósil corresponden a la producción del combustible, producción de los fertilizantes y los productos fitosanitarios. Cualquier mejora del proceso agrícola tendente a reducir estos consumos, supondrá una mejora sensible en el balance de energía fósil de este proceso y del conjunto del sistema de producción de etanol.

El consumo de energía fósil total de este sistema es de 0,27 MJf/MJ de etanol producido.

Sistema A2. Obtención del etanol

Los resultados del consumo de energía fósil para la etapa de producción de etanol se muestran en la Tabla 19 y en la Figura 12.

Tabla 19. Consumo de energía fósil de la etapa de producción de etanol (MJ fósil/MJ etanol).

Unidades	Cultivo		Transformación				Distribución
	Total	Cultivo	Secado	Procesamiento	Energía	Transporte insumos	Distribución
MJf/MJetanol	0,42	0,27	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03
%	100	63,79	8,42	8,16	5,82	7,60	6,21

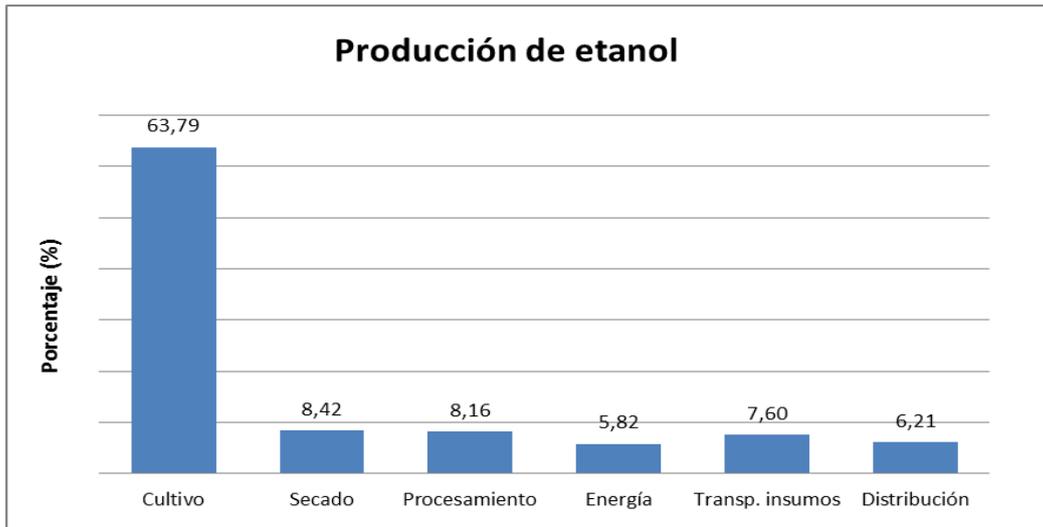


Figura 12. Consumo de energía fósil de la producción de etanol. Contribución por etapas

El consumo de energía fósil de la producción de etanol equivale a 0,42 MJ fósil /MJ de etanol. La mayor parte de los consumos energético provienen del cultivo (63,79%), el resto, se reparte entre las otras entradas: transformación (30%) y distribución 6,21%).

El ratio de energía fósil, entendido como el ratio entre la energía del producto (en términos del poder calorífico inferior) y la energía fósil necesaria para producir y distribuir el producto se calcula para la producción de etanol de sorgo en 2,40.

A efectos de comparación, la siguiente tabla muestra los ratios de energía fósil para el caso en estudio y otro etanol de sorgo, obtenidos de la literatura.

Tabla 20. Comparación de ratios energía fósil.

Proceso	Consumo de energía fósil (MJf/MJ etanol)	Ratio	Ahorro (%)
Caso base Alur	0,42	2,40	65,25
Proceso DDGS con GN⁴	0,492	2,00	58,99

4 Cai et al, 2013.

SECCIÓN V. INTERPRETACIÓN

La fase de interpretación en un ACV, busca a través del análisis de los resultados tanto de la fase de Inventario y como de la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida, resumir y discutir los aspectos más relevantes que permitan establecer conclusiones acordes con la definición del objetivo y alcance.

Una buena interpretación de los resultados en un ACV, pasa por la identificación de la influencia de las variables que más pueden afectar al resultado final. En este estudio y siguiendo la normativa relacionada [ISO 2006b], se indica en qué medida los cambios propuestos, influyen en los resultados de los indicadores.

Durante esta fase se identifican etapas que presentan una contribución importante, no sólo en términos de cantidad, sino también, por el porcentaje de participación. El objetivo es identificarlas las principales cargas ambientales y por tanto los aspectos del sistema evaluado que pueden o deben mejorarse así como las conclusiones finales. Tal como se ha descrito en los informes anteriores, una de los aspectos que posibilita el establecimiento de conclusiones, es el análisis de sensibilidad, técnica que permite a priori, determinar la influencia de hipótesis relacionadas con modificación de los datos de entrada o variaciones en las materias primas utilizadas.

Siguiendo el mismo modelo que en estudios anteriores, en los siguientes apartados, se describe el análisis de sensibilidad que se ha desarrollado en este estudio de ACV, como parte de la fase de interpretación.

1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se ha llevado a cabo comparando el escenario base, que es el analizado en este estudio, con diferentes escenarios alternativos. Los cambios propuestos se establecen a partir de nuevos escenarios, los cuales representan variaciones respecto al proceso estudiado, a partir de un escenario de referencia. Las variables elegidas para realizar este análisis de sensibilidad son las siguientes:

AS1. Modificación del co producto.

AS2. Recuperación de un porcentaje del CO₂ generado en fermentación.

AS3. Variación de los criterios de asignación.

AS4. Cambio en el rendimiento del cultivo.

1.1 Definición de los escenarios analizados

En los siguientes apartados se describen las modificaciones en el sistema de referencia, a partir de las cuales se desarrollan los escenarios que son evaluados en el análisis de sensibilidad. Estos análisis se basan en los inventarios desarrollados para dichos escenarios.

AS1. Modificación en la corriente de co-productos

La modificación del escenario afecta al sistema A2, siendo simplificado el tratamiento de la corriente de destilación en la producción del etanol. En dicho escenario se eliminan las etapas de acondicionamiento de los granos y solubles de destilación, sin realizar sobre dicha corriente operaciones de separación para reducir el contenido de agua (evaporación y secado) y de peletizado. El producto son los granos solubles de destilación húmedos (Se utiliza el acrónimo DWGS, en sus siglas en inglés).

La Figura 13 representa esquemáticamente las entradas y salidas del proceso de obtención del etanol, incluyendo la producción de DWGS, y de los procesos auxiliares de funcionamiento de la planta.

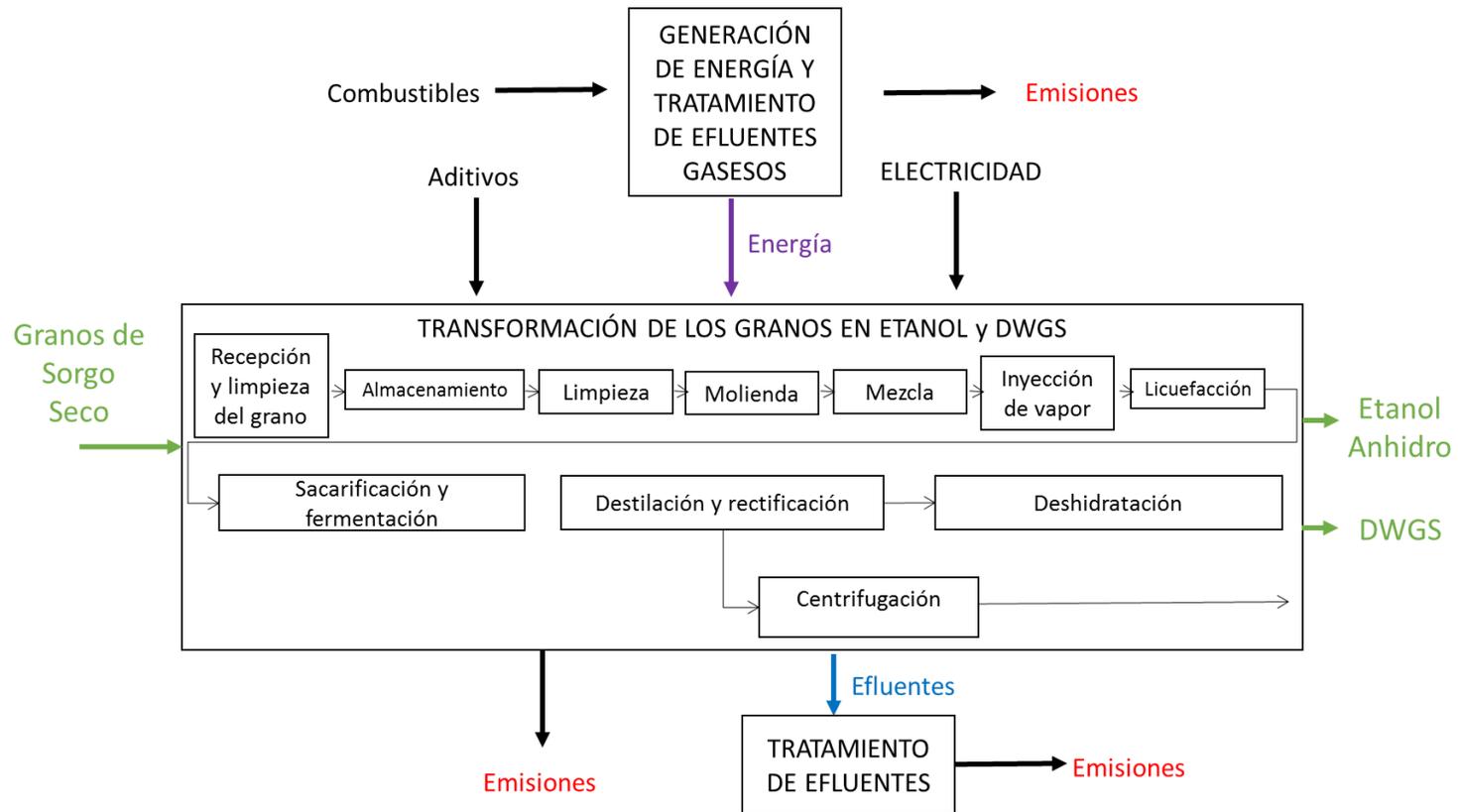


Figura 13. Representación esquemática de los procesos de producción etanol y DWGS

Procedimiento de asignación

Para el escenario generado en este análisis de sensibilidad, es necesario considerar las variaciones producidas en el proceso al modificar las condiciones de salida del co producto (DWGS). No sólo existen variaciones en el proceso, sino también en los precios de venta del co producto. Por eso tal y como se describe en la metodología, es necesario establecer el criterio de asignación para repartir las cargas ambientales entre estos dos productos. Los datos de partida y los porcentajes de asignación establecidos para este escenario (AS1), se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Calculo de la asignación económica para el escenario AS1.

Producto	%
Etanol	94,74%
DGWS	5,26%

Vinculación con la unidad funcional

Este apartado presenta las entradas y las salidas del inventario del sistema producción de etanol de sorgo y su vinculación con la unidad funcional (1 t de Etanol anhidro).

Tabla 22. Balance de materiales y combustibles para el escenario AS1.

Producto	Cantidad	Unidad
Etanol anhidro 99,6%	1,00E+00	t
DWGS	2,50E+00	t
Materiales/Combustibles		
Grano de Sorgo seco	3,10E+00	t
Alfa amilasa	1,48E+00	kg
Glucosa amilasa	1,14E+00	kg
Proteasa	1,14E-01	kg
Levaduras	4,06E-01	kg
Urea	1,10E+01	kg
DAP	3,68E+00	kg
Soda cáustica	8,24E+00	kg
Antiespumante	7,73E-01	kg
Antibiótico	6,34E-03	kg
3D TRASAR® 3dt187 (TR)	1,14E-01	kg
NALSPERSE® 7308 (TR)	3,80E-02	kg
Ácido clorhídrico HCl	5,07E-02	kg
Polímero Flopam 4190	6,34E-03	kg
Sulfato de Aluminio en solución	2,53E+00	kg
Hipoclorito de Sodio	1,09E+00	kg

Antiincrustante K78	1,01E-02	kg
Carbonato de sodio	2,03E-01	kg
RT-18P1	2,53E-02	kg
AMINAS RT 350	7,60E-02	kg
HIDRACINA RT 119H	1,05E-04	kg
Clorito de sodio FR C-25 (NaClO ₂)	7,41E-05	kg
Agua que ingresa al proceso	2,20E+00	m ³
Transporte Grano seco a Transformación	1,86E+02	tkm
Transporte Biomasa a Planta	1,76E+02	tkm
Transporte del lodo	1,10E-01	tkm
Transporte del DWGS	1,25E+02	tkm
Transporte del Etanol	3,27E+02	tkm
Biomasa usada en la caldera	1,10E+00	t
Diesel usado en la caldera	7,66E-04	t
Electricidad	3,47E-01	MWh
Emisiones Al Aire		
CO ₂ procedente de fermentación	8,52E-01	t
CO ₂ procedente de ETE	5,87E-03	t
CO ₂ Caldera	1,01E+00	t
Emisiones Al agua		
Agua a cauce ETA/ETE	2,73E+00	m ³
Agua a cauce RT	1,33E+00	m ³
Residuos		
Lodo Aguas residuales	6,48E-03	t
Agua residual	1,33E-01	t

AS2. Recuperación de CO₂

En este caso, el escenario desarrollado, implica la co producción de DDGS, la asignación mantiene el criterio económico (ver Tabla 23) y se considera hacer efectiva la industrialización del CO₂. Este proceso consiste en recuperar el 70% del CO₂ generado en el proceso de fermentación. Para ello, es necesario el consumo de energía eléctrica y de agua.

Tabla 23. Calculo de la asignación económica para el escenario AS2.

Producto	Asignación (%)
Etanol	93,25%
DDGS	6,75%

Vinculación con la unidad funcional

Este apartado presenta las entradas y las salidas del inventario del sistema producción de etanol de sorgo y su vinculación con la unidad funcional, para el escenario de producción con captura de CO₂ (AS2).

Tabla 24. Balance de materiales y combustibles para el escenario AS2.

Producto	Cantidad	Unidad
Etanol anhidro 99,6%	1,00E+00	t
DDGS	8,06E-01	t
Producto evitado	5,96E-01	
CO ₂	5,96E-01	t
Materiales/Combustibles		
Grano de Sorgo seco	3,099	t
Alfa amilasa	1,48E+00	kg
Glucosa amilasa	1,14E+00	kg
Proteasa	1,14E-01	kg
Levaduras	4,06E-01	kg
Urea	1,10E+01	kg
DAP	3,68E+00	kg
Soda cáustica	8,24E+00	kg
Antiespumante	7,73E-01	kg
Antibiótico	6,34E-03	kg
3D TRASAR® 3dt187 (TR)	1,14E-01	kg
NALSPERSE® 7308 (TR)	3,80E-02	kg
Ácido clorhídrico HCl	5,07E-02	kg
Polímero Flopam 4190	6,34E-03	kg
Sulfato de Aluminio en solución	2,53E+00	kg
Hipoclorito de Sodio	1,09E+00	kg
Antiincrustante K78	1,01E-02	kg
Carbonato de sodio	2,03E-01	kg
RT-18P1	2,53E-02	kg
AMINAS RT 350	7,60E-02	kg
HIDRACINA RT 119H	1,05E-04	kg
Clorito de sodio FR C-25 (NaClO ₂)	7,41E-05	kg
Agua que ingresa al proceso	2,20E+00	m ³
Agua clarificada	4,00E+00	m ³
Transporte Grano seco a Transformación	1,86E+02	tkm
Transporte Biomasa a Planta	2,91E+02	tkm
Transporte del lodo	1,10E-01	tkm
Transporte del DDGS	1,30E+02	tkm
Transporte del Etanol	3,27E+02	tkm

Gas Licuado de Petróleo usado en RTO*	1,65E-03	t
Gas Natural usado en RTO*	2,80E+00	m ³
Biomasa usada en la caldera	1,82E+00	t
Diesel usado en la caldera	7,66E-04	t
Electricidad	5,20E-01	MWh
Emisiones Al Aire		
CO ₂ procedente de fermentación	2,56E-01	t
CO ₂ procedente de ETE	5,87E-03	t
CO ₂ Caldera	1,68E+00	t
CO ₂ RTO	8,80E-03	t
Emisiones Al agua		
Agua a cauce de ETA y ETE	2,87E+00	m ³
Agua a cauce RT	1,33E+00	m ³
Residuos		
Lodo Aguas residuales	6,48E-03	m ³
Agua residual Purga	1,33E-01	t

*El consumo de energía en RTO se distribuye en un 90% y 10% en GLP y GN, respectivamente

AS3 Variación de los criterios de asignación

En este caso, la suposición se refiere a la modificación de los criterios de asignación. En el escenario de referencia se ha hecho asignación económica para el sistema productivo, tomando como criterio de asignación la relación de cada uno de los co-productos y el precio de venta. En los escenarios desarrollados para este análisis de sensibilidad, se utilizan dos (2) criterios de asignación adicionales: asignación energética y asignación másica, siguiendo también en este caso, las recomendaciones tanto de la normativa ISO, como aquellas recomendaciones específicas de la Plataforma Europea de Análisis de Ciclo de Vida [ISO 2006b; ILCD, 2010].

Los datos de asignación para cada uno de los criterios utilizados se presentan en la Tabla 25 y la Tabla 26.

Tabla 25. Calculo de la asignación energética para el escenario AS3.1.

Producto	PCI (MJ/kg)	Cantidad (MJ/tEtanol)	Asignación (%)
Etanol	26,75	26750	67,24
DDGS	16	13034	32,76

Tabla 26. Calculo de la asignación másica para el escenario AS3.2.

Producto	Cantidad (tprod/t etanol)	Asignación (%)
Etanol	1,00E+00	55
DDGS	8,15E-01	45

AS4 Cambio en el rendimiento del cultivo.

Con el objetivo de valorar la influencia del rendimiento del cultivo en el análisis de los impactos considerados en este caso se ha realizado el escenario de referencia modificando el rendimiento del cultivo. Teniendo en cuenta las estadísticas referidas a los rendimientos del cultivo de sorgo grano en Uruguay, se ha confeccionado el escenario con rendimiento de 4.000 kg/há, en lugar de 3.800 kg/há como se consideraba en el escenario base. Se ha utilizado la asignación económica para comparar con el caso de referencia.

1.2 Resultados del análisis de sensibilidad

A continuación se presentan de forma detallada los resultados obtenidos en los distintos escenarios que conforman el análisis de sensibilidad. La evaluación se ha realizado en términos de los impactos referidos a cambio climático (emisiones de gases de efecto invernadero) y consumo de energía fósil.

Gases de efecto invernadero

Los distintos análisis de sensibilidad realizados, presentan cambios significativos en los resultados de emisiones de GEI en la producción de etanol como se puede observar en la Tabla 27.

Tabla 27. Resumen de emisiones para los escenarios evaluados.

Escenario	Característica	Etapas				Total (gCO ₂ eq/MJ)	Ahorro (%)
		Cultivo	Transformación	Distribución	Captura CO ₂		
Caso Base	DDGS + asig Económica	21,68	9,74	2,03		33,45	60,08
AS1	DWGS + asig Económica	22,03	9,20	2,03		33,25	60,32
AS2	DDGS + asig Económica + Cap CO ₂	21,68	10,54	2,03	-16,99	17,26	79,40
AS3.1	DDGS + asig Energética	15,63	7,02	2,03		24,69	70,54
AS3.2	DDGS + asig Másica	12,79	5,75	2,03		20,56	75,46
AS4	Mod rend+DDGS + asig Económica	20,60	9,74	2,03		32,37	61,38

La información de esta tabla se puede ver de manera gráfica en la Figura 14, donde se presentan la contribución por etapa de cada escenario, así como el valor total de las emisiones de GEI y el porcentaje de ahorro, de acuerdo con el valor de referencia utilizado.

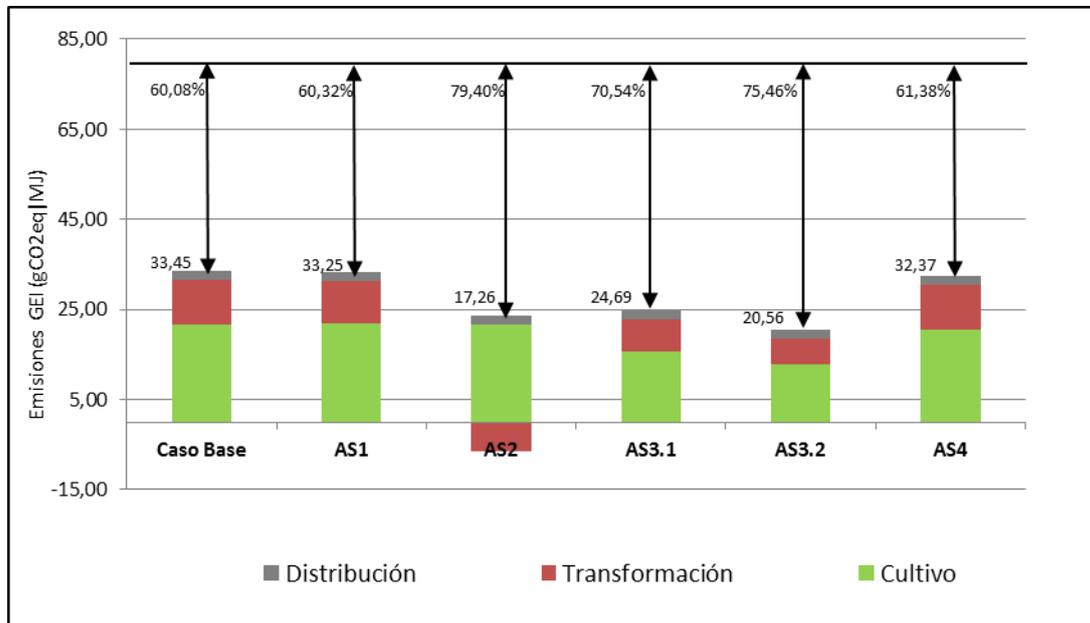


Figura 14. Comparativa de emisiones GEI entre el caso base y los escenarios de sensibilidad

De acuerdo con el gráfico, tomando como referencia el caso base, el escenario AS1 conduce a una mayor emisión de GEI por MJ de etanol producido. Esto se explica por el cambio de proporciones entre los productos y su respectivo precio de venta, lo que modifica las proporciones de las cargas que deben ser asignadas a cada producto.

En cuanto al escenario AS2, bajo el supuesto que todo el CO₂ capturado (70% del total generado), está en condiciones de evitar la producción de CO₂ industrial, se obtendría una muy importante disminución de emisiones de GEI. Bajo esta premisa, el escenario AS2, presenta unas emisiones de GEI de 17,24gCO₂eq/MJ y unos ahorros respecto a la DER, cercanos al 80%.

Por otra parte, los escenarios AS3.1 y AS3.2 muestran reducciones importantes en las emisiones. Esta reducción, se debe a la distribución de cargas dado los diferentes criterios de asignación utilizados. Este tipo de asignación, conduce a que gran parte de los impactos que en el escenario base estaban dirigidos al etanol, vayan ahora al co

producto. Las diferencias son muy importantes, los ahorros de emisiones producidos en los escenarios AS3.1 y AS3.2 son del 70,54% y 75,46% respectivamente.

Sin embargo, es necesario evaluar si dichos escenarios cumplen con todos los criterios de sostenibilidad de biocombustibles de la DER. Es decir, si el biocombustible producido muestra conformidad con los criterios de sostenibilidad establecidos en la norma. El artículo 17 de la ya mencionada directiva, establece lo siguiente:

Independientemente de que las materias primas se hayan cultivado dentro o fuera del territorio de la Comunidad, la energía procedente de biocarburantes se considerarán sostenibles, si cumplen los siguientes criterios de sostenibilidad:

- Reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, de acuerdo con los porcentajes establecidos.
- No se producen a partir de materias primas procedentes de tierras de elevado valor en cuanto a biodiversidad.
- No se fabrican a partir de materias primas procedentes de tierras con elevadas reservas de carbono.
- No provienen de materias primas extraídas de tierras que, a enero de 2008, fueran turberas, a no ser que se aporten pruebas de que el cultivo y la recolección de esta materia prima no implican el drenaje de suelos no drenados con anterioridad.

Finalmente, el escenario desarrollado para evaluar la variación en el rendimiento del cultivo (AS4), muestra una reducida disminución del total de las emisiones, acorde con el incremento en el rendimiento del cultivo. Las emisiones de GEI de este escenario son de 32,27gCO₂eq/MJ, lo que equivale a una reducción del 61,38%, respecto al fósil de referencia.

Balances energéticos

Los resultados de consumos de energía fósil en los procesos de producción de etanol y co productos, de los escenarios de sensibilidad evaluados, se presentan en la Tabla 28 y en la Figura 15.

Tabla 28. Resumen del consumo de energía para los escenarios evaluados.

Escenario	Característica	Etapas				Total (MJfeq/MJ)	Ahorro (%)
		Cultivo	Transformación	Distribución	Captura CO2		
Caso Base	DDGS + asig Económica	0,27	0,13	0,03		0,42	65,25
AS1	DWGS + asig Económica	0,27	0,12	0,03		0,41	65,69
AS2	DDGS + asig Económica + Cap CO ₂	0,27	0,13	0,03	-0,16	0,26	78,54
AS3.1	DDGS + asig Energética	0,19	0,09	0,03		0,31	74,34
AS3.2	DDGS + asig Másica	0,26	0,07	0,03		0,36	70,31
AS4	Mod rend+DDGS + asig Económica	0,25	0,13	0,03		0,40	66,36

La información de la Tabla 28, se presenta de forma gráfica en la Figura 15, donde se presentan la contribución por etapa de cada escenario, así como el valor total de la energía fósil consumida y el porcentaje de ahorro, de acuerdo con el valor de referencia utilizado.

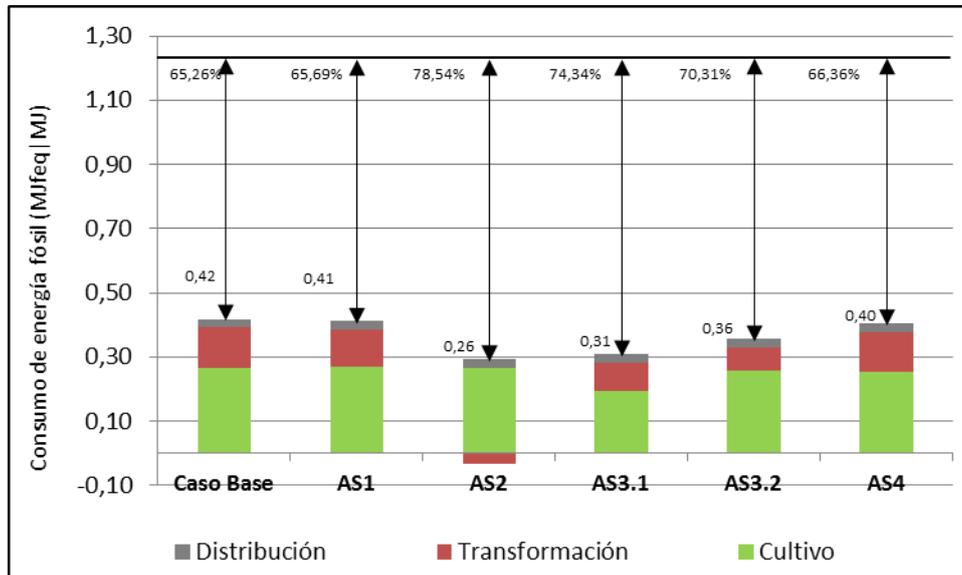


Figura 15. Comparativa de consumo de energía fósil entre el caso base y los escenarios estudiados

A partir de la información de la tabla y el gráfico, es posible observar en el escenario AS1 una leve reducción del consumo energía fósil y un ligero aumento del porcentaje de ahorro (65, 67%) respecto al escenario base. Esto se puede explicar por el cambio de participación de cada co producto, en la asignación, tal como ya se ha explicado antes en el caso del análisis de las emisiones de GEI.

En cuanto al escenario AS2, bajo los mismos supuestos ya descritos, el perfil del consumo de energía fósil mejora, por lo que el ahorro de energía fósil también es más favorable que en el escenario base. En este escenario en concreto, la reducción respecto al caso base es de 0,16MJfeq/MJ y los ahorros respecto al valor de referencia fósil son cercanos al 79%.

Por su parte, los escenarios AS3.1 y AS3.2 evidencian reducciones importantes en la cuantificación de este impacto. Tal como en el caso del análisis de las emisiones de GEI, la reducción, se debe a la distribución de cargas dado los diferentes criterios de asignación utilizada. Los ahorros en el consumo de energía fósil en los escenarios AS3.1 y AS3.2 son del 74,34% y 70,31% respectivamente.

Finalmente, el escenario AS4 presenta un perfil bastante parecido al escenario base, lo que permite aseverar, que el rendimiento considerado en el cultivo, no implica una reducción importante del consumo de energía fósil en el total del proceso.

2 Áreas de mejora

Uno de los aspectos a destacar como parte de la etapa de Interpretación en un Análisis de Ciclo de Vida, es la definición de las áreas de mejora. Estas áreas de mejora, van en relación directa con aquellos aspectos que al ser modificados en el proceso estudiado, permiten reducir o eliminar los impactos ambientales identificados en el análisis. En este análisis, las áreas de mejora están relacionadas con la etapa de producción agrícola y la producción de etanol.

Etapa de producción agrícola

Los resultados obtenidos en el análisis de la producción agrícola, no muestran datos llamativos respecto a otros escenarios de cultivo existente. De hecho, los resultados encontrados, están por debajo de valores reportados en la literatura para este mismo cultivo (Ver tablas comparativas)

Tabla 29. Emisiones de GEI en el cultivo de sorgo en este estudio

TOTAL (gCO2eq/kg)	Emisiones directas	Combustible	Fertilizante P2O5	Fertilizante urea	Fertilizante N	Tratamientos fitosanitarios	Transporte de Insumos	Semilla
193,55	102,88	4,85	17,04	18,91	11,91	30,34	2,34	5,27

Tabla 30. Emisiones de GEI en el cultivo de sorgo en otros estudios

TOTAL (gCO ₂ eq/kg)	Emisiones directas	Combustible	Fert P ₂ O ₅	Fert urea	Fert N	Lima	Tratamientos fitosanitarios	Electricidad riego	Semilla	Escenario ⁵
183,87	97,73	4,61	16,19	17,96	11,32	-	28,82	2,22	5,01	AS4
348,13	145,86	114,73	2,50	5,87	17,03	3,22	-	58,92	-	AR
498,41	230,60	106,66	39,74	18,95	29,96	2,89	-	69,62	-	USA

Sin embargo, y considerando que en la etapa producción de etanol, el cultivo tiene una participación importante, se plantea como área de mejora, la opción de estudiar la reducción de las entradas de insumos agrícolas (combustibles para las labores o fertilizantes y/o fitosanitarios).

Etapa de obtención de etanol

En la etapa de producción de etanol, las cargas tanto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como de consumo de energía fósil la entrada con una mayor contribución es claramente el cultivo. Por lo tanto, todo lo que se haga para reducir las cargas ambientales en el cultivo del sorgo va a redundar en una mejora de los resultados de la producción de etanol. A partir del análisis de sensibilidad, se ha determinado que la producción de DWGS, no mejora el resultado ambiental de la producción de etanol.

⁵ Estos tres escenarios corresponde al Análisis de sensibilidad (AS), el cultivo de sorgo granífero en Argentina (AR) y en Estados Unidos (USA). Datos tomados de la base de datos Agrifootprint (2015)

SECCIÓN V. CONCLUSIONES

El presente estudio de Análisis de Ciclo de Vida recoge los efectos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (huella de carbono) y el balance energético de la cadena de producción de etanol a partir de sorgo de la empresa ALUR en la planta de Paysandú.

Teniendo en mente, las suposiciones realizadas en la definición del objetivo y alcance, y considerando las limitaciones en cuanto a datos relativos a procesos que no se desarrollan aún en la planta, y cuya información se ha tomado a partir de la literatura, la producción de etanol en la planta de Paysandú genera unas emisiones de gases de efecto invernadero de 33,45gCO₂eq/MJ etanol. Esto supone un ahorro de un 60,08% respecto del uso de un combustible fósil de referencia (emisiones estimadas en 83,8 gCO₂eq/MJ).

Por otra parte y respecto a los escenarios desarrollados como parte del análisis de sensibilidad, la modificación del co producto obtenido en la producción de etanol, en términos de DWGS y su comercialización, presenta una leve reducción de las emisiones de GEI por unidad de etanol producido. El ahorro respecto al valor de referencia en este escenario, alcanza el 60,32%. Sin embargo, respecto al caso base no se evidencia una modificación importante.

La captura del 70% del CO₂ generado en la fase de fermentación, a pesar de implicar un mayor consumo de energía en el proceso, implicaría un importante aumento de ahorro de GEI, pasando del 60,08% del caso base, a un 79,40% en este escenario. Lo que invita a pensar que la captura de CO₂ como parte del proceso productivo, es una alternativa con evidentes ventajas. Ahora bien, es necesario, desarrollar estudios posteriores, que permitan demostrar de manera fehaciente, dichos resultados.

Por otra parte, los escenarios que representan la variación de los criterios de asignación (energética y másica), muestran valores de reducción por encima del 70%. Estos valores cumplirían con los criterios de sostenibilidad especificados en la Directiva 28/2009 EC desde el punto de vista de ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, y tal y como ya se ha establecido en anteriores estudios, es

necesario añadir las emisiones del transporte del biocarburante hasta Europa y seguir estrictamente la metodología propuesta en dicha Directiva en cuanto a los criterios de asignación.

En cuanto al balance de energía fósil para esta cadena productiva, en el caso base, el consumo de energía fósil para la producción de etanol, es de 0,42 MJ de energía fósil por unidad de energía (MJ) del etanol, lo que supone un ratio de energía de 2,40. Es decir, se producen 2,40 MJ de energía en forma de etanol (medidos con su poder calorífico inferior) por cada MJ de energía fósil empleado en la cadena de producción.

Respecto al análisis de sensibilidad realizado, los resultados muestran una gran similitud cuando se modifica el co-producto y una mejora importante ahorro de energía fósil para el escenario con captura de CO₂ y cuando se modifican los criterios de asignación de cargas.

A continuación, la Tabla 31 presenta una breve lista de diversos resultados obtenidos en otros estudios sobre etanol de granos. Estos datos podrían ser comparables en este estudio, considerando el caso base bajo la premisa de que cada estudio ofrece resultados que no necesariamente pueden ser comparados, sin tener en cuenta las características de cada estudio. A esto hace referencia, la necesidad de estandarizar los procedimientos de cálculo del inventario de gases de efecto invernadero, propuesto en la DER. Vale la pena aclarar, que en este estudio en particular, se han tenido en cuenta, la mayor parte de los criterios establecidos en la DER.

Tabla 31. Emisiones de GEI en otros estudios de producción de etanol de grano

Fuente y origen	Emisiones de GEI CO ₂ eq/kg)	Emisiones de GEI (gCO ₂ eq/MJ)	% ahorro	Fuente
Sorgo (UY) (caso base)	894,87	33,45	60,08	Estudio actual
Maíz (US)	1600	59,81	28,62	Muñoz et al, 2014
Trigo (FR)	2070	77,38	7,66	Muñoz et al, 2014
Maíz (IT)	1273,30	47,6	43,20	Buratti et al, 2008

REFERENCIAS

1. AAE, 2011. Estudio Básico Sobre Del Sector De Los Biocarburantes. Agencia Andaluza de Energía (2011).
2. Agri-footprint 2.0 – Part 1: Methodology and basic principles. September 2015
3. Agri-footprint 2.0 – Part 2: Description of data. September 2015
4. Brentrup et al. 2001. F. Brentrup, J. Küsters, H. Kuhlmann, J. Lammel. Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers. *Eur J Agron*, 14 (3) (2001), pp. 221–233
5. BioGrace - List of Additional Standard Values. Version 4 – Public. April 2011
6. BUWAL 2012. BUWAL 250 LibraryTM. Ökoinventare für Verpackungen. Schriftenreihe Umwelt Nr 250 Part 1 and 2. Second edition 2012.
7. Cai. H, Dunn. B, Wang, Z. Han. J, Wang. M. Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of production of bioethanol from sorghum in the United States. *Biotechnol Biofuels* 6, 141 (2013).
8. C. Buratti, M. Barbanera, F. Fantozzi. Environmental balance of bioethanol from corn grain: evaluation of different procedures of co-products allocation. *Proceeding of the 16th European biomass conference & exhibition (2008)*
9. CE 1998b. DIRECTIVA 98/70/CE DIRECTIVA 98/70/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de octubre de 1998 relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo y por la que se modifica la Directiva 93/12/CEE del Consejo Económico Europeo
10. CE 2009a. DIRECTIVA 2009/28/CE DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. *Diario Oficial de la Unión Europea*.
11. CE 2009b. DIRECTIVA 2009/30/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 98/70/CE en relación con las especificaciones de la gasolina, el diésel y el gasóleo, se introduce un

mecanismo para controlar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se modifica la Directiva 1999/32/CE del Consejo en relación con las especificaciones del combustible utilizado por los buques de navegación interior y se deroga la Directiva 93/12/CEE

12. CE, 1998a. DIRECTIVA 98/69/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de octubre de 1998 relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo Económico Europeo
13. CE, 2012. COM(2012) 595 final Propuesta de DIRECTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por la que se modifican la Directiva 98/70/CE, relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo, y la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables
14. EC, 2012. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and Supporting Information. First edition. February 2012. EUR 25167. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2012.
15. Ecoinvent, 2007.
16. Evaluación medioambiental de la mejora de la calidad de los combustibles para el transporte. Ministerio de Medio Ambiente.
17. EBTP. Biofuel Fact Sheet: Ethanol. European Biofuels Technology Plattform. 2011
18. Frischknecht et al, 2004. Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Humbert S., Margni M., Nemecek T. and Spielmann M. (2004) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent report No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2004.
19. Frischknecht. R, et al. Frischknecht R., Jungbluth N., et.al. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000, Swiss Centre for LCI. Dübendorf, CH, www.ecoinvent.ch. 2003.

20. Frischknecht, R.; Jungbluth, N.; Althaus, H.J.; Doka, G.; Dones, R.; Hischier, R.; Hellweg, S.; Humbert, S.; Margni, M.; Nemecek, T.; Spielmann, M. 2007. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0.ecoinvent report No. 3, Swiss centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
21. FTS, 2011. Transporte sostenible para américa latina: situación actual y perspectivas. Documento de respaldo foro de transporte sostenible (FTS) de américa latina
22. Gabrielle, B., Nguyen The, N., Maupu, P. and Vial, E. (2013), Life cycle assessment of eucalyptus short rotation coppices for bioenergy production in southern France. *GCB Bioenergy*, 5: 30–42. doi:10.1111/gcbb.12008
23. Garraín D., Herrera I., Lago C., Lechón Y. y Sáez R. Análisis de ciclo de vida de biocarburantes de aceite vegetal hidrotratado. Colección Documentos CIEMAT. ISBN: 978-84-7834-663-9, 2011
24. Garraín D. Herrera I., Lago C., Lechón Y., Sáez R. Viabilidad medioambiental del co-procesamiento de aceites vegetales en unidades de hidrotratamiento para obtener biocarburantes mediante ACV. XIV INTERNATIONAL CONGRESS ON PROJECT ENGINEERING. Madrid Junio de 2010
25. Gil et al, 2013. Gil, M. P., Moya, A. M. C., & Domínguez, E. R. (2013). Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 41, 222-231.
26. Gravalos I., Gialamas T., Koutsofotis Z., Kateris D., Tsiropoulos Z., Xyradakis P., Georgiades T. Energetic Study on Animal Fats and Vegetable Oils Using Combustion Bomb Calorimeter. *Journal of Agricultural Machinery Science*. 2008, 4 (1), 69 - 74
27. Herrera et al, 2012. Herrera, I; Lechón, Y; Lago, C; Sáenz R. "Actualización de los Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte: Bioetanol y Biodiesel" Informe Técnico. CIEMAT. Madrid. Noviembre 2012
28. Herrera et al, 2011. Herrera, I., Lago, C., Lechón, Y., Sáez, R. ACV de cultivos energéticos en España, como fuente de biomasa para calor y electricidad. Colección Documentos CIEMAT, ISBN: 978-84-7834-656-1, 2011, Madrid (Spain).

29. IEA, 2011. Technology Roadmap Biofuels for Transport (2011).
30. Houghton et al, 1990. Houghton, J.T., G.T. Jenkins and J.J. Ephraums. (eds.). 1990. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
31. ARPEL ICA, 2009. Manual de Biocombustibles. ISBN13: 978-92-9248-121-6. 2009
32. ILCD Handbook, 2010. ILCD, 2010. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps. First edition March 2010. EUR 24378 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.
33. IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). IGES, Japón .
34. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
35. ISO 2006a, ISO 14040. 2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.
36. ISO 2006b ISO 14044. 2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines.
37. Kiatkittipong et al, 2009. W. Kiatkittipong, P. Wongsuchoto, P. Pavasant Life cycle assessment of bagasse waste management options. Waste Management, 29 (2009), pp. 1628–1633
38. Köble, R, 2014. Köble, R .The Global Nitrous Oxide Calculator – GNOC – Online Tool Manual. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport.
39. Lechón et al, 2005. Y. LECHÓN; H. CABAL; C. LAGO; CRISTINA DE LA RÚA; R. SÁEZ; M. FERNANDEZ. Análisis del Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase I. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Etanol de Cereales y de la Gasolina. Energía y Cambio Climático. pp. 1 - 120. Centro de

- Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, 2005.
ISBN 84-8320-312-X
40. Lechón et al, 2006. Y. LECHÓN; H. CABAL; C. LAGO; CRISTINA DE LA RÚA; L. IZQUIERDO; R. SÁEZ; M. FERNÁNDEZ. Análisis del Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel del Diésel. Energía y Cambio Climático. pp. 1 - 139. Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, 2006.
ISBN 84-8320-376-6
41. Lechón et al, 2011. Lechón, Y., Herrera, I., Lago, C. Sánchez, J., Romero, L. Evaluación del balance de gases de efecto invernadero en la producción de biocarburantes. Documento de apoyo al estudio técnico PER 2011-2020. Instituto de diversificación y ahorro energético. 2011, Madrid (Spain).
42. Ley Nº 18.195, 2007. Ley Nº 18.195. AGROCOMBUSTIBLES SE REGULA SU FOMENTO Y REGULARIZACIÓN DE SU PRODUCCIÓN, COMERCIALIZACIÓN Y UTILIZACIÓN D.O. 28 nov/007 - Nº 27373. 2007
43. Murrú et al, 2012. A. Murrú; E. Hermin; F. Kuster. Estrategias de reconversión del sector azucarero en Uruguay: energías alternativas.
44. I. Munoz, K. Flury, N. Jungbluth, G. Rigarlsford, L. Mila i Canals, H. King. Life cycle assessment of bio-based ethanol produced from different agricultural feedstocks. Int. J. Life Cyc. Assess., 19 (1) (2014), pp. 109–119
45. Nemececk et al, 2007. Nemececk, T. & Kagi, T. Life cycle inventories of Swiss and European Agriculture production Systems. Final Report. Ecoinvent V2.0 No 15a. Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Zurich and Dübendorf, CH. 2007. (Actualizado a 2012)
46. Perroni, 2013. Perroni A. Energía Sustentable para todos. Análisis rápido de situación e identificación de brechas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA). Uruguay 2013
47. PNUMA 2012. GEO-5. Quinto reporte de evaluación Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. 2012
48. Pre et al, 2016. PRé, et al. SimaPro Database Manual Methods Library. Report version: 2.9. April 2016
49. RFA, 2008. RFA – Renewable Fuels Association. Annual Industry Outlook 2008. Renewable Fuels Association, 2008. <http://www.ethanolrfa.org>

50. Sánchez, O.J., y Cardona, C.A. (2008). Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*. 99 (2008) 5270–5295
51. SNRCC, 2010. Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y la Variabilidad. Plan nacional de respuesta al cambio climático, 2010. Diagnóstico y lineamientos estratégicos 2012
52. Mackay, 2014. Stephenson AL, Mackay DJC. Life cycle impacts of biomass electricity in 2020. In: Department of Energy and Climate Change; 2014
53. Zhan, X., Wang, D., Tuinstra, M.R., Bean, S., Seib, P.A., Sun, X.S., 2003. Ethanol and lactic acid production as affected by sorghum genotype and location. *Industrial Crops and Products* 18, 245–255.

Links

<http://www.pre.nl/simapro>

www.ecoinven.ch

<http://www.agri-footprint.com/>

<http://www.ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/BUWAL>

<http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/>

<https://parlamento.gub.uy/documentosyleyes/ficha-asunto/131595>

<http://www.ben.miem.gub.uy/>