

Beneficios ambientales del reciclaje de residuos plásticos posconsumo para la producción de postes en Mendoza, Argentina

Environmental benefits of recycling: A case study on post-consumer plastic waste to produce poles in Mendoza, Argentina

Fernando Arce-Bastias^{1,2*} 

¹Universidad Tecnológica Nacional, Grupo CLIOPE, Facultad Regional Mendoza. Mendoza, Argentina; e-mail: farcebastias@mendoza-conicet.gob.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina.

*autor de correspondencia: farcebastias@mendoza-conicet.gob.ar

Cómo citar: Arce-Bastias, F. 2022. Beneficios ambientales del reciclaje de residuos plásticos posconsumo para la producción de postes en Mendoza, Argentina. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(Supl.1):e2145. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.nSupl.1.2022.2145>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: noviembre 4 de 2021

Aceptado: mayo 8 de 2022

Editado por: Raquel Rojas Rodríguez

RESUMEN

Argentina, se encuentra entre los países de Latinoamérica con el mayor consumo de plásticos por habitante, con un valor de 42 kg, por año. El reciclaje mecánico de plástico, se presenta como una estrategia para recuperar los residuos y, de esta manera, evitar el uso de materia prima virgen, contribuyendo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño ambiental del reciclaje de plástico para la elaboración de postes en Mendoza, Argentina. En la evaluación, se utilizó el indicador tasa de beneficio de la reciclabilidad, adaptado para ciclo abierto y para su cálculo, se utilizaron los resultados del análisis de ciclo de vida de dos escenarios (vertedero y reciclaje). El valor del indicador resultó, para este caso de estudio, en 22 %. Este resultado positivo indica un ahorro ambiental de reciclar residuos plásticos posconsumo con respecto a la producción del producto, a partir de materia prima virgen (madera) y la disposición final de los residuos plásticos en el vertedero. Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad, para el parámetro del indicador que considera la vida útil de los productos y los resultados mostraron la necesidad de evitar su suposición, mediante su correcta determinación, con base a aspectos técnicos, económicos o de la calidad.

Palabras claves: Análisis de ciclo de vida; Economía circular; Ciclo abierto; Reciclaje; Residuos plásticos.

ABSTRACT

Argentina is one of the largest consumers of plastic materials in Latin America; the average consumption is 42 kg per capita per year. Mechanical recycling of plastics is a process for recovering plastic materials, and this practice produces recycled plastics substituting virgin materials. Substituting virgin materials with recycling plastics is a common practice that contributes to reducing greenhouse gas emissions. This work aims to assess the environmental performance of a case study on plastic waste recycling in Mendoza, Argentina. We applied the open-loop recyclability benefit rate indicator in the plastic waste treatment, which is based on an LCA approach. The indicator results in 22 %, this result indicates a potential environmental saving related to the recycling of the post-consumer plastic waste compared to the production of virgin material (wood) and landfilling of waste in terms of GHG emissions. Furthermore, a sensitivity analysis was performed to study the effect of the parameter that considers the lifetime of the products. There is a need to account for the lifetime of the product made from recycled material and the one made from virgin material. The accounting could be determined based on economic aspects, technical aspects, or material quality.

Keywords: Life cycle assessment; Recycling; Circular Economy; Open-loop; Plastic waste.

INTRODUCCIÓN

En contraposición al modelo económico actual denominado “economía lineal”, la Economía Circular (EC) propone un enfoque más amplio y completo del ciclo de vida de cualquier proceso y de su interacción con el medio (Ghisellini *et al.* 2016). Aunque no hay un concepto de EC ampliamente aceptado por la comunidad científica, Kirchherr *et al.* (2017) propusieron la siguiente definición:

Una EC describe un sistema económico que sustituye al concepto de fin de vida por el de reducir, reusar, reciclar y recuperar materiales en los procesos de producción/distribución y consumo. Funciona a nivel micro (productos, empresas, consumidores), meso (Parques Eco-Industriales) y macro (ciudad, región, nación y más allá), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible, creando así, simultáneamente, calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, en beneficio de las generaciones actuales y futuras.

Varios autores han reportado beneficios ambientales de la EC; por ejemplo, la simbiosis industrial de Kalundborg, Dinamarca, ha logrado reducir 635.000 toneladas de emisiones de CO₂ y disminuir el consumo de 87.000 toneladas de materiales, como etanol, cenizas, yeso, azufre y arena (Danielsson *et al.* 2018). Glogic *et al.* (2021) mostraron otro caso de éxito de la EC en la producción de pilas, en el cual, evaluaron la aplicación de tres estrategias (incrementar la utilidad del producto, el reciclaje posterior y el contenido de reciclaje), con el objetivo de incrementar la circularidad; sus resultados mostraron beneficios ambientales en los tres escenarios. Por otro lado, Huysman *et al.* (2015) analizaron el reciclaje de residuos plásticos y reportaron mayores ahorros en el uso de recursos comparado con la incineración y la disposición final.

Por otro lado, Cullen (2017) y Zink & Geyer (2017) cuestionan la EC y plantean que es una idea utópica. Para los materiales y los procesos reales, cada ciclo cerrado crea disipación y entropía, que se pueden atribuir a pérdidas en cantidad (pérdidas de material físico) y en calidad (degradación), por lo que resulta imposible cambiar hacia una economía con ciclo de materiales completamente cerrados y en los que los productos se reciclan indefinidamente, sin ningún aporte de recursos no renovables (Cullen, 2017). Además, algunos autores piensan que la EC podría producir un “efecto rebote” en el desempeño ambiental (Zink & Geyer, 2017); por ejemplo, Rodríguez *et al.* (2019) evaluaron un sistema que vincula una instalación de harina de pescado con una planta de microalgas, en la que los gases de combustión sustituyen al CO₂ puro. Los autores mostraron que, cuando la electricidad suministrada presentaba una alta contribución (mayor al 9 %) de combustibles fósiles, no se consiguió una reducción neta de las emisiones de GEI en este sistema circular.

Una de las claves para la transición hacia la EC es mejorar el desempeño de los materiales que se utilizan, entre ellos, cabe destacar la importancia que tiene el plástico en los distintos sistemas productivos. Entre los beneficios que tiene el plástico, se destacan su peso liviano, que facilita el transporte y permite conservar alimentos, reduciendo las pérdidas. Según datos del 2019, el consumo de plástico en Argentina fue de 42 kg por habitante por

año; este valor es uno de los más altos de Latinoamérica (Sbarbati Nudelman, 2020). En el área Metropolitana de Mendoza, se generan 1.078 toneladas por día de residuos sólidos urbanos y el 10 % está compuesto por plásticos (Bobillo & Santonato, 2017). Debido a las falencias en el tratamiento de los residuos en Argentina, el destino final de los residuos plásticos domiciliarios suele ser los basurales a cielo abierto.

El reciclado mecánico de plástico es uno de los procesos más utilizados para recuperar los residuos plásticos y utilizarlos en la fabricación de nueva materia prima (Davidson *et al.* 2021). Khoo (2019) reportó una eficiencia del proceso de 87,8 %, para el caso del polietileno, es decir, 0,878 kg de plástico reciclado se obtienen por cada kg de residuo previamente clasificado, mientras que, Seigné-Itoiz *et al.* (2015) consideraron en su trabajo, una eficiencia material del 85 %. En Argentina, se estima que se están reciclando 232.900 toneladas por año; este valor representa el 13 % del total de plástico que se consume, según datos de 2019 (Sbarbati Nudelman, 2020). El reciclaje de plástico es una estrategia que puede producir dos beneficios: reducir la cantidad de residuos plásticos que se disponen en vertedero y basurales a cielo abierto, al mismo tiempo, que se mitiga las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Además, el uso de residuos plásticos para la fabricación de productos evita el uso de materia prima virgen y esto contribuye en la reducción de emisiones de GEI (Liu *et al.* 2018). Seigné-Itoiz *et al.* (2015) reportaron, para España, una reducción de las emisiones de GEI de 620 kg de CO₂ por cada tonelada de residuo plástico que se recicla. Es por eso, que el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta fundamental para evaluar el impacto y los beneficios asociados con el reciclaje de residuos plásticos y para compararlo con estrategias alternativas (Gu *et al.* 2017).

El objetivo de este trabajo es evaluar el desempeño ambiental de la producción de postes a partir de residuos plásticos posconsumo, los cuales, son utilizados en el emparrado de viñedos. Este producto es de relevancia, debido a que la provincia de Mendoza (Argentina) posee grandes superficies de cultivo de vid, que supone una alta demanda de postes para su emparrado. La utilización de postes reciclados permitiría reemplazar a los postes de madera por un producto elaborado a partir de residuos plásticos que, tradicionalmente, son descartados. Algunos autores han estudiado la factibilidad de la aplicación de esta tecnología en Colombia (Sora Camargo, 2020; Toro Ortiz & Porras Hernandez, 2018) y en Ecuador (Torres Caiza, 2017).

En la evaluación, se utiliza el indicador Tasa de Beneficio de la Reciclabilidad (RBR, por sus siglas en inglés), adaptado al reciclaje de ciclo abierto, el cual, utiliza, como datos de entrada, los resultados del ACV, aplicado a dos escenarios: vertedero y reciclaje. Esta investigación contribuye a la evaluación del potencial de un caso específico de EC, además, aporta al bagaje de información de datos sobre el consumo de recursos y emisiones de productos y residuos en el campo de la sustentabilidad industrial.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la tabla 1, se explican, de manera sucinta, las etapas llevadas a cabo en este trabajo. Metodológicamente, se acudió a la investigación de tipo cuantitativa, la cual, se describe con mayor detalle en las siguientes secciones.

Descripción del caso de estudio. La empresa Madera Plástica Mendoza (MPM) transforma el residuo plástico posconsumo en productos que reemplazan a la madera y está localizada en Mendoza, Argentina; uno de los productos principales es el poste

de plástico reciclado (Figura 1a). Se seleccionó este caso de estudio, debido a que representa el primer y único caso en la localidad, en el cual, una empresa fabrica postes a partir de material reciclado. Para la producción de un poste, se utilizan 10 kg de residuos plásticos, aproximadamente; el producto de MPM es empleado por la industria vitivinícola en el emparrado de viñedos, absorbiendo los esfuerzos del viento y de la maquinaria. El objetivo de MPM es reciclar la mayor cantidad de residuos plásticos de difícil disposición, reemplazar los postes de madera y, de esta manera, disminuir la tala de árboles.

Tabla 1. Etapas de la metodología.

1 Definición del objetivo y el alcance
1.1 Se especificó el objetivo para realizar el estudio
1.2 Se describió la unidad funcional
1.3 Se especificaron los límites del sistema y los procedimientos de asignación
1.4 Se seleccionó el cambio climático como categoría de impacto
2 Análisis del inventario del ciclo de vida
2.1 Se recolectaron los datos de los procesos unitarios
2.2 Se calcularon los datos en referencia a la unidad funcional
2.3 Se plantearon los dos escenarios: vertedero y reciclaje
3 Evaluación del impacto del ciclo de vida
3.1 Se asignaron los resultados del inventario a la categoría de impacto seleccionada
3.2 Se utilizaron los factores de caracterización correspondientes para determinar el indicador de categoría
4 Interpretación
4.1 Se seleccionó el indicador RBR para evaluar los beneficios del reciclaje de plásticos posconsumo comparado con los postes de madera
4.2 Se calculó el indicador para el caso de estudio
4.3 Se analizaron los procesos con mayor contribución al impacto ambiental
5 Análisis de sensibilidad
5.1 Se modificó el valor del parámetro d con el objetivo de evaluar su influencia en los resultados
5.2 Se recalculó el indicador RBR

Este trabajo, se enfoca en el estudio del reciclaje de residuos plásticos provenientes de la cooperativa CO.RE.ME, localizada en Las Heras, Mendoza, que se dedica a la clasificación de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de Mendoza. CO.RE.ME recupera una mezcla de plásticos de los residuos sólidos que recibe y, desde 2020, provee de estos materiales a MPM. La corriente de residuos plásticos que es separada de los demás residuos está compuesta, principalmente, por empaques de alimentos, mangueras, tapas, etiquetas, recipientes de agroquímicos, entre otros. Debido a la falta de un mercado que los utilice, estos plásticos, tradicionalmente, eran considerados un “descarte” y se disponían en el vertedero de El Borbollón, Mendoza. La cooperativa envía semanalmente a MPM los residuos plásticos en fardos de 500 kg cada uno. La distancia total de transporte es de 50 km y para el transporte, se utiliza un camión con una capacidad máxima de 3.500 kg.

La materia prima que ingresa a MPM es separada en dos corrientes de plásticos: flexibles y duros. Ambas corrientes son trituradas en un molino a cuchillas. Luego, todo el material molido (Figura 1b), se mezcla e ingresa al proceso de extrusión. La extrusora tiene una capacidad máxima de procesamiento de 500 kg/h. El siguiente proceso consiste en el enfriamiento del material que ingresa a

los moldes; el enfriamiento, se realiza con agua que se recircula constantemente. La generación de residuos durante la fabricación de los postes es despreciable, debido a que todo el material se aprovecha, inclusive, los postes defectuosos.

Indicador. El indicador utilizado para cuantificar el ahorro ambiental producido por el reciclaje es la Tasa de Beneficio de la Reciclabilidad (RBR, por sus siglas en inglés). El RBR fue propuesto por Ardente & Mathieux (2014), para evaluar el reciclaje de ciclo cerrado y para su cálculo, se utilizan los resultados del ACV. El RBR, se define como la razón entre el ahorro ambiental obtenido por el reciclaje y las cargas ambientales de la producción de materia prima virgen y la disposición final (por ejemplo, vertedero o incineración). Posteriormente, Huysman *et al.* (2015) modificaron el indicador y ampliaron su utilización al reciclaje de ciclo abierto (RBR_{oi}). El RBR_{oi}, se utiliza en los casos donde el material reciclado no puede sustituir a la materia prima original, es decir, en aplicaciones distintas a la del producto inicial. Si bien esas modificaciones ampliaron el alcance del RBR, este indicador aún presentaba inconsistencias. Huysveld *et al.* (2019) propusieron una mejora del RBR_{oi} y su formulación matemática se muestra en la ecuación 1.

$$RBR_{O_{L,n}} = \frac{RCR \left(\frac{m_{v,\alpha_1}}{m_{r,\alpha_1}} \left((p_{\alpha_1} - (d_{\alpha_1} - 1)(1 - p_{\alpha_1})) V_{\alpha_1,v}^* + M_{\alpha_1,v}^* + U_{\alpha_1,v}^* + D_{\alpha_1,v}^* \right) - d_{\alpha_1} (R_{\alpha_0 \rightarrow \alpha_1} + M_{\alpha_1,r}^* + U_{\alpha_1,r}^* + D_{\alpha_1,r}^*) + D_{\alpha_0}^* (1 - d_{\alpha_1} (1 - RCR)) \right)}{D_{\alpha_0}^* + RCR \frac{m_{v,\alpha_1}}{m_{r,\alpha_1}} (V_{\alpha_1,v}^* + M_{\alpha_1,v}^* + U_{\alpha_1,v}^* + D_{\alpha_1,v}^*)} \times 100 \quad \text{ecuación 1}$$

$RBR_{O_{L,n}}$: tasa de beneficio de la reciclabilidad para la enésima categoría de impacto.

m_{v,α_1} : masa de materia prima virgen necesaria para producir el producto α

m_{r,α_1} : masa de material reciclado necesario para producir el producto α_1 [kg].

RCR : tasa de reciclaje [%], definido como la cantidad de material reciclado obtenido a partir de un kilogramo de residuo.

p_{α_1} : proporción de materia prima virgen en el producto α_1 , que es sustituido por material reciclado [%].

d_{α_1} : inversa de la relación entre la vida útil del producto α_1 , hecho a partir de material reciclado y el mismo, a partir de materia prima virgen [-]; por ejemplo, si α_1 es igual a 0,5 el producto reciclado tiene el doble de vida útil que el fabricado a partir de material virgen.

$V_{\alpha_1,v}^*$: impacto evitado de la producción de la materia prima virgen utilizada en el producto [unidad de la categoría de impacto/kg de materia prima virgen].

$M_{\alpha_1,v}^*$; $U_{\alpha_1,v}^*$; $D_{\alpha_1,v}^*$: impacto evitado de la manufactura, uso y disposición final del producto, elaborado a partir de materia prima virgen [unidad de la categoría de impacto/kg de materia prima virgen].

$R_{\alpha_0 \rightarrow \alpha_1}$: impacto del reciclaje del producto α_0 , para producir el material reciclado necesario para el producto α_1 [unidad de la categoría de impacto/kg de material reciclado].

$M_{\alpha_1,r}^*$; $U_{\alpha_1,r}^*$; $D_{\alpha_1,r}^*$: impacto de la manufactura, uso y disposición final del producto α_1 , elaborado a partir de material reciclado [unidad de la categoría de impacto/ kg de material reciclado].

$D_{\alpha_0}^*$: impacto debido a la disposición final del producto [unidad de la categoría de impacto/kg de producto α_0].

Análisis de ciclo de vida. El ACV es una metodología estandarizada en las normas ISO 14040 (ISO, 2006a) y 14044 (ISO, 2006b). El ACV es una técnica que evalúa aspectos ambientales y potenciales impactos a lo largo del ciclo de vida de un producto. Mediante la aplicación del ACV, se colecta la información relacionada con los flujos de materia y energía del ciclo de vida de un producto y se determinan los potenciales impactos ambientales. De acuerdo con ISO, las cuatro fases del ACV son: (i) definición del objetivo y

alcance, (ii) análisis del Inventario de Ciclo de Vida, (iii) evaluación del Impacto del Ciclo de Vida, (iv) interpretación.

Definición de objetivos y alcance: El objetivo de este trabajo es cuantificar los potenciales impactos ambientales de los escenarios reciclaje y vertedero. Existen diferentes métodos para modelar el reciclaje en el ACV (Ekvall *et al.* 2020). En este trabajo, se consideró que el más apropiado es el método de corte, debido a que se recomienda cuando la oferta de material reciclado supera a la demanda. Con este método, el residuo plástico ingresa al ciclo de vida del siguiente producto sin un impacto ambiental asociado. Los procesos que componen el escenario vertedero son la disposición final del residuo plástico en vertedero y la producción del poste a partir de madera virgen. Además, se tuvo en cuenta que el poste de madera, luego de su uso, es incinerado, lo cual, representa una práctica habitual. En cambio, el poste de plástico, en su fin de vida, es transportado al vertedero Según información provista por la cooperativa, la disposición final en el vertedero es una práctica habitual en la región par los productos elaborados a partir de plástico en su fin de vida.

La unidad funcional es 1 kg de residuos plásticos posconsumo (principalmente, polipropileno, polietileno de alta densidad, polietileno de baja densidad). Se realizó un análisis de la cuna a la tumba, es decir, se incluyeron las fases de extracción de materias primas, producción, transporte y disposición final. Como el poste es un producto que no requiere de energía, se considera que la fase de uso es despreciable. Con el fin de definir los procesos unitarios considerados, se establecieron los límites del sistema que se describen en la figura 2.

Análisis del inventario: La recolección de datos del sistema principal fue realizada en estrecha colaboración con la empresa MPM. Para modelar el sistema de fondo (es decir, inventario de electricidad, agua, diesel y otros), se utilizó la base de datos de Ecoinvent 3.6 (Wernet *et al.* 2016), contenida en el software SimaPro® (version 9.1.1.1). En el ACV no se incluyó la infraestructura, debido a que la información no estaba disponible. La tabla 2 muestra los datos recogidos para modelar la producción de los postes de plástico reciclado.

Como el poste de plástico se produce exclusivamente a partir de material reciclado, se consideró que el parámetro p es 100 %. En cuanto a la relación $m_{v,\alpha_1}/m_{r,\alpha_1}$, 1 kg de material reciclado reemplaza a 1,04 kg de materia prima virgen. La tasa de reciclaje (RCR) tiene el valor de 1, porque se utiliza todo el material residual que ingresa, según información provista por la empresa. Debido a la falta de información sobre la vida útil de los productos elaborados a partir de material reciclado y virgen, se supuso que el parámetro d es igual a 1. Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad respecto al parámetro d , para ilustrar el efecto en el ahorro ambiental, de la suposición hecha. El análisis de sensibilidad consistió en modificar el valor del parámetro d del $RBR_{O_{L,n}}$; en este estudio, se seleccionó un valor superior ($d=2$), al considerado, y un valor menor ($d=0,5$).

Evaluación del impacto del ciclo de vida: Para cuantificar las emisiones de GEI, en términos de $kgCO_2\text{-eq}$, se utilizó el método IPCC 2013 GWP 100a, el cual, se basa en los factores de conversión



Figura 1. a) Poste de plástico para la venta; b) residuo plástico molido que ingresa a la extrusora.

del potencial de calentamiento global, desarrollados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tradicionalmente, el reciclaje de plásticos se ha presentado como una estrategia que busca reducir las emisiones de GEI y extender la vida de los residuos recuperados. En la actualidad, existen metodologías, como el ACV e indicadores, como el RBR_{0t} , que permiten evaluar los beneficios ambientales del reciclaje. En este trabajo, se utilizaron estas dos herramientas para cuantificar el

ahorro ambiental, en términos de emisiones de GEI ($kgCO_2$ -eq). El caso de estudio contempla el uso de residuos plásticos posconsumo, como materia prima para la elaboración de postes. Estos postes son utilizados en los viñedos y reemplazan a los postes de madera.

Resultados del Análisis de Ciclo de Vida. Como se ha mencionado anteriormente, el impacto ambiental se expresa en términos de emisiones de GEI utilizando el método IPCC 2013 GWP 100a. La unidad funcional es 1 kg de residuos plásticos posconsumo.

Con respecto al escenario vertedero, las emisiones totales son de 0,49 $kgCO_2$ -eq. Las emisiones de GEI asociadas a la producción de

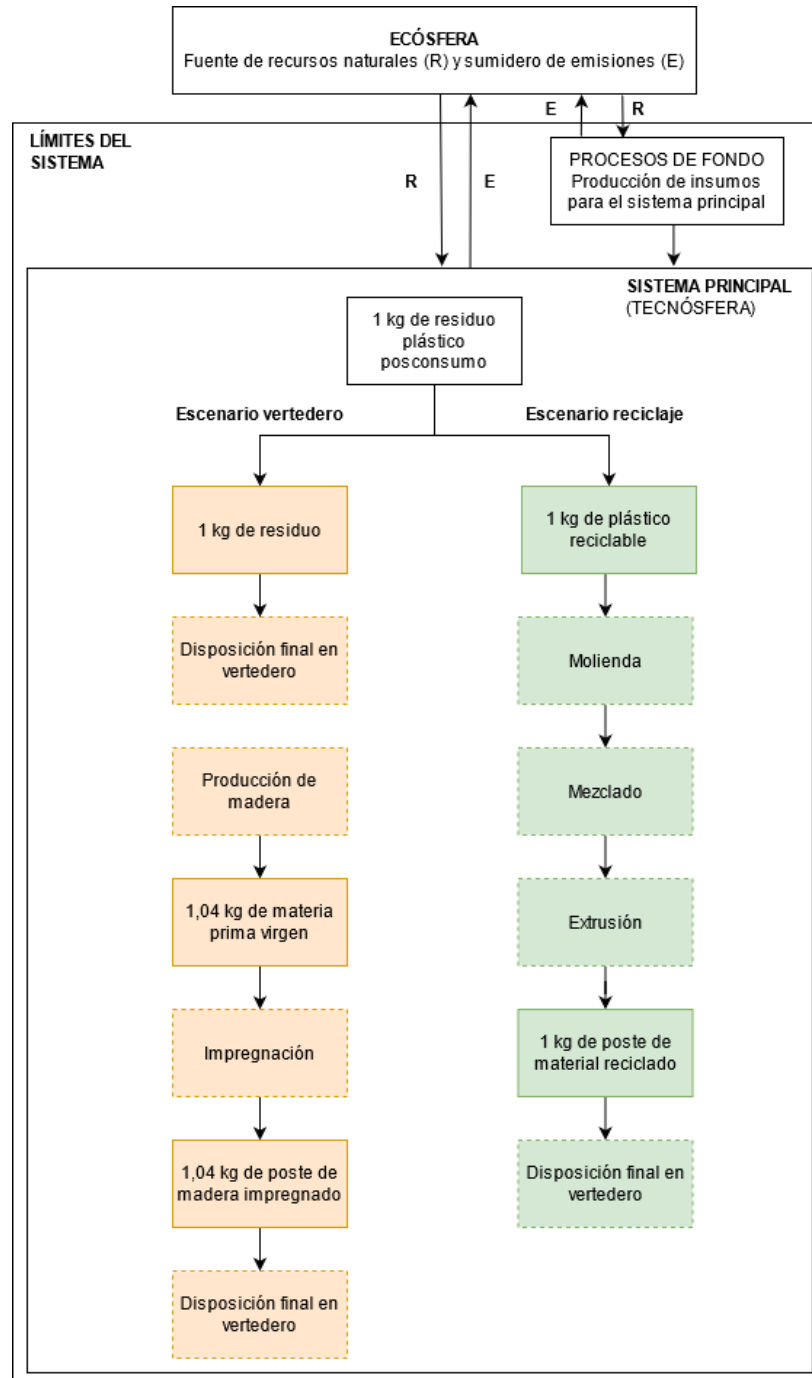


Figura 2. Caso de estudio evaluado mediante dos escenarios: reciclaje y vertedero. Los bloques verdes representan los procesos y los productos del escenario reciclaje; los bloques color naranja representan los procesos y los productos del escenario vertedero; los bloques con línea continua representan productos, mientras que los que tienen línea punteada, procesos.

materia prima virgen ($U_{\alpha_1,r}^*$) resultan en 0,02 kgCO₂-eq. Por otro lado, las emisiones relacionadas con la manufactura y disposición final ($M_{\alpha_1,v}^* + D_{\alpha_2,v}^*$) del producto elaborado a partir de materia prima virgen son de 0,31 kgCO₂-eq. La variable que considera la fase de uso ($U_{\alpha_1,v}$) del producto es nula, debido a que es un producto que no consume energía. La disposición final ($D_{\alpha_0}^*$) de los residuos plásticos en vertedero tiene unas emisiones de GEI asociadas de 0,16 kgCO₂-eq.

En el escenario reciclaje, las emisiones totales son de 0,38 kgCO₂-eq. Las emisiones de GEI asociadas al proceso de reciclaje y manufactura ($R_{\alpha_0-\alpha_1}^* + M_{\alpha_1,r}^*$) del producto reciclado resultan en 0,23 kgCO₂-eq. Como en el escenario anterior, no se consideran las emisiones asociadas a la fase de uso ($U_{\alpha_1,r}$). La disposición final del producto reciclado ($D_{\alpha_1,r}^*$) presenta unas emisiones de GEI asociadas de 0,15 kg CO₂-eq.

Tabla 2. Información sobre las entradas a MPM. Los valores fueron calculados para la unidad funcional (1 kg de residuos plásticos posconsumo).

Entrada	Valor	Unidad
Electricidad	2,07E-01	kWh
Agua	9,32E-06	kg
Aditivo antioxidante ^a	2,24E-03	kg

^a El aditivo tiene el siguiente nombre: tetrakis[metileno-3-(3,5-di-ter-butil-4-hidroxifenil)propionato]metano.

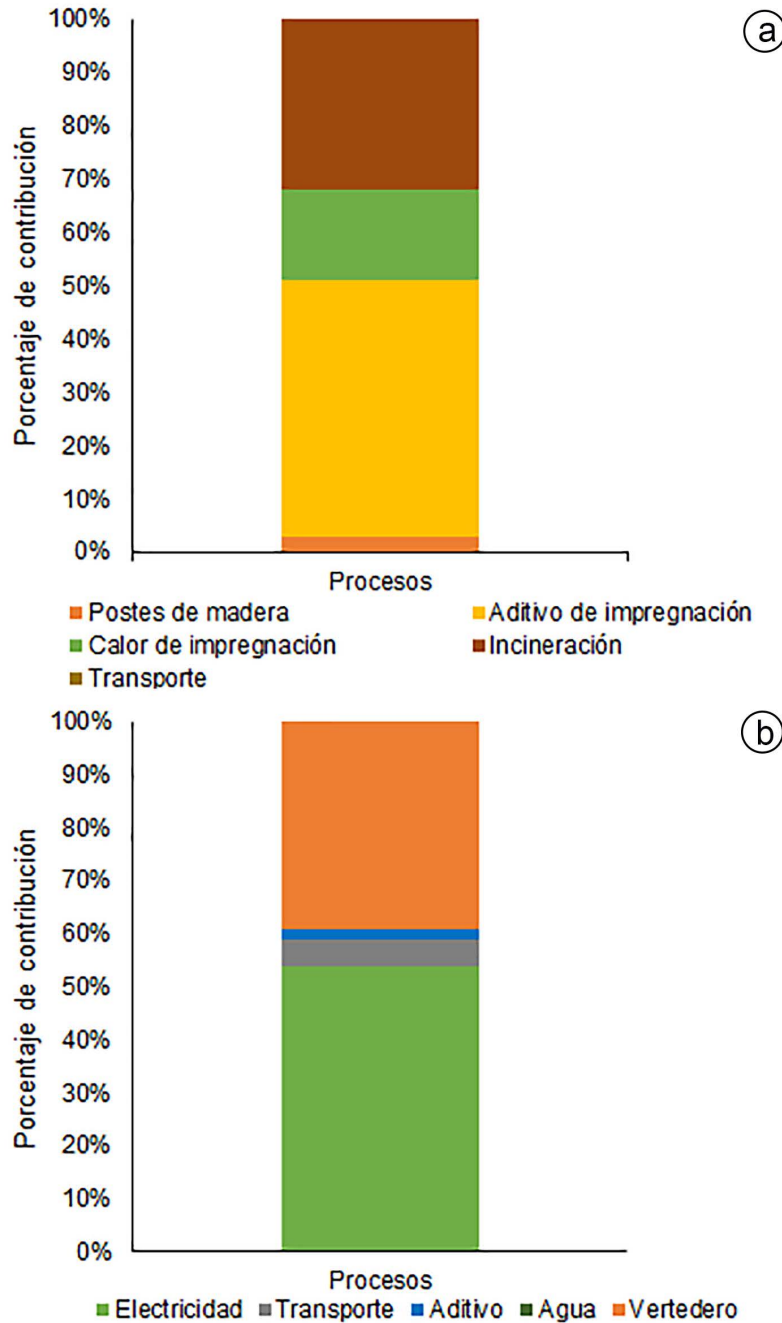


Figura 3. Contribución de cada proceso al impacto total, en términos de gases de efecto invernadero GEI, para los dos escenarios evaluados: a) vertedero; b) reciclaje.

Resultados del indicador. Con los resultados del ACV, se evaluó el ahorro ambiental producido por la fabricación de postes a partir de plástico reciclado, mediante el indicador RBR_{oi} . Para utilizar este indicador adaptado para el reciclaje de ciclo abierto, se compararon dos escenarios: vertedero y reciclaje.

El valor del RBR_{oi} , para este estudio, es 22 %. Este resultado positivo indica que el ahorro ambiental de reciclar residuos plásticos posconsumo es 22 % con respecto a la producción del producto a partir de materia prima virgen (madera) y la disposición final de los residuos plásticos en el vertedero, expresado en término de emisiones de GEI. Algunos autores también han reportado beneficios ambientales; por ejemplo, Huysman *et al.* (2015) evaluaron el uso de recursos del reciclaje de residuos plásticos domésticos para elaborar bandejas para plantas y lo compararon con la producción del mismo producto a partir de tereftalato de polietileno virgen y la disposición final en vertedero de los residuos plásticos. Los autores obtuvieron un valor del indicador RBR_{oi} de 10 %. Por otro lado, Huysveld *et al.* (2019) analizaron el reciclaje de residuos plásticos para la fabricación de tejas ecológicas; los autores compararon este sistema con la producción de tejas a partir de polipropileno virgen y la disposición final en vertedero de los residuos, el indicador RBR_{oi} , para este caso, resultó en 59 %, considerando el calentamiento global, como categoría de impacto.

En este trabajo, el indicador RBR_{oi} mostró un beneficio ambiental positivo y, por lo tanto, una disminución en la emisión de gases de efecto invernadero del escenario reciclaje en comparación al escenario vertedero. Una de las limitaciones de este resultado es que se consideró que, luego de la fase de uso, el poste de plástico reciclado se transporta al vertedero. Si bien este fin de vida es común en la mayoría de los productos plásticos, los postes de plástico reciclado tienen la capacidad de volver a ingresar al sistema productivo; de esta manera, se produce un uso en cascada que puede mejorar el desempeño ambiental en comparación con la disposición final en vertedero. Huysman *et al.* (2015) demostraron, en un caso de estudio de ciclo abierto aplicado al reciclaje de plástico, que el uso en cascada del producto incrementaba el beneficio ambiental.

Contribución de cada proceso. Como se muestra en la figura 3a, el proceso de impregnación (aditivo y calor de impregnación) del poste de madera aporta un 64 % a las emisiones totales. La disposición final del residuo plástico en vertedero es el siguiente proceso con mayores emisiones y contribuye con un 32 % a las emisiones totales de este escenario. En cuanto al escenario reciclaje, el consumo de energía eléctrica para los procesos de molienda, mezclado y extrusión realiza la mayor contribución a las emisiones totales, con un valor de 54 % (Figura 3b). El siguiente proceso, que hace su mayor aporte, es la disposición final en vertedero del poste, con un valor de 40 %. Gu *et al.* (2017) realizaron el ACV del proceso de reciclaje mecánico del plástico y encontraron, de forma similar, que el proceso que contribuye mayormente a las emisiones de GEI es el proceso de extrusión.

A partir de los resultados anteriores, se pueden sacar conclusiones en cuanto a los procesos que necesitan ser mejorados, para

disminuir las emisiones de GEI de cada producto. En el escenario vertedero, los esfuerzos se deben realizar para buscar una alternativa más sustentable para la impregnación del poste de madera y que, al mismo tiempo, permita prolongar su vida útil. El proceso de incineración de la madera también resultó relevante; si bien la práctica de quema es habitual, no existe aprovechamiento del calor, en cambio, si ese calor pudiese ser aprovechado, existen emisiones evitadas que pueden disminuir las emisiones netas. En el escenario reciclaje, la mayor contribución de los procesos de molienda, mezcla y extrusión se debe a las emisiones asociadas a la producción de la energía eléctrica. Esto indica que la reducción de las emisiones actuales se podría lograr con un mayor aporte de energías limpias.

Resultados del análisis de sensibilidad. La figura 4 presenta los resultados del análisis de sensibilidad para el parámetro d . En los resultados presentados en la sección 3.1, se supuso que el parámetro d era igual a 1, debido a que no hay un estudio que compare la vida útil de los postes evaluados. Con el objetivo de investigar la influencia del parámetro d en los resultados del indicador, se compararon tres escenarios, en los que el parámetro d toma los valores 0,5, 1 y 2. La disminución del parámetro d , de 1 a 0,5, supone una reducción del 50 % de la vida útil del poste fabricado con material virgen, en comparación con el poste fabricado con material reciclado. La disminución del parámetro d supone un incremento del beneficio ambiental, alcanzando un valor del indicador de 61 %. Por el contrario, el incremento del parámetro d , de 1 a 2, supone que el producto reciclado tiene la mitad de la vida útil del producto fabricado a partir de material virgen. Este incremento del parámetro d provoca una disminución del indicador, el cual, toma un valor de -55 % y, por lo tanto, muestra una reducción de los beneficios ambientales del escenario de reciclaje, en comparación con el escenario de vertedero. Huysveld *et al.* (2019) mostraron resultados similares. En su trabajo efectuaron un incremento del parámetro d , de 1 a 2 y recalcularon el RBR_{oi} , con estos cambios; al igual que en este trabajo, el indicador presentó una reducción del beneficio ambiental y su valor disminuyó de 59 a 18 %.

En atención al análisis de sensibilidad realizado en este trabajo, los resultados obtenidos demostraron el efecto que tiene el parámetro d sobre el cálculo del beneficio ambiental. Como señalan Huysveld *et al.* (2019) es necesario realizar una correcta contabilización de la diferencia de vida útil entre el producto fabricado con material reciclado y el producto que utiliza material virgen. Para determinar la vida útil, los aspectos que pueden ser considerados son los técnicos, económicos y la calidad del material. Huysman *et al.* (2017) desarrollaron un indicador, en el cual, la calidad del producto era determinada a partir de parámetros físicos.

Limitaciones y recomendaciones para futuras investigaciones. Las limitaciones de este estudio se relacionan, en primer lugar, con el inventario utilizado para evaluar la producción de postes de madera; no se ha elaborado, considerando los flujos materiales y de energía, propios de la región estudiada. Para resolver esta limitación, los esfuerzos se deberían realizar sobre el estudio de especies forestales regionales utilizadas para la producción de postes de madera, como también sobre la producción y los aditivos aplicados en la

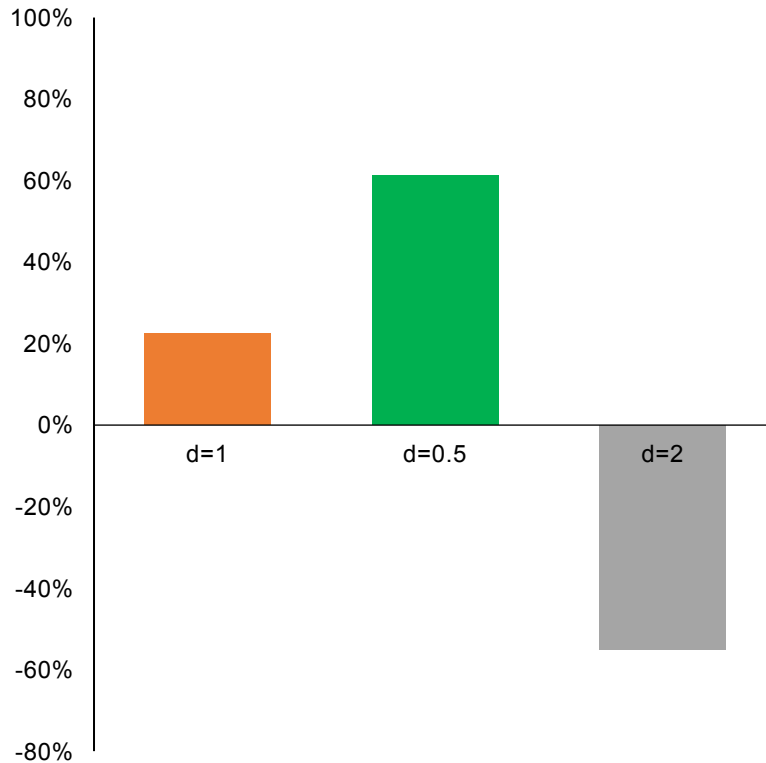


Figura 4. Resultados del análisis de sensibilidad para el parámetro d, con los valores 1, 0,5 y 2.

impregnación. En segundo lugar, por razones de falta de información respecto a la vida útil de los productos comparados, se asumió el valor numérico del parámetro d. Como se demostró en el análisis de sensibilidad, podría modificar enormemente el resultado del indicador. Con el fin de obtener un valor real de la vida útil, se debe estudiar la resistencia de ambos productos a los esfuerzos, durante la fase de uso. Además, con base en lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de definir, como actividad futura, el cálculo del indicador, incluyendo el uso en cascada del poste reciclado.

Agradecimientos. El autor desea agradecer a Leonardo Cano, Pio De Amoriza y Carlos Arce, socios de Madera Plástica Mendoza, por su colaboración. **Conflictos de intereses:** El manuscrito fue preparado y revisado con la participación del autor, quien declara que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. Además, el autor declara que no hay conflicto de confidencialidad de la información o con el uso del nombre de Madera Plástica Mendoza. **Financiación:** Este trabajo fue realizado en el marco de la beca doctoral otorgada por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

REFERENCIAS

1. ARDENTE, F.; MATHIEUX, F. 2014. Identification and assessment of product's measures to improve resource efficiency: the case-study of an energy using product. *Journal of cleaner production*. 83:126-141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.058>
2. BOBILLO, J.M.; SANTONATO, A.J. 2017. Análisis de la cadena de intermediarios de los materiales reciclables en el área metropolitana de Mendoza. Ministerio de producción; Mendoza gobierno; Universidad Nacional de Cuyo. 44p.
3. CULLEN, J.M. 2017. Circular economy: Theoretical benchmark or perpetual motion machine? *Journal of Industrial Ecology*. 21(3):483-486. <https://doi.org/10.1111/jiec.12599>
4. DANIELSSON, S.E.; MØLLER, P.; RANDERS, L. 2018. Modelling CO₂ savings and economic benefits for the Kalundborg Symbiosis. Symbiosis Center Denmark. 10p.
5. DAVIDSON, M.G.; FURLONG, R.A.; MCMANUS, M.C. 2021. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review. *Journal of Cleaner Production*. 293:126163. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126163>
6. EKVAL, T.; BJÖRKLUND, A.; SANDIN, G.; JELSE, K.; LAGERGREN, J.; RYDBERG, M. 2020. Modeling recycling in life cycle assessment. Vinnova; Swedish Energy Agency; Formas. 138p. Available from Internet in: https://www.lifecyclecenter.se/wp-content/uploads/2020_05_Modeling-recycling-in-life-cycle-assessment-1.pdf
7. GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced

- interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. 114:11-32.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
8. GLOGIC, E.; SONNEMANN, G.; YOUNG, S.B. 2021. Environmental trade-offs of downcycling in circular economy: combining life cycle assessment and material circularity indicator to inform circularity strategies for alkaline batteries. *Sustainability*. 13(3):1040.
<https://doi.org/10.3390/su13031040>
 9. GU, F.; GUO, J.; ZHANG, W.; SUMMERS, P.A.; HALL, P. 2017. From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of the Total Environment*. 601-602:1192-1207.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.278>
 10. HUYSMAN, S.; DE SCHAEPMEESTER, J.; RAGAERT, K.; DEWULF, J.; DE MEESTER, S. 2017. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*. 120:46-54.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.013>
 11. HUYSMAN, S.; DEBAVEYE, S.; SCHAUBROECK, T.; DE MEESTER, S.; ARDENTE, F.; MATHIEUX, F.; DEWULF, J. 2015. The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. *Resources, Conservation and Recycling*. 101:53-60.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.014>
 12. HUYSVELD, S.; HUBO, S.; RAGAERT, K.; DEWULF, J. 2019. Advancing circular economy benefit indicators and application on open-loop recycling of mixed and contaminated plastic waste fractions. *Journal of Cleaner Production*. 211:1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.110>
 13. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO. 2006a. ISO 14040:2006 Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework. 2th Edition. 20p.
 14. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, ISO. 2006b. ISO 14044:2006 Environmental management: Life cycle assessments: Requirements and guidelines. 1th Edition. 46p.
 15. IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate. Cambridge University Press (Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA). 1535p.
 16. KHOO, H.H. 2019. LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. *Resources, Conservation and Recycling*. 145:67-77.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.010>
 17. KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 127:221-232.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
 18. LIU, Z.; ADAMS, M.; COTE, R.P.; CHEN, Q.; WU, R.; WEN, Z.; LIU, W.; DONG, L. 2018. How does circular economy respond to greenhouse gas emissions reduction: An analysis of Chinese plastic recycling industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 91:1162-1169.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.038>
 19. RODRÍGUEZ, P.D.; ARCE BASTIAS, F.; ARENA, A.P. 2019. Modeling and environmental evaluation of a system linking a fishmeal facility with a microalgae plant within a circular economy context. *Sustainable Production and Consumption*. 20:356-364.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.08.007>
 20. SBARBATI NUDELMAN, N. 2020. Residuos plásticos en Argentina: su impacto ambiental y en el desafío de la economía circular. *Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales-ANCEFN (Ciudad Autónoma de Buenos Aires)*. 260p.
 21. SEVIGNÉ-ITOIZ, E.; GASOL, C.M.; RIERADEVALL, J.; GABARRELL, X. 2015. Contribution of plastic waste recovery to greenhouse gas (GHG) savings in Spain. *Waste Management*. 46:557-567.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.007>
 22. SORA CAMARGO, R.A. 2020. Estudios realizados sobre procesos de transformación de residuos plásticos en el municipio de Boyacá departamento de Boyacá a partir de la producción de postes de plástico residual. Tesis de maestría, Universidad EAN. 121p.
 23. TORO ORTIZ, J.S.; PORRAS HERNANDEZ, M.L. 2018. Formulación de un plan de negocio para la fabricación de postes y mangueras a partir de la transformación del plástico recuperado en el municipio de Cumaribo, Vichada. Tesis de grado, Universidad Santo Tomás. 117p.
 24. TORRES CAIZA, L.F. 2017. Elaboración de un prototipo para la fabricación de ecopostes con plástico (PET) en el relleno sanitario Romerillos del Cantón Mejía. Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi. 70p.
 25. WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

21:1218-1230.

<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

26. ZINK, T.; GEYER, R. 2017. Circular economy rebound.

Journal of Industrial Ecology, 21(3):593-602.

<https://doi.org/10.1111/jiec.12545>