



7th INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION Academic

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Análisis de Ciclo de Vida de la Producción de Bioetanol de La Caña de Azúcar, Estudio de Caso: Ingenio Risaralda S.A.

GONZÁLEZ, L.F.^{a,b*}, MONTOYA, J. A.^a, MARÍN, G.A.^c

a. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia

b. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

c. Ingenio Risaralda S.A., Colombia

**Autor, lufergon@utp.edu.co, lfgonzalezr@udistrital.edu.co*

Resumen

El cultivo de caña de azúcar *Sacharum officinaru*, fue introducida a Colombia en el siglo XV. El Clúster Bioindustrial del Azúcar está ubicado en el valle geográfico del río Cauca (Colombia); este sector productivo se industrializó generando como negocio medular un proceso de especialización en la producción de azúcar y ampliando su actividad productiva industrial a la producción de biocombustibles (etanol carburante) y a la producción de energía eléctrica. La búsqueda por la disminución del uso de combustibles fósiles y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero son algunos de los principales objetivos en la búsqueda de la sostenibilidad del sector.

En el presente trabajo se exponen los resultados del análisis de impactos ambientales potenciales del bioetanol producido en el Ingenio Risaralda S.A., basándose en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Para obtener los resultados, se siguieron las etapas de un ACV conforme a las estandarizadas por la norma ISO 14040; la fase de elaboración de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) fue la que más demandó trabajo por tratarse de la fase de recolección de datos en campo y posterior estructuración para la continuación del ACV. Con el inventario concluido, la información de ICV fue incluida en el software SimaPro, versión 8.2.3. Para el análisis del impacto ambiental, el proyecto se centró en el método ReCiPe Midpoint (H), que evalúa 18 categorías de impacto. El sistema estudiado comprende la cadena productiva para la obtención del bioetanol en el Ingenio Risaralda S.A. en las etapas de campo, cosecha, fábrica, destilería y cogeneración.

Se encontró que la etapa de campo es responsable de 4 de las 18 categorías de impacto; la de cosecha contribuye a 5 de las 18; la de fábrica es responsable de 7 de las 18; la de destilería contribuye a 2 de las 18 y la etapa de cogeneración implica un impacto ambiental positivo en la categoría de cambio climático, pues utiliza la energía en forma de calor producida por el bagazo para generar vapor y luego mediante el uso de turbogeneradores, la energía eléctrica. Para el año 2015, la producción de bioetanol de caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., presentó un cálculo de emisiones de 138 kg CO₂ eq /m³; en comparación con los datos de estudios de cambio climático del Centro de Investigación de Caña de Azúcar (CENICAÑA) que para el año 2010 obtuvo un resultado de 909 kg CO₂ eq /m³ y para el año 2015 fue de 476 kg CO₂ eq /m³ los resultados son muy buenos, el Ingenio en estudio evidencia un comportamiento ambientalmente mejor, por el no uso de carbón en sus calderas, y porque en los cálculos (avalados por CENICAÑA), se asumió que la energía cogenerada vendida era un beneficio ambiental.

Palabras clave: caña de azúcar; bioetanol; análisis de ciclo de vida; software SimaPro; impactos ambientales potenciales.

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Barranquilla - Colombia - June 21st and 22nd - 2018

1. Introducción

Durante siglos, la biomasa como la leña, fue el principal combustible para la humanidad. Con el inicio de la Revolución Industrial, que incluyó la introducción del carbón mineral y los hidrocarburos, la matriz energética se transformó para ceder el paso a la utilización de recursos no renovables, y la biomasa fue paulatinamente perdiendo importancia. Posteriormente, desde la crisis del petróleo de los años setenta, los biocombustibles (que según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006, son los combustibles líquidos, sólidos o gaseosos que se extraen de la biomasa), vuelven a ser considerados alternativas capaces de sustitución, con ventajas sobre los derivados del petróleo (CEPAL, 2006).

Bueno, L. S., (2011), plantea que las razones que incentivan a los países a la producción de biocombustibles son: a) Reducción de la dependencia externa en el suministro de combustibles y aseguramiento del abastecimiento del mercado nacional a partir de fuentes locales, con potenciales ventajas en términos de balanza de pagos y equilibrio fiscal; b) Sustentabilidad ambiental de los biocombustibles, por ser un forma renovable de energía, y por presentar un menor impacto ambiental en el uso final; c) Dinamización de las actividades agrícolas y generación de empleo en el medio rural y d) Diversificación estratégica que los biocombustibles traen a los sectores agroindustriales eventualmente estancados o en retracción.

Colombia, con la Ley 693 de 2001 del Ministerio de Minas y Energía, apostó por los biocombustibles haciendo obligatorias las mezclas de gasolina con etanol y de diesel con biodiesel. En el documento Conpes 3510 de 2008, se encuentran los lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia. Desde 2005, cuando se hicieron efectivos los mandatos de mezcla con etanol, la producción ha pasado de 27 millones de litros a 337 millones de litros, ha aumentado la superficie sembrada de caña de azúcar y se han generado nuevos empleos en zonas rurales (García y Calderón, 2012).

Las reservas de combustibles fósiles se están agotando, el calentamiento global se está convirtiendo en una realidad, el reciclado de residuos es cada vez mayor, más costoso y problemático, y el inexorable crecimiento de la población requiere más energía y alimentos. Frente a este panorama, la producción de los biocombustibles surge como una solución a muchos de los problemas socio-económico-ambientales actuales. En particular, la caña de azúcar es una especie desde la cual el bioetanol se produce eficientemente en el mundo (BNDES y CGEE, 2008). En Colombia, las razones expuestas anteriormente han llevado a considerar el bioetanol producido de recursos agrícolas propios del país como la caña de azúcar, una solución viable para sustituir parte de las importaciones de gasolina y mejorar la calidad del aire de las ciudades (Acosta et al, 2003).

Los mayores productores de caña de azúcar a nivel mundial son Brasil e India (FAOSTAT, 2009). Colombia, con una producción anual próxima a 40 millones de toneladas, ocupa el séptimo lugar. Actualmente, cerca de la mitad de esta cantidad es usada para la producción de azúcar y etanol (ASOCAÑA, 2011). En América Latina, Colombia es el segundo país líder en la producción de bioetanol después de Brasil. La productividad (rendimiento por ha) en la producción de bioetanol en el país es el doble que la de Ecuador (Arango et al, 2011).

En Colombia, la producción de etanol se estableció en el valle geográfico del río Cauca, donde seis (6) ingenios azucareros (Incauca, Providencia, Riopaila, Manuelita, Mayaguez y Risaralda) adoptaron la estrategia de producción dual (azúcar y sus derivados y etanol), que consiste en fermentar parte de las mieles que se utilizan en el proceso de refinación del azúcar - hasta este punto los dos procesos son compartidos- y son desviadas hacia los fermentadores de la destilería para producir el etanol (actualizado por el autor a Rincón, 2013). Además, en Puerto López, Meta, está ubicada la planta de Bioenergy "El Alcaraván", con capacidad para producir hasta 504.000 litros diarios de etanol; el 18 de marzo de 2017, inició la producción continua de etanol (el proyecto se constituyó en el año 2010) (Bioenergy, 2017).

El estudio de artículos como Cherubini y Stromman, 2011, Gnansounou et al, 2009, Von Blottnitz y Curran, 2007 y Larson, 2006 que realizan una revisión del tema de Análisis de Ciclo de Vida sobre sistemas de biocombustibles líquidos para el sector del transporte, plantean que para la sostenibilidad

del medio ambiente los resultados se discuten en tres categorías: 1) Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles a través de las evaluaciones del equilibrio energético; 2) Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI); y 3) Reducción de los impactos ambientales y de salud en todo el ciclo de vida.

El consorcio CUE (Universidad Pontificia Bolivariana, Centro Nacional de Producción Más Limpia y EMPA para el Ministerio de Minas y Energía), realizó una evaluación del Análisis del Ciclo de Vida para la cadena de producción de biocombustibles en Colombia para el año 2009 (BID y Ministerio de Minas y Energía, 2012), que concluyó que el etanol colombiano de la caña de azúcar tiene un potencial importante ya que solo genera el 26% de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) comparado con la gasolina fósil, sin considerar cambios directos e indirectos en el uso del suelo.

El objetivo general de este estudio fue evaluar, en el Ingenio Risaralda S.A., los impactos ambientales potenciales de la producción de bioetanol de la caña de azúcar en los procesos de campo, cosecha, fábrica, destilería y cogeneración. Se utilizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el software especializado SimaPro versión 8.2.

2. Método

2.1 Área de Estudio

El estudio se realizó en el Ingenio Risaralda S.A. y su área de influencia. El Ingenio Risaralda S.A. es una organización dedicada a la transformación y el aprovechamiento integral de la caña de azúcar, que pertenece a la industria agroindustrial y de alimentos colombiana, haciendo frente a cuatro unidades de negocio: azúcar, alcohol carburante, energía eléctrica y compostaje. Se encuentra ubicado en el Municipio de Balboa, Departamento de Risaralda. La planta industrial y administrativa está ubicada en el kilómetro 2, vía La Virginia – Balboa y cuenta con una sede administrativa en la Ciudad de Pereira (Ingenio Risaralda S.A., 2015).

2.2. Descripción Metodológica

El proyecto utilizó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para caracterizar el impacto ambiental potencial de las actividades realizadas para la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A. El ACV se aplica de acuerdo a la norma NTC-ISO 14040:2007, que lo define como la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida, y se compone de cuatro (4) fases: la definición del objetivo y el alcance, el análisis de inventario, la evaluación del impacto y la interpretación.

Para elaborar el inventario del ciclo de vida y realizar las evaluaciones de impacto correspondientes, se utilizó el software SimaPro versión 8.2. La unidad funcional para el estudio fue producir 1 m³ de etanol anhidro en el Ingenio Risaralda S.A. durante el año 2015, el cual se mezcla con gasolina y es utilizado como combustible vehicular. Para realizar la evaluación de impacto a nivel medio, se utilizó el método ReCiPe Midpoint (H) V1.12 / World Recipe H, que analiza 18 categorías de impacto.

La información para la construcción del inventario se recolectó directamente en el Ingenio. El estudio se divide en los procesos de: campo (comprende desde la siembra de la caña hasta antes de la cosecha, incluyendo las labores de preparación de terreno, fertilización, riego, control de malezas y maduración); cosecha (comprende el proceso desde el corte, alce, transporte y entrega de la caña en las mesas de caña de la fábrica); fábrica de azúcar (comprende las etapas del proceso fabril de azúcar crudo, desde la recepción de la caña hasta la descarga del azúcar y la miel B, incluyendo: preparación y molienda, clarificación, evaporación y cristalización.); destilería (comprende el proceso de producción de etanol carburante desde la preparación de materia prima hasta el despacho de etanol carburante, incluyendo: fermentación, destilación y deshidratación.) y la cogeneración (comprende el proceso de combustión del bagazo o de otro tipo de combustible para la generación de vapor en las calderas y su posterior aprovechamiento en los turbogeneradores para la producción de energía eléctrica).

Para este estudio se utilizó el enfoque de la tumba a la puerta y quedaron excluidas las cargas ambientales relativas a la fabricación y mantenimiento de las maquinarias e infraestructuras necesarias para el cultivo y cosecha de la caña de azúcar, las instalaciones de la transformación de la caña para la obtención del etanol, el tratamiento de efluentes (Comprende las plantas de tratamiento de aguas residuales y la planta de compostaje donde se produce el abono orgánico estabilizado que es aplicado en el campo como mejorador de suelos), y las implicaciones de circulación, distribución y consumo del producto final (etanol). Los resultados del estudio no van a apoyar aseveraciones comparativas.

4. Resultados

4.1 Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) de la producción de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A.

En la figura 1 se puede observar que el proceso de campo es el principal responsable en las siguientes 4, de las 18 categorías de impacto así: Cambio climático, Agotamiento de la capa de ozono, Agotamiento de agua y Agotamiento de combustibles fósiles. El proceso de cosecha contribuye en su mayoría, a 5 de las 18 categorías de impacto, así: Acidificación terrestre, Eutrofización marina, Formación de oxidantes fotoquímicos, Formación de material particulado y Ecotoxicidad terrestre. El proceso de fábrica es el contribuyente más importante de 7 de las 18 categorías de impacto, así: Eutrofización de agua dulce, Ecotoxicidad de agua fresca, Ecotoxicidad marina, Ocupación de suelo agrícola, Ocupación de suelo urbano, Transformación de suelo natural y Agotamiento de metales. El proceso de destilería es el principal responsable de 2 de las 18 categorías de impacto, así: Toxicidad humana y Radiación ionizante. El proceso de planta de cogeneración genera un impacto ambiental positivo, pues evita el consumo de energía eléctrica de la red nacional.

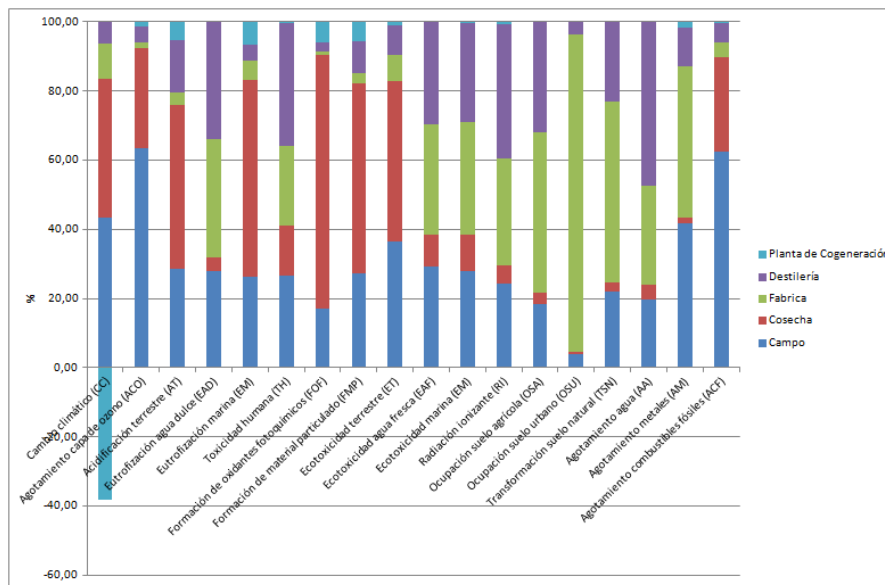


Figura 1. Asignación porcentual de la EICV para la producción de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015

La figura 2 muestra la evaluación de la etapa de campo. Se puede apreciar que la mecanización contribuye en su mayor parte en 5 categorías de impacto (Acidificación terrestre, Eutrofización marina, Formación de oxidantes fotoquímicos, Formación de material particulado y Ecotoxicidad terrestre). La mayor contribución de la etapa de fertilización y nutrición es al Cambio climático. El control de malezas es el principal responsable de 7 categorías (Eutrofización de agua dulce, Toxicidad humana, Radiación ionizante, Ocupación de suelo agrícola, Ocupación de suelo urbano, Transformación de suelo natural y Agotamiento de metales) y el riego aporta en su mayor parte a Agotamiento de la capa de ozono, Ecotoxicidad de agua fresca, Ecotoxicidad marina, Agotamiento de agua y Agotamiento de combustibles fósiles.

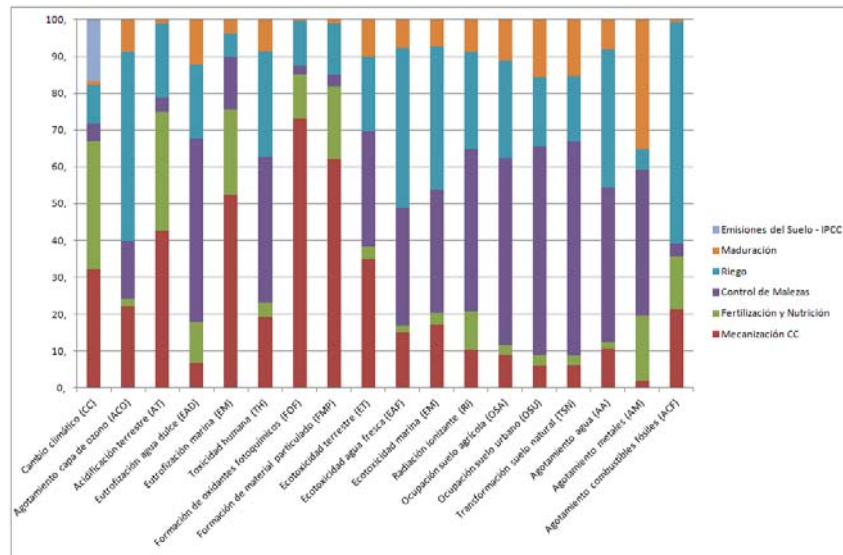


Figura 2. Asignación porcentual de la evaluación de la etapa de campo para la producción de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015

En la figura 3 se presenta la evaluación de la etapa de cosecha. Se evidencia que para la cosecha manual, hace una mayor contribución a las categorías de impacto de Cambio climático, Acidificación terrestre, Eutrofización marina, Formación de oxidantes fotoquímicos y Formación de material particulado. El transporte de caña contribuye en mayor grado a 11 de las 18 categorías de impacto (Agotamiento de la capa de ozono, Eutrofización de agua dulce, Ecotoxicidad de agua fresca, Ecotoxicidad marina, Radiación ionizante, Ocupación de suelo agrícola, Ocupación de suelo urbano, Transformación de suelo natural, Agotamiento de agua, Agotamiento de metales y Agotamiento de combustibles fósiles). La operación de tractores de cosecha hace su mayor aporte a la Ecotoxicidad terrestre.

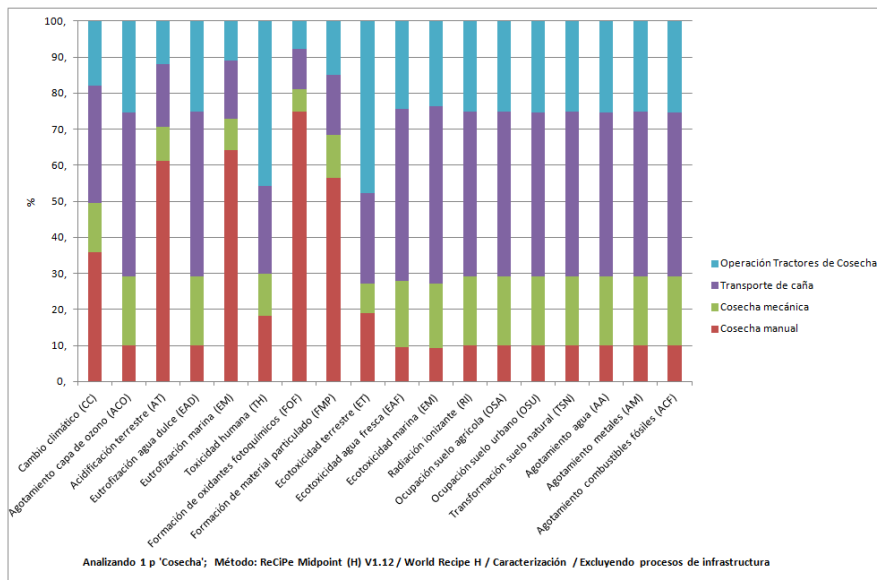


Figura 3. Asignación porcentual de la evaluación de la etapa de cosecha para la producción de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015

En la figura 4, se evidencia la evaluación de la etapa de fábrica. De la misma, se puede concluir que excepto por la categoría de impacto de Ecotoxicidad terrestre que está en su mayor grado influenciada por la refinera de azúcar, para las otras 17 categorías de impacto, la mayor contribución está dada por la elaboración de azúcar crudo.

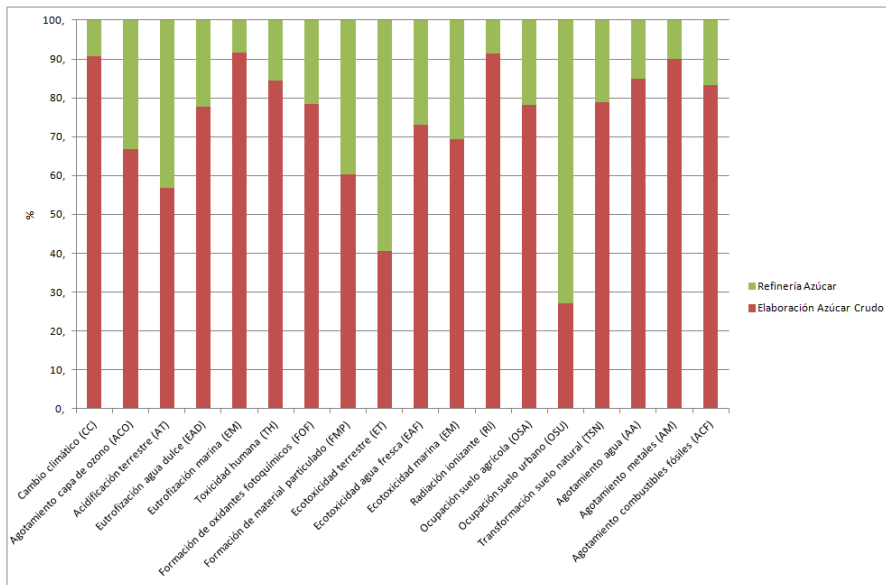


Figura 4. Asignación porcentual de la evaluación de la etapa de fábrica para la producción de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015

En la figura 5, se evidencia la evaluación de la etapa de destilería. El uso de ácido sulfúrico (H2SO4), contribuye en mayor grado a las categorías de impacto de Acidificación terrestre, Formación de material particulado y Agotamiento de agua. El hidróxido de sodio (NaOH), es el principal contribuyente de 13 de las 18 categorías de impacto (Cambio climático, Eutrofización agua dulce, Eutrofización marina, Toxicidad humana, Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad agua fresca, Ecotoxicidad marina, Radiación ionizante, Ocupación suelo agrícola, Ocupación suelo urbano, Transformación suelo natural, Agotamiento metales y Agotamiento combustibles fósiles). El transporte de insumos desde su lugar de origen hace el mayor aporte a Agotamiento de la capa de ozono y Formación de oxidantes fotoquímicos.

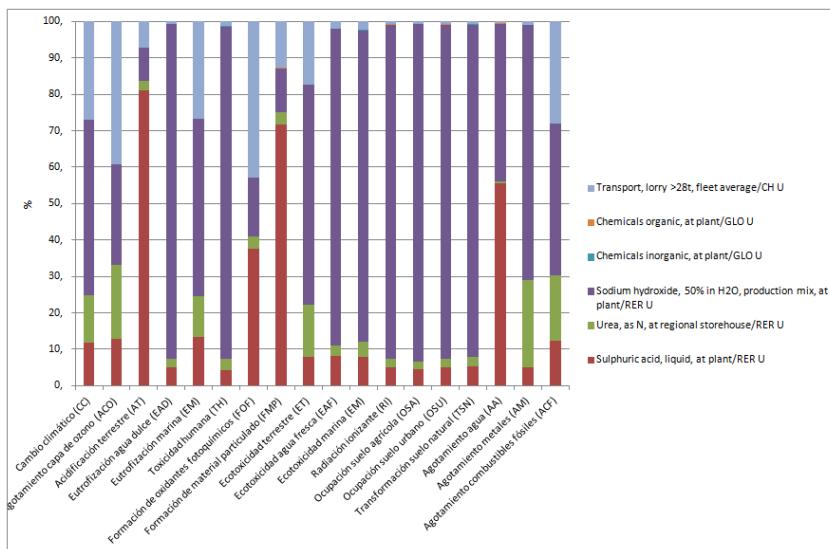


Figura 5. Asignación porcentual de la evaluación de la etapa de destilería para la producción de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015

En la figura 6, se evidencia la evaluación de la etapa de Cogeneración. El proceso de cogeneración genera un impacto ambiental positivo en la categoría de cambio climático, pues utiliza la energía en forma de calor producida por el bagazo para generar vapor y luego mediante el uso de turbogeneradores, la energía eléctrica.

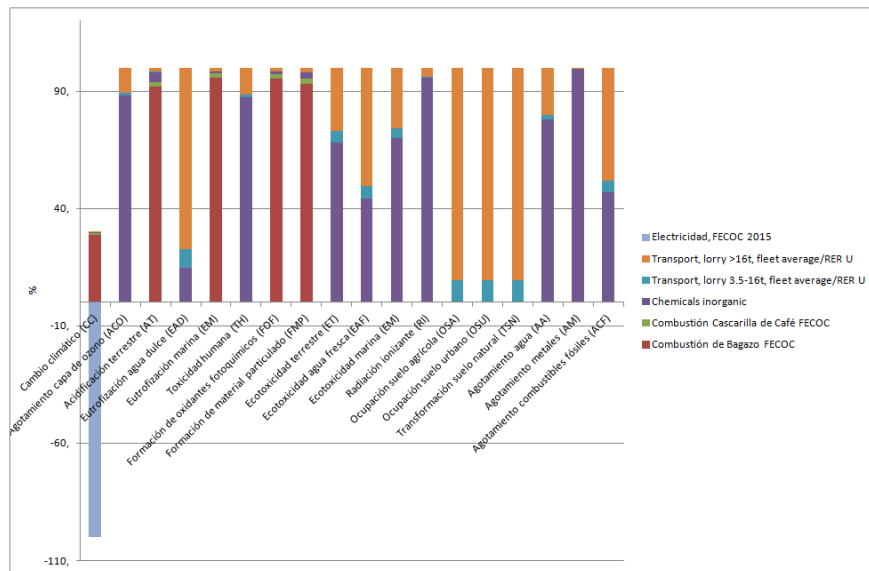


Figura 6. Asignación porcentual de la evaluación de la etapa de cogeneración para la producción de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015

4.2 Interpretación del impacto ambiental de la producción de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A.

En la tabla 1 se presenta el resumen de los principales hallazgos de la EICV para la producción de 1 m³ de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015.

Tabla 1. Principales hallazgos de los resultados de la EICV

Etapa de ciclo de vida	Producción de 1 m ³ de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015
------------------------	---

Campo El proceso de campo es responsable de **4** de las 18 categorías de impacto, así: Cambio climático, Agotamiento de la capa de ozono, Agotamiento de agua y Agotamiento de combustibles fósiles. En cambio climático, el mayor impacto se da por la fertilización y nutrición. Para las categorías de impacto de agotamiento de agua y agotamiento de combustibles fósiles, la etapa que más aporta es riego.

Cosecha El proceso de cosecha es el segundo proceso que contribuye a la mayoría de las categorías de impacto (**5** de las 18), así: Acidificación terrestre, Eutrofización marina, Formación de oxidantes fotoquímicos, Formación de material particulado y Ecotoxicidad terrestre.

La acidificación terrestre se da por la cosecha manual, al igual que la eutrofización marina, la formación de oxidantes fotoquímicos y la formación de material particulado. La ecotoxicidad terrestre se da por la operación de los tractores.

Fábrica El proceso de fábrica es el principal responsable de la mayoría de categorías de impacto (**7** de las 18), así: Eutrofización de agua dulce, Ecotoxicidad de agua fresca, Ecotoxicidad marina, Ocupación de suelo agrícola, Ocupación de suelo urbano, Transformación de suelo natural y Agotamiento de metales. Los impactos ambientales se dan por la elaboración de azúcar crudo.

Etapa de ciclo de vida	Producción de 1 m³ de bioetanol de la caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., para el año 2015
-------------------------------	---

Destilería	El proceso de destilería contribuye a 2 de las 18 categorías de impacto, así: Toxicidad humana y Radiación ionizante. Los impactos ambientales se dan por el uso de hidróxido de sodio.
Planta de cogeneración	El proceso de cogeneración genera un impacto ambiental positivo en la categoría de cambio climático, pues utiliza la energía en forma de calor producida por el bagazo para generar vapor y luego mediante el uso de turbogeneradores, la energía eléctrica. El vapor de escape del turbogenerador entonces va al proceso productivo mientras que la electricidad es mayoritariamente utilizada para su consumo propio y una porción se vende a la red nacional.

Fuente: El autor, 2016

5. Conclusiones

Los biocombustibles son un medio por el cual se puede llevar a cabo la transición energética de una economía sustentada en los combustibles fósiles, a una economía basada en fuentes renovables de energía. En la producción bioetanol de caña de azúcar, las plantas toman el agua y el CO₂ de la atmósfera y con la luz solar los convierten en carbohidratos (azúcares, almidones y celulosas) mediante el proceso conocido como fotosíntesis. La caña de azúcar, tiene la propiedad de capturar (fijar) el CO₂ y de liberar a cambio oxígeno. Luego, por fermentación, las levaduras se encargan de transformar los azúcares en alcohol y CO₂, con la ventaja de que en este proceso se aprovecha tanto la glucosa como la fructuosa. La combustión del alcohol produce CO₂ y agua, que vuelven a la atmósfera para iniciar de nuevo el proceso.

El Etanol es un producto cuya demanda está creciendo aceleradamente en todo el mundo. Desde la implementación de la Ley 693 de 2001, se puso en marcha en Colombia el mercado de este biocombustible.

En términos ambientales, el proceso de campo es el principal responsable de 4 de las 18 categorías de impacto, así: Cambio climático, Agotamiento de la capa de ozono, Agotamiento de agua y Agotamiento de combustibles fósiles. El proceso de cosecha es el segundo proceso que contribuye a la mayoría de las categorías de impacto (5 de las 18), así: Acidificación terrestre, Eutrofización marina, Formación de oxidantes fotoquímicos, Formación de material particulado y Ecotoxicidad terrestre. El proceso de fábrica es el principal responsable de la mayoría de categorías de impacto (7 de las 18), así: Eutrofización de agua dulce, Ecotoxicidad de agua fresca, Ecotoxicidad marina, Ocupación de suelo agrícola, Ocupación de suelo urbano, Transformación de suelo natural y Agotamiento de metales. El proceso de destilería contribuye a 2 de las 18 categorías de impacto, así: Toxicidad humana y Radiación ionizante. El proceso de cogeneración genera un impacto ambiental positivo en la categoría de cambio climático, pues utiliza la energía en forma de calor producida por el bagazo para generar vapor y luego mediante el uso de turbogeneradores, la energía eléctrica. El vapor de escape del turbogenerador entonces va al proceso productivo mientras que la electricidad es mayoritariamente utilizada para su consumo propio y una porción se vende a la red nacional.

Para el año 2015, la producción de bioetanol de caña de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A., implicó un cálculo de emisiones de 138,11 kg CO₂ eq /m³ de etanol. En comparación con otros estudios similares, se evidencia un comportamiento ambientalmente limpio por el no uso de carbón en sus calderas, y porque en los cálculos, que fueron avalados por CENICAÑA, se asumió que la energía cogenerada vendida era un beneficio ambiental. Las emisiones en la producción del bioetanol de caña para Macedo et al. (2008) fue de 436 kg CO₂ eq /m³ de etanol para el año 2006 y para CENICAÑA fue de 909 kg CO₂ eq /m³ de etanol para el año 2010 y de 476 kg CO₂ eq/m³ de etanol para el año 2015 (con la misma base de datos que se utilizó en esta tesis, pero con otro método de cálculo).

Con base en este estudio, se evidencia que el perfil ambiental del etanol producido en el Ingenio Risaralda S.A., puede compararse con otros estudios similares, respecto a la categoría de impacto de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pero cuando se trata de otras categorías de impacto, esa comparación no se puede hacer pues no se han publicado resultados comparables a este estudio.

6. Referencias

Acosta, A. Bendeck, J. Cárdenas, J. Cala, D. 2004. El gran desafío: a propósito de los alcoholes carburantes. Segunda Edición, Editorial EdiSion Ltda.

Arango Sanclemente, S. Yoshioka Vargas, A. M. Gutiérrez Rincón, V. A. 2011. Análisis del ambiente competitivo del Cluster Bioindustrial del Azúcar en el valle geográfico del río Cauca: Desarrollo de retos. Cali: Sello Editorial Javeriano.

Asociación de cultivadores de caña de azúcar colombiana (ASOCAÑA). 2011. La transformación de la industria azucarera en Colombia a partir de nuevas tecnologías: Desafíos y oportunidades. <https://www.dnp.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=fbFhdTF-hOs%3D&tabid=1433> último acceso diciembre de 2017

Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Ministerio de Minas y Energía. 2012. Proyecto "Estrategias de energía sostenible y biocombustibles para Colombia ATN/JC-10826-CO y ATN/JF-10827-CO". "Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia". Consorcio CUE.

Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social (BNDES). Centro de Gestión y Estudios Estratégicos (CGEE). 2008. Bioetanol de caña de azúcar: energía para el desarrollo Sostenible. Rio de Janeiro.

Bioenergy. (2017). Bioenergy inició producción continua de etanol. <http://www.bioenergy.com.co/SitePages/Noticia.aspx?IdElemento=32> último acceso enero de 2018

Bueno, L. S. 2011. Oportunidades y Amenazas de los Biocombustibles en Colombia. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12377/BuenoRojasLucySikint2011.pdf?sequence=1> último acceso Abril de 2018

Cherubini, F. Stromman, A. H. 2011. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102(2), 437–451.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). 2006. Perspectivas de un Programa de Biocombustibles en América Central. http://www.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2017/08/2004-biocomb_programa-de-biocombustibles-en-amrica-central.pdf último acceso Abril de 2018

Departamento Nacional de Planeación. 2008. Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia (Documento CONPES 3510). Bogotá D.C., Colombia: DNP.

Food and Agricultural Organization Statistical FAOSTAT. 2009. Agriculture Data, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Sugar cane.

García, H. Calderón, L. 2012. Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia. Fedesarrollo. <http://www.asorinoquia.org/DPN/Evaluacion.pdf> último acceso Abril de 2018

Gnansounou, E. Dauriat, A. Villegas, J. Panichelli, L. 2009. Life cycle assessment of biofuels: energy and greenhouse gas balances. *Bioresource technology*, 100(21), 4919-4930.

Ingenio Risaralda S.A. 2015. Informe de Sostenibilidad del Ingenio Risaralda S.A., Balboa, Risaralda. http://www.pagegear.co/es/dominios/ingeniorisaralda/upload/373/informe_de_sostenibilidad_2015_9_mb.pdf último acceso marzo de 2018

Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC). 2007. Norma Técnica Colombiana NTC-ISO14040. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Bogotá

Larson, E. D. 2006. A review of life-cycle analysis studies on liquid biofuel systems for the transport sector. *Energy for Sustainable Development*, 10(2), 109-126.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2006. Estrategia de Desarrollo de Biocombustibles: Implicaciones para el Sector Agropecuario. Bogotá D.C. <http://www.corpoica.org.co/sitioweb/Convenio/Documentos/EstrategiaDesarrolloBiocombustiblesColombia.pdf> último acceso enero de 2018

Ministerio de Minas y Energía., 2001. Ley 693 de Septiembre 19 de 2001. <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosSoporteRevistas/3660.pdf> último acceso enero de 2018

Rincón, C. (2013). Características de la producción de etanol en los ingenios azucareros del valle geográfico del río Cauca - Colombia - . una aproximación a su impacto socioeconómico y ambiental. Centro Cultura Floreal Gorini.Tuluá, Valle del Cauca. Colombia.

Von Blottnitz, H. Curran, M. A. 2007. A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. *Journal of cleaner production*, 15(7), 607-619.

6.1 Otras referencias del estudio:

Arbeláez, M. A. Estacio, A. Olivera, M. 2010. Impacto socioeconómico del sector azucarero colombiano en la economía nacional y regional. En: Cuadernos de Fedesarrollo, número treinta y uno. <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/168> último acceso agosto de 2017

Bueno, L. S. 2011. Oportunidades y Amenazas de los Biocombustibles en Colombia. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana. Recuperado en abril de 2017 de la web: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12377/BuenoRojasLucySikint2011.pdf?sequence=1> último acceso abril de 2017

Buitrago, R. Belalcázar, L. C. 2013. Análisis del ciclo de vida para la producción de bioetanol en Colombia por medio de OpenLCA. *Épsilon* (21), 145-156.

Cortes, B. T. 2010. Descripción Socioambiental del Suelo en el valle geográfico del Río Cauca. El Caso de la Agroindustria Azucarera. *Revista. Luna. Azul*, 31(31), 41-57.

Da Silva, S.S. 2012. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do etanol combustível: uma análise econômica, social e ambiental. 130 p. Dissertação (Pós-Graduação, Mestrado em Economia Regional). Centro de Estudos Sociais Aplicados, Universidade Estadual de Londrina.

Delgadillo, O. L. 2014. La caña de azúcar en la historia ambiental del valle geográfico del río Cauca. Tesis de Doctorado en Estudios ambientales y rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. <http://hdl.handle.net/10554/15735> último acceso mayo de 2017

Finkbeiner, M. Schau, E. M. Lehmann, A. Traverso, M. 2010. Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability*, 2(10), 3309-3322.

Ganduglia, F. 2009. Handbook on Biofuels. San José, Costa Rica: Interamerican Institute for Agricultural Cooperation (IICA). Regional Association of Oil and Natural Gas Companies of Latin America and the Caribbean (ARPEL).

Goedkoop, M. Heijungs, R. Huijbregts, M. De Schryver, A. Struijs, J. van Zelm, R. 2009. ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level). (1ra ed.)