

Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca¹

María Fernanda Valderrama Ocoró², Luz Elena Chavarro Guzmán³,
Juan Carlos Osorio Gómez⁴, Claudia Cecilia Peña Montoya⁵

Resumen

Introducción: El acelerado crecimiento de la población, los diversos patrones de consumo y la reducción en los ciclos de vida de los productos, han generado un incremento en el consumo y por tanto en la generación de residuos sólidos, los cuales si no se tratan de manera adecuada tienen efectos adversos al ambiente como muerte de animales por ingesta, inundaciones debido a la inadecuada disposición en canales de aguas lluvias y disminución de la vida útil de los rellenos sanitarios de materiales aprovechables. Uno de los residuos generados es el polietileno teraftalato (PET) que pese a ser un material 100% reciclable, está terminando en los rellenos sanitarios, disminuyendo la vida útil de los mismos y consumiendo recursos como el petróleo para la generación de materiales nuevos. **Objetivos:** Evaluar los efectos al ambiente del reciclaje del PET en el Valle del Cauca, a través de un modelo de dinámica de sistemas. **Materiales y métodos:** Se estudiaron variables como el consumo de agua y energía, generación de CO₂ y la vida útil del relleno sanitario Colomba El Guabal que le sirve a municipios del Valle del Cauca, variando la tasa de reciclaje del PET. **Resultados:** El efecto de incrementar la tasa de reciclaje disminuye el consumo de agua y energía, la emisión de CO₂ e incrementa la vida útil del relleno sanitario. **Conclusiones:** Es importante hacer seguimiento a las políticas de gestión de residuos en las principales variables ambientales y fortalecer los

procesos de toma de decisiones, como aquellos relacionados con las opciones de diseño de productos y reutilización de materia prima, orientados a generar un impacto positivo en el ambiente.

Palabras clave: Dinámica de sistemas, gestión de residuos sólidos, PET, reciclaje.

Dynamic study of pet containers recycling in Valle del Cauca

Abstract

Introduction: Fast population growth has generated an increase in the consumption and therefore it has influenced the rise of the solid waste generation, which causes adverse effects on the environment if treated inadequately. Polyethylene terephthalate (PET) is a kind of solid waste generated that is 100% recyclable, however it is ending in landfills reducing the lifespan of them and consuming resources like petroleum in order to generate new products. **Objective:** Evaluating the effect on the environment of PET recycling by means of a system dynamics model. **Material and method:** The variables considered were water and energy consumption, CO₂ emissions and landfill lifespan varying the PET recycling rate. **RESULTS:** the increase of the recycling rate cause a decrease in water and energy consumption as well as de

- 1 Artículo original derivado del Proyecto de Investigación denominado: "Modelo soporte a la toma de decisiones para la gestión integral y sostenible de residuos sólidos en cadenas de suministro de ciclo cerrado del Valle del Cauca" financiado por la Universidad del Valle ejecutado entre agosto 2012 y diciembre 2015
- 2 Ingeniera Industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia. E-mail: maryfer1801@gmail.com ORCID: 0000-0001-1724-2304
- 3 Ingeniera Industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia. E-mail: elenaalgato5@gmail.com ORCID: 0000-0003-0444-7259
- 4 Ingeniero Industrial, MSc en Ingeniería Industrial, Doctor en Ingeniería, profesor titular, Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia. E-mail: juan.osorio@correounivalle.edu.co ORCID: 0000-0001-5625-5609
- 5 Ingeniera Industrial, MSc in Management, Esp. Logística, Doctora en Ingeniería, profesora Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. E-mail: ccpena@uao.edu.co ORCID: 0000-0001-5167-5145

Artículo recibido: 9/08/2017; artículo aprobado: 24/07/2018

CO2 emissions and produce a rise in the landfill lifespan. **Conclusions:** It is still important to follow the accomplishment of the solid waste management policies so as to enhance the decision making process related to generate a positive impact on the environment.

Keywords: Systems dynamics, solid waste management, PET, recycling

Estudo dinâmico da reciclagem de embalagens pet no Valle del Cauca

Resumo

Introdução: o acelerado crescimento a população, os diversos padrões de consumo e a redução nos ciclos de vida dos produtos, tem gerado um incremento no consumo e por tanto na geração de resíduos sólidos, em caso de não serem tratadas adequadamente tem efeitos adversos sobre o ambiente como a morte de animais pela ingestão, inundações devido à inadequada disposição em canais de águas de chuva e a diminuição da vida útil dos aterros sanitários de materiais aproveitáveis. Um dos

resíduos gerados é o teraftalato de polietileno (PET) apesar de ser um material 100% reciclável, está acabando nos aterros sanitários, diminuindo a vida útil dos mesmos e consumindo recursos como o óleo para a geração de novos materiais. **Objetivo:** Avaliar os efeitos ao ambiente de reciclagem do PET no Valle del Cauca, através de um modelo de dinâmica de sistemas. **Materiais e métodos:** Estudaram-se variáveis como o consumo de água e energia, geração de CO2 e a vida útil do aterro sanitário Colomba El Guabal que serve aos municípios do Valle del Cauca, variando a taxa de reciclagem do PET. **Resultados:** O efeito de incrementar a taxa de reciclagem diminuindo o consumo de água e energia, a emissão de CO2 e o aumento da vida útil do aterro sanitário. **Conclusões:** É importante fazer seguimentos políticos de gestão de resíduos nas principais variáveis ambientais e melhorar os processos de tomada de decisões, como aqueles relacionados com as opções de desenho de produtos e reutilização de matéria prima, orientados a gerar um impacto positivo no ambiente.

Palavras-chaves: Dinâmica de sistemas, gestão de resíduos sólidos, PET, reciclagem.

Introducción

La generación y gestión de residuos sólidos requiere del compromiso de la sociedad, gobiernos, academia, medios de comunicación, comunidad, organizaciones e individuos, para minimizar los efectos adversos al ambiente y la salud. Principalmente, la adecuada gestión de materiales reciclables es de vital importancia para reducir la cantidad de residuos que se conducen a los rellenos sanitarios ocupando un espacio innecesario y reduciendo la vida útil de los mismos.

En el año 2013, el 83% de los residuos sólidos domiciliarios que generados en Colombia fueron a los rellenos sanitarios y solo el 17% fue recuperado por recicladores para su reincorporación al ciclo productivo (Departamento Nacional de Planeación y Banco Mundial, 2015). Esta cifra coincide con los datos de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, SSPD (2015) donde 81% de los 1102 municipios están disponiendo sus residuos en rellenos sanitarios y el 3,09% hace uso de las plantas de aprovechamiento.

Según el Departamento Administrativo de Planeación Municipal (2014), en Santiago de Cali, durante el año 2011 se aprovecharon 400 toneladas de material reciclable del total generado (577.331 Toneladas), lo cual representa un 0,07%. Los esfuerzos por gestionar estos materiales se están evidenciando en países como Estados Unidos donde las tasas de reciclaje superan el 70% en materiales como el papel de oficina y el aluminio; mientras que alrededor de un 30% en materiales como el PET (United States Environmental Protection Agency, EPA, 2015).

El polietileno teraftalato (PET) es un material reciclable que está en aumento, ocasionando efectos ambientales adversos debidos a las actuales formas de disposición de los productos PET, una vez son utilizados por el consumidor final. Entre los problemas ambientales ocasionados por este material se encuentra mayor acumulación en el medio, muerte de animales, inundaciones, disminución de la vida útil de los rellenos sanitarios. Cuando son destinados para incineración producen contaminación por la generación de gases de efecto invernadero, afectan la salud humana por la emisión de gases

tóxicos y la disposición final de las cenizas contamina el agua subterránea por infiltración de lixiviados (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).

Aunque el PET es 100% reciclable y fácilmente reprocesable, estas cualidades están lejos de ser consideradas una ventaja, porque sólo el 26% del total de plástico consumido en Colombia es reciclado (Suárez, 2016), esto se explica por diversos factores como, la falta de separación en la fuente, la poca rentabilidad que representa para los recolectores, la selección de este material y la difícil identificación en los centros de acopio dada la gran variedad en el mercado. A esto se suma la falta de un adecuado sistema de recolección de residuos permitiendo una pre-selección de los residuos antes de ser llevados a los rellenos sanitarios.

El promedio mundial de reciclaje del PET, al 2015, fue de 41% siendo Japón el país con la cifra de reciclaje de PET más alta, alcanzando el 78% (Suárez, 2016). En 2013 se reciclaron 31% de los 4 millones de toneladas de PET generados en el mismo año en Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, EPA, 2015).

En el año 2015 se recicló en Colombia el 26% (3500 ton aproximadamente) de los PET producidos, lo cual indica que el restante 74% se condujo a los rellenos sanitarios (Suárez, 2016). La empresa Socya es el segundo captador de PET, ello ha permitido generar inclusión de 800 familias del sector del reciclaje y comercialización de 850 toneladas mensuales de plásticos. Asimismo, cuenta con una capacidad instalada de 4200 ton/año para recuperar envases plásticos PET (Socya, 2016, Rojas, 2016). La empresa ENKA también aporta considerablemente a la recuperación de botellas posconsumo PET, como lo indica en su informe de sostenibilidad, para el año 2015, recuperó 726 millones de botellas cerrando así el ciclo de estas botellas que se convirtieron en resina apta para la fabricación de envases en contacto con alimentos y en fibras de alto valor agregado (Enka, 2015).

Abordar el caso de los PET es importante para dar cumplimiento a los compromisos adquiridos por Colombia en el marco de la agenda internacional orientada a aumentar la reutilización y aprovechamiento de envases de bebidas (Departamento Nacional de Planeación, DNP, 2016). De este modo, se presenta una oportunidad de vincular herramientas de la ingeniería industrial como la dinámica de sistemas a problemáticas como la adecuada gestión de

residuos PET.

La literatura reporta la importancia del tema de reciclaje de los PET a nivel mundial principalmente en la localización de los sitios de reprocesamiento, el trabajo conjunto de los sectores formales e informales y la reducción en el consumo de material PET. Así mismo, se reportan diversos trabajos asociados con la gestión de residuos y la dinámica de sistemas (ver Tabla 1).

Tabla 1. Desarrollo de investigaciones en gestión de residuos PET y dinámica de sistemas

Fuente: Los autores

Tema	Autores	Año	Región	Resultados
Gestión de los PET	Coelho, Castro & Gobbo	2011	Brasil	Programa integral para la gestión de los PET posconsumo que considere la educación de los involucrados, la reducción en el consumo, la estructuración de la cadena inversa y el compromiso de sectores como el industrial y el gobierno a través de políticas públicas que soporten tecnologías limpias para el procesamiento de los PET
	Kuczynski & Geyer	2013	California (Estados Unidos)	El programa descentralizado para recolectar y procesar botellas PET ha producido una fuente de material posconsumo que tiene impactos ambientales mínimos y que la localización de los sitios de recolección y reprocesamiento es el factor que más influye en los impactos de los materiales posconsumo
	Zhang & Wen	2014	Beijin (China)	Los sectores informales y formales deben trabajar juntos para la construcción del sistema de recolección y reciclaje, también en campañas de educación para reducir el consumo, especialmente entre los jóvenes
	Matar, Jaber & Searcy	2014	Canadá	Desarrollaron un modelo para el manejo de inventario en una cadena de suministro de ciclo cerrado de botellas plásticas considerando (i) que no todos los materiales recolectados se recuperan sino que toman otras opciones de gestión, (ii) pueden también ir al relleno sanitario (RS) o son vendidos como materia prima de baja calidad, (iii) los costos sociales de rehabilitar los sitios de disposición final y (iv) involucra el uso de material biodegradable y su impacto en el modelo
Dinámica de sistemas	Vásquez	2005	Chile	Simularon el impacto de un plan de gestión para los residuos sólidos domiciliarios integrando los diversos componentes como: población, condición socioeconómica, recolección de residuos, vertederos ilegales de residuos, estaciones de transferencias y rellenos sanitarios.
	Dyson & Chang	2005	Texas (Estados Unidos)	Predijeron la cantidad de residuos sólidos que se generarían en una región determinada de forma que se pueda planificar y diseñar un sistema de gestión de residuos eficiente.
	Sufian & Balab	2007	Dhaka	Utilizan un modelo dinámico para predecir la generación, capacidad de recolección y cantidad de energía que se puede obtener de los residuos sólidos sometidos a incineración, además evaluar

La investigaciones presentadas en la Tabla 1, señalan la tendencia a indagar sobre la gestión de residuos de PET, resaltando la importancia de las campañas educativas y la definición de opciones de gestión para este residuo. Además, se confirma la aplicabilidad de la dinámica de sistemas para la gestión de diversos residuos sólidos, teniendo en cuenta variables como cantidad de generación, impactos ambientales y económicos; sin embargo, existe la oportunidad de desarrollar estudios dinámicos, es decir estudios donde se consideren las relaciones entre las diferentes variables apoyados en la dinámica de sistemas, a residuos posconsumo como el PET. Este tipo de estudios apoyan el proceso de toma de decisiones para el aprovechamiento de este material (Departamento Nacional de

Planeación, DNP, 2016).

Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo es estudiar dinámicamente el impacto ambiental del reciclaje de los residuos PET, con el fin de mejorar la toma de decisiones teniendo como base el Valle del Cauca. En la siguiente sección se presenta la metodología, seguido de los resultados, discusión y finalmente las conclusiones.

Materiales y métodos

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

La industria en la que se enfoca el estudio comprende los procesos de separación, selección, acopio, distribución, procesamiento y comercialización del PET tanto en su forma primaria como en productos terminados. Las variables y las relaciones constituyen los elementos necesarios para la construcción del diagrama causal, base fundamental para la simulación. Estas variables incluyen los elementos asociados a la fabricación y reciclaje del PET y los principales efectos ambientales, económicos y sociales relacionados con estas actividades.

DIAGRAMA CAUSAL

Identificadas las variables del modelo, se construyó el diagrama causal que explica el comportamiento del sistema: la actividad de reciclaje del PET y los efectos asociados. En dicho diagrama se identificaron los bucles de realimentación existentes, los cuales constituyen las estructuras primarias de los modelos de dinámica de sistemas.

DIAGRAMA DE FORRESTER

A partir del diagrama causal se desarrolló el diagrama de Forrester, el cual representa la interfase con el software de simulación (Vensim® V) ello permitió el desarrollo formal orientado al estudio de la situación en el tiempo.

SIMULACIÓN

La simulación se realizó para 25 años y se consideró la variación en la tasa de reciclaje de 24%, 30% y 40%. Esta simulación fue realizada en el software Vensim® de acuerdo con el diagrama de Forrester. Los datos utilizados corresponden a información relacionada con la fabricación de envases PET, generación de

residuos y reciclaje del PET en el Valle del Cauca, Colombia.

Resultados

IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Las variables se presentan en la Tabla 2 y se clasificaron teniendo en cuenta los marcos ambiental, económico y social (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2004).

Tabla 1. Definición de variables ambientales, económicas y sociales involucradas en el modelo
Fuente: Los autores

Marco	Variables	Unidad de medida
Ambiental: Contempla los efectos en el medio ambiente, consecuencia de la inadecuada disposición del PET, así como los generados por las actividades propias de la producción con materia prima virgen y reciclada	Consumo de agua por fabricación de PET reciclado Vs Consumo de agua producción de PET virgen	Litros/tonelada
	Consumo de energía por fabricación de PET reciclado Vs Consumo de energía producción de PET virgen	Kw-hr/tonelada
	Disminución de las reservas de petróleo por uso de material PET virgen	Galones/año
	Acumulación de PET en rellenos sanitarios	Toneladas
	Acumulación de PET en Botaderos a Cielo abierto	Toneladas
	Acumulación de CO ₂ en la atmósfera	Toneladas de CO ₂
Económico: Se enfoca en las posibles inversiones tanto del sector privado como del público en lo referente a mejoras del sistema de recolección de residuos o la creación de uno nuevo, así como de los impactos que tienen estas en el desarrollo de la economía	Efectos del precio en las tasa de reciclaje	\$
	Inversión pública y/o privada en el manejo de residuos	\$
	Efecto de la variabilidad del precio del material reciclado en la tasa de reciclaje	adimensional
Social: Se centra en las acciones que pueda o no tomar la población frente a la percepción de una problemática ambiental que afecta su región.	Efectos en la población por prácticas de manejo de residuos inadecuadas	adimensional

DIAGRAMA CAUSAL

En la Figura 1 se presenta el diagrama causal realizado. En el sistema se identificaron tres bucles, dos de refuerzo (R1 y R2) y uno de compensación (C1), los cuales se explican a continuación:

Comportamiento de la industria de reciclables (R1): Se aprecia que las empresas que reciclan PET en el Valle del Cauca, reaccionan ante un incremento de la demanda del PET reciclado invirtiendo recursos para incrementar la capacidad instalada. De este modo, aumentan la tasa de reciclaje del departamento del Valle del Cauca, ofertando al mercado una mayor cantidad de PET obtenido mediante reciclaje. El mercado a su vez, reacciona ante la sobreoferta disminuyendo el precio de PET reciclado, lo cual disminuye progresivamente el uso de materia

prima virgen, ya que los demandantes de resina PET encontrarán más atractivo usar PET reciclado en lugar de PET virgen.

Este efecto es retroalimentado y hace crecer la demanda de PET reciclado; sin embargo, la disminución exagerada en el precio de PET reciclado tiene un impacto en la tasa de reciclaje, ya que los recolectores de este material encontrarán poco atractivo reciclarlo, ya que no les representaría utilidades.

Influencia del PET reciclado en la adquisición de PET virgen (R2): Evidencia cómo el uso de material reciclado se ve influenciado por los incrementos en la producción de botellas PET y la utilización de material reciclado. Entre mayor fabricación de botellas PET y menor sea el consumo de materiales reciclados, mayor será el uso de PET virgen.

Comportamiento del precio del PET (C1): Se observa cómo el precio de la resina virgen se ve afectado por las reservas de petróleo, las cuales se ven afectadas por el consumo de petróleo asociada al uso de PET virgen. Este bucle es de realimentación de compensación

DIAGRAMA DE FORRESTER

Las variables de nivel para el diagrama de Forrester presentado en la Figura 2 corresponden a Reserva de Petróleo (Energy Information Administration, 2016), Inventario de Resina PET Virgen (PETRECOL, 2013), PET transformados en artículos, Generación de Residuos PET, Acumulación de PET en Botaderos a Cielo Abierto, Acumulación de PET en Rellenos Sanitarios, Inventario de Resina PET Reciclada y Acumulación de CO2 en la atmósfera (PETRECOL, 2013). Estas variables y las relaciones establecidas en el diagrama mostraron los efectos en el ambiente como la reducción de la vida útil de los rellenos sanitarios al disponer materiales que se pueden aprovechar y el comportamiento de dichas variables ante escenarios de estudio, todo ello para fortalecer los procesos de toma de decisiones respecto a la gestión del PET.

SIMULACIÓN

En la Figura 3a se muestra el crecimiento del 9% anual en el consumo de envases PET, lo cual refleja un aumento en la misma proporción de residuos generados de este material. Cabe mencionar que independientemente de la tasa de reciclaje que se utilice, la generación de residuos

mantendrá su crecimiento porque no depende directamente del reciclaje, si no de los patrones de consumo de la población.

Figura 1. Diagrama causal
Fuente: Elaborado por los autores

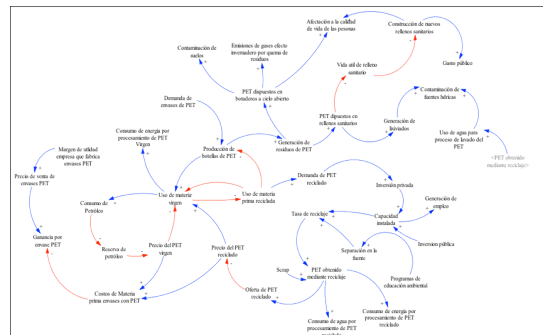


Figura 2. Diagrama de Forrester
Fuente: Elaborado por los autores

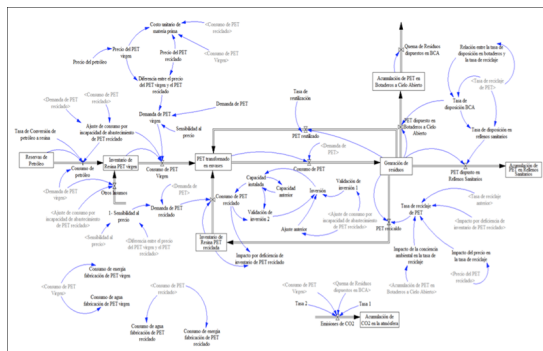


Figura 3a. Consumo de PET y generación de residuos PET

Consumo de PET	TR 40%
Generación de residuos PET	TR 30%
	TR 24%

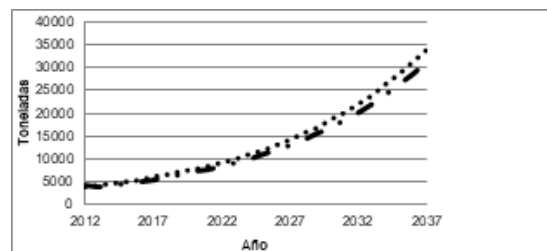


Figura 3b. Acumulación de PET en rellenos sanitarios a variaciones de la tasa de reciclaje

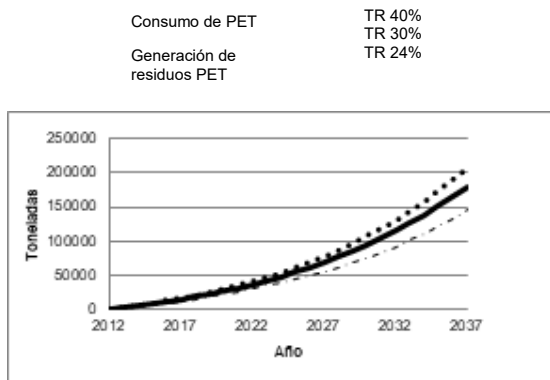


Figura 3. Simulación de variables
Fuente: Los autores

En lo referente a la disposición final, los impactos ambientales son acumulativos y de largo plazo porque el PET tiene un tiempo de degradación de entre 100 y 500 años. Como se puede observar en la Figura 3b, al incrementar la tasa de reciclaje se logra prolongar la vida útil de los RS y además reducir la generación de lixiviados y contaminantes para las aguas subterráneas debido a la sudoración de los envases y la acumulación de aguas lluvias.

También se simuló el comportamiento de las reservas de petróleo ante variaciones de la tasa de reciclaje (TR), ya que la dependencia de materia prima proveniente del petróleo es uno de los aspectos ambientales asociados a la producción de PET virgen. Para la TR del 24%, las reservas de petróleo presentan una disminución más acelerada debido al mayor consumo de materiales vírgenes para satisfacer la demanda.

Adicionalmente, se observó que ante incrementos en la tasa de reciclaje, la cantidad de agua utilizada para la producción de PET incrementa, debido a que la producción de PET reciclado requiere cantidades de agua mayores a las del PET virgen debido a la necesidad de lavado del material (Plastic Waste Management Institute, PWMI, 2016).

En relación con el consumo de energía, los Kilovatios hora utilizados para la producción de PET virgen en las diferentes TR evaluadas, superan los utilizados para la obtención del PET reciclado. Estos resultados son similares a los reportados el PWMI (2016), Firas, & Dumitru

2005) y la Corporación Ambiental Empresarial, CAEM (s.f).

Así mismo, se evaluó la cantidad de residuos depositados en botaderos a cielo abierto (BCA). Si se presentan bajas tasas de reciclaje la cantidad de residuos depositados en BCA aumenta; sin embargo, con la puesta en marcha de políticas como el CONPES 3874 (DNP, 2016) y la Política de Producción y Consumo Sostenible (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) se lograría una disminución considerable de los residuos depositados en BCA. Se detectó que el reciclaje de residuos PET puede disminuir la cantidad de emisiones de CO₂ teniendo en cuenta la problemática asociada al calentamiento global y el cambio climático, lo cual coincide con el análisis presentado por Kuczenski, & Geyer (2013). Similarmente, se reporta que por cada libra de PET reciclado se reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en 71% (Zhang & Wen, 2014).

Discusión

Con el diagrama causal se representó la complejidad del sistema asociado a la producción y reciclaje del PET y los impactos ambientales tanto de la fabricación como de su reincorporación en los procesos productivos. Adicionalmente a los tres bucles descritos, se vincularon en el diagrama los efectos en las variables ambientales a saber: la vida útil del RS, los consumos de agua y energía, la generación de CO₂ y el consumo de petróleo.

En cuanto a la vida útil del relleno se sabe que el RS de Colomba El Guabal, en el municipio de Yotoco recibe los residuos de 10 municipios del Valle del Cauca y cinco del Cauca. En total son 2300 toneladas diarias de residuos y tiene un área de disposición con una vida útil proyectada al año 2032 (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, SSPD, 2016). Por lo tanto, para extender la vida útil de este RS es necesario cambiar las tendencias de consumo de la población y considerar los costos de disposición asociados al uso de la tierra, contaminación ambiental y rehabilitación de los sitios como los sugieren Matar, Jaber & Searcy (2014).

En cuanto al consumo de petróleo, debe tenerse en cuenta que el 4% de todo el petróleo producido es destinado para la industria petroquímica y que el 64% de una tonelada de PET es petróleo (Plastic Waste Management Institute, PWMI,

2016), por lo tanto de continuarse con el consumo actual de petróleo se llegará a un punto en que no se contará con reservas suficientes para elaboración de materiales plásticos vírgenes en la industria.

Por otro lado, los informes de PWMI (2016), Firas, & Dumitru (2005) y la Corporación Ambiental Empresarial, CAEM (s.f) sugieren que la producción de PET reciclado requiere entre un 45% y 60% menos energía que la fabricación de materiales vírgenes debido principalmente a la cantidad de calor necesaria para transformar el material en productos terminados. Por cada libra de PET reciclado se reduce el uso de energía en 84% (Zhang & Wen, 2014).

En relación con la disposición de residuos en BCA, es pertinente destacar que se disponen 212.7 Ton/día en diferentes municipios de Colombia; en el Valle del Cauca, el municipio El Águila cuenta con este sistema de disposición final (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, SSPD, 2015). Esta práctica es aún usada en zonas rurales y aledañas a los municipios en el Valle del Cauca donde los sistemas de recolección de residuos tienen poco o ningún acceso, por lo tanto considerar el reciclaje de los PET contribuiría a erradicar esta práctica.

El reciclaje de PET también evidencia la importancia de mejorar la coordinación entre los sistemas de recolección, producción y disposición final con el propósito de incrementar la cantidad de PET recuperado (Matar et al., 2014). De este modo se controlaría la producción de PET virgen y la disposición y tratamiento de los residuos PET posconsumo, las cuales se consideran las dos fuentes principales de generación de CO₂ asociadas a los residuos PET (Coelho, Castro & Gobbo, 2011).

Conclusiones

El impacto ambiental asociado al PET es una problemática derivada de las nuevas tendencias de consumo y las iniciativas incipientes de reciclaje, por lo que es importante hacer seguimiento a las políticas de gestión de residuos y fortalecer los procesos de toma de decisiones, como aquellos relacionados con las opciones de diseño de productos y reutilización de materia prima, para generar un impacto positivo en el ambiente. Es importante evaluar los efectos ambientales positivos asociados a la gestión

adecuada del PET de forma dinámica, pues si bien se observa en la simulación que con el incremento en el reciclaje se aumenta el consumo de agua (lo que podría pensarse un efecto adverso), también se disminuye el consumo de energía, se aumenta la vida útil de los rellenos sanitarios y se disminuyen las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Por esta razón, el modelo presentado ofrece un enfoque dinámico al incluir diferentes variables ambientales asociadas con el proceso; sin embargo, se sugiere hacer una evaluación multicriterio como complemento al estudio, para confirmar el efecto positivo para el ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones y Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Cali-Colombia por el apoyo recibido para desarrollar este trabajo.

Referencias

- Coelho, T. M., Castro, R., & Gobbo, J. A. (2011). PET containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 291-299.
- Corporación Ambiental Empresarial, CAEM. (s.f.). Guía metodológica para el uso eficiente de la energía en el sector: Plástico. Disponible en http://www.caem.org.co/documentos/600_GUIA_METODOLOGICA_PLASTICOS.pdf
- Energy Information Administration (EIA) (2016). Total Petroleum and Other Liquids Production 2016. Disponible en <https://www.eia.gov>
- Enka (2015). Informe de Sostenibilidad 2015. Disponible en <http://www.enka.com.co/enka/index.php/es/content/download/300/4746/file/SOSTENIBILIDAD+2015+FINAL.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación y Banco Mundial (2015). Estrategia Nacional de Infraestructura. Sector Residuos Sólidos. Bogotá D.C.
- Departamento Administrativo de Planeación Municipal (2014). Cali en Cifras 2013. Alcaldía de Santiago de Cali, Colombia.

- Departamento Nacional de Planeación, DPN (2016). CONPES 3874. Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Bogotá, Colombia.
- Dyson B. & Chang N.B. (2005). Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. *Waste Management*, 25(7), pp. 669-679.
- Firas, A. & Dumitru, P. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, pp. 1453-1477.
- Kuczynski, B., & Geyer, R. (2013). PET bottle reverse logistics—environmental performance of California's CRV program. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(2), 456-471.
- Matar, N., Y. Jaber, M., & Searcy, C. (2014). A reverse logistics inventory model for plastic bottles. *The International Journal of Logistics Management*, 25(2), 315-333.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2004). Guía ambiental sector plásticos, Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible. Bogotá D.C.
- Plastic Waste Management Institute, PWMI (2016). An introduction to plastic recycling.
- PETRECOL S.A. (2013). Informe sobre consumo de PET en el Valle del Cauca. Zona Industrial Acopi-Yumbo
- Rodríguez B, L.A., González E, N., Reyes R, L. S., & Torres R, A. F. (2013). Sistema de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Enfoque de dinámica de sistemas. *Sistemas & Telemática*, 11(24) pp 39-53.
- Rojas, J.F (2016). Colombia entierra millones de pesos por no reciclar. Artículo en el diario El colombiano. Medellín, Colombia. Enero 10 de 2016.
- Socya (2016). Reporte de Sostenibilidad. Disponible en www.socya.co/portal/wp-content/uploads/2017/05/Reporte-de-Sostenibilidad-Socya-2016-web.pdf
- Suárez, (2016). Solo el 26% de las botellas plásticas se recicla, Artículo en el diario La República, 10 de Marzo 2016, http://www.larepublica.co/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla_357536.
- Sufian, M. & Balab, B. (2007). Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city. *Waste Management*, 27(7), pp. 858-868.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, SSPD (2015). Disposición Final de Residuos Sólidos, Informe Final. República de Colombia.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, SSPD (2016). Superservicios atenta a operación del relleno sanitario de Yotoco y racionamientos de agua en el Valle del Cauca. Disponible en www.superservicios.gov.co/Sala-de-prensa/Comunicados/Superservicios-atenta-a-operación-del-relleno-sanitario-de-Yotoco-y-a-racionamientos-de-agua-en-el-Valle-del-Cauca
- United States Environmental Protection Agency (2015). Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures 2013.
- Vásquez, O. (2005). Modelo de simulación de gestión de residuos sólidos domiciliarios en la Región Metropolitana de Chile. *Revista de Dinámica de Sistemas*, 1 (1), pp. 27-52.
- Ye, G., Yuan, H., Shen L. y Wang, H. (2012). Simulating effects of management measures on the improvement of the environmental performance of construction waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, pp. 56-63.
- Zhang, H., & Wen, Z. G. (2014). The consumption and recycling collection system of PET bottles: a case study of Beijing, China. *Waste Management*, 34(6), 987-998.T