

Análisis del ciclo de vida y cálculo de la huella de Carbono para un proceso de reciclaje de botellas PET en Medellín (ANT)¹.

Carlos E. Aristizábal Alzate², José L. González Manosalva³, Juan C. Gutiérrez Cano⁴

Resumen

Introducción: Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), permite establecer las entradas y salidas de materia, y energía de un proceso, producto, servicio, persona y/o organización, a lo largo de su vida útil o dependiendo de la delimitación del objeto de estudio. Este análisis, junto con la Huella de Carbono (HC), posibilitan estandarizar la información, para realizar análisis, comparaciones y determinar el impacto ambiental del objeto de estudio en una misma unidad (KgCO₂eq), sin importar el contexto. **Objetivo:** Presentar un ACV y la determinación de la HC, para una empresa de reciclaje de botellas de plástico tipo PET, ubicada en la ciudad de Medellín. **Materiales y métodos:** Este estudio se realizó siguiendo las metodologías establecidas en las normas internacionales ISO 14040-14044 y la ISO 14064, desde que el PET es acopiado en las

instalaciones de la empresa hasta que este material es procesado y considerado apto, para su entrega. Además, se incluyen el inventario de las emisiones de GEI asociadas al metabolismo del personal de la empresa, durante el desarrollo de sus actividades al interior de esta. **Resultados:** Del proceso de reciclaje PET analizado se obtuvo una HC de 1,4026 KgCO₂eq/ton, donde el consumo de energía eléctrica es el que más aporta a este indicador; con un 63,32%. **Conclusiones:** la HC de EKORED puede ser establecida como indicador de gestión y de sostenibilidad, y como la línea base, para emprender estrategias y acciones que vayan encaminadas a la construcción de una industria carbono neutro.

Palabras clave: reciclaje de desechos; desarrollo sostenible; huella de carbono; análisis de ciclo de vida.

1 Artículo original derivado del proyecto de investigación titulado Análisis del Ciclo de Vida y Cálculo de la Huella de Carbono de EKORED SAS. Entidad financiadora: Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín (ITM), fecha de realización marzo–noviembre de 2016.

2 Mg. en Gestión Energética Industrial. Grupo de investigación Materiales Avanzados y Energía, Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-8970-6389. Correo: carlosaristizabal207157@correo.itm.edu.co

3 Mg. en Medio Ambiente y Desarrollo. Grupo de Investigación Alquimia. Química Básica, Aplicada y Ambiente. Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas, Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia. ORCID: 0000-0002-0625-3362. Correo: josegonzalez@itm.edu.co

4 Gerente EKORED SAS, Colombia. ORCID: 0000-0003-0642-8844. Correo electrónico: juan.gutierrez@ekored.co

Autor para correspondencia: Carlos E. Aristizábal, correo: carlosaristizabal207157@correo.itm.edu.co
Recibido: 11/11/2018 Aceptado: 21/07/2020

Life Cycle Assessment and Carbon Footprint Calculus for a PET Bottles Recycling Process at Medellin (ANT)

Abstract

Introduction: A Life Cycle Analysis (LCA), allows to establish the inputs and outputs of matter, and energy of a process, product, service, person and/or organization, throughout its useful life or depending on the delimitation of the object of study. This analysis, together with the Carbon Footprint (HC), makes it possible to standardize the information, to perform analyzes, comparisons and determine the environmental impact of the object of study in the same unit (KgCO₂eq), regardless of the context. **Objective:** To present LCA and the determination of the HC, for a PET plastic bottle recycling company, located in the city of Medellín. **Materials and methods:** This study was carried out following the methodology established in the international standards ISO 14040-14044 and ISO 14064, since the PET is collected in the company's facilities until this material is processed and considered suitable, for delivery. In addition, the inventory of GHG emissions associated with the metabolism of the company's personnel is included, during the development of its activities within it. **Results:** From the PET recycling process analyzed, an HC of 1.4026 KgCO₂eq / ton was obtained, where the consumption of electric energy is the one that contributes most to this indicator; with 63.32%. **Conclusions:** the EKORED HC can be established as a management and sustainability indicator, and as the baseline, to undertake strategies and actions that are aimed at building a carbon neutral industry.

Keywords: carbon footprint; waste recycling; sustainable development; life cycle assessment

Análise do ciclo de vida e cálculo da pegada de carbono para um processo de reciclagem de garrafas PET em Medellín (ANT).

Resumo

Introdução: Uma Análise do Ciclo de Vida (ACV) permite estabelecer as entradas e saídas de matéria e energia de um processo, produto, serviço, pessoa e / ou organização, ao longo de sua vida útil ou dependendo da delimitação do objeto de estudo. Essa análise, juntamente com a Pegada de Carbono (HC), permite padronizar as informações, realizar análises, comparações e determinar o impacto ambiental do objeto de estudo na mesma unidade (KgCO₂eq), independentemente do contexto. **Objetivo:** Apresentar uma ACV e a determinação do HC, para uma empresa de reciclagem de garrafas PET, localizada na cidade de Medellín. **Materiais e métodos:** Este estudo foi realizado seguindo a metodologia estabelecida nas normas internacionais ISO 14040-14044 e ISO 14064, uma vez que o PET é coletado nas instalações da empresa até que este material seja processado e considerado adequado, para entrega. Além disso, é incluído o inventário das emissões de GEE associadas ao metabolismo do pessoal da empresa, durante o desenvolvimento de suas atividades. **Resultados:** A partir do processo de reciclagem de PET analisado, foi obtido um HC de 1,4026 KgCO₂eq/tonelada, onde o consumo de energia elétrica é o que mais contribui para esse indicador; com 63,32%. **Conclusões:** o EKORED HC pode ser estabelecido como um indicador de gestão e sustentabilidade e como linha de base para empreender estratégias e ações que visam a construção de uma indústria neutra em carbono.

Palavras-chave: reciclagem de resíduos; desenvolvimento sustentável; pegada de carbono; análise do ciclo de vida.

Introducción

La creciente conciencia con respecto a la importancia de la protección ambiental a nivel mundial, y los posibles impactos negativos asociados con la extracción de las materias primas, pasando por el procesado, fabricación y distribución, hasta la etapa de uso y final de la vida útil (depósito, reutilización o reciclado) de bienes y servicios en general, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar estos impactos. Una de las técnicas desarrolladas es el análisis del ciclo de vida (ACV), la cual es una herramienta que permite conocer el origen y la magnitud de los consumos (Materias primas + Energía + Otros Recursos) y las emisiones al interior de una organización (ICONTEC, 2007b; Yuan, Zhang, & Liu, 2016). La implementación y el análisis de los resultados del ACV, constituirán el primer paso para reducir los costes energéticos, así como para reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) al interior de la organización, y la huella de carbono que nos permite identificar todas las fuentes de emisiones de GEI y establecer, fundado en este conocimiento, las actuaciones o estrategias necesarias para alcanzar una reducción del consumo de energía y una utilización de recursos y materiales más amigables con el medio ambiente y de una forma sustentable, contribuyendo así con la lucha contra el cambio climático (Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, 2015).

El reciclaje es una forma efectiva de disminuir las emisiones GEI, ayudando de esta forma a la consecución de las metas establecidas en el Marco de la Convención de las Naciones Unidas para Cambio Climático y en el Protocolo de Kyoto. Además, se ha demostrado que el reciclaje de materiales de desechos sólidos ahorra más energía que recuperando el potencial energético de dichos residuos, mediante la

incineración o gasificación, para la generación de calor o electricidad (Colling, Oliveira, Reis, Cruz, & Hunt, 2016).

El objetivo de este trabajo es cuantificar para el proceso de reciclaje PET, empleado por la empresa EKORED SAS, el consumo de materias primas y energía, y la emisión de GEI, es decir, realizar el ACV y determinar la Huella de Carbono para el proceso de reciclado de PET, desde la entrada del material a la empresa hasta su embalaje y puesta a punto como producto final. Además, se introduce un nuevo elemento a este tipo de estudios, el cual consiste en cuantificar la Huella de Carbono producida por el desarrollo de la actividad humana al interior de las organizaciones.

Análisis del ciclo de vida. Es la recopilación y evaluación de las entradas y salidas de masa y energía, y de los potenciales impactos ambientales negativos tales como la acidificación, agotamiento del ozono, la eutrofización, la contaminación, el calentamiento global y los efectos en la salud humana (Caffrey & Chinn, 2012; K. Verghese, Lockrey, Clune, & Sivaraman, 2012; Karli Verghese & Carre, 2012). El ACV trata estos potenciales impactos (por ejemplo, la utilización de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones y vertidos) a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final, es decir, de la cuna a la tumba (ICONTEC, 2007b, 2007a). Sin embargo, puede realizarse un ACV por etapas o procesos, pero debe entenderse que si cambian los límites del sistema de estudio pueden cambiar los alcances, los objetivos, el análisis y los marcos de referencia (Caffrey & Chinn, 2012). Además, puede emplearse la metodología *Cut-off* o de aislamiento, la cual distingue la Primera Vida (Producto Virgen) y la Segunda Vida (Producto Reciclado), como

sistemas o situaciones totalmente distintas, es decir, los residuos post-consumo de la Primera Vida no tienen ninguna carga ambiental cuando son utilizados, como materia prima en la Segunda Vida (Shen, Worrell, & Patel, 2010). En el presente estudio será tenida en cuenta esta metodología, ya que es simple y fácil de aplicar, debido a que la información de la Primera Vida del PET no es necesaria.

El método goza de cierta estandarización gracias a las normas ISO 14040 (principio y estructura), 14041 (objetivo y amplitud), 14042 (evaluación del impacto del ciclo de vida) y 14043 (interpretación del ciclo de vida).

Este tipo de metodologías es una parte de las herramientas utilizadas para hacer gestión de la sostenibilidad dentro de una organización, a un producto o un servicio, ya que incrementa el conocimiento y la comprensión acerca de la interacción de los materiales y procesos con el medio ambiente y los alrededores (K. Verghese et al., 2012; Karli Verghese & Carre, 2012).

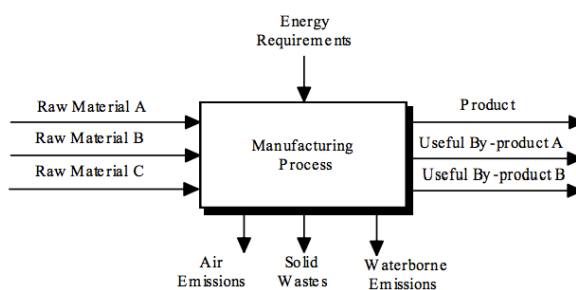
Los requisitos, directrices y pasos para realizar un correcto ACV, están enunciadas en las Normas ISO 14040 e ISO 14044, y a continuación son descritos.

- a. **La definición del objetivo y el alcance del ACV:** La definición del objetivo y el alcance incluye la determinación de la razón de llevar a cabo el estudio del ACV, la intención, tipo audiencia a quien va dirigido, y la aplicación deseada mientras se define el ámbito de aplicación, el cual consiste en la delimitación del sistema y el nivel de detalle de este. Por desgracia, sino se delimita el alcance y no se cuenta con un objetivo específico, las evaluaciones integrales para todos los efectos potenciales del producto o servicio requerirían grandes cantidades de tiempo, datos, conocimientos y

recursos, convirtiendo el ACV en un proyecto inviable. Por lo tanto, se deduce que todos los estudios deben estar bien delimitados en algunos aspectos de la sofisticación y/o amplitud del estudio (Bare, 2011).

- b. **La fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV):** Fase del análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y salidas para un sistema del producto o servicio, a través de su ciclo de vida (Ver Figura 1).

Figura 1. Concepto de “Caja Negra” para el desarrollo del ICV.



Fuente: Franklin Associates, a Division of Eastern Research Group., 2011

- a. **La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV):** Fase del análisis del ciclo de vida dirigida a conocer y evaluar la magnitud, y cuán significativos son los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto, a través de todo el ciclo de vida del producto.

Existen varias metodologías EICV que se pueden aplicar, las cuales difieren en los impactos que cubren, la selección de indicadores y en su contexto geográfico (Caffrey & Chinn, 2012; Lehtinen, Saarentaus, Rouhiainen, Pits, & Azapagic, 2011). La elección de la metodología más adecuada es la LCIA de casos específicos como el Manual ILCD (CE, 2010) da apoyo

en la selección de la metodología apropiada, proporcionando más información sobre las principales metodologías, incluyendo (Lehtinen et al., 2011):

- b. La fase de interpretación del ciclo de vida:** Fase del análisis del ciclo de vida en la que los hallazgos del análisis del inventario o de la evaluación del impacto, o de ambos, se evalúan en relación con el objetivo y el alcance definidos para llegar a conclusiones y recomendaciones.
- c. El informe y la revisión crítica del ACV**
- d. Las limitaciones del ACV**
- e. La relación entre las fases del ACV**
- f. Las condiciones de utilización de juicios de valor y de elementos opcionales:** “El ACV es una de las diversas técnicas de gestión ambiental existentes (por ejemplo; evaluación del riesgo, evaluación del desempeño ambiental, auditoría ambiental y evaluación del impacto ambiental) y podría no ser la técnica más apropiada a utilizar en todas las situaciones. Generalmente el ACV no considera los asuntos económicos o sociales de un producto, pero el enfoque del ciclo de vida y las metodologías descritas en esta Norma Internacional se pueden aplicar a estos otros aspectos” (ICONTEC, 2007a).

Huella de carbono. Se entiende como huella de carbono “la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto”. (Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, 2015)

- **Huella de carbono de una organización:** Mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto provenientes del desarrollo de la actividad de dicha organización.
- **Huella de carbono de producto:** Mide los GEI emitidos durante todo el ciclo de vida de un producto: desde la extracción de las materias primas, pasando por el procesado y fabricación y distribución, hasta la etapa de uso y final de la vida útil (depósito, reutilización o reciclado) (AENOR, 2015)

Antes de proceder con el cálculo de la Huella de Carbono, se deben estimar todas las emisiones antropogénicas de GEI’s al interior de la organización (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆), para luego con el factor potencial de calentamiento global, convertir esta información en emisiones de CO₂ equivalentes (KgCO₂ eq) (Ertug Ercin & Hoekstra, 2012; ICONTEC, 2006). En la Tabla 1, se muestran los factores de conversión de los diferentes GEI’s a Kg de CO₂ equivalentes.

Tabla 1. factores de conversión de los diferentes GEI’s a Kg de CO₂ equivalentes.

Compuesto	GWP	Tiempo de Vida (años)	
		20	100
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1	-	-
Metano	25	86	34
HFC-134a (hydrofluorocarbon)	13,4	3790	1550
CFC-11 (chlorofluorocarbon)	45	7020	5350
Óxido Nitroso (N ₂ O)	235	268	298
Carbon tetrafluoride (CF ₄)	50000	4950	7350

Fuente: Myhre et al., 2013 & Sánchez et al., 2015

El cálculo de la Huella de Carbono (HC) consiste en aplicar la siguiente fórmula, la cual es implementada por (Colling et al., 2016):

$$HC = \text{Dato Actividad} * \text{Factor Emisión} \quad (1)$$

Donde:

- **El dato de actividad**, es el parámetro que define el grado o nivel de la actividad generadora de las emisiones de GEI.
- **El factor de emisión (FE)** supone la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro “dato de actividad”.

Por ejemplo, para el consumo de gas natural para la calefacción, el factor de emisión sería 0,202 kg CO₂ eq/kWh de gas natural, como resultado de esta fórmula obtendremos una cantidad (g, kg, t, etc.) determinada de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq).

Materiales y métodos

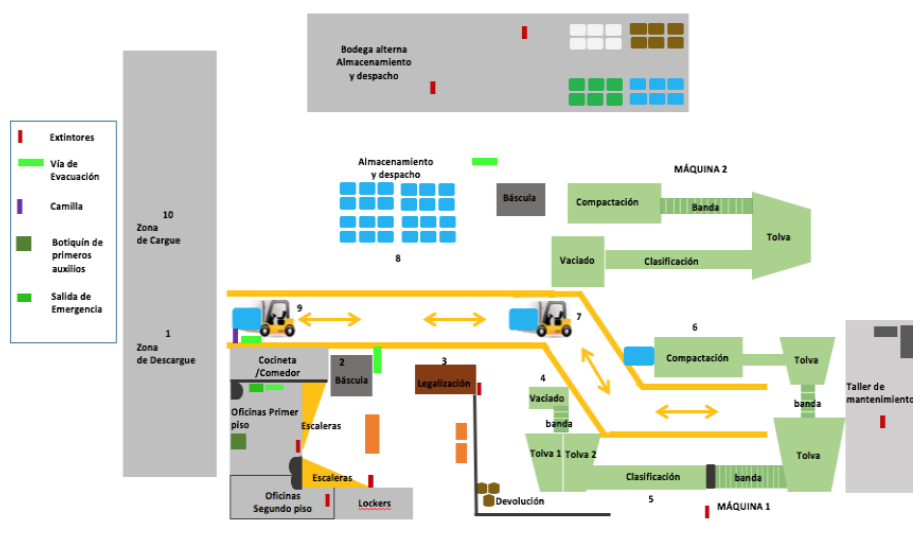
Toda la información reportada parte del procesamiento y análisis de los consumos de recursos primarios, esquemas productivos, otra información relevante, y relacionada con el proceso de reciclaje de PET al interior de EKORED SAS. Tales recursos informativos, así como toda la documentación requerida, es recopilada a través de reuniones entre la

empresa y el equipo de investigadores del ITM, y siguiendo la normatividad para la realización de ACV y determinación de Huella de Carbono, objetivos del proyecto y alcances establecidos, de acuerdo a las normas ICONTEC/ISO 14040 -14044 (ICONTEC, 2007b, 2007a; Shen et al., 2010) y la ICONTEC/ISO 14064.

- **Objetivo y finalidad del estudio:** Determinar la sostenibilidad de una empresa de reciclaje PET, a través de un Análisis del Ciclo de Vida de su proceso y de los indicadores de factores de impacto asociados al Cambio Climático o Calentamiento Global, tales como la medida la Huella de Carbono o las emisiones de CO₂ eq.
- **Definición del objeto de estudio:** EKORED SAS es una empresa ubicada en el municipio de Medellín (ANT), cuyo objeto social es el reciclaje de distintos materiales, como por ejemplo el PET en botellas de plástico, las cuales son obtenidas en distintas partes del departamento de Antioquia.

En la Figura 2, se evidencian las principales áreas de procesos y el flujo de materiales al interior de dicha organización, esto con el fin de realizar el inventario del proceso productivo y de identificar la huella de carbono de la puerta a la puerta

Figura 2. Plano del proceso productivo de Ekored S.A.S.



Nota: 1. Descarga de material, 2. Pesaje en báscula, 3. Legalización de material (ingreso al sistema de las cantidades recibidas), 4. Vaciado de material, 5. Selección de material, 6. Compactación, 7. Transporte a zona de almacenamiento, 8. Almacenamiento, 9. Transporte para carga de material y 10. Despacho de material).

Fuente: Ekored SAS, 2016.

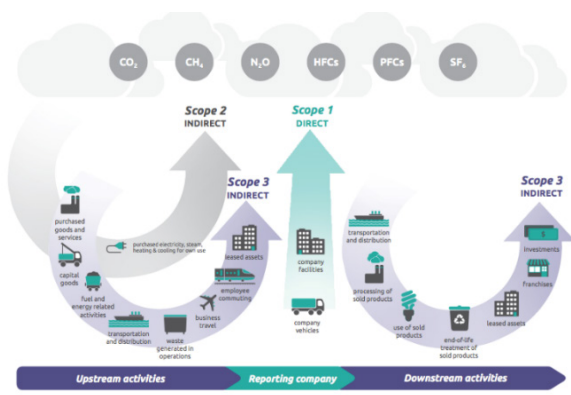
La etapa inicial de este proceso comienza con el descargo del PET reciclado (aplastado) en la Zona 1, el cual viene en sacos de 80 kg aprox., y proviene de los diferentes lugares de acopio que tiene EKORED dentro de su cadena de abastecimiento. Luego, este material pasa a la báscula (Zona 2) y a la zona de legalización (Zona 3), donde se realiza el respectivo registro y control inicial. Dependiendo de la calidad y características del PET, este es transportado por el montacargas u operarios (dependiendo del peso del PET) a la maquina 1 o 2, pasando a través de una tolva, donde es vaciado este material (Zona 4), seguido de una zona de clasificación manual, en la cual 2 o 3 operarios, dependiendo del flujo y volumen de trabajo, seleccionan el PET con las condiciones indicadas (color, tipo de etiqueta, entre otros parámetros). Posteriormente este PET con las condiciones adecuadas, es transportado por una banda hacia otra tolva, en la cual se realiza un proceso de ponchado con cuchillas para eliminar el aire y facilitar de esta forma el

proceso de prensado y compactación. Luego del ponchado, este material es transportado por una banda y de nuevo pasa a través de una tolva, para que entre al proceso de compactación (Zona 6). Finalmente, se obtiene un cubo de PET prensado, el cual es asegurado con alambre dulce y que tiene un peso promedio de 400 Kg. Por esta razón, este cubo es transportado por el montacargas a la zona de almacenamiento de producto final (Zona 8). Para terminar, el montacargas transporta el cubo de PET prensado hacia la Zona 10, donde es desapachado hacia su único cliente, ENKA de Colombia.

- **Unidad funcional:** Dado la gran variabilidad de formas, tamaños y masa, que pueden tener los envases PET en el mercado y que pueden ser reciclados, se tomará como unidad funcional **Una (1) Tonelada de PET reciclado, prensado y listo para entrega a clientes y/o distribuidores.**

- **Limite operacional y alcances del estudio:** Para el cálculo de la Huella de Carbono, primero, se tiene que cuantificar las emisiones directas e indirectas que se tienen en cuenta dentro de los límites operacionales y los alcances del estudio, los cuales se describen a continuación y se ilustran de manera gráfica en la Figura 3.

Figura 3. Representación gráfica de los alcances presentes en un estudio de determinación de emisión de GEI's.



Fuente: World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) & World Resources Institute (WRI), 2011

Alcance 1: Emisiones directas de GEI

- Personal administrativo, operativo y docente
- Combustión del Gas Licuado de Petróleo, para la operación del montacargas

Alcance 2: Emisiones indirectas de GEI

- Consumo de energía eléctrica
- Consumo de agua

Alcance 3: Otras emisiones indirectas:

Este alcance no será tenido en cuenta en su totalidad, ya que es la primera vez que se determina la HC de la empresa EKORED

SAS. Además, la organización puede excluir de la cuantificación las fuentes de GEI directas o indirectas, cuya contribución a las emisiones o remociones de estos gases no sea significativa, y aquellas cuya cuantificación no sería técnicamente viable, de acuerdo al contexto organizacional (técnico, económico y temporal), pero, debe justificarse indicando de manera precisa la razón por la cual no se incluirá en el inventario de GEI, a pesar de tener el control operacional o financiero sobre la instalación (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015).

- **Requisitos de calidad de los datos:** Es necesario establecer unas normas de filtrado de datos que conceda validez y fiabilidad a estos. Algunos de los parámetros a tener en cuenta son los siguientes:
- **Cobertura temporal:** Los datos sobre inventarios de materiales, transportes, entre otros, serán obtenidos a partir del análisis de las operaciones unitarias y las tecnologías actualmente usada por EKORED. Estos datos se consideran representativos para el presente análisis.

Para los datos que deban ser obtenidos a partir de fuentes secundarias, se tratará de que sean lo más actualizado, de bases de datos confiables y que estén lo más acorde al contexto geográfico establecido.

- **Cobertura geográfica:** La planta de reciclaje de envases PET analizada se encuentra ubicada en Medellín (COL). Los puntos de acopio de los envases, se encuentran ubicados dentro del territorio nacional (los cuales serán posteriormente establecidos de acuerdo a información suministrada por la empresa). Sin embargo, solo se considerará el transporte terrestre del PET prensado

desde los puntos de abastecimiento que se encuentren contemplados dentro de la cadena de abastecimiento de la planta recicladora de EKORED (Med.).

- **Cobertura tecnológica:** El presente estudio analiza el reciclaje de envases PET desde la entrada de la planta y su posterior embalaje como PET reciclado, listo para ser enviado como materia prima para diferentes industrias.

Para todos estos procesos, la tecnología reflejada en el análisis es la tecnología actual usada por EKORED y se considera representativa para el análisis del ciclo de vida del producto establecido en el objetivo y alcance del presente estudio.

Análisis del inventario del ciclo de vida. El análisis de inventario empieza definiendo el sistema a estudiar y a continuación, divide este sistema en diferentes etapas para organizar el estudio, para que finalmente sean establecidos los flujos materiales y energéticos que posee cada subsistema.

Para el desarrollo de esta etapa del ACV, se propone visitar la planta de producción de material PET reciclado, para determinar los subprocesos y operaciones unitarias involucradas en este macroproceso de reciclaje, el cual está delimitado en el numeral 5.4, y de esta forma registrar los datos que sean mesurables, cuantificables, directos y que estén relacionados con los balances de materia y energía de cada uno de los subprocesos identificados.

De no ser posible cuantificar ciertos datos por la variabilidad en los mismos, como sería el caso del consumo de combustible de los carros transportadores del PET a reciclar, desde el lugar de acopio hasta la planta, se procederá a utilizar información secundaria fiable suministrada por la empresa, por terceros o por la literatura, siempre tratando de mantener el contexto y ubicación a la hora de obtener esta información.

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (ISO: 14042). Esta fase consiste en convertir la información obtenida en el inventario en una información interpretable, para deducir los valores de los impactos e indicadores seleccionados (emisiones, recursos consumidos, etc.). Esta etapa que puede ser empleada en procesos, productos, compañías y comunidades, se deben utilizar los Factores de Caracterización o Factores de Emisión, los cuales nos sirven para cuantificar los impactos potenciales que tienen las entradas y salidas del sistema, en categorías específicas de impacto y en unidades de equivalencia comunes (Bare, 2012).

Dado que solo nos importa la medición de la Huella de Carbono, la única categoría de impacto que se abordará en el presente estudio, será **Cambio climático o Calentamiento Global**. Además, se podrán modificar los Factores de Caracterización de impacto que dependan de la ubicación geográfica o de características propias de la ubicación del objeto de estudio (Bare, 2011, 2012).

A continuación, en la **Tabla 2**, se ilustra la descripción y unidad utilizada para representar la categoría de impacto **Cambio climático o Calentamiento Global**.

Tabla 2. Ejemplo de indicador medioambiental de un ACV.

Indicador	Unidad de Representación	Descripción
Calentamiento Global	Kg CO ₂ equivalente	Cuantifica los efectos del cambio climático, resultantes de la emisión de dióxido de carbono (CO ₂), metano (CH ₄) u otros gases efecto invernadero causantes del calentamiento global.

Fuente: K. Verghese et al., 2012

Los Factores de Caracterización de impacto o de emisión (FE), para el consumo de recursos energéticos, ilustrados en la **Tabla 3**, serán tomados de la calculadora de emisiones de la

UPME, ya que en esta se presentan los FE, de acuerdo con la generación y consumo dadas las condiciones en Colombia.

Tabla 3. Factores de emisión para el consumo de recursos energéticos.

Recurso energético	Factor de Emisión (Kg CH ₄ /und.)	Factor de Emisión (Kg CO ₂ /und.)	Factor de Emisión (Kg CO ₂ /und.)
Electricidad–2015 (KWh)	-	-	0,1990
Gas Licuado de Petróleo (GLP) genérico (m ³ _{ST})			
Condiciones Estándar (ST): 1 atm y 20 °C.	4,54145E-5	4,54145E-6	3,0512 ^b
Densidad ^a : 2,06 Kg/gal			

^aFuente: Unidad de Planeación Minero Energética & Ministerio de Minas y Energía, 2013

^bKgCO₂/Kg GLP

El agua potable es un recurso que consume materias primas y energía por su captación, tratamiento y distribución, por ende, se emite CO₂ por su consumo y es por esta razón que se contemplarán las emisiones asociadas al consumo de recurso hídrico. Como no se cuenta con un FE asociado específicamente al caso colombiano, se toma el factor de emisión calculado por el software libre OpenLCA[®], el cual es utilizado para análisis de ciclos de vida siguiendo la metodología TRACI 2.1 de la EPA. En la **Tabla 4**, se muestra el Factor de Emisión asociado al calentamiento global (Kg-eq CO₂), para la producción de agua potable a partir del tratamiento de aguas superficiales.

Tabla 4. Calentamiento global asociado al tratamiento de agua potable, a partir de aguas superficiales.

Recurso	Factor de Emisión (Kg CO ₂ /m ³)
Agua potable	0,00063

Fuente: Software OpenLCA[®]

Otro aspecto generador de emisiones de CO₂ y el cual no es generalmente tomado en cuenta, son las emisiones de CO₂ por la labor humana, es decir, por el consumo de la energía necesaria para desempeñar las diferentes actividades al interior

de las organizaciones, por parte del metabolismo humano. En las referencias (Carbajal, 2013) y (Vargas, Lancheros, & Barrera, 2011), se ilustran las ecuaciones que permiten hallar dicha energía. Se utilizarán las ecuaciones de Oxford, ya que las propuestas por la FAO/WHO/UNU, tienden a sobreestimar los gastos metabólicos (Henry CJ, 2005) Schofield et al. reviewed the literature and produced predictive equations for both sexes for the following ages: 0-3, 3-10, 10-18, 18-30, 30-60 and >60 years. These formed the basis for the equations used in 1985 FAO/WHO/UNU document, Energy and Protein Requirements. While Schofield's analysis has served a significant role in re-establishing the importance of using basal metabolic rate (BMR.

Con la ayuda de la Ecuación (1), se calcula el Gasto Energético Total (GET), para una persona que desempeña cierta Actividad Física (AF) durante un tiempo (t) dado.

$$GET = AF \times TMR \times t \quad (2)$$

En la referencia (Carbajal, 2013), se explica detalladamente el nivel de AF correspondiente a cierta labor o actividad. Con respecto al tiempo de labor en la empresa, se puede afirmar que se trabaja 6 días a la semana, las 52 semanas del año.

El gasto energético metabólico total, por el desarrollo de las distintas operativas y administrativas de los empleados de la empresa, corresponde a la conversión de la energía química contenida en los nutrientes, almacenada en forma de ATP, y en la energía disipada como calor en los procesos de oxidación. Si se acepta que todo el O₂ consumido se utiliza para oxidar los sustratos energéticos (proteínas, carbohidratos y lípidos), y que todo el CO₂ producido se elimina por la respiración, es posible calcular las emisiones de GEI, por el consumo de la energía producida, por la oxidación de los nutrientes. En **Tabla 5**, se ilustra la información cuantitativa, de lo anteriormente dicho.

Tabla 5. Reacción química asociada a la respiración humana.

Reacción química asociada a la respiración humana (aerobia)
$C_6H_{12}O_{6(s)} + 6O_{2(g)} \rightarrow 6CO_{2(g)} + 6H_2O_{(g)} \quad \Delta H_c^\circ = -2813 \frac{kJ}{mol}$
Información termoquímica de la reacción de respiración aerobia
Tipo de Reacción: Exotérmica Entalpia (ΔH_c° , Tref: 25°C) = 2.813 kJ/mol C ₆ H ₁₂ O ₆ Relación Energía/CO ₂ (ΔH° , Tref: 25°C) = 468,83 KJ/mol CO ₂
Factor de Emisión por respiración humana
Relación GEI (Kg CO ₂ -eq.)/Energía (KJ) = 2,56x10 ⁻⁵ Kg CO ₂ /KJ Relación GEI (Kg CO ₂ -eq.)/Energía (KCal) = 1,072x10 ⁻⁴ Kg CO ₂ /KCal

Fuente: elaborado por los autores

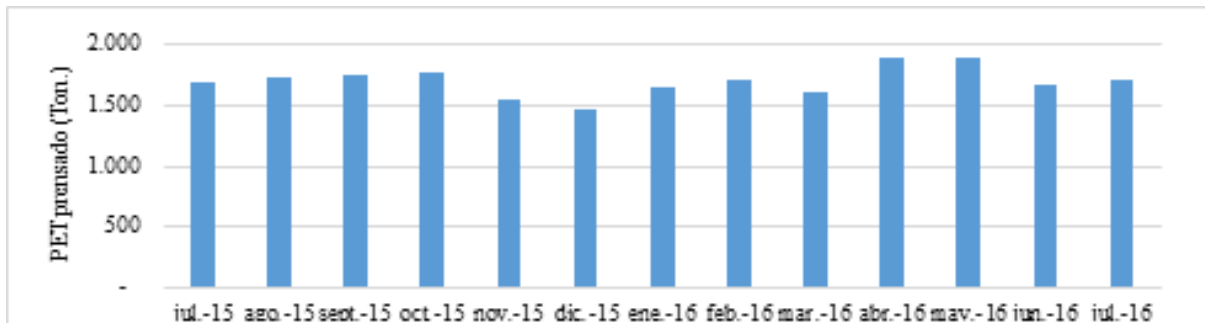
Interpretación de los resultados (ISO 14043). De acuerdo a los datos reportados por la utilización de los FE, los cálculos realizados y la información obtenida por otras fuentes, se seguirá la metodología planteada por la

ISO 14043. Sin embargo, se interpretará, se analizará y se reportará solo la información relevante, que determine la sostenibilidad de la compañía EKORED y el proceso de reciclaje de material PET.

Información suministrada, datos recolectados y suposiciones. En la figura 4, se muestra la producción total por mes de pet

presado, suministrada por ekored, desde julio de 2015 hasta julio de 2016, del pet presado y embalado, listo para su despacho al cliente.

Figura 4. Producción de PET presado por mes.

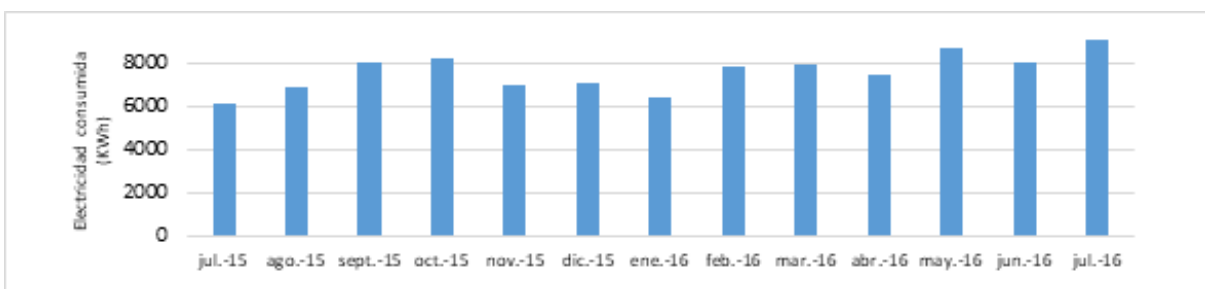


Fuente: elaborado por los autores

Descripción de los consumos de recursos primarios. De acuerdo con la descripción del proceso, ilustrado en la Figura 2, las principales entradas son el PET a procesar, el Gas Licuado de Petroleo (GLP) utilizado por el montacargas, el agua potable utilizada para limpieza y los servicios sanitarios, y la energía eléctrica consumida por el área administrativa, las luminarias y en una mayor proporción por las máquinas y sus equipos auxiliares. Las salidas son el PET presado y las aguas residuales. A

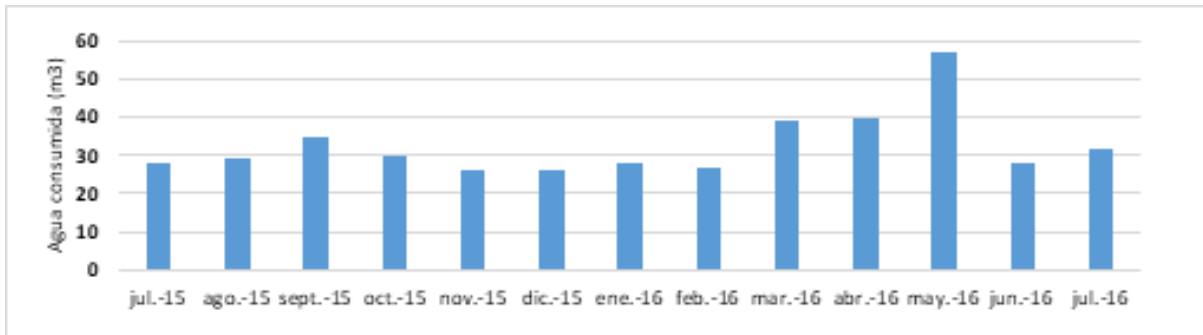
continuación, en la Figura 5 y Figura 6 se ilustran los consumos de electricidad y agua potable que son utilizados en la empresa, para el desarrollo de su actividad productiva. Como solo se cuenta con la información para el consumo de GLP de los meses de febrero de 2015 hasta septiembre 2016, pero no hay información completa para algunos meses (ver Figura 7), ya que esa fue la información suministrada por EKORED, se procede a hacer una estimación para los meses faltantes, utilizando métodos numéricos.

Figura 5. Consumo de energía eléctrica (KWh) de EKORED (2015-2016).



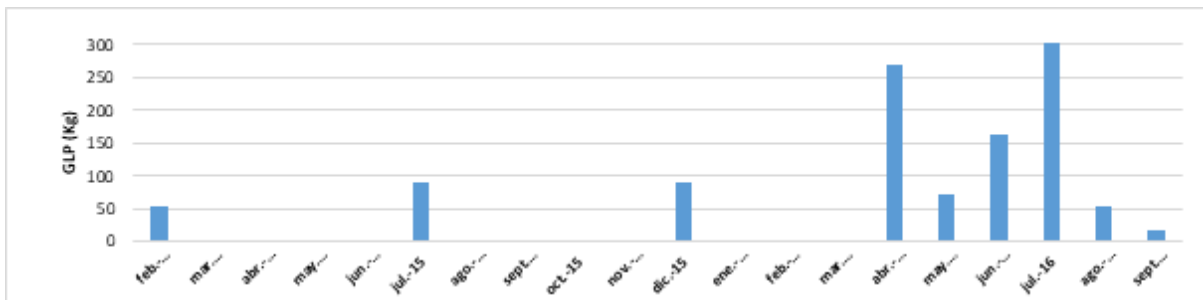
Fuente: elaborado por los autores

Figura 6. Consumo de agua potable (m³) de EKORED (2015-2016).



Fuente: elaborado por los autores

Figura 7. Consumo de gas licuado de petróleo (GLP) por EKORED en Kg. (1 pipeta = 18 Kg = 40 lb = 8,549 gl).



Fuente: elaborado por los autores

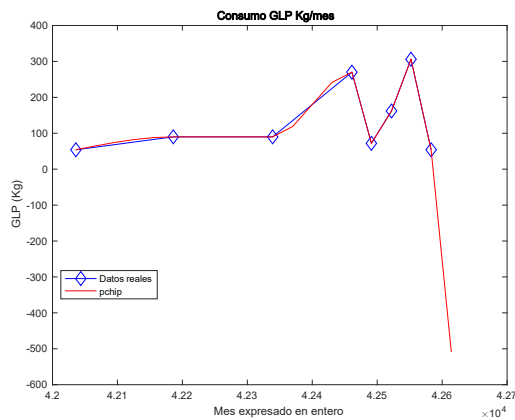
Nota: Componentes del GLP genérico en Porcentaje: C₃H₈:50%, C₄H₁₀:50%, ST: Condiciones Estandar; 1 atm y 20°C. Fuente: UPME.

Por otro lado, para hacer la estimación, se convirtieron las fechas a números enteros, mediante la herramienta incluida en Excel, para tal fin.

Dado que no se cuenta con información del consumo de GLP mes a mes para por lo menos un año, se procedió a realizar una estimación mediante el uso de MATLAB y la Interpolación Polinómica de Hermite, ya que este método busca un polinomio cúbico por cada subintervalo y se ajusta muy bien a los datos reales, tal y como se puede evidenciar en la Figura 8.

Para el cálculo de la Huella de Carbono se utilizarán los datos interpolados y asociados a la información de producción de PET prensado, con la que se cuenta, para completar la serie de datos de los meses sin información, para el periodo de julio de 2015 hasta julio de 2016.

Figura 8. Consumo de GLP de Ekored real (Azul) e interpolados (Rojo)

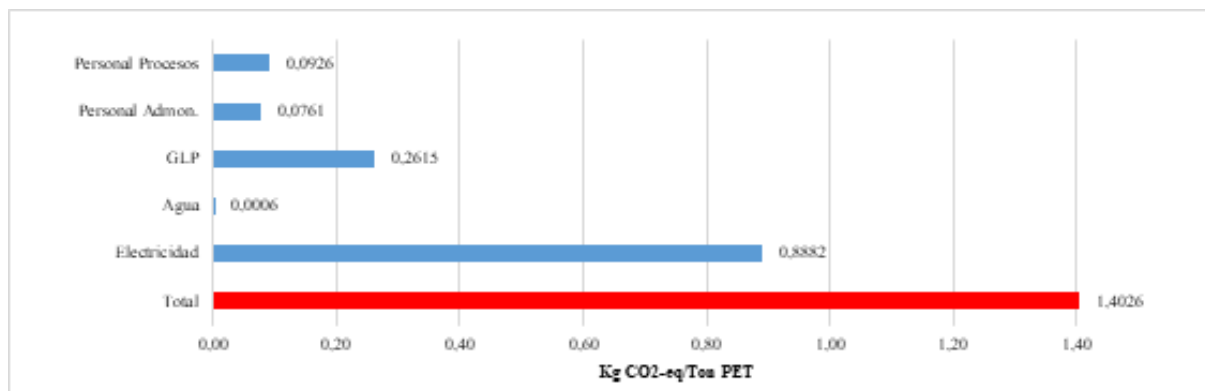


Fuente: elaborado por los autores

Resultados

En la Figura 9, se ilustra la Huella Total de Carbono de EKORED S.A.S y los principales factores que contribuyen a este indicador, por separado, en KgCO₂-eq por Tonelada de PET prensado y producido.

Figura 9. Huella de Carbono de EKORED S.A.S Total y por factores (Kg CO₂-eq/Ton PET), para Junio del 2015 y Julio del 2016.



Fuente: elaborado por los autores

Discusión

Claramente, se puede evidenciar en la Figura 9, que el factor que más influye en la Huella de Carbono es el consumo de electricidad, ya que toda la maquinaria y equipos auxiliares, a excepción del monta-carga que funciona con GLP, involucrados en el proceso de reciclaje, acondicionamiento, transformación y prensado del PET, requieren de energía eléctrica para operar, y al ser equipos robustos y de gran escala, pueden ser considerados grandes consumidores.

Además, por lo que se pudo observar en estos equipos, se trabajaba a carga plena, sin importar el flujo de materia prima (PET para reciclar).

El segundo recurso que más impacta las emisiones de CO₂, es la quema del combustible GLP de la monta-carga. Esto obedece a que es un combustible fósil y este equipo es muy usado por la empresa, ya que es necesario para el descargue de grandes empaques de materia prima y para llevar el PET prensado, del área de producto terminado hasta el área de cargue de producto final.

Con respecto al agua, se puede decir que no impacta significativamente la Huella de Carbono, porque no es un recurso primario y de vital importancia, para el proceso de reciclaje de PET, solo es utilizado para labores de limpieza y en los servicios sanitarios.

Información técnica y científica reportada en la literatura sobre la Huella de Carbono, muestra que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para la producción de PET a partir de recursos vírgenes, como el petróleo y el gas natural, se encuentran entre 1.160 y 5.480 kg CO₂-eq/ton PET (Brogaard et al., 2014; Milliken, 2010) y para industrias con procesos de reciclaje PET, muestran unas emisiones de Dióxido de Carbono equivalente por tonelada de PET reciclado (kg CO₂-eq/ton PET) de máximo un 1.100, un mínimo de 110 y un promedio de 530 (Brogaard et al., 2014; Turner et al., 2015), ya que este material debe ser reprocesado y acondicionado para su utilización como materia prima nuevamente en la industria.

Los datos que reporta EKORED se encuentran por debajo de la Huella de Carbono mostrada en la literatura, con un valor de 1,4026 kg CO₂-eq/ton PET, debido a que la actividad de reciclaje que ejerce esta empresa y la contemplada en el presente estudio, solo incluye la recepción y acondicionamiento de las botellas de PET, mediante compresión mecánica, hasta convertirlas en bloques de 400 Kg (aprox.), listos para su envío al cliente. Por otro lado, estos datos pueden convertirse en la línea base para la huella de carbono de la empresa, ya que, a través de mejoras en la cultura organizacional y/o en inversiones tecnológicas, se alcanzarían procesos productivos más eficientes y amigables con el medio ambiente, posibilitando la disminución de este indicador tan relacionado con el consumo de materias primas y recursos energéticos, tales como la electricidad y el GLP.

Conclusiones

Se realizó un análisis de la huella de carbono de la puerta a la puerta de la empresa EKORED SAS, cuya actividad económica principal es la recepción, reciclaje y acondicionamiento de botellas de plástico de PET. Dicho análisis fue realizado basado en los factores de emisión de dióxido de carbono acordes a las condiciones geográficas de la empresa y asociados a los consumos de recursos másicos y energéticos por su proceso de reciclaje de botellas PET, los cuales dependen del tipo de maquinaria, luminarias y equipos auxiliares, y que para la empresa en cuestión son energía eléctrica, GLP y agua. Además, se incluye un elemento novedoso en este tipo de metodologías, el cual muestra la huella de carbono relacionada con la actividad humana dentro de los procesos administrativos y operativos de la empresa.

La huella de carbono determinada para la empresa en cuestión es muy inferior a la reportada en la literatura. Sin embargo, el proceso llevado a cabo por EKORED tan solo contempla la recepción y acondicionamiento del PET reciclado, y los consultados incluyen la recolección de botellas de PET una vez cumplen con el propósito de la primera vida, su transporte a las diferentes etapas del reaprovechamiento, acondicionamiento, reprocesamiento del PET, producción de nuevos materiales basados en esta resina plástica y su disposición final.

Por último, cabe anotar, que estos resultados para la huella de carbono de cada uno de los recursos utilizados por EKORED y la huella de carbono total, pueden ser establecidos como indicadores de gestión y de sostenibilidad. Además, de establecerse como la línea base, de tal modo que sean implementadas estrategias y acciones que vayan encaminadas la construcción de una industria carbono neutro, disminuyendo las barreras de entrada en los mercados locales

y foráneos, debidas a la incorporación de los indicadores para medir y monitorear los objetivos del Desarrollo Sostenible.

Referencias

- AENOR. (2015). Gases de efecto invernadero. Huella de carbono de productos: Requisitos y directrices para cuantificación y comunicación. *Especificación Técnica. UNE-CEN ISO/TS 14067*, 66. Retrieved from www.aenor.es
- Bare, J. (2011). TRACI 2.0: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(5), 687–696. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0338-9>
- Bare, J. (2012). Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts (TRACI): Version 2.1 User's Manual. *EPA. United States Environmental Protection Agency*, (July). Retrieved from <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100HN53.pdf>
- Brogaard, L. K., Damgaard, A., Jensen, M. B., Barlaz, M., & Christensen, T. H. (2014). Resources , Conservation and Recycling Evaluation of life cycle inventory data for recycling systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 87, 30–45. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.011>
- Caffrey, K. R., & Chinn, M. S. (2012). Life Cycle Assessment (LCA) and Degradable. North Carolina: North Carolina Cooperative Extension Service.
- Carbajal, A. (2013). *Manual de Nutrición y Dietética. Departamento de Nutrición. Facultad de Farmacia. Madrid.* Retrieved from <https://www.ucm.es/nutricioncarbajal/>
- Colling, A. V, Oliveira, L. B., Reis, M. M., Cruz, N. T., & Hunt, J. D. (2016). Brazilian recycling potential : Energy consumption and Green House Gases reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 544–549.
- Ertug Ercin, A., & Hoekstra, Y. (2012). Carbon and Water Footprints. *Concepts, Methodologies and Policy Responses*, (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), 1–24. <https://doi.org/10.1038/021225b0>
- Franklin Associates. a Division of Eastern Research Group. (2011). *Cradle-to-Gate Life Cycle Inventory of Nine Plastic Resins and Two Polyurethane Precursors*. Prairie Village, Kansas.
- Frías, Arturo Cristán. Lema , Irina Ize. Gavilán García, A. (2007). Situación de los envases plásticos en México. Retrieved February 23, 2016, from <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetitas/422/envases.html>
- Gleick, P. H., & Cooley, H. S. (2009). Energy implications of bottled water. *Environmental Research Letters*, 4(1), 014009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014009>
- Henry CJ. (2005). Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutr.*, 8(7A), 1133–1152. <https://doi.org/10.1079/PHN2005801>
- Icontec. (2006). Ntc-Iso 14064-1: Gases de Efecto Invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las

- emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. *Norma Técnica Colombiana*, 23. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Icontec. (2007a). *Ntc-Iso 14044. Gestión Ambiental. Análisis De Ciclo De Vida. Requisitos Y Directrices. Requisitos Del Ciclo De Vida*. Retrieved From [Http://Tienda.Icontec.Org/Brief/Ntc-Iso14044.Pdf](http://Tienda.Icontec.Org/Brief/Ntc-Iso14044.Pdf)
- Icontec. (2007b). Ntc-Iso14040. Gestión Ambiental. Análisis De Ciclo De Vida. Principios Y Marco De Referencia, (571), 1–18. Retrieved from <http://www.fedebiocombustibles.com/files/NTC-ISO14040.pdf>
- Lee, J., Pereira, G., Sánchez Matteucci, A., & Barson, A. (2009). *Análisis del Impacto de los Gases de Efecto Invernadero en el Ciclo de Vida de los Embalajes y Otros Productos Plásticos en Chile V1.0*. Retrieved from www.noco2.com.au
- Lehtinen, H., Saarentaus, A., Rouhiainen, J., Pits, M., & Azapagic, A. (2011). A review of LCA methods and tools and their suitability for SMEs. *Eco- Innovation BIOCHEM*, (May), 24.
- Mesa, J. A. (2012). *Innovación empresarial: Reinventando insumos a través de la innovación. Catedras de Innovación Empresarial* (Vol. 1). Medellín.
- Milliken. (2010). *An environmental comparison of polymers*. Retrieved from <http://www.semplastik.com.tr/pdf/envcomppol.pdf>
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., ... Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 659–740). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Agricultura, A. y M. A. (2015). *Guía para el cálculo de la huella de carbono y la huella de carbono, para la elaboración de un plan de mejora de una organización*. Madrid. Retrieved from nipo: 280-14-241-8
- Sánchez, A., Artola, A., Font, X., Gea, T., Barrena, R., Gabriel, D., ... Mondini, C. (2015). Greenhouse gas emissions from organic waste composting. *Environmental Chemistry Letters*, 13(3), 223–238. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2015). Guía para el cálculo y reporte de Huella de Carbono Corporativa. Retrieved from http://www.ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=f64a7ccd-8a76-4d0d-b6de-33a3f08576fc&groupId=586236
- Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(1), 34–52. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014>
- Turner, D. A., Williams, I. D., & Kemp, S. (2015). Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 105, 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.026>
- Unidad de Planeación Minero Energética, & Ministerio de Minas y Energía. (2013). Cadena del Gas Licuado del Petroleo, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Vargas, M., Lancheros, L., & Barrera, M. (2011). Gasto energético en reposo y composición corporal en adultos. *Rev Fac Med*, 59(1), 43–58.

Verghese, K., & Carre, A. (2012). Applying Life Cycle Assessment. In K. Verghese, H. Lewis, & F. Leanne (Eds.), *Packaging for Sustainability* (pp. 171–210). London, England: Springer London. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Verghese, K., Lockrey, S., Clune, S., & Sivaraman, D. (2012). Life cycle assessment of food and beverage packaging. *Emerging Food Packaging Technologies*, 380–408. <https://doi.org/10.1533/9780857095664.4.380>

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), & World Resources Institute (WRI). (2011). Greenhouse Gas Protocol Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. *World Resources Institute and World Business Council ...*, 1–152. Retrieved from http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/public/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf

Yuan, Z., Zhang, Y., & Liu, X. (2016). Life cycle assessment of horizontal-axis washing machines in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(1), 15–28. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0993-5>