

**Modelo de simulación dinámica para
evaluar el impacto ambiental de la
producción y logística inversa
de las llantas**

Dynamic simulation model to evaluate the
environmental impact of production and
reverse logistics of tire

Santiago Camargo Rodríguez*
Jessica Andrea Franco López**
Universidad del Valle, Colombia
Vivian Lorena Chud Pantoja***
Universidad Santiago de Cali, Colombia
Juan Carlos Osorio Gómez****
Universidad del Valle, Colombia

* Ingeniero Industrial de la Universidad del Valle. santiago.camargo@correounivalle.edu.co

** Ingeniera Industrial de la Universidad del Valle. jessica.franco@correounivalle.edu.co

*** Ingeniera Industrial, Magíster en Ingeniería Industrial. Profesora Facultad de Ingeniería, Universidad Santiago de Cali. vivianchud@usc.edu.co

**** Ingeniero Industrial, Magíster en Ingeniería Industrial. Profesor Titular Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad del Valle. juan.osorio@correounivalle.edu.co

Correspondencia: Vivian Lorena Chud. 518 30 00 Ext 358. Carrera 62 Calle 5.

Resumen

Este artículo presenta un modelo de dinámica de sistemas que permite evaluar el impacto ambiental generado por la logística inversa de las llantas para automóviles. Se utiliza la dinámica de sistemas para explicar el comportamiento de las emisiones generadas por cuatro procesos: la producción de llantas nuevas, el reencauche, la trituración mecánica y el co-procesamiento, en los tres últimos se pueden aprovechar las llantas una vez estas se convierten en residuo. El impacto ambiental de la red logística inversa permite el análisis de diferentes variables ambientales que caracterizan al sistema, entre las cuales se encuentran las emisiones de dióxido de carbono, el consumo de petróleo y el consumo de agua. También se analizan diferentes escenarios para evaluar la sensibilidad del modelo propuesto e identificar las disposiciones que mayor y menor contaminación generan, además permiten reconocer cual es el proceso de producción que reduce las emisiones.

Palabras claves: Co-procesamiento de llantas, dinámica de sistemas, Logística inversa de las llantas, producción de llantas, reencauche, trituración mecánica de llantas.

Abstract

This article presents a system dynamics model which evaluates the environmental impact caused by the reverse logistics of car tires. System dynamics is used to explain the behavior of the emissions generated by four processes, the production of new tires, retreading, mechanical crushing and co-processing, the last three refer to processes where you can use the tires once these become waste. The environmental impact of reverse logistics network allows the analysis of different environmental variables that characterize the system, among which are the carbon dioxide emissions, oil consumption and water consumption. Different scenarios are also analyzed to evaluate the sensitivity of the proposed model and identify the disposal that generate more and less contamination, as well as to recognize the production process that reduces emissions.

Keywords: Mechanical crushing wheels, retread, reverse logistics tire, system dynamics, tire co-processing, tire production.

Fecha de recepción: 19 de mayo de 2016
Fecha de aceptación: 13 de marzo de 2017

I. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento poblacional, el incremento en el consumo de bienes ha hecho necesario considerar qué hacer con los residuos de los productos, más cuando se considera que muchos de los residuos poseen potenciales aplicaciones al reincorporarlos en el flujo productivo a través de la denominada logística inversa [1].

Estas actividades de logística inversa han sido consideradas por varios autores como solución para la gestión de residuos [2], Morales establece que las actividades asociadas a esta gestión pueden ser el reciclado, la reutilización, la eliminación, la reparación y la remanufactura, principalmente [3].

Teniendo en cuenta lo anterior, se encuentran procesos donde los residuos de llantas pueden ser reutilizados, pues las propiedades de sus materiales permiten diferentes disposiciones finales para alargar el ciclo de vida o darle una adecuada eliminación. Ellos son: el reencauche, el cual consiste en retirar la banda de rodamiento ya gastada por el uso y reemplazarla por una nueva; la trituración mecánica, en la que se separa el caucho de las partes metálicas de la llanta y por medio de cuchillas, y se reduce el tamaño hasta convertirlo en pequeños granos, los cuales pueden ser usados en la pavimentación de calles; y el co-procesamiento, que se refiere al uso de las propiedades caloríficas de las llantas en hornos, principalmente cementeros.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial estima que en Colombia las llantas generan una cantidad de residuos cercana a las 61.000 toneladas al año [4], de esta cantidad más de 71% van a los rellenos sanitarios o son incineradas, es decir, que este gran porcentaje no se aprovecha mediante la reutilización o el uso en otras actividades de sus componentes. De la cantidad que se aprovecha, son utilizadas en reencauche un poco más del 17%, van para uso artesanal el 6,2%, se llevan a regrabado el 2,3% y, en otros usos, un 2% adicional [5]. Debido a la cantidad de llantas desechadas y los problemas ambientales generados por la mala disposición de estas al final de su ciclo de vida, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante el Decreto 1457 del 29 de julio de 2010 definió el objeto:

Establecer a cargo de los productores de llantas que se comercializan en el país, la obligación de formular, presentar e implementar los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, con el propósito de prevenir y controlar la degradación del ambiente. (p. 2)

Para que las empresas productoras de llantas puedan llevar a cabo el proceso de recogida de las llantas, estas deben implementar un programa de logística inversa dentro de sus funciones, y así darles una adecuada eliminación, además Gómez [5] resalta que la logística inversa sirve para medir el desempeño en cuanto a factores económicos, legales, ambientales y operacionales. Igualmente dice que las empresas deben de informar sobre las prácticas de sostenibilidad que llevan a cabo, y servir como un punto de referencia frente a los competidores, al tiempo que en los informes se incluyan medidas o indicadores del rendimiento de la compañía.

De acuerdo con la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (Anla) [6], la evaluación del impacto ambiental tiene carácter predictivo y preventivo, dado que busca predecir los impactos y suministrar la información que permita tomar las decisiones adecuadas en función de las políticas establecidas para la prevención, acompañadas del cumplimiento de la parte normativa, específicamente en el campo ambiental. Debido a que estos sistemas son dinámicos, debe existir una revisión permanente y una actualización de los estándares en función de los acontecimientos [7]. Por estas razones, las empresas que fabrican o comercializan las llantas deben establecer un sistema que les permita evaluar cómo se comportan las emisiones ambientales cuando se recolectan, remanufacturan, reparan o se llevan a cabo procesos que eviten que las llantas al final de su ciclo de vida lleguen a los rellenos sanitarios, sean incineradas o tengan una disposición final no permitida por las leyes ambientales.

Diferentes autores han investigado el tema de la logística inversa mediante la dinámica de sistemas en la que se estudian situaciones ambientales, entre los cuales se encuentran Rodrigues et al. [8], quienes desarrollaron una aplicación de la administración basada en modelos ambientales de remanufactura de equipos electrónicos, seleccionaron las variables que conforman la representación del sistema de remanufactura de los equipos electrónicos, y establecieron las relaciones para simular la influencia de esfuerzo de recogida y las necesidades de materia prima, inventario útil, conciencia ambiental, costos de remanufactura y costo total de fabricación. Por su parte, Yao et al. [9] diseñaron un modelo para evaluar el comportamiento medioambiental de la gestión de los residuos de construcción y prestaron atención a las interrelaciones e interacciones dinámicas que pueden influir en el medioambiente. Najeeb y Abdul-Kader [10] elaboraron un modelo

de medición de desempeño de logística inversa mediante la integración de Balanced Score Card (BSC). El modelo propuesto pretende mejorar el desempeño de las empresas, mostrando caminos para el diseño de sistemas de medición y lograr los objetivos de las operaciones de logística inversa. Valencia et al. [11] presentan un modelo de dinámica de sistemas en el cual se estudia el impacto ambiental asociado a la producción y disposición final de envases PET para alimentos, contemplando la opción de reciclar los envases y utilizarlos como materia prima.

Considerando estos elementos, se ha desarrollado un modelo sistémico que evalúe el impacto ambiental de la producción y logística inversa de llantas, buscando que sirva como herramienta para la toma de decisiones ambientales en este aspecto.

II. METODOLOGÍA

Para desarrollar la propuesta, se realizó una revisión bibliográfica en la cual no se encontró un referente que haya abordado la logística inversa de las llantas mediante la dinámica de sistemas, por lo que se plantea que el modelo aquí presentado constituye un primer aporte en este tema de investigación.

El modelo realizado evalúa los principales impactos ambientales generados por tres procesos que se pueden llevar a cabo con las llantas una vez estas se conviertan en residuo: coprocesamiento, reencauche y trituración mecánica. En la Fig. 1 se presenta la representación causal de la logística inversa de las llantas, la cual se explica a continuación. Dado que todas las actividades involucran procesos de transformación tanto de las materias primas como de los productos terminados, los impactos estudiados se vinculan a los controles ambientales existentes.

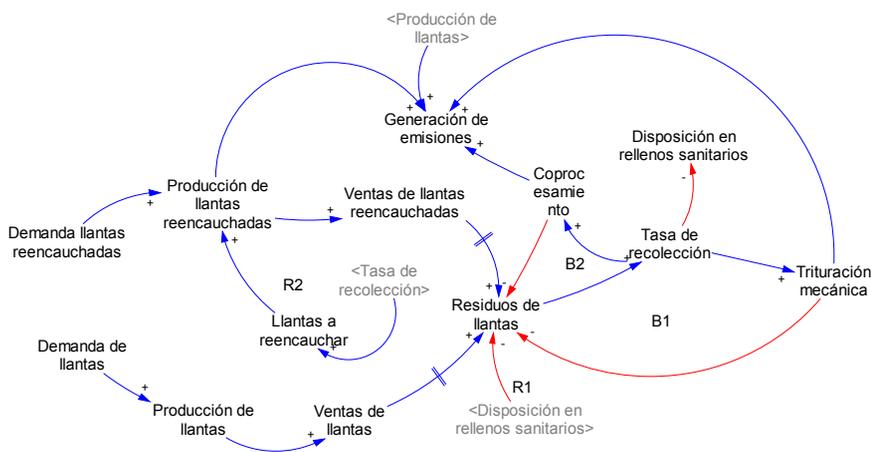


Figura 1. Diagrama causal de la logística inversa de las llantas.

En la Fig. 1, se pueden observar cuatro bucles de realimentación, dos son de refuerzo (R1 y R2) y dos de compensación (B1 y B2). Los cuatro bucles representan las relaciones de influencia asociadas a las actividades de disposición final comentadas y el impacto que dichas actividades generan al ambiente. Se procede a continuación a explicar cada uno de los bucles identificados.

En la Fig. 2 se presenta el bucle de refuerzo que involucra el residuo de llantas y la tasa de recolección de manera que si se presenta un incremento en esta tasa, se tendrá una disminución de las llantas que van al relleno sanitario y por tanto, se contará con más residuos para otros usos.

El otro bucle de refuerzo se presenta en la Fig. 3; cuando aumentan los residuos de llantas se presenta un aumento en la tasa de recolección, de manera que haya más llantas para ser reencachadas y por tanto, más producción de dichas llantas. En la medida en que esta producción se incrementa existirán mayores ventas de ellas, y con el paso del tiempo, del uso y deterioro, estas se convierten nuevamente en residuos.

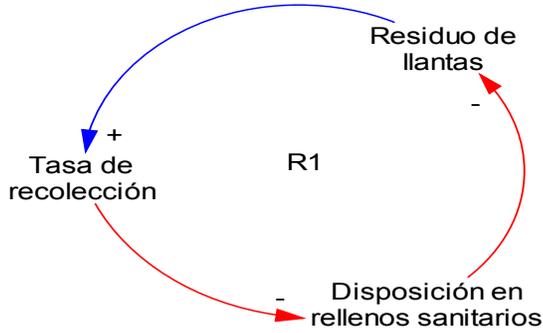


Figura 2. Bucle de refuerzo: Disposición en rellenos sanitarios.

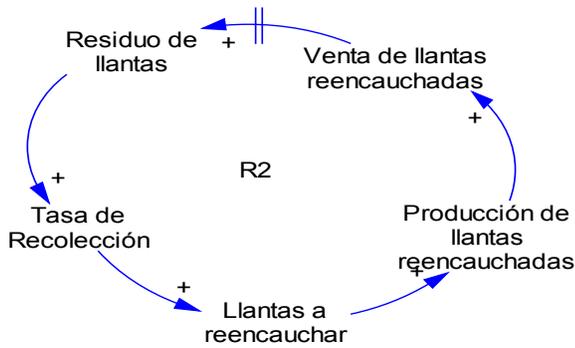


Figura 3. Bucle de refuerzo: Producción de llantas reencauchadas.

En la Fig. 4 se presenta el primer bucle de compensación, en el cual se representa el efecto reparador sobre los residuos de llantas al realizar la actividad de trituración, dichos residuos disminuyen en la medida que se realiza la trituración mecánica.

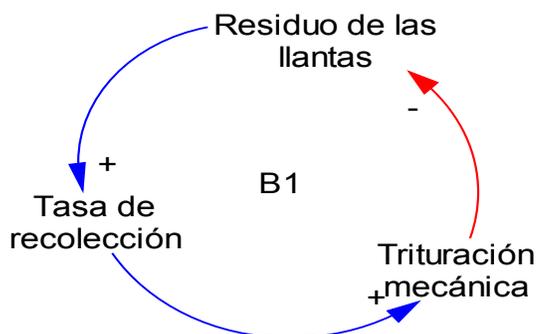


Figura 4. Bucle de compensación (Trituración).

Por otro lado, en la Fig. 5 se presenta el otro bucle de compensación en el que se representa la relación existente entre la disposición final a co-procesar y su efecto inverso en el residuo de las llantas, ya que en la medida en que se tiene más cantidad de residuos de llantas también se tiene una tasa mayor de recolección y por lo tanto, se contará con más llantas para co-procesar de manera que los residuos disminuyan.

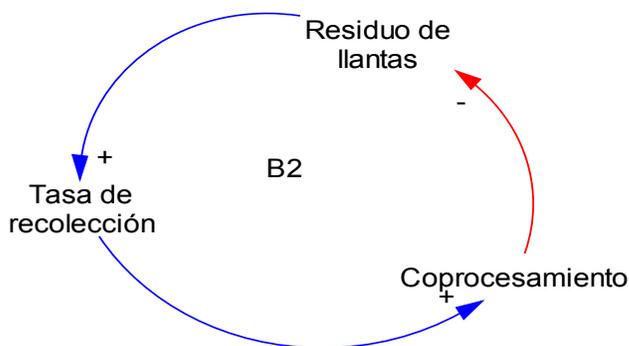


Figura 5. Segundo bucle de compensación (Co-procesamiento).

Adicionalmente a los bucles presentados, para lograr realizar la simulación fue necesario definir el tipo de llantas y la información pertinente para incluir en el modelo. Se escogieron las llantas para automóviles de servicio particular de rin 13 a 17 [12] y se utilizó la información de la ciudad de

Bogotá, debido a que allí se encuentra la mayor cantidad de documentación para realizar el análisis.

Se tiene entonces, que los vehículos particulares representan el 92% de los registrados en la ciudad, donde el 57,72% son automóviles [13], además empresas como el Grupo Guerrero González S.A. de la ciudad dedican el 45% de la producción de llantas reencauchadas a vehículos livianos [14], y respecto al costo de reencauchado de llantas para automóviles, se puede ahorrar hasta el 49,11% frente a las llantas nuevas [15].

La Alcaldía Mayor de Bogotá, en el informe de movilidad en cifras [13], muestra el registro de automóviles desde el año 2002 al 2011. De este informe se toma el número de automóviles para la elaboración de la Tabla 1, en la cual se calcula la demanda de llantas nuevas y reencauchadas para automóviles de la ciudad.

Tabla 1. Cálculo de la demanda de llantas nuevas y reencauchadas

| Año | Auto- móviles (A) | Llantas en uso (B) (Ax4) | Llantas de carros nuevos (C) | Índice de generación de llantas usadas (D) | Residuos de llantas generados (E) (AxD) | Demanda de llantas (F) (E+C+1) | Demanda de llantas reen- cauchadas (G) (3%xF) |
|------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------|---|---|--------------------------------------|--|
| 2002 | 350.904 | 1.403.616 | | 1,72 | 603.555 | 783.970,880 | 18.107 |
| 2003 | 396.008 | 1.584.032 | 180.416 | 1,72 | 681.134 | 869.097,760 | 20.434 |
| 2004 | 442.999 | 1.771.996 | 187.964 | 1,72 | 761.958 | 939.774,280 | 22.859 |
| 2005 | 487.453 | 1.949.812 | 177.816 | 1,72 | 838.419 | 1.039.215,160 | 25.153 |
| 2006 | 537.652 | 2.150.608 | 200.796 | 1,72 | 924.761 | 1.162.689,440 | 27.743 |
| 2007 | 597.134 | 2.388.536 | 237.928 | 1,72 | 1.027.070 | 1.243.506,480 | 30.812 |
| 2008 | 651.243 | 2.604.972 | 216.436 | 1,72 | 1.120.138 | 1.296.825,960 | 33.604 |
| 2009 | 695.415 | 2.781.660 | 176.688 | 1,72 | 1.196.114 | 1.445.413,800 | 35.883 |
| 2010 | 757.740 | 3.030.960 | 249.300 | 1,72 | 1.303.313 | 1.631.548,800 | 39.099 |

Fuente: Adaptado de [13].

Los datos de la columna (A) hacen referencia al número de automóviles que se encontraban en la ciudad de Bogotá durante los años 2002 a 2010; las llantas en uso (B) se obtienen de multiplicar la columna (A) por el número de llantas que utilizan los automóviles (4 llantas/ Automóvil). La columna (C) indica el número de carros nuevos por periodo (el aumento con res-

pecto al periodo anterior). El índice de generación de llantas usadas (D) es el número de residuos que se genera por automóvil (1,72 estipulado por la Secretaría Distrital de Ambiente en el diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados creados por el parque automotor de Bogotá). Con este índice se procede a calcular el residuo de llantas generado por todos los automóviles (E). Para el cálculo de la demanda de llantas (F) se utiliza la suma de los residuos de llantas generados (E) más el aumento de llantas de carros nuevos del próximo periodo (C). Según la Secretaría Distrital de Ambiente en su estudio, el 3% de las llantas que están en uso son reencauchadas, por lo tanto para el cálculo de la demanda de llantas reencauchadas (G) se está asumiendo el 3% de la demanda de llantas.

Para realizar la simulación del modelo, es necesario tener en cuenta la demanda de llantas nuevas y reencauchadas, ya que el modelo propuesto exige una distinción de estas. Para ello se realizó el pronóstico de la demanda total de llantas, el cual fue realizado con los datos de la Tabla 1 y se utilizó la regresión matemática para el cálculo. En la Fig. 6 se muestra el comportamiento del pronóstico de demanda, en la cual se observa que la tendencia es creciente y que el pronóstico se ajusta a la demanda.

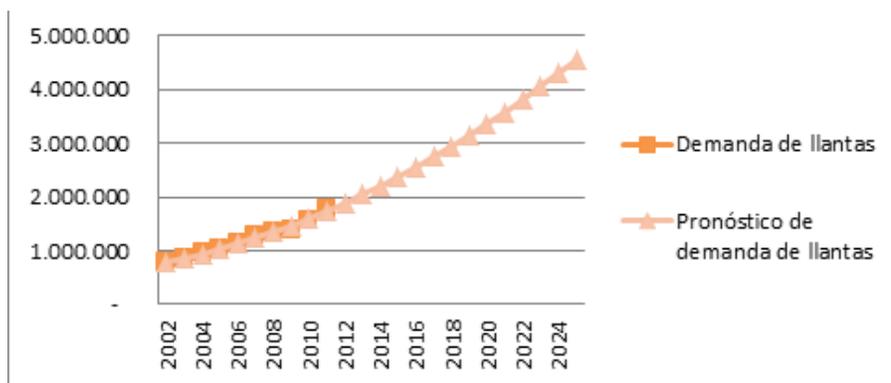


Figura 6. Comportamiento de la demanda versus el pronóstico de demanda de llantas.

Después de tener los datos del pronóstico de la demanda de llantas nuevas y reencauchadas se procedió a establecer los datos iniciales de las variables de nivel. La simulación en el estudio abarca desde el año 2012 al 2025 y se tiene en cuenta que la tasa de recolección para el año 2012 debió ser del 20%

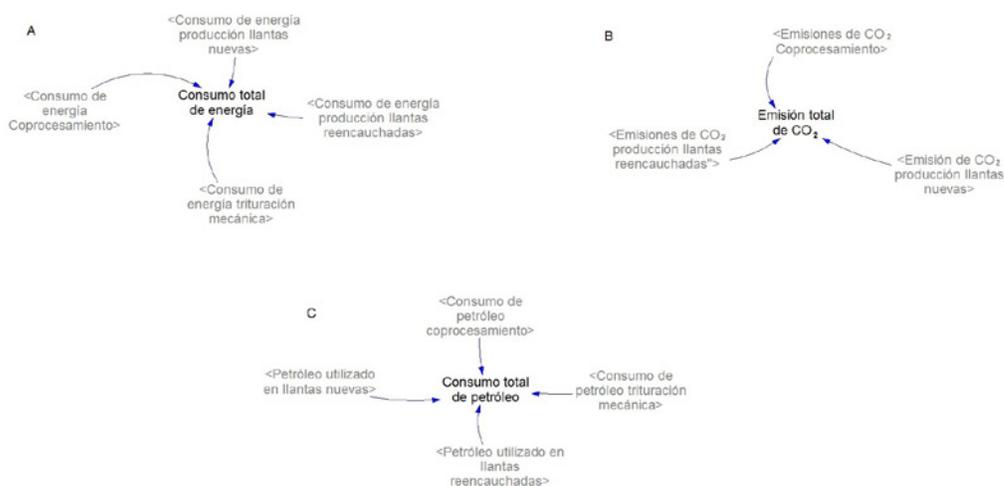


Figura 8. Medidas de desempeño ambiental estudiadas.

Inicialmente se analizó el comportamiento de las variables “llantas nuevas en el mercado”, “llantas reencauchadas en el mercado” y “residuos de llantas”. El comportamiento de estas variables se puede observar en la Fig. 9, donde se evidencia una tendencia creciente, que representa la demanda de las llantas, también se puede observar que las llantas nuevas en el mercado sobrepasan los residuos de llantas, los cuales son alimentados en mayor cantidad por las llantas nuevas que terminan su ciclo de vida.

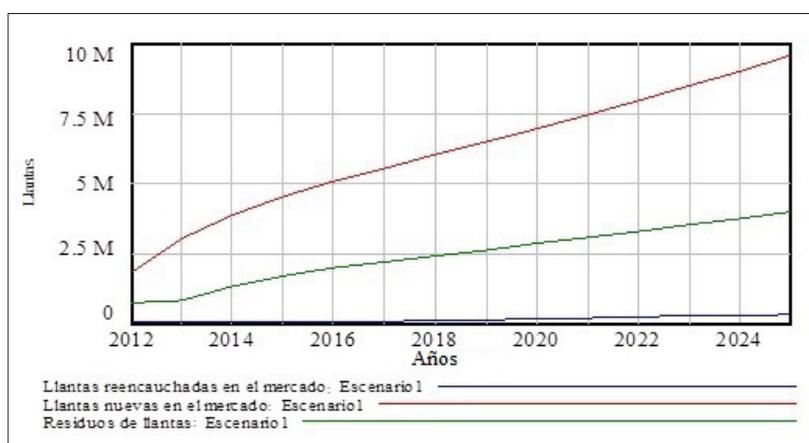


Figura 9. Comparación entre las llantas que se encuentran en el mercado y los residuos de llantas.

También se muestra el comportamiento de las variables: “residuos de llantas”, “residuos de llantas recolectados” y “llantas en el relleno sanitario”, que se puede observar en la Fig. 10, donde se evidencia que los residuos de llantas tienen tendencia creciente acorde a la demanda de llantas, como ya se había mencionado antes.

Como era de esperarse, las llantas recolectadas muestran con el tiempo un aumento, pues la tasa de recolección estipulada por la política ambiental es progresiva hasta el año 2021; después la tasa de recolección se mantiene constante. Respecto a las llantas en el relleno sanitario, se muestra una acumulación que aumenta en cada periodo de simulación y que con el tiempo sobrepasa los residuos de llantas.

Las llantas cuando no son dispuestas a triturar, a reencauchar o a co-procesar son –infortunadamente– situadas en lugares que prohíbe la Resolución 1457. En este estudio estas otras disposiciones no se analizan, pero el modelo supone que las llantas en el peor de los casos son llevadas a los rellenos sanitarios, y se evidencia su acumulación en grandes cantidades. Según el modelo, para el año 2025 la demanda de llantas de automóviles es de 4.547.984, los residuos de llantas que se tendrán para ese mismo año será de 2.651.000, y 13.870.00 llantas de automóvil no serían recolectadas para alargar su vida útil o darles una disposición adecuada.

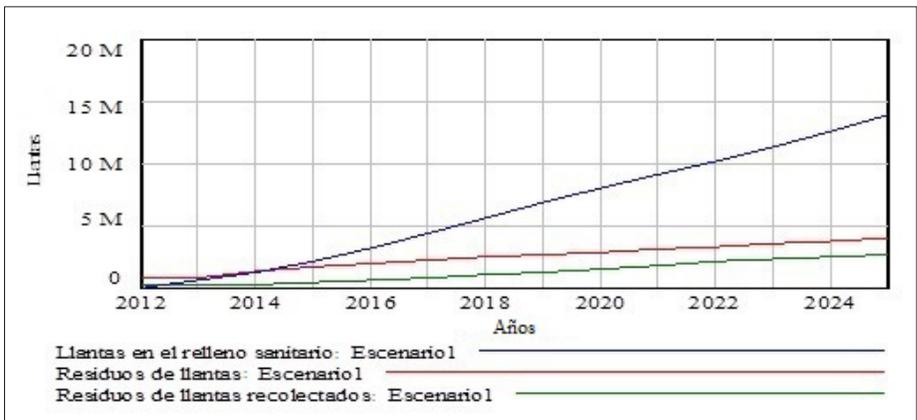


Figura 10. Comportamiento de los residuos de llantas.

Las siguientes variables a analizar son las correspondientes a las disposiciones finales, las cuales son: disposición a co-procesamiento, disposición a reencauchar y disposición a triturar. El comportamiento de estas variables se muestra en la Fig. 11, donde se aprecia que cada año se presenta un aumento en el número de llantas que son colocadas para los diferentes procesos. Es de esperarse que en el co-procesamiento sea la que mayor flujo de residuos de llantas presente, pues la tasa de esta disposición también es la mayor. Para el año 2025, si se mantienen estas tasas de disposición final, 1.906.000 de residuos de llantas serán dispuestos a co-procesar, 455.895 a reencauche y 286.259 a trituración mecánica. Estos valores representan un aumento porcentual de 352%.

Es importante tener en cuenta que no todas las llantas que se recolectan para reencauchar se ingresan al sistema de producción, esto se presenta porque la demanda de llantas reencauchadas se logra satisfacer con poca cantidad de residuos.

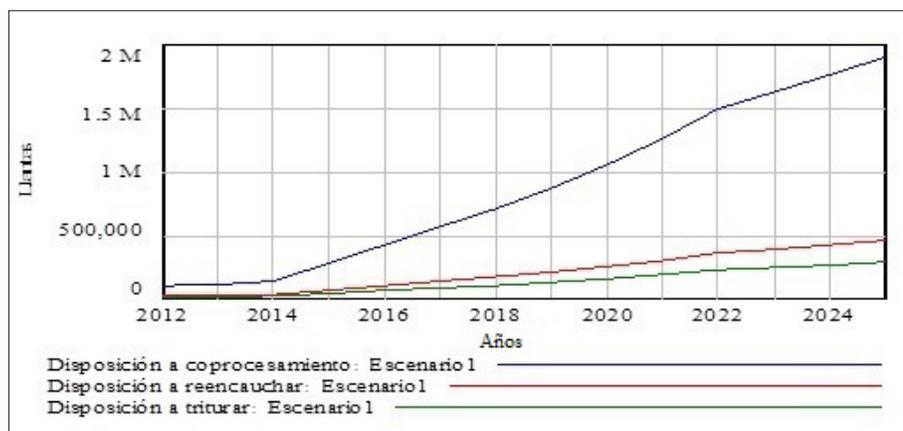


Figura 11. Comparación de las disposiciones finales.

Para efectos de comparación y toma de decisiones frente al consumo total de petróleo, se muestra el resultado del impacto para la producción de llantas y las tres disposiciones finales estudiadas en la Fig. 12. El comportamiento de las tres disposiciones finales en la ilustración no se puede apreciar porque la cantidad de litros de petróleo que se consumen por la producción de llantas nuevas es de mayor magnitud que la cantidad de litros que se consumen por

cada disposición final, sin embargo, los resultados muestran que la producción de llantas nuevas es la que mayor consumo de petróleo genera, seguido de la producción de llantas reencauchadas, el co-procesamiento y por último la trituración mecánica de estas.

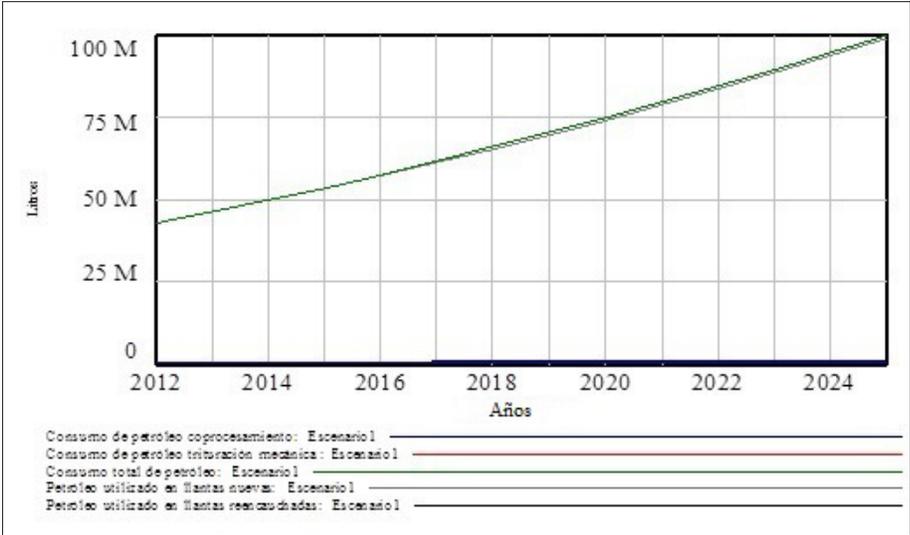


Figura 12. Comparación del consumo de petróleo para la producción de llantas nuevas y las disposiciones finales estudiadas.

La segunda comparación se muestra en la Fig. 13, en la cual se observa el comportamiento de las emisiones totales de CO₂. Es importante aclarar que, según la bibliografía consultada [16], no se mencionan emisiones de CO₂ para la trituración mecánica de los residuos de llantas, se observa entonces el comportamiento para el co-procesamiento, la producción de llantas nuevas y reencauchadas.

Las emisiones de CO₂ para la producción de llantas nuevas sobrepasa en gran medida la cantidad de emisiones generadas para la producción de llantas reencauchadas y el co-procesamiento, esto debido a que la cantidad de llantas dispuestas a reencauchar y co-procesar son muy pocas en comparación a las llantas nuevas que se producen.

También, la Fig. 14 presenta el comportamiento de las emisiones de CO₂ para las llantas reencauchadas y co-procesadas, donde se puede apreciar

cómo el co-procesamiento a partir del año 2020 supera las emisiones del reencauche de llantas; esto no se presentaba antes puesto que las llantas recolectadas y utilizadas para el reencauche eran mayores que los residuos de llantas dispuestos a co-procesamiento.

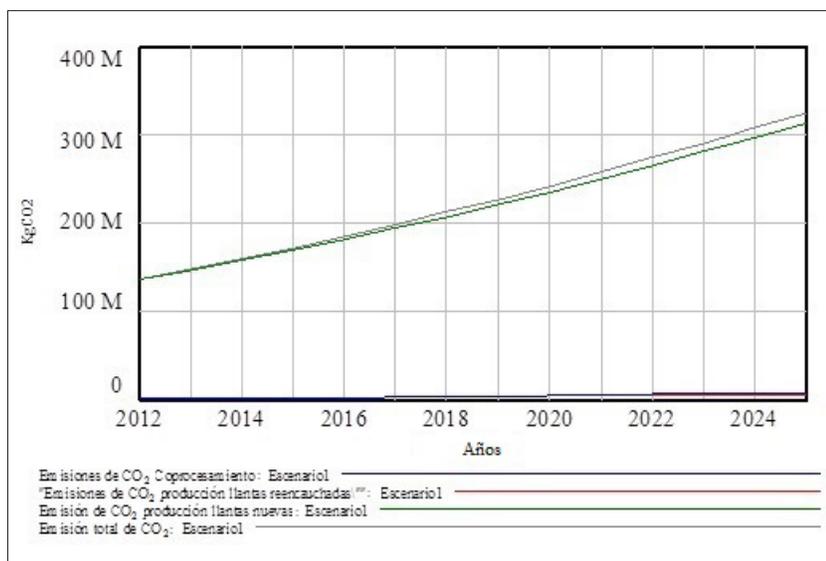


Figura 13. Comparación de las emisiones de CO₂ para la producción de llantas nuevas y las disposiciones finales estudiadas.

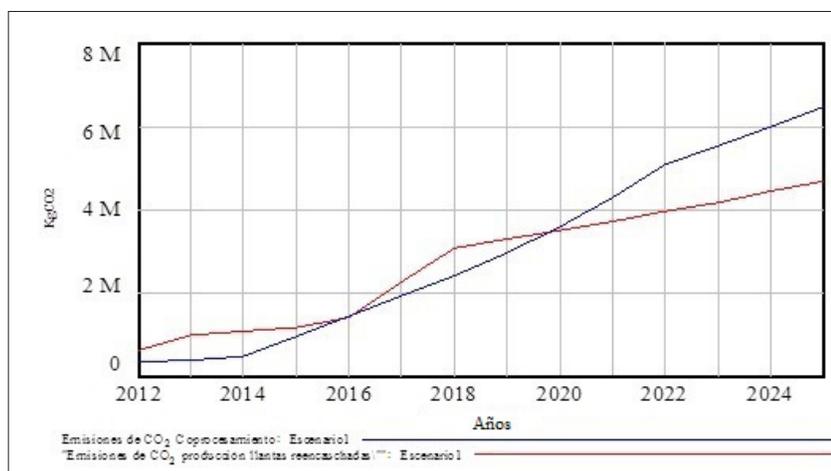


Figura 14. Comparación de las emisiones de CO₂ para la producción de llantas reencauchadas y la disposición final de co-procesamiento.

La última comparación hace referencia al consumo total de energía para la producción de llantas nuevas y las diferentes disposiciones finales estudiadas. En la Fig. 15 se observa el comportamiento de este impacto y se evidencia cómo la producción de llantas nuevas es la que más consumo de energía presenta, seguido por el reencauche, el co-procesamiento y la trituración. Para este impacto ambiental, tampoco el comportamiento de las disposiciones finales puede ser apreciado en la figura, puesto que la magnitud del consumo de energía por la producción de llantas nuevas es mucho mayor que el consumo de las disposiciones finales.

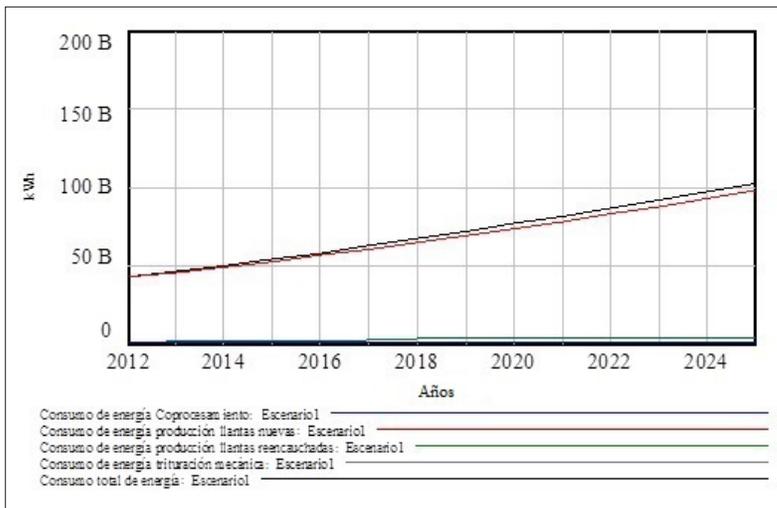


Figura 15. Comparación del consumo de energía para la producción de llantas nuevas y las disposiciones finales estudiadas.

Adicional a los resultados de la simulación inicial, se presentan a continuación los análisis realizados al modelo. Para ello se definieron ocho escenarios más, detallados en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Escenarios propuestos variando la tasa de disposición final

| Escenario | Tasa de reencauche | Tasa de co-procesamiento | Tasa de trituración mecánica | |
|-----------|--------------------|--------------------------|------------------------------|---|
| 2 | 10% | 45% | 45% | Se pretende mostrar la variación cuando se dispone una tasa de reencauche menor a la actual |
| 3 | 5% | 47,5% | 47,5% | |
| 4 | 2,5% | 48,75% | 48,75% | |
| 5 | 0% | 50% | 50% | |

Para analizar el comportamiento de las emisiones de CO₂, consumo de petróleo y de energía, se realiza un análisis donde se pueda satisfacer la demanda total de llantas con llantas reencauchadas, manteniendo las condiciones iniciales del escenario actual.

Tabla 3. Escenarios propuestos variando la demanda de llantas reencauchadas

| Escenario | |
|-----------|--|
| 6 | Se cubre el 10% de la demanda total de llantas con llantas reencauchadas |
| 7 | Se cubre el 20% de la demanda total de llantas con llantas reencauchadas |
| 8 | Se cubre el 30% de la demanda total de llantas con llantas reencauchadas |
| 9 | Se cubre el 40% de la demanda total de llantas con llantas reencauchadas |

Se pretende mostrar el comportamiento de las emisiones cuando se satisface la demanda total con llantas reencauchadas

Los escenarios 2, 3, 4 y 5, con los cuales se muestra el comportamiento de los consumos totales de energía, petróleo y emisiones de CO₂, buscan mostrar la variación cuando se dispone una tasa menor de reencauche a la actual. El comportamiento de estos tres impactos se observa en las Figs. 16, 17 y 18, donde hay poca variación de estos, pues el único escenario que muestra un cambio significativo es el escenario 5, donde la tasa de recolección es de 0% y no se satisface la demanda de llantas reencauchadas.

Se concluye que mientras no se logre abarcar mayor cantidad de la demanda total de llantas con llantas reencauchadas, el comportamiento de los impactos totales serán los mostrados en las ilustraciones.

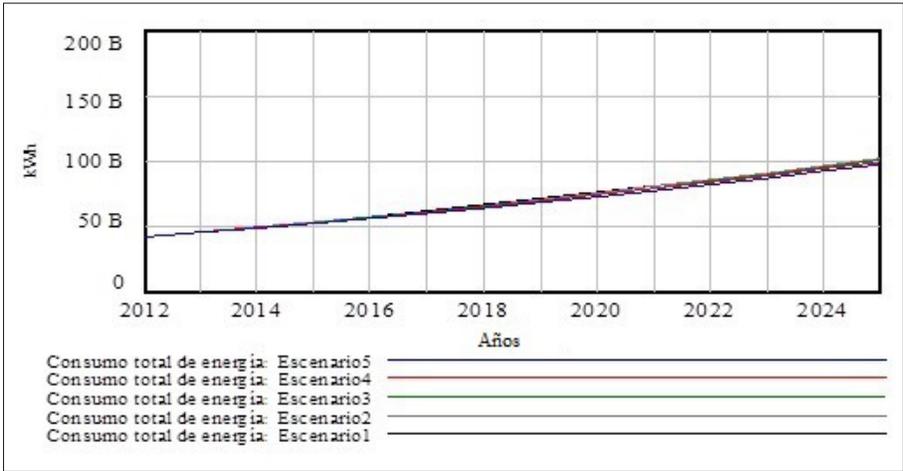


Figura 16. Consumo total de energía para los diferentes escenarios de estudio (1, 2, 3, 4 y 5).

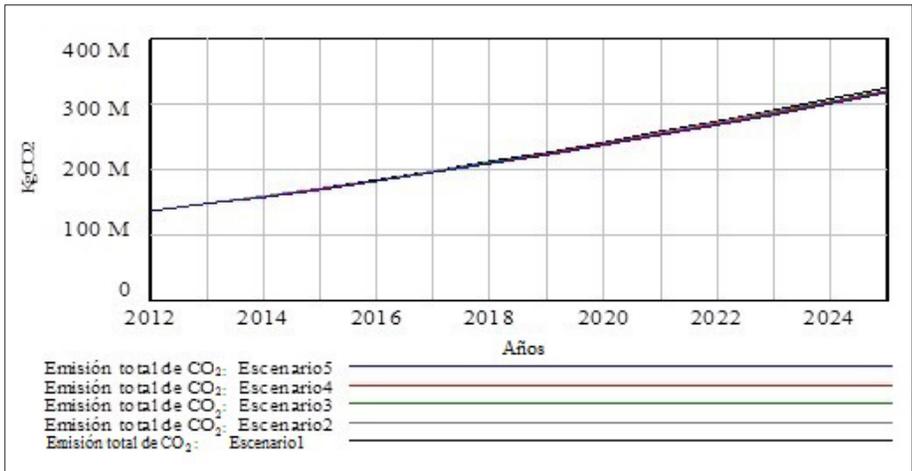


Figura 17. Emisión total de CO₂ para los diferentes escenarios de estudio (1, 2, 3, 4 y 5).

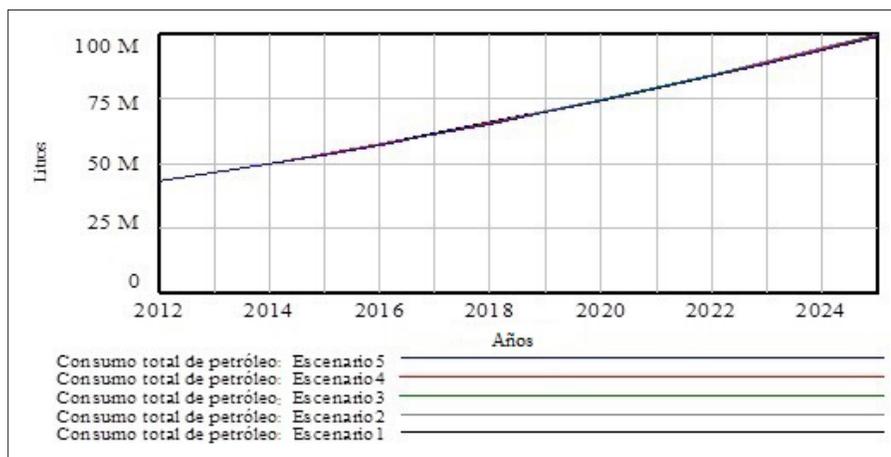


Figura 18. Consumo total de petróleo para los diferentes escenarios de estudio (1, 2, 3, 4 y 5).

De los escenarios anteriores, se puede observar que el modelo no es sensible a los cambios de la tasa de reencauche. Esto se debe a que la demanda de llantas reencauchadas es muy poca en comparación con la demanda total, por lo tanto se plantearon los escenarios 6, 7, 8 y 9, en los cuales cambia el porcentaje de la demanda total que se pretende satisfacer con llantas reencauchadas. Para este estudio, las condiciones iniciales del sistema no se cambiaron. Los resultados de la simulación para el consumo total de energía, la emisión total de CO_2 , y el consumo total de petróleo de estos escenarios se pueden observar en las Figs. 19, 20 y 21, donde se compara con el escenario actual (escenario 1).

En la Fig. 19, que representa el consumo total de energía, se puede evidenciar que cuando se satisface más cantidad de la demanda total de llantas con llantas reencauchadas disminuye el consumo de energía. Como se puede apreciar, el escenario actual está por encima de los escenarios 6, 7, 8 y 9. De los escenarios estudiados, el escenario 9, que satisface el 40% de la demanda total de llantas con llantas reencauchadas, es el que menor consumo de energía presenta.

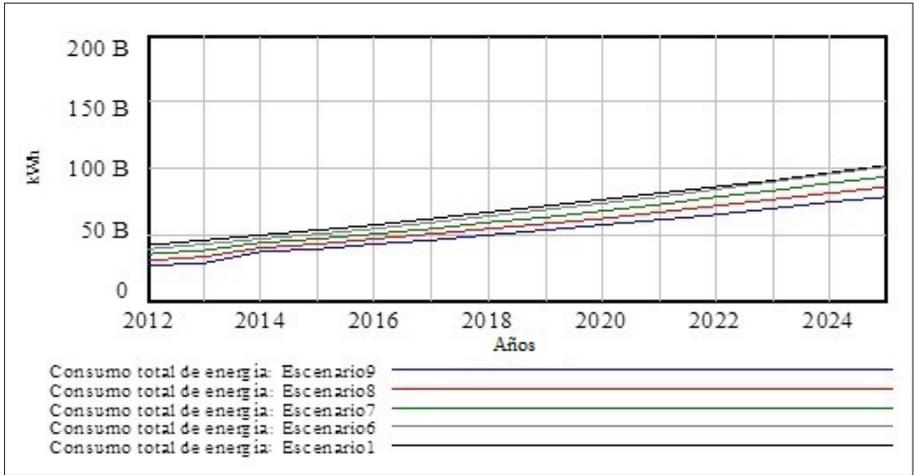


Figura 19. Consumo total de energía para los diferentes escenarios de estudio (1, 6, 7, 8 y 9).

Respecto a la emisión total de CO_2 , en la Fig. 20 se muestra que satisfacer la demanda de llantas total con llantas reencauchadas disminuye las emisiones de CO_2 ; se puede evidenciar que el escenario 1 está por encima de los demás escenarios de estudio mientras el escenario 9, el que menores emisiones de CO_2 genera.

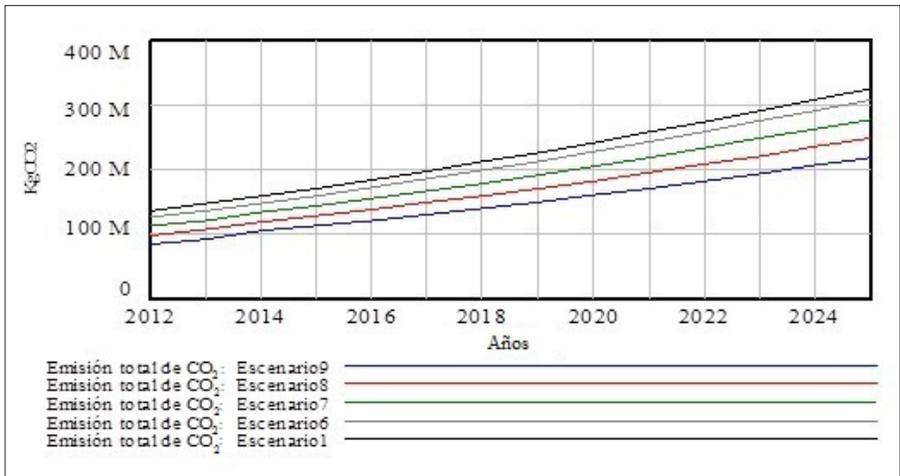


Figura 20. Emisión total de CO_2 para los diferentes escenarios de estudio (1, 6, 7, 8 y 9).

Por último, el comportamiento del consumo total de petróleo se muestra en la Fig. 21. Se puede observar que satisfacer un mayor porcentaje de la demanda total de llantas con llantas reencauchadas disminuye el consumo de petróleo. Lo anterior se evidencia cuando el escenario 1 sobrepasa en el consumo de petróleo a los demás escenarios de estudio, en tanto el escenario 9, es el que menor consumo de petróleo genera.

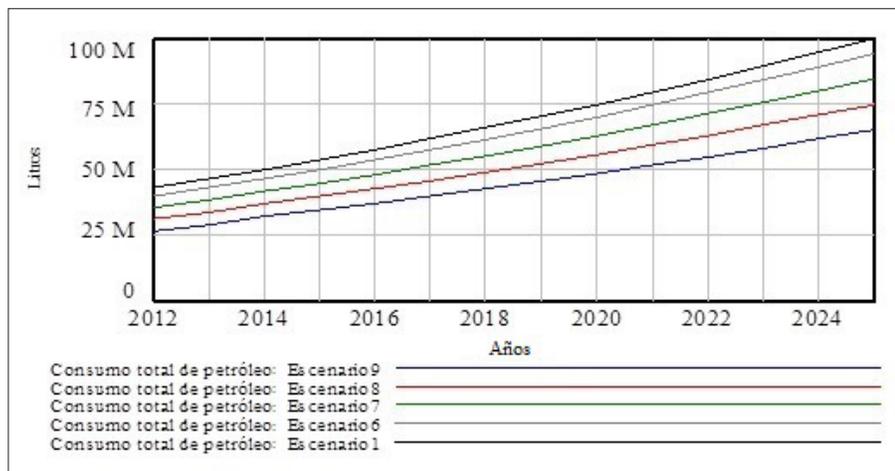


Figura 21. Consumo total de petróleo para los diferentes escenarios de estudio (1, 6, 7, 8 y 9).

IV. CONCLUSIONES

Cuando se habla de logística inversa de las llantas, el reencauche de estas permite realizar una red de retorno al fabricante, para alargar la vida útil de las llantas y lograr de esta manera abastecer el mercado de llantas reencauchadas. El co-procesamiento y la trituration pueden ayudar a las empresas productoras e importadoras a tener otras opciones de disposición final, que contribuyan a sus actividades de gestión, dado que la logística inversa también trata el tema de qué hacer con el producto al final de su ciclo de vida.

Como se pudo observar dentro de los resultados respecto al escenario actual (escenario 1), cubrir la demanda de llantas reencauchadas va a estar directamente relacionado con la tasa de recolección y el porcentaje de llantas que se

dispongan a reencauchar, mientras que las emisiones que se presenten por el reencauche están directamente relacionadas a la producción de llantas. Entre mayor sea la cobertura de la demanda, mayor será la cantidad de emisiones generadas. Además no todas las llantas que se recolectan para reencauchar se fabrican, debido a que la demanda es pequeña en comparación con la cantidad de llantas que se recolectan. Con la simulación de los escenarios se puede evidenciar que el sistema se encuentra dominado por la demanda de llantas nuevas, generando los comportamientos crecientes de las variables estudiadas.

Las decisiones ambientales sobre la disposición final de las llantas pueden decidirse según la cantidad de impactos que generen cada uno de los procesos de producción. Basándose en ello, se evidencia que la trituración mecánica de los residuos de llantas es la mejor opción para la disposición final, porque es el proceso que menores impactos ambientales presenta. Primero, si se compara con el reencauche, triturar una llanta y no reencaucharla genera menor consumo de energía, menor consumo de petróleo y no se encontró un estudio donde se señale que se generan emisiones de CO₂ y, segundo, si se compara con el co-procesamiento, el consumo de energía y de petróleo son los mismos en unidades, debido a que para este estudio se trituran las llantas de forma mecánica antes de co-procesarlas, por lo tanto, el consumo de energía y de petróleo va a depender de la cantidad de residuos de llantas que se dispongan para estos dos procesos.

El co-procesamiento de llantas es el proceso que más documentado se encuentra hasta el momento según la literatura encontrada, y es una buena opción para eliminar los residuos de llantas. Co-procesar un residuo de llanta consume menos energía, menos petróleo y genera menos emisiones de CO₂ que reencaucharla. En este sentido, se concluye que esta es la segunda mejor opción de disposición final cuando se compare frente a estos tres impactos ambientales.

Aunque existe una normatividad que exige a las empresas productoras e importadoras de llantas gestionar la recolección de los residuos de llantas, la cantidad de estos que no se recogen, incrementan sustancialmente con el tiempo, lo que conlleva a que no se logre la recolección de un gran porcentaje de estos residuos. Con esto se podrían generar opciones de incentivos a otros mercados, tales como las empresas de trituración, de reencauche o

de co-procesamiento, para que se hagan responsables de la recolección de estos residuos de llantas que no alcanzan a ser cubiertas por el sistema de gestión de los productores e importadores.

Para complementar el modelo y hacerlo más cercano a la realidad, en investigaciones futuras se pueden considerar aspectos que le puedan dar una mayor precisión, entre ellos se encuentran:

- Analizar y estudiar el comportamiento del modelo cuando se reincorpora al proceso de producción el desecho del proceso “Ripio”.
- Incluir dentro del análisis, el carácter económico y social, que hacen parte del enfoque del desarrollo sostenible, a la red de logística inversa de las llantas y de las diferentes disposiciones finales analizadas. Todo esto con el objetivo de otorgar a la empresa más criterios de decisión para la disposición final de las llantas, que no involucre solo el carácter ambiental.

REFERENCIAS

- [1] D. Cabeza, *Logística inversa en la gestión de la cadena de suministros*. Barcelona: Marge books, 2012.
- [2] T. Pohlen, M. Farris II, “Reverse Logistics in plastic recycling,” *Int. J. phys. distrib. logist. Manag.*, vol. 22, pp. 35-47, 1992.
- [3] B. B. Morales. (2009) “La logística reversa o inversa, aporte al control de devoluciones y residuos en la gestión de la cadena de abastecimiento”, [En línea]. Disponible en: <http://www.legiscomex.com/BancoMedios/Archivos /la%20logistica%20reversa%20o%20inversa%20basilio%20balli.pdf>
- [4] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Resolución 1457. Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones*. Bogotá, 2010.
- [5] R. A. Gómez, “Logística inversa un proceso de impacto ambiental y productividad”, *Producción + Limpia*, vol 5, no 2, pp 63-76, 2010.
- [6] ANLA. Glosario Subdirección de Evaluación y Seguimiento, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2014, [En línea]. Disponible en: <http://www.anla.gov.co/subdireccion-evaluacion-y-seguimiento>

- [7] G. Espinoza, *Gestión y Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental. Programa de Apoyo para el Mejoramiento de la Gestión Ambiental en los Países de América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Banco Interamericano de Desarrollo, 2007.
- [8] L. Rodrigues, F. Golrooy, D. Ramesh, V. Kamath, "System dynamics model for remanufacturing in closed-loop", *System Dynamics Society*, 2014, [En línea]. Disponible en: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2012/proceed/papers/P1061.pdf>
- [9] H. Yao, L. Shen, Y. Tan, J. Hao, "Simulating the impacts of policy scenarios on the sustainability performance of infrastructure projects", *Automation in Construction*, vol 20, pp. 1060-1069, 2011.
- [10] M. Najeeb, W. Abdul-Kader, "Comprehensive performance measurement and causal-effect decision making model for reverse logistics enterprise", *Computers & Industrial Engineering*, vol 68, pp. 87-103, 2014.
- [11] M. Valencia, L. Girando, J. C. Osorio, "Evaluación dinámica del impacto ambiental generado por la producción de envases tipo PET en un entorno de logística reversa", *XII Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas*, pp. 121-133, Bogotá, Colombia, 2014.
- [12] *Manual de buenas prácticas en el manejo de llantas de desecho en centros de acopio*. Comisión de Cooperación Fronteriza (COCEF), México, 2013.
- [13] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., *Movilidad en cifras 2011*, [En línea]. Secretaría de Movilidad, Bogotá, 2011. Disponible en: http://www.simur.gov.co/documents/10180/76627/MOVILIDAD_EN_CIFRAS_2011.pdf
- [14] Cámara de Comercio de Bogotá, *Guía para el manejo de llantas usadas*. Colombia: Editorial Kimpres Ltda, 2006.
- [15] M. Sánchez, M. Guzmán, *Análisis de la Eficiencia Medioambiental de Recauchutado de Neumáticos*. Madrid: Editorial UMH, 2013.
- [16] A. Corti, L. Lombardi, "End life tyres: Alternative final disposal processes compared by LCA", *Energy*, 22, pp. 2089-2018, 2004.