

**MODELO DE GESTIÓN LOGÍSTICA INVERSA PARA LA RECOLECCIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE LATAS DE ALUMINIO EN UN MUNICIPIO DEL
NORTE DEL VALLE DEL CAUCA**

**NATALIA CASTAÑEDA COLONIA - 1664683
DARLYN JOHANNA REYES VILLADA - 1664828**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA INGENIERÍA INDUSTRIAL
SEDE ZARZAL
2021**

**MODELO DE GESTIÓN LOGÍSTICA INVERSA PARA LA RECOLECCIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE LATAS DE ALUMINIO EN UN MUNICIPIO DEL
NORTE DEL VALLE DEL CAUCA**

**NATALIA CASTAÑEDA COLONIA - 1664683
DARLYN JOHANNA REYES VILLADA - 1664828**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera
Industrial**

**Directora: VIVIAN LORENA CHUD PANTOJA
MSc. Ingeniería Industrial**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA INGENIERÍA INDUSTRIAL
SEDE ZARZAL
2021**

DEDICATORIA

Este trabajo de grado se lo dedico a mi papá, porque sé que estaría orgulloso de que sea ingeniera, a mi mamá por ser mi más grande apoyo y motivación durante toda mi carrera, a mis familiares y amigos que con sus palabras de apoyo me alentaron a seguir y cumplir mis proyectos. También, se lo dedico a mi mascota Lupita, quien aunque no lo sabe, es un ser muy importante para mí.

Natalia Castañeda Colonia

Este trabajo de grado lo dedico especialmente a Dios y la Virgen por haberme dado la oportunidad de estudiar y ser mi guía y fortaleza en los momentos más difíciles. A mi madre y a mi abuela, quienes a pesar de no tener las mejores oportunidades económicas me permitieron estudiar y formarme como profesional, siempre estuvieron dispuestas a brindarme todo su apoyo, amor y ser mi mayor motivación y ejemplo de vida. A mis hermanos, tíos y primas por confiar en mí y alentarme cuando me sentía desistir. Y especialmente, este trabajo de grado se lo dedico a mi abuelita, que aunque ya no esté conmigo, siempre será la razón de mi superación, para hacerla sentir orgullosa donde quiera que se encuentre.

Darlyn Johanna Reyes Villada

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer a cada uno de los docentes que durante nuestra formación como ingenieras, nos transmitieron conocimientos que nos permitieron crecer no sólo como profesionales sino como personas. Queremos agradecer de forma especial a nuestra directora de trabajo de grado, la MSc. Vivian Lorena Chud Pantoja por su orientación, dedicación y guía indispensable para el desarrollo de este proyecto. Asimismo, queremos agradecer al coordinador el PhD(c) Julián González Velasco quien siempre estuvo dispuesto a brindarnos su apoyo, consejos y apreciaciones a lo largo del proceso de elaboración de este trabajo.

También, queremos agradecer a nuestros compañeros de curso, quienes hicieron que este camino fuera más grato y lleno de buenos recuerdos gracias a tantas vivencias compartidas.

Y por último pero no menos importante, le queremos dar las gracias a la Universidad del Valle Sede Zarzal por darnos la oportunidad de formarnos profesionalmente y cumplir con nuestro proyecto de vida.

RESUMEN

Los altos índices de consumo conllevan a que en la sociedad actual sea evidente una creciente generación de Residuos Sólidos Municipales (RSM) de distintos tipos, cuya disposición trae consigo riesgos para la salud, la economía y un deterioro medioambiental progresivo, por lo que, a su vez, entre las técnicas para mitigar dichos efectos se destacan la reutilización y el reciclaje. Dentro de los elementos reutilizables y reciclables se encuentran los metales, los cuales componen alrededor del 4% de los materiales que más se producen. Si bien en Colombia existe una legislación ambiental que busca conservar el medio ambiente y los recursos naturales renovables, se puede apreciar que no se cumple con rigor, pues la tasa de aprovechamiento no compensa los niveles de generación de residuos, perdiendo la oportunidad de generar valor pos-consumo al igual que disminuir los distintos impactos negativos.

Este trabajo de grado se concentra en estudiar cómo en un municipio del Norte del Valle del Cauca es posible aportar a la disminución del impacto ambiental por la generación de residuos de latas de aluminio, realizando un análisis de la gestión de retorno de los desechos y de los envases que entran en desuso al llegar al final de su vida útil, cuyo propósito sea el reutilizar el aluminio que los componen y generar valor a partir de este residuo en Colombia. Para ello, se plantea el diseño de una red de logística inversa que permita la recolección de este tipo de residuos para su posterior aprovechamiento en plantas a nivel nacional que se dedican a la producción de materiales derivados del metal reciclado. También, mediante un modelo de dinámica de sistemas propuesto, se dimensionará el impacto ambiental ocasionado por la reutilización y el reciclaje de este tipo de residuo a fin de establecer estrategias de disposición final para la gestión del mismo.

Para esto, se realizó una revisión bibliográfica con objeto de identificar los elementos y variables necesarias que permitan establecer los principales agentes que actúan en la cadena de abastecimiento de las bebidas envasadas en latas de aluminio y la relación entre cada uno de ellos para la construcción del modelo y posterior evaluación de los beneficios de la implementación de la red logística propuesta a través de un análisis de sensibilidad que permita analizar el comportamiento de las variables que intervienen directamente en él. Además, el modelo tiene en cuenta la política de gestión ambiental vigente y dos disposiciones finales para los residuos de las latas de aluminio y evidencia la repercusión que tiene cada una en el medio ambiente.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.1 Pregunta de investigación.....	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3. Justificación.....	3
2. MARCO CONCEPTUAL	4
2.1. Logística inversa	4
2.2. Gestión de la cadena de suministro y gestión de residuos sólidos	6
2.3. Generación de residuos sólidos	6
2.4. Dinámica de sistemas	7
3. CARACTERIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN EL MUNICIPIO DE ZARZAL	8
3.1. Caracterización de los residuos	8
3.1.1 Caracterización de los residuos en Zarzal, Valle del Cauca.....	8
3.1.2 Política vigente.....	10
3.1.3 Reporte de las toneladas efectivamente aprovechadas	11
3.2. Proceso de fabricación de las de aluminio	13
3.2.1 Metalurgia de aluminio secundario	14
3.2.2 Pretratamiento de las chatarras de aluminio.....	15
3.2.3 Fundición del aluminio secundario.....	15
3.2.4 Refino y moldeo.....	16
4. MODELO SISTÉMICO DE LA LOGÍSTICA INVERSA DE LAS LATAS DE ALUMINIO.....	18
4.1. Estrategias de logística inversa.....	18
4.2. Selección de la estrategia de logística inversa.....	18
4.3. Contextualización del caso.....	19
4.4. Proceso de modelado en dinámica de sistemas	19
4.5. Diagrama causal	19
4.6. Establecimiento de relaciones (Diagrama Causal)	22
4.7. Clasificación de las variables del diagrama Forrester	23
4.7.1 Variables de nivel de la logística inversa de las latas de aluminio	23
4.7.2 Variables de flujo de la logística inversa de las latas de aluminio.....	25
4.7.3 Variables auxiliares de la logística inversa de las latas de aluminio	26
4.7.4 Variables ambientales de la logística inversa de las latas de aluminio	27
4.8. Diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio	30
5. RESULTADOS.....	34
5.1. Caso de estudio	34
5.2. Validación de los resultados.....	35
5.3. Análisis de sensibilidad	39
5.3.1 Escenarios de estudio.....	39

5.4. Interpretación de los escenarios de estudio	41
5.4.1 Escenarios 2, 3 y 4	41
5.4.2 Escenarios 5 y 6	43
5.4.3 Escenario 7	45
6. CONCLUSIONES	46
7. REFERENCIAS	47
ANEXOS	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de las toneladas aprovechadas por familia de material reportadas en 2018.....	11
Tabla 2. Distribución de materiales de la familia de metales reportadas para el 2018	12
Tabla 3. Caracterización de la generación de residuos de aluminio en Zarzal, Valle.....	12
Tabla 4. Residuos de aluminio según su origen y aleación	14
Tabla 5. Ecuaciones y unidades de las variables de nivel del diagrama de Forrester de la logística inversa de las latas de aluminio	24-25
Tabla 6. Ecuaciones y unidades de las variables de flujo del diagrama de Forrester de la logística inversa de las latas de aluminio.....	26
Tabla 7. Ecuaciones/parámetros y unidades de las variables auxiliares del diagrama de Forrester de la logística inversa de las latas de aluminio.....	27
Tabla 8. Ecuaciones y unidades de las variables ambientales del diagrama de Forrester de la logística inversa de las latas de aluminio	29
Tabla 9. Venta de latas de aluminio del periodo junio 2020 - mayo 2021.....	34
Tabla 10. Datos iniciales de las variables de nivel del diagrama de Forrester.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de proceso de las latas de aluminio	13
Figura 2. Diseño de red de la logística inversa del aluminio	17
Figura 3. Diagrama causal de la logística de las latas de aluminio.....	21
Figura 4. Bucle 1 (de refuerzo): Producción de aluminio primario	22
Figura 5. Bucle 2 (de compensación): Procesamiento de bauxita	22
Figura 6. Bucle 3 (de refuerzo): Generación de residuos	23
Figura 7. Primer parte del diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio (Producción de latas de aluminio primario)	30

Figura 8. Segunda parte del diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio (Otras disposiciones finales)	31
Figura 9. Tercera parte del diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio (Producción de latas de aluminio secundario)	31
Figura 10. Diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio.....	32
Figura 11. Medidas de desempeño ambiental evaluadas	33
Figura 12. Pronóstico de ventas del periodo 2021 - 2025.....	34

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Comportamiento de los residuos de latas de aluminio	36
Gráfica 2. Volumen ocupado en el relleno sanitario.....	36
Gráfica 3. Comparación de las disposiciones finales.....	37
Gráfica 4. Comparación de las emisiones de CO ₂	37
Gráfica 5. Agua utilizada en la producción de aluminio primario.....	38
Gráfica 6. Comparación consumo de energía.....	38
Gráfica 7. Emisiones de NO _x en la disposición a proceso de aluminio secundario.....	39
Gráfica 8. Emisiones de NO _x en la disposición a proceso de aluminio secundario en los escenarios 1, 2, 3 y 4 de estudio.....	41
Gráfica 9. Emisiones de CO ₂ en la disposición a proceso de aluminio secundario en los escenarios 1, 2, 3 y 4 de estudio	42
Gráfica 10. Consumo total de energía en los escenarios 1, 2, 3 y 4 de estudio.....	42
Gráfica 11. Emisión total de CO ₂ en los escenarios 1, 2, 3 y 4 de estudio.....	43
Gráfica 12. Consumo total de energía en los escenarios 1, 5 y 6 de estudio.....	44
Gráfica 13. Generación total de CO ₂ en los escenarios 1, 5 y 6 de estudio.....	44
Gráfica 14. Consumo total de energía en los escenarios 1 y 7 de estudio.....	45
Gráfica 15. Generación total de CO ₂ en los escenarios 1 y 7 de estudio.....	45

1. INTRODUCCIÓN

La logística ha evolucionado desde ser inicialmente concebida como un proceso de distribución de bienes hacia un cliente final, pasando a convertirse en toda una gestión de cadenas de suministro hasta llegar a la necesidad de implementar la logística inversa de los desechos generados por el proceso productivo y los productos que entran en desuso al llegar al final de su vida útil, con el fin de reutilizar los materiales que los componen y aportar al medio ambiente (Domínguez, García, & Arias, 2009). Se estima que en el mundo se generan anualmente 2.010 millones de toneladas de desechos sólidos municipales (RSM), y al menos el 33 % de ellos no se gestionan sin riesgo para el medio ambiente (Banco Mundial, 2018). En cuanto a los RSM recolectados, el 70% es llevado a vertederos y basureros, el 19% es reciclado o recuperado y el 11% es llevado a instalaciones de recuperación de energía (Waste Atlas, 2018)

En lo referente a América Latina, conforme con la Evaluación Regional efectuada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), los latinoamericanos generan 0.63 kg/hab./día de residuos sólidos domiciliarios (RSD). Si se toman en cuenta los residuos sólidos municipales, es decir, los domiciliarios más otros residuos de origen comercial, el número asciende a 0.93 kg/hab./día (Sturzenegger, 2014). En cuanto a Colombia, en el 2018 se dispuso en promedio 30.973 Ton/día de residuos sólidos y más de la mitad de las toneladas dispuestas en el país (53%) se dispusieron en 3 de los 32 departamentos, los cuales son: Antioquia, Valle del Cauca y Atlántico. En este trabajo, se pretende identificar las variables que conforman el sistema de gestión de las latas de aluminio para su retorno dentro de la cadena de abastecimiento al igual que analizar el impacto ambiental de la logística inversa de dichas latas mediante el uso de la dinámica de sistemas aplicando un caso de estudio a un municipio del norte del Valle del Cauca.

1.1. Planteamiento del problema

De acuerdo Mill et al. (2015), desde el punto económico, dos factores afectan la producción del aluminio primario: la eficiencia del proceso y la eficiencia energética. El primero está determinado por el consumo sostenible de la materia prima, el cual varía de la siguiente forma: la fabricación de 1 tonelada de aluminio primario consume 2 toneladas de alúmina, es decir, 4 toneladas de bauxita; en cambio, con 1.1 toneladas de residuos es posible conseguir la misma cantidad de aluminio secundario debido a que procesos de recuperación, como la fundición de residuos, tienen una eficiencia del 90% al 93%. En cuanto a la energía, el ahorro es una de las principales características del proceso de transformación de los residuos en

aluminio, pues utiliza menos del 6% de la energía mencionada, lo que ayuda a reducir aún más el costo de producción de aluminio (Mill et al., 2015).

En relación con el impacto social, según la investigación realizada por Torrellas Hidalgo (2013), la amplia utilización del aluminio en la vida diaria hace que el ser humano esté expuesto a este metal tóxico a través de los alimentos y sus aditivos, envases, productos del hogar, agua, ciertos medicamentos y cosméticos y, a pesar de que hasta ahora no se conoce ningún papel fisiológico del aluminio dentro del organismo y sus potenciales riesgos, estudios en animales han mostrado que la exposición crónica al aluminio se asocia con cambios en el comportamiento, déficit de aprendizaje y neuropatologías, así como a daños neuroquímicos y genotóxicos.

Para terminar, dentro del impacto ambiental se encuentran las emisiones que genera de Gases de Efecto Invernadero (GEI), en donde en comparación con la producción del aluminio primario, en este proceso de reciclaje se consume del 5% al 10% de la energía necesaria en el proceso de producción primaria, generándose entre 1 a 5% de emisiones de GEI asociadas a la producción del metal a partir de bauxita, haciendo que el uso del aluminio tenga un mayor sentido económico, técnico y ambiental. Asimismo, hay que tener en consideración el impacto ambiental que significa la producción de metal primario, por la generación de residuos (lodos, polvos, escorias, etc.); para el caso del aluminio se generan 2,7 toneladas de residuos (principalmente los “lodos rojos” del proceso Bayer de disolución cáustica de la bauxita) por cada tonelada de metal refinado (Antonio, 2015). De igual modo, la destrucción del suelo es otro de los impactos ambientales más evidentes de la producción de aluminio primario, pues para llegar a las fuentes de bauxita se deben excavar 10 toneladas de rocas por cada tonelada de aluminio primario (Mill et al., 2015), lo que implica la deforestación de miles de hectáreas.

Es pertinente decir que, aunque los marcos de estudio en los cuales se centró este proyecto son esencialmente ambientales, hay que tener en cuenta que dado que la propuesta trata sobre el diseño de una red de logística inversa para la recolección y aprovechamiento de latas de aluminio en un municipio del norte del Valle del Cauca, el traslado a las industrias dedicadas al tratamiento y recuperación de este material beneficia el sector económico también, puesto que permite reincorporar las latas de aluminio dentro del ciclo económico productivo, pues gracias a sus propiedades químicas, la vida útil de este metal puede ser ilimitada propiciando que se dé lugar a empleos tanto formales como informales en cada eslabón de la cadena de abastecimiento beneficiando a su vez al sector social.

1.1.1 Pregunta de investigación

Por todo lo anteriormente mencionado, surge la pregunta de investigación que da lugar a este proyecto:

¿Cómo desarrollar una red de logística inversa en un municipio del Norte del Valle del Cauca para lograr la recuperación de los residuos de latas de aluminio de forma que se logre clasificar el material para su aprovechamiento?

1.2. Objetivos

1.2.1 *Objetivo general*

Proponer el diseño de una cadena de logística inversa para la recuperación y aprovechamiento de residuos de las latas de aluminio que generan los habitantes en un municipio del Norte del Valle del Cauca.

1.2.2 *Objetivos específicos*

- Caracterizar la gestión actual de residuos de latas de aluminio que son generadas por los habitantes en un municipio del norte del Valle del Cauca.
- Identificar los actores relevantes de la cadena de la logística inversa y definir los flujos a seguir por los residuos de latas de aluminio.
- Establecer las estrategias de logística inversa potenciales para dichos residuos y seleccionar la mejor.
- Validar el modelo de la cadena de suministro a través de un caso de estudio.

1.3. Justificación

La industria logística necesita cambiar el modo tradicional de desarrollo, y debería tratar de lograr el desarrollo sostenible igualando la logística inversa con la logística avanzada, e igualando los beneficios ambientales con los económicos (Sun, 2016), debido a que en los últimos años, se ha producido un incremento en la generación de residuos tal como: productos devueltos, ociosos, el cambio de equipos por tecnologías más novedosas en la industria. Asimismo, se incorporan más productos, partes o materiales recuperados de vuelta a los procesos productivos y mercados, por lo que cada vez más se necesita de empresas y cadenas que desempeñen esta labor eficientemente (de la Cruz, et. al., 2017), pues la logística inversa favorece la reducción de utilización de insumos provenientes de la naturaleza, además de proveer beneficios ambientales, económicos y sociales (Maquera, 2013).

Un claro ejemplo de esta transición es el caso del aluminio, dado que una de las causas del fortalecimiento de su sector secundario es precisamente el cambio del modelo productivo que ha pasado de ser lineal a uno de tipo cíclico, en el cual hay un menor volumen de material dispuesto en rellenos sanitarios, permitiendo una mayor reutilización y reintegración de residuos en nuevos ciclos productivos conllevando así a que haya menos explotación de bauxita.

Esta reducción representa un impacto importante considerando que durante la transformación de la bauxita en alúmina y de esta en aluminio, el proceso de Bayer genera 3,2 toneladas de barro color rojizo por cada tonelada de aluminio primario, mientras que durante la fabricación de aluminio reciclado se emplean 0,5 toneladas de fundentes que posteriormente pueden ser reciclados (Mill et al., 2015) ya que el aluminio puede ser reciclado al 100% indefinidamente sin disminuir su calidad, haciendo que sea una actividad rentable, generadora de empleo y que fomenta la sostenibilidad industrial.

Adicionalmente, la eficiencia energética es otra de las ventajas de este modelo productivo, pues con un 5% de la energía empleada para obtener una tonelada de aluminio primario, es posible conseguir la misma cantidad de aluminio secundario (Aluminio, n.d.); cabe resaltar que de acuerdo con los autores (Cortes & Acevedo, 2012), el consumo energético relacionado con la generación de GEI para una producción de 1000 kg de aluminio secundario es de 30,91 MJ de energía eléctrica, 0,704 Kg de combustible Diesel, 0,012 kg de gasolina y a su vez, dentro de la fundición se generan 2,071 Kg de óxidos de nitrógeno.

Finalmente, se considera que en promedio para una lata de aluminio que pesa 13,34 gramos, las emisiones de CO₂ en el proceso de aluminio secundario decrece en aproximadamente 10 veces en comparación con el aluminio primario. La emisión de GEI de CO₂ es de 131,5 kg/1000 latas para el proceso de aluminio primario y de 113,8 kg/1000 latas a partir del aluminio secundario, esto quiere decir que hay un menor impacto ambiental y económico con la utilización de este residuo para producir nuevos productos (Cortes & Acevedo, 2012).

En esta línea de ideas, la implementación de una propuesta de logística inversa enfocada en la recolección para el posterior aprovechamiento de latas de aluminio presenta un impacto positivo a nivel global y local; global en el aspecto ambiental y local considerando también el aspecto económico y social.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Logística inversa

La logística inversa está relacionada con la literatura de logística verde como una herramienta para desarrollar el nivel de recuperación y retorno de los productos usados, sirviendo para reducir la contaminación, reparación, re fabricación de piezas, reciclaje, eliminación y recuperación de piezas (Vasiliauskas & Jakubauskas, 2007). La logística inversa se refiere al proceso de planificar, implementar y controlar eficientemente el flujo efectivo de materias primas, inventario semiprocado, bienes terminados e información referida a estos, desde

el punto de consumo al punto de origen, con la finalidad de obtener valor o su correcta descomposición (Rogers & Tibben-Lembke, 1998).

Para Du & Evans (2008), es el proceso de trasladar mercancías desde su destino final típico hasta otro punto, con el fin de captar el valor que de otro modo no estaría disponible, o para la eliminación adecuada de los productos. Básicamente, el elemento clave de todas las definiciones y debates sobre la logística inversa es el movimiento de algo desde su usuario final hasta alguna otra actividad o lugar, por lo general después de que se haya consumido total o parcialmente su utilidad prevista (Haas, Murphy, & Lancioni, 2003).

Como resultado, la logística inversa se ha vuelto cada vez más importante como estrategia comercial rentable y sostenible (Du & Evans, 2007), pues uno de los aspectos más críticos dentro de la misma es la devolución de productos que puede incluir: la devolución de productos defectuosos junto con la retirada de productos, la devolución para mantenimiento, reparación y revisión de productos, y la devolución de productos excedentes (Bernon, Tjahjono, & Ripanti, 2018), y considerando que dichas devoluciones generan varios costos diferentes que no consisten meramente en el valor de los productos devueltos y que a menudo se consideran un costo necesario para la empresa (Russo & Cardinali, 2012), hay una mayor necesidad de que el proceso de logística inversa maximice el valor retenido del producto/servicio, por lo que los productos tendrán que ser puestos en cascada para mantenerlos en su máxima utilidad y valor en todo momento (Ripanti & Tjahjono, 2019), permitiendo que las empresas puedan recuperar el valor de los productos al final de su vida útil mediante la reutilización de componentes, el reciclado de materiales o la recuperación de energía mediante la incineración (Kleindorfer, Singhal, & Van Wassenhove, 2005).

Por lo tanto, las motivaciones de la comunidad empresarial para aplicar prácticas de logística inversa pueden dividirse en dos categorías: proactivas o reactivas. Algunos incentivos proactivos serían la reducción de costos, un mejor perfil, para obtener una ventaja competitiva y mejorar el rendimiento ambiental; las motivaciones reactivas serían los factores legislativos que también explican la decisión de las empresas de adoptar prácticas de logística inversa en sus operaciones diarias (Nikolaou, Evangelinos, & Allan, 2012). A causa de lo anterior, las necesidades de servicio típicas de la cadena de logística inversa incluyen: servicio al cliente, reparación en depósito, fabricación al final de la vida útil, gestión de la tecnología de la información, reciclaje, renovación/escrutinio, gestión de reemplazo, autorización de devoluciones, gestión de repuestos, transporte, almacenamiento y gestión de garantías (Kumar & Putnam, 2008). En suma, un buen sistema de logística inversa debería poder utilizar los recursos y las energías de manera eficaz, proteger el medio ambiente y promover el desarrollo sostenible de la economía regional al igual que desempeñar un papel importante en la manipulación de los productos devueltos o que han llegado al final de su vida útil.

2.2. Gestión de la cadena de suministro y gestión de residuos sólidos

La cadena de suministro se entiende como una red de empresas conectadas por flujos de materiales, información y recursos financieros, en la que cada empresa tiene como objetivo añadir valor al producto, bien o servicio (Avelar-Sosa, García-Alcaraz, & Castrellón-Torres, 2014). Cabe resaltar que el impacto ambiental es otra consideración esencial en el diseño de las cadenas de suministro contemporáneas (Diabat, Al-Salem, & Simchi-Levi, 2014). Por consiguiente, la gestión de la cadena de suministro abarca las actividades generales relacionadas con la transformación y el flujo de bienes y servicios, así como los flujos de información de la fuente de los materiales (Nikolaou et al., 2012).

La gestión de residuos engloba todas aquellas actividades relacionadas con el ciclo de vida de los residuos, e incluye la recogida, el transporte y el tratamiento de los mismos (Recytrans, 2014). Por lo cual, los encargados de los aspectos prácticos de la gestión de los residuos sólidos para una comunidad deben abordar el costo directo (Haas et al., 2003). En la jerarquía de la gestión de los residuos, se debe evitar o reducir la generación desde la fuente y la eliminación de los residuos debe ser la última opción para verter los residuos. Básicamente, la primera opción, es decir, la reducción en la fuente y la prevención tiene por objeto, en general, reducir la cantidad total de residuos que se desechan y fomentar la reutilización de los contenedores y productos similares. El reciclado, incluidas técnicas como el compostaje, debería convertirse en la segunda opción de eliminación de residuos. Si los residuos no pueden ser reciclados, la tercera opción para la eliminación es la incineración. Por último, se recomienda el relleno sanitario como la opción final debido a las complejidades tecnológicas y los costos que conlleva (Abd Hamid, Ishak, & Abu Samah, 2015).

2.3. Generación de residuos sólidos

Se entiende por residuo a todo material inútil o no deseado originado por la actividad humana, en cualquier estado (sólido, líquido, gaseoso y sus respectivas mezclas) y que puede ser liberado en cualquier medio receptor (Ayuntamiento de Albacete, 2006). Los residuos sólidos se consideran generalmente un asunto "urbano" debido a que las tasas de generación de desechos tienden a ser mucho más bajas en las zonas rurales ya que, en promedio, los residentes suelen ser más pobres, compran menos artículos en las tiendas (lo que resulta en menos embalaje) y tienen mayores niveles de reutilización y reciclaje (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012). La generación de residuos sólidos es un tema de gran importancia para las diferentes economías del mundo, pues el crecimiento continuo de los últimos años ha traído consigo ventajas económicas, legales y tecnológicas, pero también nuevos retos para satisfacer las necesidades del crecimiento demográfico, que ha tenido un impacto

adverso en el medio ambiente y, por lo tanto, en nuevos riesgos para la salud, el empleo y también en la economía (Colorado & Echeverri-Lopera, 2019).

Al generarse los residuos, específicamente del aluminio, comienza el ciclo de reciclaje, donde el aluminio usado llega principalmente por dos canales: de los desechos del consumo ya sea doméstico o industrial y de los recortes y virutas que se producen durante la fabricación de productos de aluminio. La selección de las latas consiste en la separación de las latas ferrosas y no ferrosas. Una vez limpiadas, son llevadas a la planta de reciclaje, donde se compactan en bloques de aproximadamente 7 kilogramos, que equivalen a 500 latas. Los bloques se perforan e introducen en un horno, de manera que se consigue la refundición del material para posteriormente hacer lingotes de los cuales se separan las láminas de aluminio reciclado. A partir de los lingotes o las láminas, los productos a realizar dependen de la demanda de la industria (López Escobar, 2010).

2.4. Dinámica de sistemas

De acuerdo con Senge (1995), un “sistema” es un conjunto de variables que se influyen mutuamente. También, tomando como base lo dicho por Jay Forrester, dice que las causas de muchos urgentes problemas públicos, desde la decadencia urbana hasta la amenaza ecológica global, residían en las mismas políticas bien intencionadas que procuraban resolverlos. Estos problemas eran en realidad “sistemas” que tentaban a los funcionarios a actuar sobre los síntomas, no sobre las causas subyacentes, lo cual producía beneficios a corto plazo y perjuicios a largo plazo, y alentaba la necesidad de nuevas intervenciones sobre los síntomas. Para Aracil (1995), un sistema se entiende como una unidad cuyos elementos interaccionan juntos, ya que continuamente se afectan unos a otros, de modo que operan hacia una meta común. Es algo que se percibe como una identidad que lo distingue de lo que la rodea, y que es capaz de mantener esa identidad a lo largo del tiempo y bajo entornos cambiantes. Por tanto, los cambios que se producen en el sistema son reflejo, en alguna medida, de las interacciones que tienen en su seno. Por otra parte, el término dinámica se emplea comúnmente para referirse al efecto contrario de la estática, a fin de hacer alusión al carácter cambiante de aquello que calificamos con esa palabra.

Al hablar de la dinámica de un sistema, se hace referencia a que las distintas variables que podemos asociar a sus partes sufren cambios a lo largo del tiempo, como consecuencia de las interacciones que se producen entre ellas. Su comportamiento vendrá dado por el conjunto de las trayectorias de todas las variables, que suministra algo así como una narración de lo acaecido al sistema (Aracil, 1995). Además Naim & Towill, (1994), proponen una metodología que consiste en dos fases distintas, pero superpuestas. La fase cualitativa se relaciona con la adquisición de conocimientos intuitivos y conceptuales suficientes para

comprender la estructura y el funcionamiento de una cadena de suministro, mientras que la fase cuantitativa se relaciona con la elaboración y el análisis de modelos matemáticos y de simulación.

Cabe destacar que, se han realizado estudios significativos en los sistemas medioambientales, en donde se han evaluado tanto los principales impactos ambientales generados por la logística inversa utilizando dinámica de sistemas (Carmago, Chud, & Osorio, 2017), como también el comportamiento del reciclaje y la identificación de centros de acopio (Osorio & Peña, 2018).

3. CARACTERIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN EL MUNICIPIO DE ZARZAL

3.1. Caracterización de los residuos

En el estudio del contexto de los sistemas de disposición final utilizados realizado por la Superintendencia de servicios públicos domiciliarios en el 2018, se tuvo en cuenta la cantidad de toneladas dispuestas a nivel departamental y se pudo evidenciar que el Valle del Cauca se encuentra entre los departamentos que más residuos generan, pues hay unos, como Antioquia, que producen menos residuos pese a tener una mayor población. Esto se afirma dado que, para ese año, el Valle del Cauca contaba con una población de 4.475,886 habitantes y se generaban 3.592,68 toneladas diarias en promedio de residuos. Cabe resaltar que dichos residuos se disponen en los sistemas autorizados, como en el caso de Zarzal, Valle del Cauca, pues para el mismo año, hubo un promedio de 84,81 toneladas generadas al día, y su disposición final fue el relleno sanitario regional Presidente, ubicado en el municipio de San Pedro, Valle del Cauca (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios & Departamento Nacional de Planeación, 2019).

3.1.1 Caracterización de los residuos en Zarzal, Valle del Cauca

Con miras de obtener información específica sobre el municipio de Zarzal, se acudió a fuentes secundarias pertenecientes a los grupos de interés que permitiesen determinar la gestión que se le da a los residuos sólidos. En primer lugar, conforme con la última actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de Zarzal la cual fue realizada en el año 2015, se indica que los residuos sólidos son ocasionados en el municipio por distintos sectores tales como: el residencial, el comercial, el industrial y el institucional; a su vez, son sumados aquellos residuos que se originan como consecuencia directa de las actividades desarrolladas en las plazas de mercado y en cada uno de los servicios complementarios como el corte de césped, la poda de árboles, el lavado de áreas públicas y la instalación de cestas (P. Sánchez, comunicación personal, 22 de

septiembre de 2020), puesto que todos ellos son objeto de la prestación del servicio público de aseo. Además, es pertinente mencionar que las entidades municipales trabajan de manera conjunta con las entidades regionales responsables de la gestión integral de los residuos sólidos para dar cumplimiento a lo establecido en el manual de funciones del PGIRS (2015-2020) (Lopez Orozco, 2015).

En segunda instancia, en lo que respecta a la cantidad de residuos sólidos generados en el municipio, tomando nuevamente como base la información provista en el PGIRS, para el año 2015 cada habitante del municipio de Zarzal produjo 0,7353473 Kg (735 gr) de residuos sólidos al día y se reportó un total de 8420 usuarios del servicio los cuales son clasificados por tipo y estrato. Además, fueron generadas por la comunidad en general un promedio de 857 toneladas de residuos sólidos al mes y el 61,62% pertenecieron a residuos orgánicos, el 31,10% a residuos reciclables y/o aprovechables y sólo el 7,27% a la categoría de residuos no aprovechables (Lopez Orozco, 2015). Actualmente, si bien el municipio no cuenta con el PGIRS actualizado, la empresa Veolia, encargada del servicio público de aseo, recoge los materiales y los envía al relleno sanitario; aunque conviene destacar que existe una ruta selectiva cuyo propósito es identificar los materiales aprovechables y no combinarlos con los materiales de rechazo, por lo cual disponen un vehículo para la ruta de los residuos de rechazo y otro vehículo para los de la ruta selectiva y cada uno posee una capacidad máxima de 13 toneladas (P. Sánchez, comunicación personal, 22 de septiembre de 2020). Por este motivo, tomando en consideración lo dicho se hace necesario evaluar el impacto que tendría en el ambiente el aprovechar los residuos reciclables con el objetivo establecer una propuesta que permita disminuir el uso de materiales vírgenes al incorporar materiales aprovechables nuevamente dentro de la cadena de abastecimiento por un lado, y también, para prolongar la vida útil del sitio de disposición final y así obtener beneficios no sólo ambientales sino también económicos y sociales por otro.

Por su parte, en cuanto al tema del reciclaje, el municipio de Zarzal está en proceso de articular unas actividades que están relacionadas con que el usuario pueda separar sus residuos reciclables desde la fuente y se irá articulando a diferentes actores recuperadores que están en la zona para que ellos no estén desplazados de este proceso y también, para que las empresas prestadoras de servicio que están clasificadas como estaciones de clasificación y aprovechamiento puedan hacer el ejercicio de la junta selectiva para que la comunidad pueda beneficiarse del servicio de aprovechamiento (P. Sánchez, comunicación personal, 22 de septiembre de 2020).

Por último, por lo que se refiere a la información proporcionada para la entidad prestadora del servicio público de aseo, es necesario señalar que la cobertura barrido es del 100% para el caso urbano; esto quiere decir que todos los barrios, vías principales, residenciales y zonas verdes del municipio cuentan con el servicio de recolección y transporte de los residuos, los cuales son recogidos con

regularidad gracias a que se efectúan 15 rutas por semana para garantizar el cubrimiento total de la zona (Lopez Orozco, 2015). Sin embargo, es preciso aclarar que Zarzal no cuenta con estaciones de transferencia debido a que las mismas no son requeridas por la normativa, y a causa de esto, como se mencionó anteriormente, los desechos sólidos son transportados hasta el relleno sanitario regional de Presidente, el cual cuenta con todas las tecnologías y cumple con todos los aspectos ambientales, licencias ambientales, manejo y tratamiento de lixiviados para garantizar que todos los materiales que son dispuestos no generen contaminación ambiental (P. Sánchez, comunicación personal, 22 de septiembre de 2020).

No obstante, cabe destacar que en el municipio existen tres bodegas, centros de acopio y/o estaciones de clasificación y aprovechamiento designadas como pequeñas, (cuya área es menor a 150 m²), dos designadas como medianas (cuya área se encuentra entre 150 y 999 m²) y hasta ahora, no se registra ninguna en la categoría de grande (área igual o mayor a 1.000 m²) (Lopez Orozco, 2015).

3.1.2 Política vigente

Acorde a la información publicada por la Cámara de Comercio de Bogotá (2020), “en los últimos años Colombia se ha propuesto incrementar su capacidad de reutilizar la basura, pues según el más reciente informe de Disposición Final de Residuos del Departamento Nacional de Planeación (DNP) en el país se generaron 12 millones de residuos sólidos en 2019 y solo se recicló el 16,5%”. Por esta razón, y dado que el país ha venido evidenciando esta problemática cada vez con más frecuencia, desde el año 2018 se publicó la resolución 1407, con la cual el gobierno reglamenta la gestión ambiental y establece el compromiso que tienen las empresas de recoger los empaques y envases de papel, cartón, plástico, vidrio y metal que introducen en el mercado, excluyendo los usados en el sector farmacéutico en medicamentos primarios o peligrosos. La política pública prevé que con esta norma se incorporen los desechos de nuevo al ciclo económico y se cumpla con unas metas de captación que comienzan con el 10% en 2021, para luego aumentar en 2% y 3% hasta llegar al 30% al cierre del 2030. La norma también pretende que las empresas inviertan en investigación y desarrollo del ecodiseño para cumplir con el proceso y generar sensibilización y cultura ciudadana al rededor del adecuado manejo de estos materiales (MinAmbiente, 2018).

Además, la ley 99 de 1993 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones (Bonev & Alexandrov, 1993).

3.1.3 Reporte de las toneladas efectivamente aprovechadas

Tomando como base la publicación realizada por la Superintendencia de servicios públicos domiciliarios en el mes de noviembre de 2018, de enero a octubre de dicho año se reportaron 767.137 toneladas aprovechadas al SUI por 232 prestadores de la actividad de aprovechamiento, y con respecto al 2017, hubo un incremento del 44,8% en el valor de las toneladas reportadas en dicho período (529.517) y del 37,2% en los prestadores que realizaron el reporte de la información (169).

El lugar de origen de residuos aprovechados con mayor participación a nivel nacional es Bogotá, al haber hecho el reporte del 84,8% de las toneladas aprovechadas en 2017 y el 80% de las 767.137 toneladas reportadas en 2018. El Valle del Cauca se encuentra en el séptimo lugar con un reporte del 1,07% indicando que, para tanta población que tiene el departamento, no se aprovechó lo suficiente en el 2018, pues sólo fueron aprovechadas 8.208,36 toneladas de las aproximadamente 970.023,6 que generó en ese año (Superservicios, 2018).

Cabe mencionar que de las 767.137 toneladas reportadas, la familia de materiales con mayor representación es la del papel y cartón (55,1%), seguida de la familia de metales (29,7%), en tercer lugar se encuentra la familia de plásticos (8,8%), seguida de la familia de vidrio y la familia de madera con 4,9% y 1,2% respectivamente, y en el último lugar está la familia de textiles (0,4%) (Superservicios, 2018).

Tabla 1. Distribución de las toneladas aprovechadas por familia de material reportadas en 2018

Familia	Papel y cartón	Metales	Plásticos	Vidrio	Madera	Textiles
Toneladas Aprovechadas	55,1%	29,7%	8,8%	4,9%	1,2%	0,4%

Fuente. Informe Nacional Aprovechamiento (Superservicios, 2018)

La tabla 1 muestra que después del papel y cartón, la familia de metales ocupa el segundo lugar con 29.7% en el aprovechamiento efectivo de los residuos, dando a entender que los diferentes productos derivados de este material son altamente demandados en el país, ya sea por medio de materiales para construcción, envases para alimentos y bebidas, estructuras para vehículos, entre otros.

En la tabla 2 se observa que para el 2018, la cantidad de metales reportada por los prestadores de la actividad de recolección ascendió al 83,33%, representando el 25% del total de los residuos reportados en el país para dicho año. Además, del total de los metales reportados, el 2,63% corresponden al aluminio, por lo que se puede decir que Colombia tiene gran oportunidad en su aprovechamiento, pues como se puede observar, es el tercer residuo de la familia de metales que más está siendo reportado en el país, señalando la existencia de un buen auge debido a la rentabilidad que esto conlleva. Por tal motivo, se debe optar por lograr una mayor

tasa de recuperación de dicho material, teniendo en cuenta las consideraciones pertinentes para el diseño de una red de logística inversa que facilite a las empresas dedicadas a la producción de aluminio secundario, ya sean locales o extranjeras, el reprocesamiento efectivo y su óptimo aprovechamiento.

Tabla 2. *Distribución de materiales de la familia de metales reportadas para el 2018*

Material	Chatarra	Otros metales	Aluminio	Cobre	Acero	Bronce	Antimonio
Toneladas Reportadas	83,33%	13,55%	2,63%	0,21%	0,13%	0,12%	0,02%

Fuente. Informe Nacional Aprovechamiento (Superservicios, 2018)

A nivel departamental, en lo referente a la distribución porcentual de cada familia de material para el año 2018, en el Valle del Cauca el 15,59% pertenece a la familia de metales (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019), y con respecto a su aprovechamiento, y pese a que hay empresas dedicadas al reciclaje y reprocesamiento de este residuo ubicadas en el sector, en el departamento sólo se aprovechó el 1% de los residuos de metales generados, ubicándose en el último lugar en comparación con otros departamentos.

La tabla 3 presenta los datos pertenecientes al municipio de Zarzal, Valle del Cauca, con base en la última actualización del PGIRS realizada en el año 2015. De acuerdo con la información, se recogieron 88.476 kg de residuos de aluminio entre los meses de septiembre a diciembre. Esto, contando la empresa Colombina, ubicada en La Paila, Valle del Cauca y a todos los corregimientos pertenecientes al municipio.

Tabla 3. *Caracterización de la generación de residuos de aluminio en Zarzal, Valle*

Zona	Cantidad (Kg)
Estrato 1	1,13
Estrato 2	0,88
Estrato 3	1,78
Estrato 4	0,35
Comercio	1,02
La Paila	1,5
Quebrada Nueva	0,873
Vallejuelo	0,33
Limones	0,613
Colombina	80
Total	88,476

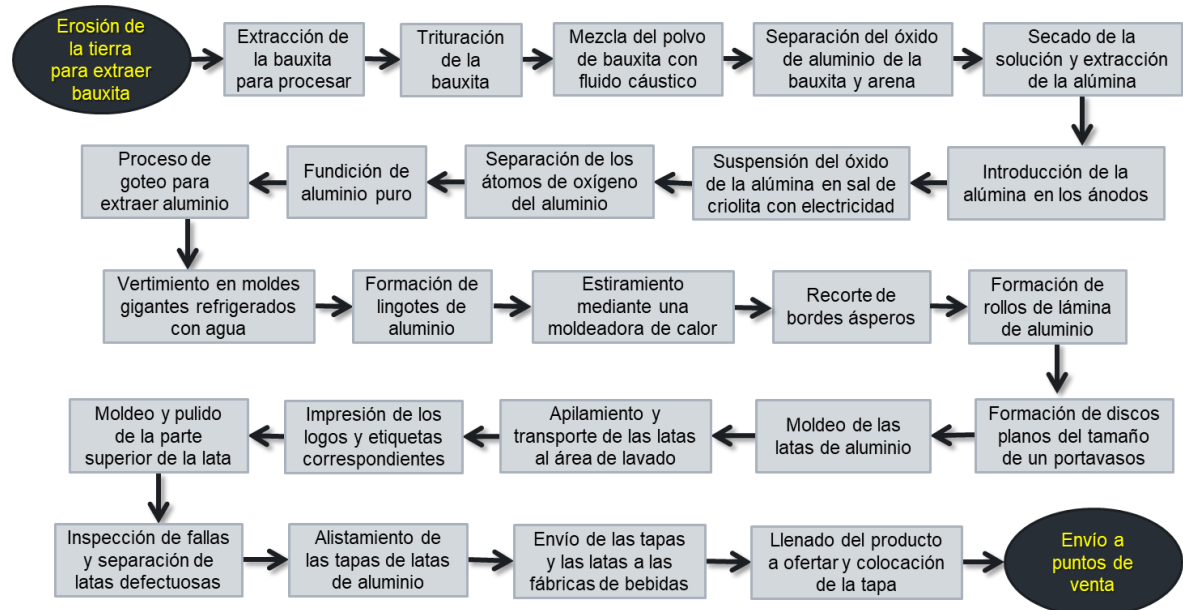
Fuente. Elaboración propia a partir de la última actualización del PGIRS del municipio de Zarzal, Valle del Cauca (Lopez Orozco, 2015)

Cabe decir que la empresa Veolia ha venido trabajando en el municipio desde el año 2011 y cuenta con dos estaciones de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos las cuales se encuentran ubicadas en Palmira y Tuluá, Valle del Cauca. Además, pese a que esta empresa cuenta con una capacidad total para la recolección debido a que la oferta de los vehículos de aseo se realiza acorde a la demanda del municipio, también tiene un equipo encargado de educar acerca de la gestión de todos los residuos en los barrios con los presidentes de junta, comunidades, labor social, colegios, entidades oficiales y asimismo, las industrias en donde hay programas de gestión social (P. Sánchez, 22 de septiembre de 2020).

3.2. Proceso de fabricación de las de aluminio

Debido a que este proyecto tiene como enfoque de estudio el factor ambiental, se precisa dar idea de cómo durante el proceso de transformación al que son sometidas las materias primas para producir el aluminio puro se generan emisiones claves dentro de la problemática en la cual se va a trabajar. Por esta razón, en la figura 1 se ilustra el proceso de fabricación del aluminio primario, y específicamente de las latas, puesto que con este material se pueden hacer varios productos ya sea del sector automotriz, construcción, envases y demás. Este proceso inicia con la extracción de la bauxita, la cual una vez lavada y triturada, es mezclada con fluido cáustico a fin de obtener alúmina purificada por medio del uso de ánodos recubiertos en carbón. De ahí, mediante electrólisis la alúmina se descompone y se obtiene aluminio líquido puro para su posterior transformación en láminas y así moldear el producto a fabricar, que en este caso son las latas, las cuales son enviadas a fábricas de alimentos y bebidas para su llenado y posterior venta en el mercado.

Figura 1. Diagrama de proceso de fabricación de latas de aluminio



Fuente. Adaptado de Peiro Sáez, (2014)

Tabla 4. Residuos de aluminio según su origen y aleación

		Aleaciones	
		Moldeo	Forja
Origen	Pos-industrial	Viruta Residuos Fundición Bandas	Papel foil Perfilería Cables Láminas
	Pos-consumo	Motores Autopartes	Placas Envases Latas

Fuente. Adaptado de Reciclaje de aluminio (Mill et al., 2015)

La tabla 4, indica cómo el aluminio, considerado un material con alto potencial de aprovechamiento, es recuperado habitualmente gracias a los planes de reciclaje pos-consumo y pos-industriales que implementan las ciudades. Sin embargo, para llevar estos residuos al mercado es necesario: (a) dar un tratamiento adecuado a las impurezas para cumplir los requerimientos de calidad de la industria (Delgado, 2016) y (b) controlar su composición química para obtener las propiedades mecánicas deseadas en el producto (Mill et al., 2015). Lo anterior es posible mediante la separación de los desechos por familia de materiales (polímeros, ferrosos y no ferrosos), la clasificación del aluminio por tipo de producto (lata, perfil, autoparte, papel) y su fundición de manera independiente para evitar la mezcla de aleaciones. Para poder clasificar el aluminio durante el proceso de reciclaje, se debe considerar el tipo de aleación de acuerdo con el origen del producto.

3.2.1 Metalurgia de aluminio secundario

La extracción del aluminio de la bauxita se efectúa en tres etapas: minería, refinación y reducción. La bauxita se extrae, se lava y se seca antes de ser destinada a la refinería donde se separa del aluminio. Según sus aleaciones se clasifica en hierro, zinc, manganeso, magnesio, silicio, cobre, estaño o titanio (Castillo, Martinez, & Rojas, 2014). El aluminio, después de su fase de reciclado, debería terminar en un producto igual o similar al original, por ejemplo, una lata en otra lata, debido a las aleaciones que contiene dicho material, aunque normalmente esto no sucede y terminan siendo productos completamente diferentes.

Por este motivo, conviene aclarar que existen dos clases de reciclado del aluminio, el de “ciclo cerrado” o “ciclo abierto”. El de ciclo cerrado es el más sencillo, en el que el producto primario se recicla y se produce un producto igual al inicial teniendo la misma calidad de material, manteniéndose en el mismo sistema siempre. El proceso de ciclo abierto es más complejo, ya que es cuando un producto se recicla y se fabrica otro producto distinto que puede cambiar sus propiedades originales, por lo que el producto inicial cambia de sistema (Antonio, 2015).

En la mayoría de los casos, el primer paso consiste en la eliminación del magnesio que pudiera haber en la chatarra que entra como materia prima, con el fin de evitar la degradación del producto obtenido en las operaciones de moldeo. Se estima que la chatarra puede contener hasta un 1% de magnesio, por lo que se necesita reducirlo hasta el 0,1. Mediante el empleo de sales se obtiene un mayor grado de recuperación del aluminio, ya que estas disminuyen el grado de oxidación del metal durante la fusión (las sales forman una capa fundida sobre el aluminio y ayudan a prevenir la oxidación), con el consecuente aumento de la producción de escorias salinas (Sistema español de inventario de emisiones, 2019).

Por último, cabe decir que para hacer 1000 Kg de aluminio, se necesitan 10.000 Kg de bauxita que producen 500 kg de alúmina, 80 kg de criolita, 600 kg de carbón más 14.000 kWh de energía eléctrica. Debido al alto consumo eléctrico, las plantas de electrólisis del aluminio se ubican junto a lugares donde la energía es más barata, tal como centrales hidroeléctricas, nucleares o países productores de petróleo (Lontana Group).

3.2.2 Pretratamiento de las chatarras de aluminio

Antes de cualquier proceso de metalurgia, el aluminio debe someterse a algunas o todas estas operaciones:

- Estrío y clasificación de los géneros por dimensiones y calidades.
- Troceamiento de los más voluminosos y ligeros (tiras, láminas, hilos, etc.) y trituración y molienda de los más duros y compactos (grasos, espumas, etc.).
- Separación magnética del hierro, y
- Eliminación de los contaminantes (pintura, caucho, aceites, plásticos, etc.).

El objetivo principal de someter el material de aluminio a un proceso previo de inspección y clasificación es identificar y separar todo el material de aluminio que no requiere otro tratamiento previo, sino que se encuentra limpio y puede ser almacenado o alimentado directamente al horno de fundición. Además de separar otros materiales como plástico, hierro, acero inoxidable, cinc y latón libres, que se consideran contaminantes (Manabì, El, & Lectivo, 2010).

3.2.3 Fundición del aluminio secundario

La fusión o fundición es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia del estado sólido al estado líquido por la acción del calor. Cuando se calienta un sólido, se transfiere calor a los átomos que vibran con más rapidez a medida que gana energía (Manabì et al., 2010).

3.2.4 Refino y moldeo

El metal puede sangrarse desde el horno de fusión, donde se realizan adiciones de elementos de aleación, bien directamente a un sistema de moldeo, bien a través de un sistema de transferencia a un horno de retención (donde pueden hacerse otras adiciones de elementos de aleación). El metal es luego refinado en el horno de retención o en un reactor en línea, para eliminar los gases y otros metales, generalmente del mismo modo que el aluminio primario (Antonio, 2015).

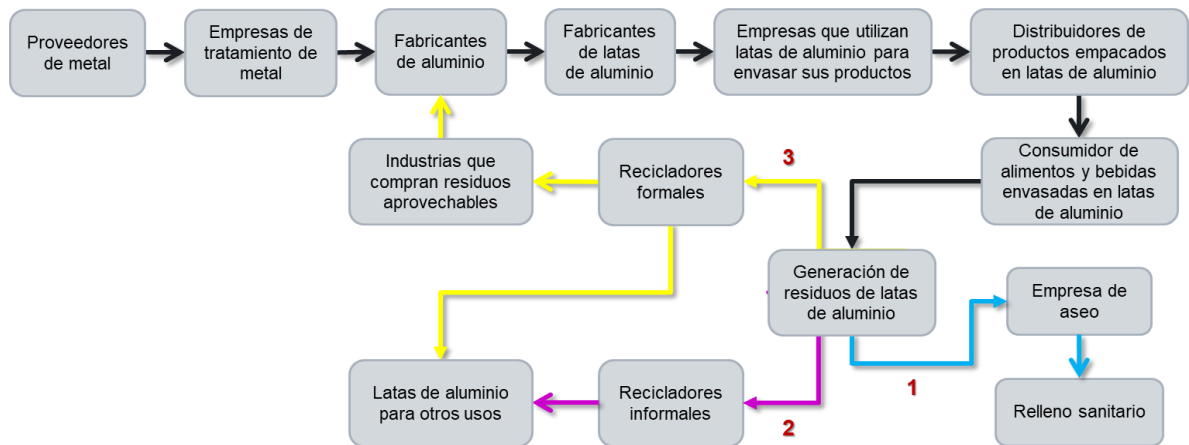
En su proceso de transformación, las latas de aluminio tardan solo 60 días para ser recicladas y convertirse en una lata nueva o en otro tipo de producto como pueden ser: lámpara con anillas de latas, adornos navideños reutilizando latas de aluminio, copia de una llave con una lata de conservas, cortina con latas de refresco, joyero y comedero para pájaros con una lata de conserva, mini estufa de alcohol con una lata de aluminio, tejas con latas de aluminio, lámpara con una lata de aluminio, maceta con lata de conserva, rallador con una lata (EcoInventos, 2013).

3.3. Actores relevantes dentro de la cadena de suministro

Luego de llevar a cabo un proceso de revisión de la literatura concerniente a la logística inversa de latas de aluminio, fue necesario para su validación acudir a una persona directiva de la empresa dedicada a la gestión de este tipo de residuos en el municipio de Zarzal, Valle del Cauca, para así, lograr construir el diseño de la red de la logística inversa presentada en este trabajo.

En la figura 2, se presentan los actores que intervienen en la logística inversa de las latas de aluminio. Para comenzar, los proveedores envían el metal a las empresas que tratan este material, de ahí, pasa a los fabricantes de aluminio y a los de latas concretamente. Luego, los fabricantes envían las latas de aluminio a empresas de productos enlatados para posteriormente enviarlo a los distribuidores y luego a los consumidores de bebidas envasadas en latas de aluminio. Una vez las latas son usadas por los consumidores, se generan residuos, los cuales pueden seguir tres caminos: en el primero, los residuos son recogidos por la empresa de aseo y llevados a los rellenos sanitarios; en el segundo, los cacharrereros informales envían los residuos a otros mercados donde se pueden hacer manualidades, artesanías o disponer las latas para otros usos en general; y en el tercer camino, los recicladores formales pueden disponer los residuos para otros usos o bien, enviarlos a industrias dedicadas al aprovechamiento del aluminio para que gracias al proceso adecuado pueda ser redistribuido en el mercado y dar lugar al inicio de la cadena nuevamente.

Figura 2. *Diseño de red de la logística inversa de las latas de aluminio*



Fuente. Elaboración propia con base en Carbajo-de-Lera, Alfalla-Luque, & Medina-Lopez, (2011).

Considerando que el enfoque de estudio es el municipio de Zarzal, es preciso decir dentro de los actores relevantes se encuentra la comunidad, que son todos los usuarios del servicio público de aseo y quienes generan residuos, los cuales se van para el desecho sanitario, por lo que se viene avanzando en la gestión integral del proceso de reutilización y transformación de estos materiales aprovechables para que vayan menos residuos al relleno sanitario y se les brinde el tratamiento adecuado para un mayor aprovechamiento. Estos son lineamientos dados desde el Ministerio del Medio Ambiente y seguirán siendo articulados en todas las alcaldías municipales, las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATA), la misma gestión de medio ambiente y demás. Entonces, son actores importantes: la comunidad que son los usuarios, las industrias, los recuperadores de las zonas y las autoridades de control, la Superintendencia y las guías que controlan todo el proceso de cumplimiento de la actividad de recolección de residuos domiciliarios (P. Sánchez, comunicación personal, 22 de septiembre de 2020). Además, según la información suministrada en el PGIRS, en el municipio hay 6 recicladores informales que no están organizados ni pertenecen a alguna de las figuras jurídicas previstas en el artículo 15 de la Ley 142 de 1994 para prestar el servicio público de aseo (Lopez Orozco, 2015).

4. MODELO SISTÉMICO DE LA LOGÍSTICA INVERSA DE LAS LATAS DE ALUMINIO

4.1. Estrategias de logística inversa

El impacto ambiental asociado a la gestión inadecuada y en algunos casos inexistente de los residuos de latas de aluminio, es una problemática que surge de la poca cultura ambiental de los consumidores de bebidas enlatadas frente al reciclaje de materiales aprovechables. Por esta razón, y con miras de seleccionar la mejor estrategia que contribuya al diseño de una red de logística inversa para los residuos de latas de aluminio, se presentan a continuación las más apreciables:

- La primer estrategia, es *la recolección de estos residuos por parte de los recicladores informales. Lo que estos hacen, es vender el material a otros mercados para posteriormente ser utilizados en manualidades o artesanías.* Esta estrategia surge en vista de que el aluminio es un material muy fácil para transformar en productos artesanales por su capacidad de manipulación rápida y la utilidad del mismo en necesidades de las personas (Contreras, 2013).
- La segunda estrategia, es *la recolección de los residuos por parte de los recicladores formales para luego venderlos ya sea a mercados informales de fabricación de artesanías u otros productos hechos a partir de latas de aluminio o a empresas dedicadas al tratamiento de este residuo para convertirlo en el mismo producto, es decir, producir latas a partir de aluminio secundario.* De las principales acciones que contribuyen a esta estrategia, está la separación en la fuente y la implementación de rutas de recolección selectiva planteadas y favorecer así la prevención de la contaminación por la incorrecta disposición de estos residuos, así como la disminución de la cantidad a ser dispuesta en el relleno sanitario (Palacios Gómez, 2015).

Cabe aclarar que dentro de las alternativas de disposición final se encuentran las presentadas en el diseño de red de la logística inversa de las latas de aluminio (figura 2), sin embargo, se optó por escoger como estrategias las anteriormente dichas, ya que la disposición a relleno sanitario se da antes de la recolección de las latas de aluminio para sus posteriores usos; es decir, que los residuos de latas se disponen bien sea para otros usos o para aluminio secundario una vez son recolectados para su posterior tratamiento según el tipo de disposición a efectuar.

4.2. Selección de la estrategia de logística inversa

Para efectos de seleccionar la mejor estrategia, se realizan diferentes escenarios de estudio los cuales indican que la estrategia más viable es la recolección de los

residuos por parte de los recicladores formales para luego convertirlos de nuevo en latas de aluminio ya que genera menos contaminación ambiental, y por ende afecta positivamente el aspecto económico y social.

4.3. Contextualización del caso

Para llevar a cabo la simulación del modelo de la logística inversa de las latas de aluminio, se emplearon los datos de ventas de bebidas enlatadas en el municipio de Zarzal¹. Además, se realizó una investigación de las prácticas de gestión de residuos aplicadas por los habitantes del municipio y no se encontró algún referente que haya abordado la logística inversa de las latas de aluminio mediante la dinámica de sistemas, por lo que se plantea que el modelo aquí presentado constituye un primer aporte en este tema de investigación debido a los beneficios que ha tenido en otras investigaciones realizadas. De esta manera, se propone un modelo que evalúe los principales impactos ambientales generados por las tres estrategias de logística inversa una vez las latas se conviertan en residuo. Por ello, para describir el modelo de logística inversa propuesto, primero se presenta la explicación del diagrama causal, seguido del diagrama Forrester y finalmente, se simula el modelo con los datos recolectados. Es conveniente aclarar que para el caso de estudio, se utilizaron datos de latas de aluminio de 355 ml porque de acuerdo con la información recolectada, son las que comúnmente tienen mayor demanda por los habitantes del municipio del caso de estudio.

4.4. Proceso de modelado en dinámica de sistemas

Para el desarrollo del modelo, se hace uso de un diagrama causal donde se representan los elementos que influyen en el sistema y así, poder analizar su comportamiento al plantear distintos escenarios donde se expongan las variables objeto de estudio, sus relaciones y las estrategias seleccionadas como parte del diseño de la cadena de logística inversa para las latas de aluminio.

4.5. Diagrama causal

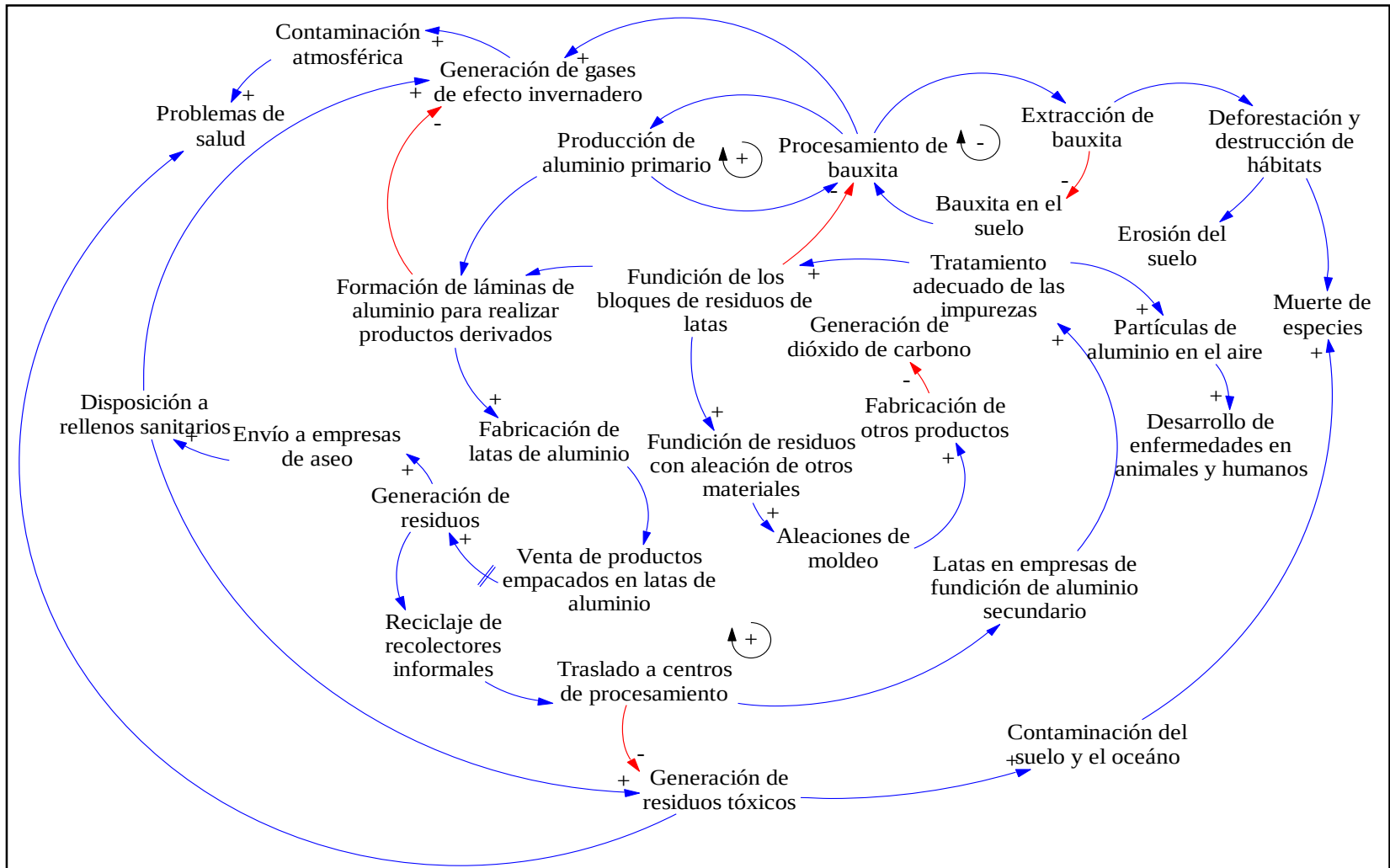
El comportamiento de las diferentes variables que se ven afectadas dentro de la logística inversa de las latas de aluminio se representan a partir del diagrama causal en la figura 3, en donde la red logística comienza con la producción de aluminio primario que activa la venta de productos envasados en latas de aluminio; al terminar su ciclo de vida, son desechadas y es allí donde inicia el análisis de las disposiciones finales o el uso en otros mercados en donde se busca generar el

¹ Algunos datos fueron estimados para efectos de aplicación del modelo.

menor impacto ambiental posible. Este impacto ambiental está medido en esta investigación en términos de GEI por medio de las tres estrategias presentadas.

Se puede visualizar que el diagrama causal presenta un proceso cíclico, el cual tiene como factor inicial la producción del aluminio primario hasta que las latas fabricadas en este tipo de metal se convierten en residuos y son llevadas a las empresas de aseo. A partir de dichos residuos, se comienza a hacer la gestión y se da lugar a la logística inversa por medio de dos caminos que pueden tomar. El primero, es ser trasladados a los centros que convierten residuos en latas nuevamente o en otros productos fabricados a partir de este material, haciendo este método atractivo gracias a los beneficios tanto ambientales como económicos que trae consigo el disminuir el uso de la materia prima virgen al reutilizar este tipo de metal. El segundo y menos atractivo, es ser dispuestos a rellenos sanitarios, lo cual no sólo puede llegar a ser muy contaminante debido a su forma de eliminación, sino que también entre mayor sea la cantidad de latas que lleguen a ellos, menor será la capacidad instalada de los mismos. Por esto, uno de los principales propósitos de este proyecto, es evaluar el impacto ambiental consecuente de cada estrategia, buscando reducir la tasa de disposición a rellenos para ayudar al cuidado del mismo.

Figura 3. Diagrama causal de la logística de las latas de aluminio

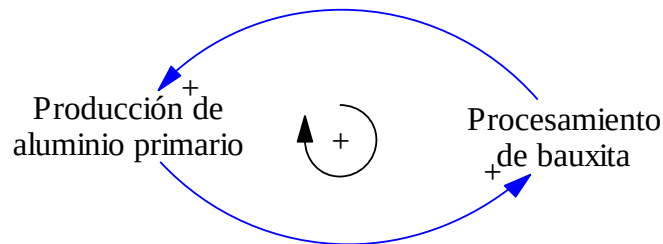


Fuente. Elaboración propia

4.6. Establecimiento de relaciones (Diagrama Causal)

En el planteamiento del diagrama, se logran identificar tres bucles, siendo dos de ellos de refuerzo y uno de compensación. El bucle 1 se muestra en la figura 4 donde se representa la producción de aluminio primario, la cual influye positivamente en el incremento de la bauxita procesada y esta a su vez, aumenta el gasto de energía y agua. Así, entre menor sea la producción de aluminio primario menor será el procesamiento de bauxita y por ende menos gasto de agua y energía.

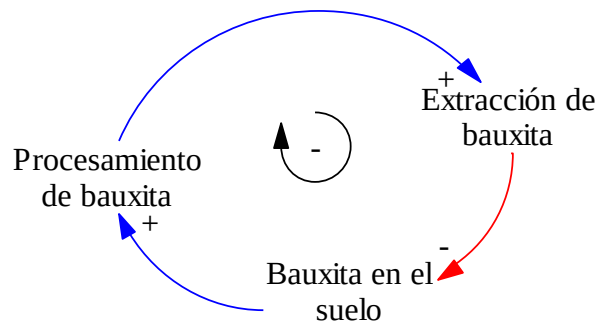
Figura 4. Bucle 1 (de refuerzo): Producción de aluminio primario



Fuente. Elaboración propia

En el bucle 2 (figura 5), se observa cómo los suelos con bauxita disponibles se ven afectados por la extracción de la misma para su posterior procesamiento, conllevando a que existan menos lugares de dónde extraerla y por consiguiente, un menor procesamiento de bauxita. Este efecto es compensado ya que al haber menos bauxita en el suelo, habrá menos procesamiento de bauxita.

Figura 5. Bucle 2 (de compensación): Procesamiento de bauxita

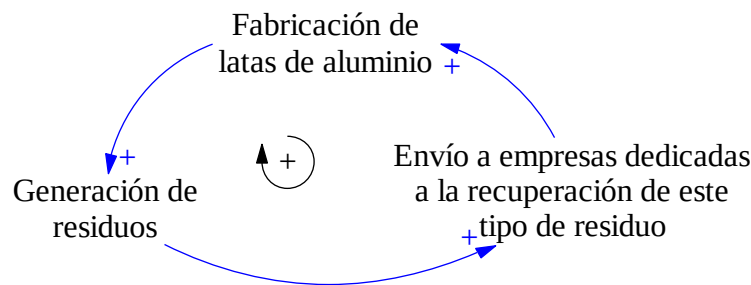


Fuente. Elaboración propia

En el bucle 3 (figura 6), se observa cómo la fabricación de latas de aluminio influye de manera positiva en la generación de residuos y estos, contribuyen a que sea

mayor la posibilidad de envío a empresas dedicadas a recuperar este tipo de material. Este efecto es retroalimentado y hace crecer la fabricación de latas a partir de aluminio secundario reduciendo constantemente el uso de materia prima virgen.

Figura 6. Bucle 3 (de refuerzo): Generación de residuos



Fuente. Elaboración propia

4.7. Clasificación de las variables del diagrama Forrester

A continuación, se presentan las variables que intervienen en el diagrama Forrester de las latas de aluminio propuesto y se explica la respectiva función de cada una.

4.7.1 Variables de nivel de la logística inversa de las latas de aluminio

Las variables de nivel de la logística inversa de las latas de aluminio se explican a continuación. Además, la tabla 5 muestra las ecuaciones y unidades utilizadas.

- **Inventario de bauxita:** Acumula la bauxita necesaria para producir alúmina. El flujo de entrada es extracción de bauxita y el de salida es extracción de alúmina.
- **Inventario de alúmina:** Almacena la cantidad de alúmina para la producción de latas de aluminio primario. Tiene como flujo de entrada la extracción de alúmina, y como flujo de salida, la extracción de aluminio puro a partir de alúmina.
- **Inventario de aluminio puro:** Acumula la cantidad de aluminio que se tiene en inventario proveniente de la extracción de aluminio, el flujo de salida corresponde a la producción de latas de aluminio primario.
- **Inventario de latas de aluminio:** Indica la cantidad de latas de aluminio acumuladas que son fabricadas de acuerdo con la producción de latas de aluminio primario y la producción de latas de aluminio secundario, el flujo de salida corresponde a la venta a empresas de productos enlatados.
- **Inventario de latas de aluminio recolectadas:** Se refiere a la cantidad de latas de aluminio recolectadas que se debe tener en inventario para producir latas a

partir del material secundario. Tiene como flujo de entrada los residuos de latas y como flujo de salida, la producción de latas a partir de aluminio secundario.

- **Latas de aluminio nuevas en el mercado:** Indica la cantidad de latas nuevas disponibles en el mercado. Depende del flujo de venta de productos enlatados y el flujo de salida de productos consumidos en latas de aluminio.
- **Residuos de latas generados:** Representa la cantidad de residuos de latas que se acumulan. A esta variable ingresa el flujo de los productos consumidos en latas de aluminio e indica la cantidad que se recolecta o envía al relleno sanitario.
- **Residuos de latas de aluminio recolectados:** Es la acumulación de los residuos de latas de aluminio que se van a disponer para otros usos o se van a disponer a proceso de aluminio secundario. Tiene como flujo de entrada la recolección de residuos de latas de aluminio.
- **Latas de aluminio a reprocesar:** Almacena los residuos de latas de aluminio que se disponen a proceso de aluminio secundario. Tiene como flujo de entrada la disposición a proceso de aluminio secundario y como flujo de salida los residuos de latas de aluminio a inventario.
- **Latas de aluminio en el relleno sanitario:** Acumula las latas de aluminio que se disponen en el relleno sanitario con el objeto de saber cuánto volumen ocupan en él. Contiene como flujo de entrada la disposición a relleno sanitario.

Tabla 5. Ecuaciones y unidades de las variables de nivel del diagrama de Forrester de la logística inversa de las latas de aluminio

VARIABLES DE NIVEL		
Nombre	Ecuación	Unidad
Inventario de bauxita	INTEG (Bauxita como materia prima)	Kg
Inventario de alúmina	INTEG (extracción de alúmina - Extracción de aluminio puro a partir de alúmina)	Kg
Inventario de aluminio puro	INTEG (Extracción de aluminio puro a partir de alúmina - Producción de latas de aluminio primario)	Kg
Inventario de latas de aluminio	INTEG (Producción de latas de aluminio primario - Venta a empresas de productos enlatados + Producción de latas a partir de aluminio secundario)	Latas
Inventario de latas de aluminio recolectadas	INTEG (Residuos de latas de aluminio a inventario - Producción de latas a partir de aluminio secundario)	Kg
Latas de aluminio nuevas en el mercado	INTEG (Venta de productos enlatados - Productos consumidos en latas de aluminio)	Latas
Residuos de latas generados	INTEG (Productos consumidos en latas de aluminio - Disposición a relleno sanitario-Recolección de residuos)	Latas
Residuos de latas de aluminio recolectados	INTEG (Recolección de residuos - Disposición a proceso de aluminio secundario - Disposición para otros usos)	Latas
Latas de aluminio a reprocesar	INTEG (Disposición a proceso de aluminio secundario - Residuos de latas de aluminio a inventario)	Latas

VARIABLES DE NIVEL		
Nombre	Ecuación	Unidad
Latas de aluminio en el relleno sanitario	INTEG (Disposición a relleno sanitario)	Latas

Fuente. Elaboración propia

4.7.2 Variables de flujo de la logística inversa de las latas de aluminio

Las variables de flujo de la logística inversa de las latas de aluminio se explican a continuación. Además, la tabla 6 muestra las ecuaciones y unidades utilizadas.

- **Extracción de bauxita:** Contiene la bauxita usada de acuerdo con la demanda de alúmina necesaria para fabricar latas de aluminio primario.
- **Extracción de alúmina:** Es la cantidad de alúmina usada acorde a la demanda de latas de aluminio, la tasa de bauxita/ton de aluminio y la tasa de aluminio/lata.
- **Extracción de aluminio puro a partir de alúmina:** Es el flujo de alúmina desde el inventario de alúmina, hasta el inventario de aluminio puro.
- **Producción de latas de aluminio primario:** Indica la cantidad de latas de aluminio primario que van a ser producidas cada año de acuerdo con la demanda requerida, para después ser almacenadas en el inventario de latas de aluminio. Con este flujo, se calcularán las emisiones de GEI, el gasto de energía y agua utilizada para la producción de latas de aluminio primario.
- **Venta de latas de aluminio:** Indica cuántas latas vendidas a empresas de productos enlatados se van a encontrar en el mercado, de acuerdo con la demanda de bebidas enlatadas.
- **Productos consumidos en latas de aluminio:** Las latas de aluminio que están en el mercado se van a convertir en residuo, por lo tanto, esta variable indica qué cantidad de productos enlatados se consumen por año.
- **Recolección de residuos:** El flujo tiene como objetivo identificar la cantidad de residuos de latas de aluminio que se recolectan según una tasa establecida.
- **Disposición para otros usos:** Según la tasa de transformación de latas de aluminio, este flujo indica cuántos residuos de latas se van a disponer a transformación a otro producto. Con este flujo se calcularán las emisiones de GEI para la producción anual de otros productos.
- **Disposición a proceso de aluminio secundario:** Indica la disposición de residuos a proceso de aluminio secundario. Con este flujo se calculará las emisiones de GEI, el gasto de energía y agua para la producción anual de latas de aluminio secundario.
- **Residuos de latas de aluminio a inventario:** Indica la cantidad de residuos de latas de aluminio que se van a utilizar como materia prima para el reprocesamiento de estas.
- **Producción de latas a partir de aluminio secundario:** Indica la cantidad de latas de aluminio secundario que se van a producir según la producción

requerida de latas de aluminio secundario y el inventario de latas de aluminio recolectadas.

- **Disposición a relleno sanitario:** El flujo indica los residuos de latas de aluminio que se disponen al relleno sanitario, según la tasa de disposición a utilizar. Con este flujo se calculará el volumen ocupado en el relleno sanitario de los residuos de latas de aluminio que no son recolectados.

Tabla 6. Ecuaciones y unidades de las variables de flujo del diagrama de Forrester de la logística inversa de las latas de aluminio

VARIABLES DE FLUJO		
Nombre	Ecuación	Unidad
Extracción de bauxita	Demanda de bauxita	Kg/año
Extracción de alúmina	Inventario de bauxita como materia prima*4	Kg/año
Extracción de aluminio puro a partir de alúmina	Inventario de alúmina*2	Kg/año
Producción de latas de aluminio primario	MIN ((Inventario de aluminio puro / 0.013), Producción requerida de latas nuevas)	Latas/año
Venta de latas de aluminio	MIN (Inventario de latas de aluminio, Demanda de bebidas enlatadas)	Latas/año
Productos consumidos en latas de aluminio	Latas de aluminio nuevas en el mercado	Latas/año
Recolección de residuos	Residuos de latas generados * Tasa de recolección	Latas/año
Disposición para otros usos	Tasa de transformación * Residuos de latas de aluminio recolectados	Latas/año
Disposición a proceso de aluminio secundario	Residuos de latas de aluminio recolectados * Tasa de reprocesamiento	Latas/año
Residuos de latas de aluminio a inventario	Latas de aluminio a reprocesar	Latas/año
Producción de latas a partir de aluminio secundario	MIN (Producción requerida latas de aluminio secundario, Inventario de latas de aluminio recolectadas)	Latas/año
Disposición a relleno sanitario	Tasa de disposición en relleno sanitario * Residuos de latas generados	Latas/año

Fuente. Elaboración propia

4.7.3 Variables auxiliares de la logística inversa de las latas de aluminio

La tabla 7 muestra las ecuaciones/parámetros y unidades de las variables auxiliares de la logística inversa de las latas de aluminio. Además, se explican a continuación:

- **Demanda de bauxita:** Muestra cuánta bauxita se necesita conforme la cantidad de alúmina a extraer por cada lata de aluminio a fabricar.

- **Producción requerida de latas nuevas:** Indica la cantidad necesaria de latas de aluminio nuevas a producir para satisfacer el pronóstico de la demanda. El primer año simulado, inicia con la demanda de latas entre el periodo 2020-2021.
- **Demanda de bebidas enlatadas:** Indica la demanda de bebidas envasadas en latas de aluminio primario. Para el primer año de simulación, se utiliza la demanda de latas de aluminio tomada de las ventas de un supermercado representativo del municipio de Zarzal durante el periodo 2020-2021.
- **Tasa de disposición a relleno sanitario:** Indica el porcentaje de residuos de latas de aluminio que no se recolectan y van a los rellenos sanitarios.
- **Volumen por lata de aluminio:** Esta constante representa el volumen que una lata de aluminio ocupa en el relleno sanitario. Sirve para calcular el volumen total ocupado en los rellenos sanitarios.
- **Tasa de recolección:** Indica la tasa de recuperación de residuos de latas de aluminio.
- **Tasa de transformación:** Indica qué porcentaje de residuos de latas de aluminio se disponen a transformar en otros productos.
- **Tasa de reprocesamiento:** Indica qué porcentaje de residuos de latas de aluminio se disponen a reprocesamiento.
- **Producción requerida de latas de aluminio secundario:** Indica la producción requerida de latas de aluminio secundario a fabricar para satisfacer la demanda.

Tabla 7. Ecuaciones/parámetros y unidades de las variables auxiliares del diagrama de Forrester de la logística inversa de las latas de aluminio

VARIABLES AUXILIARES		
Nombre	Ecuación o parámetro	Unidad
Demanda de bauxita	GET XLS DATA('DATOS.xlsx','ventas','B','I2')	Kg
Producción requerida de latas nuevas	GET XLS DATA('DATOS.xlsx','ventas','B','E2')	Latas
Demanda de bebidas enlatadas	GET XLS DATA('DATOS.xlsx','ventas','B','C2')	Latas
Tasa de disposición a relleno sanitario	0.8	Dmnl
Volumen por lata de aluminio	$5,654 * 10^{-5}$	m ³ /lata
Tasa de recolección	0.10	Dmnl
Tasa de transformación	0.40	Dmnl
Tasa de reprocesamiento	0.60	Dmnl
Producción requerida de latas de aluminio secundario	GET XLS DATA('ventas.xlsx','ventas','B','J2')	Latas

Fuente. Elaboración propia

4.7.4 Variables ambientales de la logística inversa de las latas de aluminio

Las variables ambientales de la logística inversa de las latas de aluminio se explican a continuación. Además, la tabla 8 muestra las ecuaciones y unidades utilizadas.

- **Agua utilizada en la producción de latas de aluminio primario:** Muestra la cantidad de agua para producir latas de aluminio primario cada año. La ecuación utilizada es: *Producción de latas de aluminio primario*Tasa de consumo de agua latas de aluminio primario*. La unidad de medida es Litros/Año. La tasa de consumo usada es de 1.17 litros/lata (Canal Educa, n.d.).
- **Consumo de energía en la producción latas de aluminio primario:** Mide el consumo de energía anual causado por la producción de latas de aluminio primario. La ecuación es: *Producción de latas de aluminio primario*0.1918*. La unidad de medida es kWh/año. El consumo de energía para la producción de una lata de aluminio primario es 0.1918kWh/lata (Aluminio, n.d.).
- **Emisión de CO2 en la producción de latas de aluminio primario:** Mide las emisiones de CO2 por la producción de latas de aluminio primario. La ecuación es: *Producción de latas de aluminio primario*0.1315*. La unidad de medida es kgCO2/año. El valor es tomado de Cortes & Acevedo, (2012).
- **Consumo de energía / disposición a proceso de aluminio secundario:** Mide el consumo de energía generado por el proceso de aluminio secundario. La ecuación es: *Disposición a proceso de aluminio secundario*0.00959*. La unidad de medida es kWh/año. Cabe decir que el cálculo se realizó sabiendo que para aluminio secundario se utiliza sólo el 5% de la energía utilizada en el primario.
- **Emisiones de CO2 / disposición a proceso de aluminio secundario:** Mide las emisiones de CO2 por la disposición a proceso de aluminio secundario. La ecuación es: *disposición a proceso de aluminio secundario*0.1138*. La unidad de medida es kgCO2/año. El valor es obtenido de Cortes & Acevedo, (2012).
- **Volumen ocupado en el relleno sanitario:** Indica el volumen total de todas las latas dispuestas a rellenos sanitarios. La ecuación es: *latas de aluminio en el relleno sanitario*volumen por lata de aluminio*. La unidad de medida es m³/año.
- **Emisiones de NOx / disposición a proceso de aluminio secundario:** Expresa la emisión de óxido de nitrógeno que genera la disposición a proceso de aluminio secundario al año. La ecuación y unidad de medida es: *disposición a proceso de aluminio secundario*2,76 * 10⁻⁵ [kgNOx/año]* (Cortes & Acevedo, 2012).
- **Consumo total de energía:** Expresa el consumo total de energía causado por la producción de latas de aluminio primario y las dos disposiciones presentadas. La ecuación es: *consumo de energía producción de latas de aluminio primario + consumo de energía disposición para otros usos + consumo de energía disposición a proceso de aluminio secundario*. La unidad de medida es kWh/año.
- **Emisión total de CO2:** Mide la emisión total de CO2 generada en la producción de latas de aluminio primario y las dos disposiciones presentadas. La ecuación es: *emisiones de CO2 disposición a proceso de aluminio secundario + emisiones de CO2 disposición para otros usos+ emisión de CO2 producción de latas de aluminio primario*. La unidad de medida es kgCO2/año.
- **Emisiones de CO2 / disposición para otros usos:** Da información de la emisión de CO2 que se genera cada año por la disposición a otros usos. La

ecuación es: *disposición para otros usos**0.00034. La unidad de medida es kgCO₂/año. La información es tomada de Cortes & Acevedo, (2012).

- **Consumo de energía en la disposición para otros usos:** Mide el consumo de energía cuando las latas se disponen para otros usos. La ecuación es la siguiente: *disposición para otros usos**0.0004. La unidad de medida es kWh/año. La información es tomada de Aluminio (n.d.).

Tabla 8. Ecuaciones y unidades de las variables ambientales del diagrama de Forrester de la logística inversa de las latas de aluminio

VARIABLES AMBIENTALES		
Nombre	Ecuación	Unidad
Agua utilizada en la producción de latas de aluminio primario	Producción de latas de aluminio primario * tasa de consumo latas de aluminio primario	Litros/año
Consumo de energía producción latas de aluminio primario	Producción de latas de aluminio primario * 0.1918	kWh/año
Emisión de CO ₂ producción de latas de aluminio primario	Producción de latas de aluminio primario * 0.1315	KgCO ₂ /año
Consumo de energía disposición a proceso de aluminio secundario	Disposición a proceso de aluminio secundario * 0.00959	kWh/año
Emisiones de CO ₂ disposición a proceso de aluminio secundario	Disposición a proceso de aluminio secundario * 0.1138	KgCO ₂ /año
Volumen ocupado en el relleno sanitario	Latas de aluminio en el relleno sanitario * volumen por lata de aluminio	m ³ /año
Emisiones de NO _x disposición a proceso de aluminio secundario	Disposición a proceso de aluminio secundario * $2,76 * 10^{-5}$	kgNO _x /año
Consumo total de energía	Consumo de energía producción de latas de aluminio primario + consumo de energía disposición para otros usos + consumo de energía disposición a proceso de aluminio secundario	kWh/año
Emisión total de CO ₂	Emisiones de CO ₂ disposición a proceso de aluminio secundario + emisiones de CO ₂ disposición para otros usos + emisión de CO ₂ producción de latas de aluminio primario	KgCO ₂ /año
Emisiones de CO ₂ disposición para otros usos	Disposición para otros usos * 0.00034	KgCO ₂ /año
Consumo de energía disposición para otros usos	Disposición para otros usos * 0.0004	kWh/año

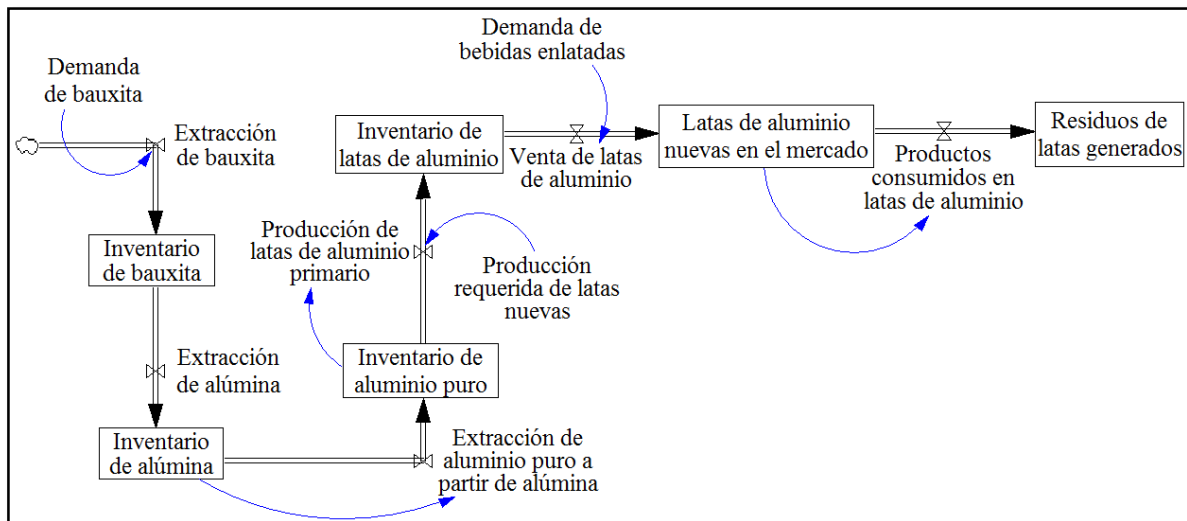
Fuente. Elaboración propia

4.8. Diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio

Con base en el diagrama de relaciones presentado, se realizó el diagrama de Forrester (ver figura 10) con el fin de evaluar los impactos ambientales al producir latas de aluminio tanto del material primario como del reciclado, teniendo en cuenta las variables identificadas, las interacciones existentes y los cambios sujetos a ellas.

Con el propósito de tener una mejor visualización del diagrama, su análisis se divide en tres partes. La primera (figura 7), presenta la producción de aluminio primario, la cual inicia con la extracción de bauxita para ser acumulada en inventario. A partir de este, se extrae la alúmina y se almacena en inventario que sirva de base para obtener aluminio puro. Una vez se forma el inventario del material virgen, se tiene la materia prima para fabricar latas nuevas de aluminio según el requerimiento del mercado. La producción de latas se acumula en inventario y va disminuyendo acorde a las ventas a empresas que distribuyen bebidas envasadas en latas de aluminio; y así mismo, el inventario de bebidas enlatadas se reduce conforme la demanda existente en el momento, es decir, se encontrarán en el mercado para que después de ser consumidas, se conviertan en residuos de latas de aluminio.

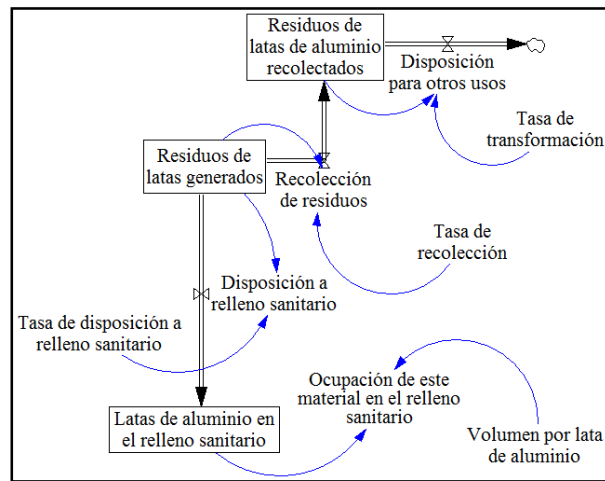
Figura 7. Primer parte del diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio (Producción de latas de aluminio primario)



Fuente. Elaboración propia

La segunda parte del diagrama (figura 8), hace referencia a las disposiciones finales de los residuos de latas de aluminio. Uno de los procesos de las latas recolectadas es su transformación en manualidades y artesanías. Con las latas restantes que no son recolectadas ni dispuestas para otros usos, se mirará cuánto espacio ocupan en el relleno sanitario y qué cantidad de GEI emiten en el medio ambiente.

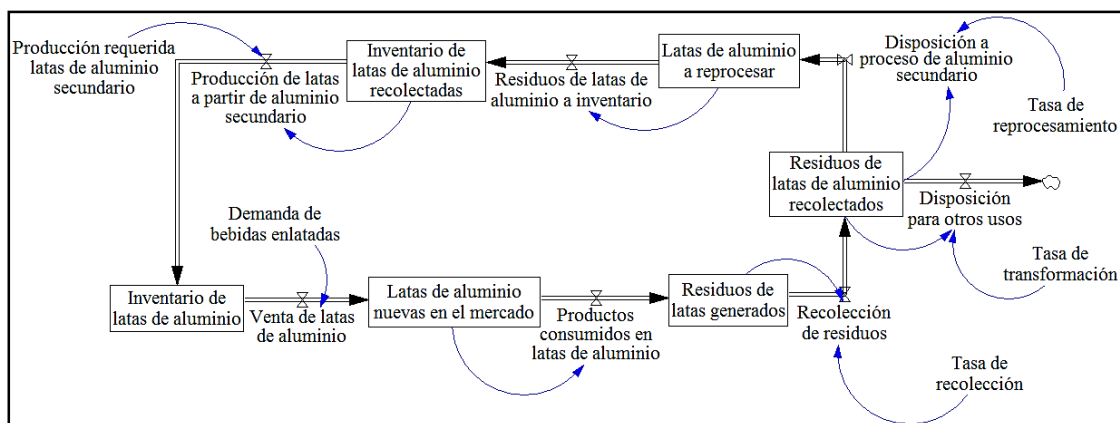
Figura 8. Segunda parte del diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio (Otras disposiciones finales)



Fuente. Elaboración propia

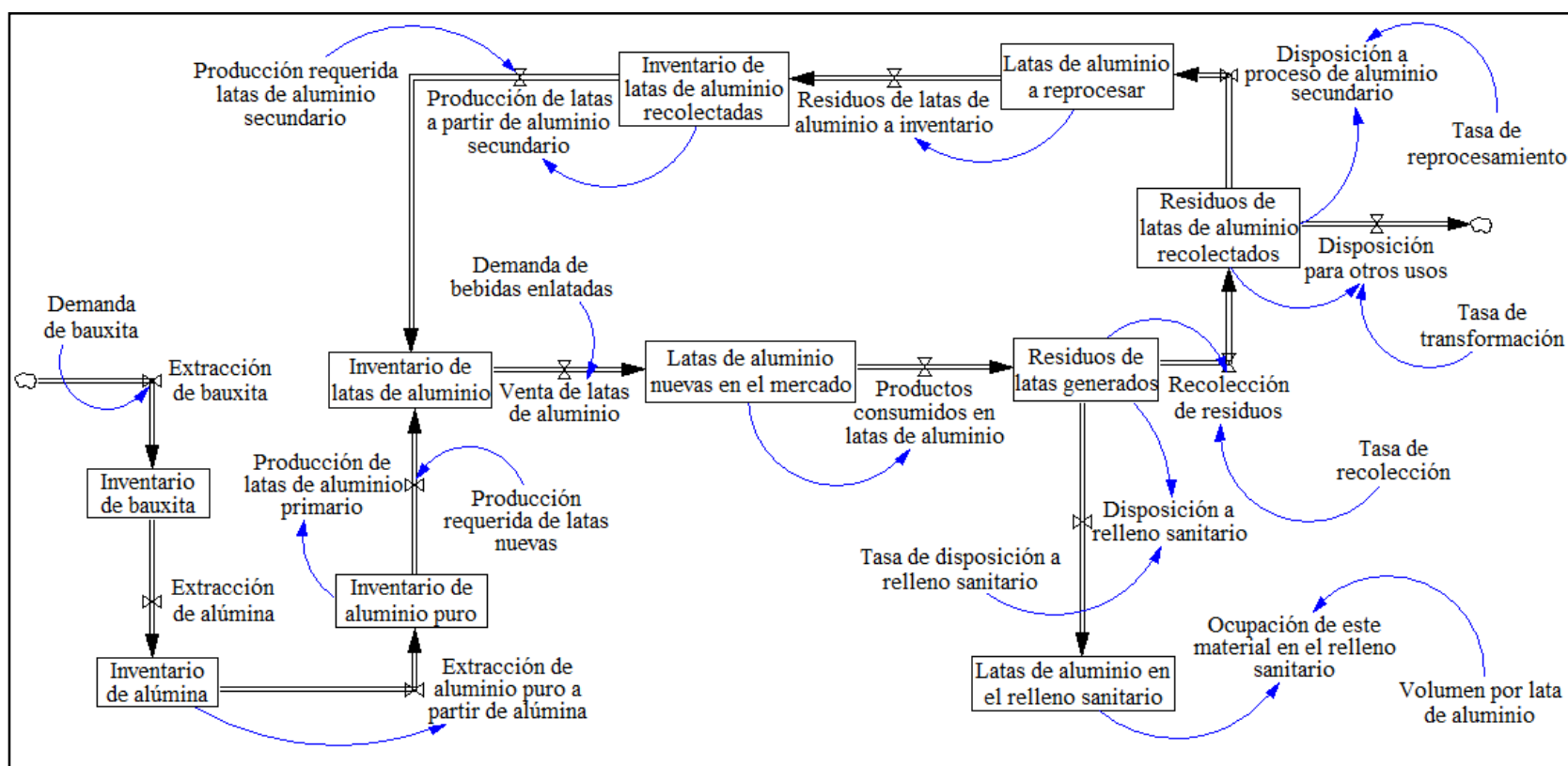
La tercer parte del diagrama (figura 9), hace referencia a la producción de latas de aluminio secundario. Cuando los residuos de latas son recolectados, se acumula un inventario de latas de aluminio dispuesto a reprocesar. Dicho inventario decrece conforme se producen nuevas latas a partir del material reciclado. Una vez las latas de aluminio producidas se almacenan en inventario, este va disminuyendo conforme las ventas a empresas de bebidas enlatadas, las cuales dependen de la demanda de este tipo de producto. Finalmente, luego de ser utilizadas las latas de aluminio disponibles en el mercado, se convierten de nuevo en residuos.

Figura 9. Tercera parte del diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio (Producción de latas de aluminio secundario)



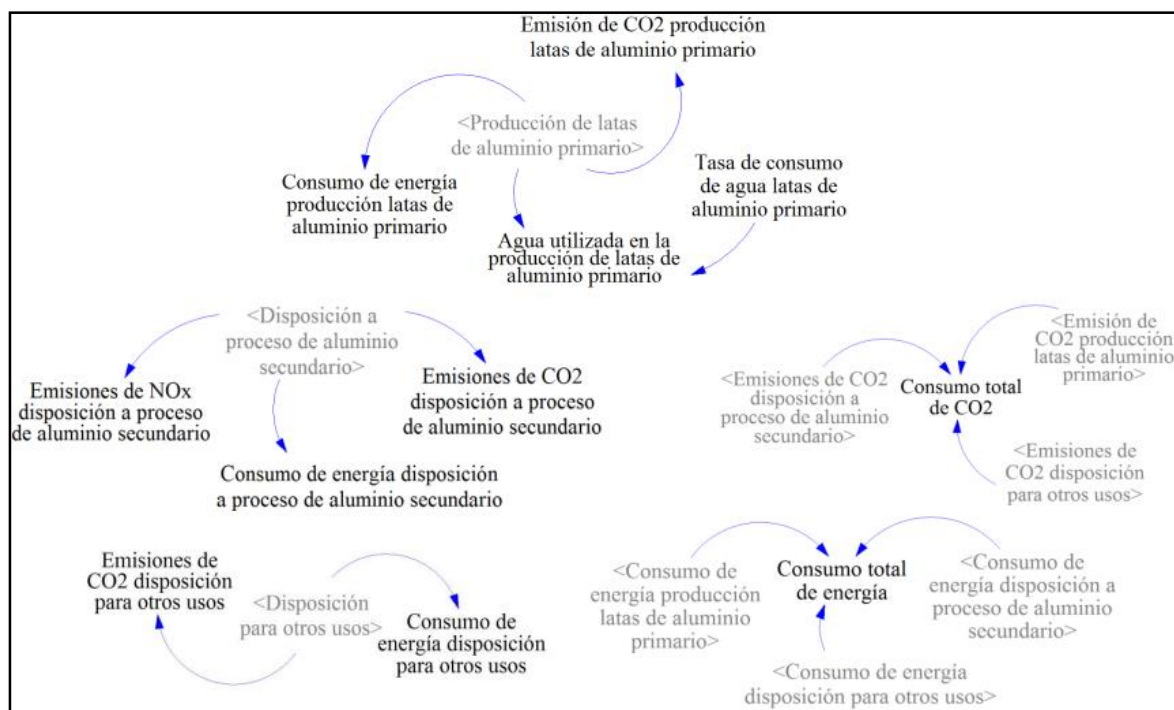
Fuente. Elaboración propia

Figura 10. Diagrama de Forrester de la logística de las latas de aluminio



Fuente. Elaboración propia

Figura 11. Medidas de desempeño ambiental evaluadas



Fuente. Elaboración propia

La figura 11 presenta las medidas de impacto ambiental a evaluar en este estudio, las cuales fueron determinadas teniendo en cuenta la repercusión que tienen en el medio ambiente tanto las disposiciones finales presentadas (ver la tabla 8) como la producción de latas de aluminio a partir del material virgen. Por este motivo, se hizo una revisión de la literatura existente que sirviera de base para determinar el gasto de insumos necesarios y las emisiones durante la producción del aluminio bien sea primario o secundario al igual que la disposición de este metal para otros usos. Además, si bien es cierto que en el municipio de Zarzal no se produce este tipo de envases ni se cuenta con plantas dedicadas al tratamiento del aluminio, es pertinente analizar el impacto que generan los residuos de latas de aluminio en el medio ambiente dado que la gestión inadecuada de estos residuos repercute negativamente en el entorno. Cabe resaltar que para la producción de aluminio secundario y para la disposición a otros usos, no se tendrá en cuenta el consumo de agua, ya que solo se utiliza para la producción de aluminio primario.

5. RESULTADOS

5.1. Caso de estudio

A continuación, se presenta el caso de estudio que se utilizó para evaluar el impacto ambiental generado por la logística inversa de las latas de aluminio. Para realizar la simulación, se definió el tipo de producto de aluminio para desarrollar el estudio, que como se mencionó con anterioridad, es latas de bebidas, específicamente, latas de cervezas. Este proyecto se centra en el municipio de Zarzal, donde gracias a la información suministrada por el supermercado Cañaveral, se obtuvo la venta de cerveza en lata del periodo comprendido entre junio del 2020 y mayo del 2021. Para efectos de simulación, la tabla 9 presenta los datos pertenecientes a la venta de latas de aluminio donde se asume que la venta de bebidas envasadas en latas de aluminio está directamente relacionada con la demanda y posterior generación de residuos de este tipo. Además, para obtener los residuos de latas de aluminio, se tomó un índice del 15% conforme al reporte de generación de residuos presentado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

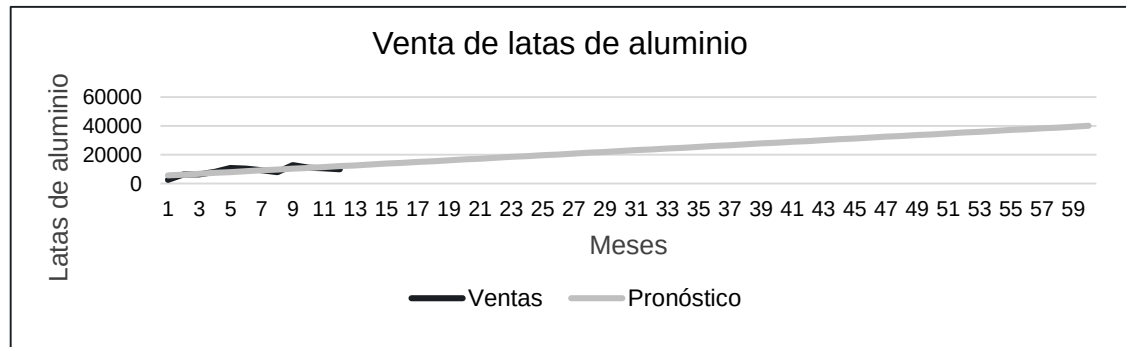
Tabla 9. *Venta de latas de aluminio del periodo junio 2020 - mayo 2021*

Mes	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Venta de latas de aluminio	2569	6409	6375	8200	10856	10348	9275	7943	12740	11125	10687	10006
Residuos de latas de aluminio generados	385,35	961,4	956,3	1230	1628	1552	1391,3	1191,5	1911	1668,75	1603,1	1500,9

Fuente. Elaboración propia

En consecuencia, se procede a realizar el pronóstico de ventas de latas de aluminio, utilizando la suavización exponencial doble para su cálculo. La figura 12 muestra el comportamiento del pronóstico, donde se observa que la tendencia es decreciente, se va normalizando y posteriormente, se va ajustando a las ventas obtenidas.

Figura 12. *Pronóstico de ventas del periodo 2021 - 2025*



Fuente. Elaboración propia

Luego de tener los datos del pronóstico de ventas de latas de aluminio, se logra establecer los datos iniciales de las variables de nivel operando las proporciones mencionadas anteriormente frente al pronóstico que se estima y estos son presentados en la tabla 10.

Tabla 10. *Datos iniciales de las variables de nivel del diagrama de Forrester*

VARIABLE DE NIVEL	DATO INICIAL	FUENTE
Inventario de alúmina	5070 kg	Pronóstico de ventas para el año 2021 * peso de alúmina
Inventario de aluminio puro	2537 kg	Pronóstico de ventas para el año 2021 * peso de aluminio
Inventario de latas de aluminio	190338 latas	Pronóstico de ventas para el año 2021
Inventario productos empacados en latas	106533 latas	Pronóstico de ventas para el año 2020
Latas de aluminio nuevas en el mercado	106533 latas	Pronóstico de ventas para el año 2020
Residuos de latas generados	21306.6 latas	Venta de latas * 0,15
Residuos recolectados	4261 latas	Venta de latas * 0,1

Fuente. Elaboración propia

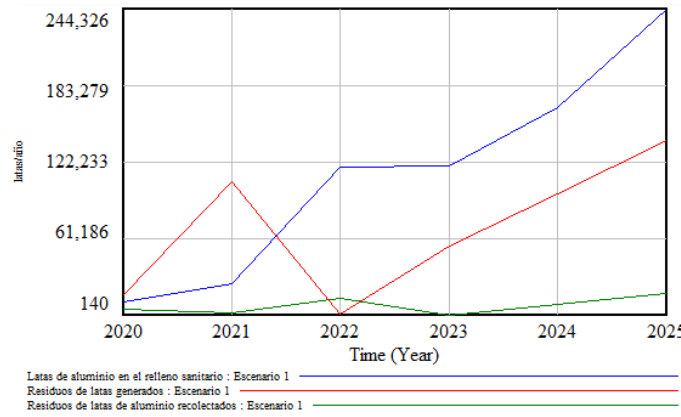
La simulación del modelo abarca un horizonte de 5 años, iniciando en el año 2020 y utilizando una tasa de recolección del 10%, y según el aumento anual del 2% impuesta por la resolución 1407 de 2018, esta tasa debe alcanzar el 20% de recolección como mínimo para el año 2025. En este estudio se analizarán tres disposiciones finales: disposición a relleno sanitario, disposición para otros usos y disposición a proceso de aluminio secundario. Las tasas iniciales empleadas serán del 10%, 40% y 60% respectivamente para cada disposición final.

5.2. Validación de los resultados

En primera instancia, se analizará el comportamiento de las variables *residuos de latas de aluminio*, *residuos recolectados* y *residuos en el relleno sanitario* con el propósito de realizar la validación del modelo propuesto mediante el contraste entre los datos obtenidos por la simulación del sistema y su nivel de afinidad con la realidad. Como se puede observar en la gráfica 1, el comportamiento de los residuos de latas de aluminio tiende a ser creciente conforme al aumento en la demanda de bebidas envasadas en este material. También, es necesario decir que la tendencia creciente de los residuos de latas de aluminio generados no depende de la tasa de reciclaje utilizada, sino de la cultura de aprovechamiento y prácticas de consumo aplicadas por los habitantes del municipio. Con relación a las latas de aluminio en el relleno sanitario, en la gráfica 2 se puede notar un incremento en la acumulación de residuos en cada período simulado, pues como se mencionó anteriormente, la tasa de recolección tiene un crecimiento anual del 2%, lo cual se refleja en el

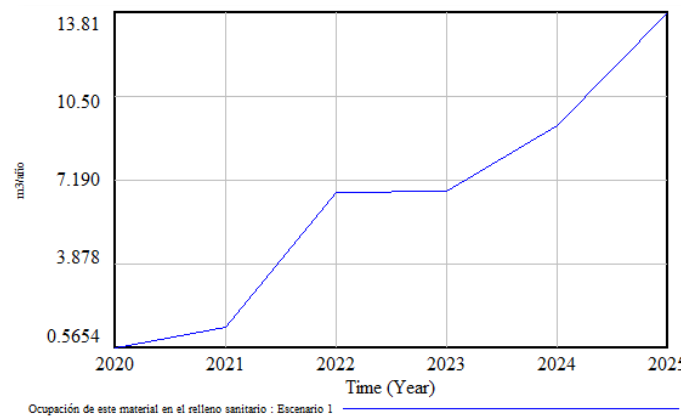
aumento progresivo del volumen ocupado en el relleno sanitario, pues para el año 2025 se espera que ocupen 13.81 metros cúbicos.

Gráfica 1. Comportamiento de los residuos de latas de aluminio



Fuente. Elaboración propia

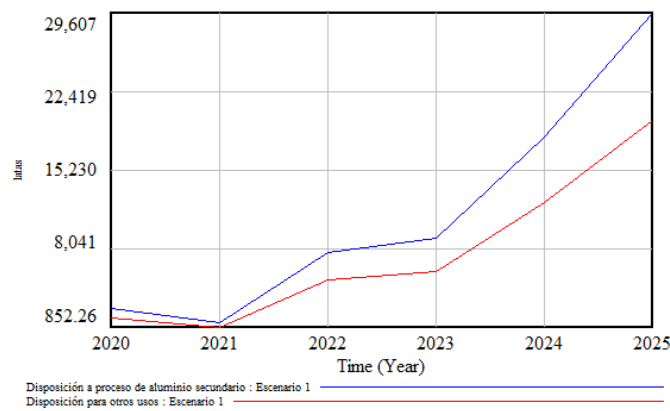
Gráfica 2. Volumen ocupado en el relleno sanitario



Fuente. Elaboración propia

A continuación, se analizarán *las disposiciones finales*, las cuales son: disposición para producir aluminio secundario y disposición para otros usos. La gráfica 3 muestra los resultados del primer escenario propuesto, donde se puede apreciar un aumento en las latas que son dispuestas en ambos procesos, pero, debido a que se empleó una relación de 60/40, porque va a ser mayor la demanda para proceso de aluminio secundario que para otros usos, dado que es más factible por su facilidad de producción y se observa cómo esta disposición representa el mayor flujo de residuos. Si las tasas empleadas son constantes, se espera que 29,607 residuos de latas de aluminio sean dispuestos para producir aluminio secundario y que 19,738 residuos sean dispuestos para otros usos para el año 2025.

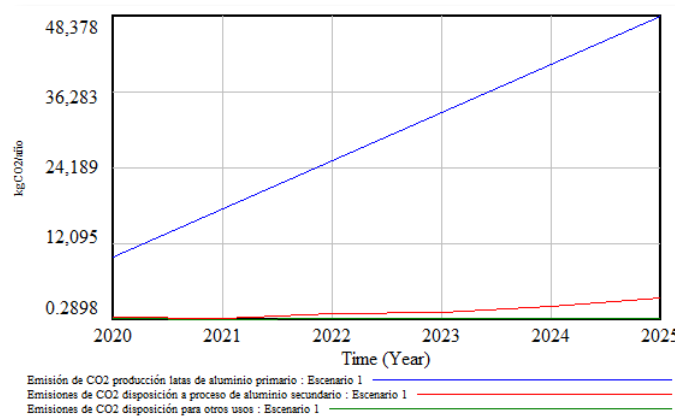
Gráfica 3. Comparación de las disposiciones finales



Fuente. Elaboración propia

Por último, se analizarán los impactos ambientales causados por la producción de aluminio primario y por cada disposición final utilizada para los residuos de latas. En la gráfica 4, se hace una comparación de las emisiones de CO₂ para la producción de latas a partir de aluminio primario frente a las dos disposiciones finales presentadas. Se puede observar cómo la producción de aluminio primario es la que genera la mayor emisión de CO₂, seguido de la disposición a proceso de aluminio secundario y finalmente, la disposición para otros usos. Las emisiones para producir aluminio primario aumentan cada año ya que estas dependen de la demanda creciente de aluminio en el mercado, mientras que, pese a que la producción de latas a partir de aluminio reciclado también presenta una tendencia progresivamente creciente, la emisión de CO₂ que se genera es significativamente menor. Al final, la disposición para otros usos no genera emisión alguna de CO₂ en vista de que no hay procesos que impliquen fundir dicho material.

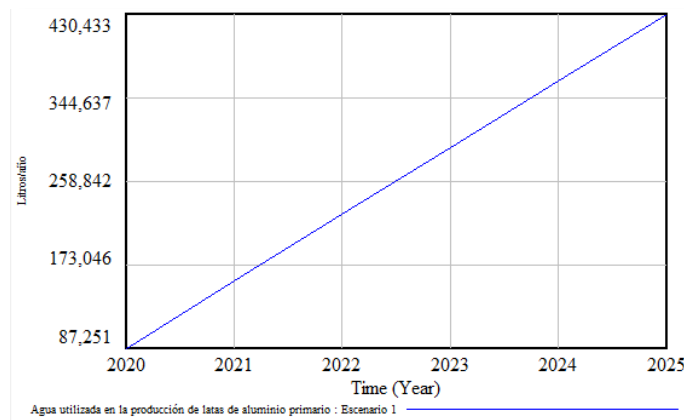
Gráfica 4. Comparación de las emisiones de CO₂



Fuente. Elaboración propia

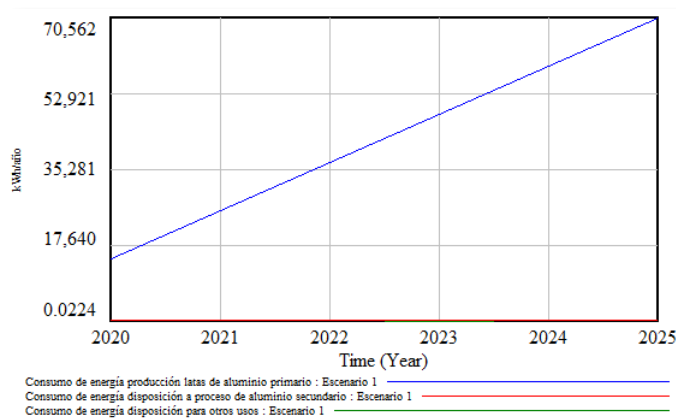
Como se puede observar en las gráficas 4, 5 y 6 la generación de CO₂ y el consumo de agua y energía, representan un comportamiento similar respecto a la tendencia creciente en cuestión a la producción de aluminio primario. Por tal motivo, se puede afirmar que la disposición de las latas ya sea para producir aluminio secundario o para otros usos, representa un menor impacto ambiental, pues para el caso del aluminio secundario, el consumo energético es constante con 0.0224 kWh y nulo para el consumo del agua, dado que el tratamiento de las impurezas de los residuos recolectados se hace de forma química o mecánicamente y por lo cual, no se consideró en la simulación del consumo del agua. En el caso de las emisiones de gases reactivos (NO_x), en la gráfica 7 se puede observar que hay un crecimiento notable, debido a que la disposición a aluminio secundario es menor al primario por la tasa de recolección hay una leve disminución de la emisión en el año 2021, y vuelve y sube de manera notoria, esto de acuerdo a la demanda que es creciente.

Gráfica 5. Agua utilizada en la producción de aluminio primario



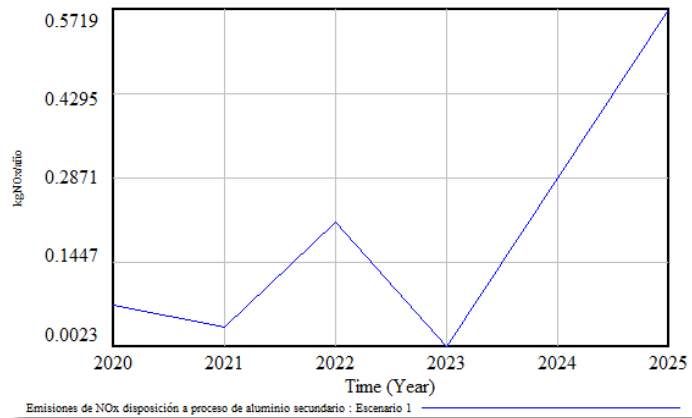
Fuente. Elaboración propia

Gráfica 6. Comparación consumo de energía



Fuente. Elaboración propia

Gráfica 7. Emisiones de NOx en la disposición a proceso de aluminio secundario



Fuente. Elaboración propia

5.3. Análisis de sensibilidad

5.3.1 Escenarios de estudio

Dado que el objeto principal de este trabajo de investigación es el diseño de una red de logística inversa que posibilite el aprovechamiento de los residuos de las latas de aluminio, pero que a su vez, permita precisar el impacto que causan en el medio ambiente las dos disposiciones finales presentadas como alternativas de reciclaje, se presentan siete escenarios de estudio distintos a fin de evidenciar el comportamiento del consumo de agua, energía y emisiones de CO₂ y NO_x para las disposiciones finales seleccionadas, cambiando en cada escenario las tasas de disposición final y cuándo se logra satisfacer la mayor cantidad de demanda de latas de aluminio a partir de aluminio secundario.

➤ **Escenario 1:** *Mayor disposición de residuos de latas a aluminio secundario.*

En este escenario se propone que la disposición de las latas para producir aluminio secundario sea mayor que la disposición para otros usos, pues así se buscaría aprovechar este tipo de metal y evitar el uso de las materias primas derivadas de recursos no renovables, como lo es la bauxita. Las tasas utilizadas para este escenario son:

- Tasa a disposición proceso de aluminio secundario: 60%
- Tasa a disposición para otros usos: 40%

➤ **Escenario 2:** *Mayor disposición de residuos de latas de aluminio a transformación para otros usos.*

En este escenario se propone un aumento de la disposición de las latas para otros usos, pues gracias a las fuentes consultadas, se dice que al transformar las latas

de aluminio en productos artesanales, no se da lugar al consumo de materias primas ni se generan emisiones contaminantes para el ambiente. Las tasas utilizadas para este escenario son:

- Tasa a disposición proceso de aluminio secundario: 20%
- Tasa a disposición para otros usos: 80%

➤ **Escenario 3:** *Mayor disposición de residuos de latas de aluminio a proceso de aluminio secundario.*

En este escenario se cambia el valor de las tasas del anterior, proponiendo un aumento de la disposición de las latas a proceso de aluminio secundario a fin de que se cumpla la técnica de ciclo cerrado, donde las latas recolectadas sean transformadas nuevamente en latas del mismo material. Las tasas utilizadas para este escenario son:

- Tasa a disposición proceso de aluminio secundario: 80%
- Tasa a disposición para otros usos: 20%

➤ **Escenario 4:** *Igual disposición de residuos de latas de aluminio para los dos procesos.*

En este escenario se busca analizar el comportamiento de las variables ambientales cuando se tienen las mismas tasas de disposición final para los dos procesos presentados. Las tasas utilizadas para este escenario son:

- Tasa a disposición proceso de aluminio secundario: 50%
- Tasa a disposición para otros usos: 50%

➤ **Escenario 5:** *0% de disposición de residuos de latas de aluminio a transformación para otros usos.*

En este escenario se busca analizar el comportamiento de las emisiones de CO₂ y el consumo de materias primas si los residuos de latas de aluminio fuesen aprovechados completamente para producir aluminio secundario. Las tasas utilizadas para este escenario son:

- Tasa a disposición proceso de aluminio secundario: 100%
- Tasa a disposición para otros usos: 0%

➤ **Escenario 6:** *0% de disposición de residuos de latas de aluminio a proceso de aluminio secundario.*

En este escenario se busca cuál sería el impacto en el ambiente si todos los residuos de latas de aluminio fuesen dispuestos para otros usos. Las tasas utilizadas para este escenario son:

- Tasa a disposición proceso de aluminio secundario: 0%
- Tasa a disposición para otros usos: 100%

- **Escenario 7:** Se cubre el 50% de la demanda de latas de aluminio con aluminio secundario.

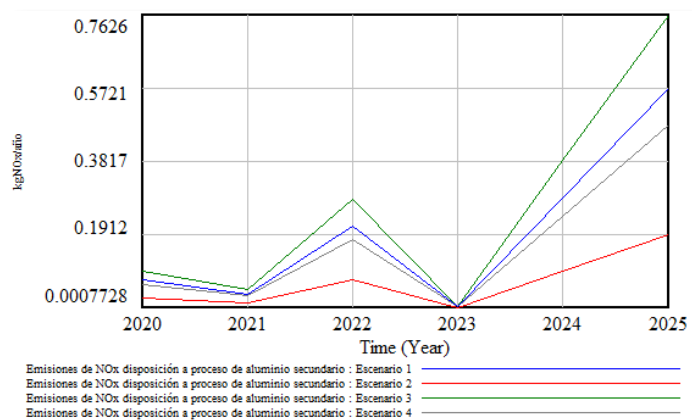
En este escenario se busca analizar el comportamiento de las emisiones de CO₂ y el consumo de materia prima para satisfacer el 50% de la demanda total de latas con aluminio secundario y el 50% restante con la producción de aluminio primario.

5.4. Interpretación de los escenarios de estudio

5.4.1 Escenarios 2, 3 y 4

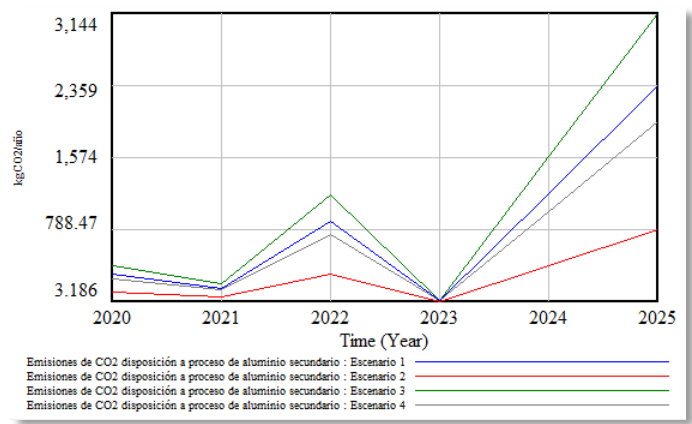
En la gráfica 8 se observa que el comportamiento creciente de las emisiones de NO_x está directamente relacionado con las tasas de disposición a proceso de aluminio secundario propuestas en los escenarios 2, 3 y 4, por lo que varía dependiendo de la tasa a simular. Por tal motivo, el escenario actual (1) presenta menor emisión que el escenario 3, pues para lograr apreciar qué tan acertada ha sido la modelación del sistema diseñado, este último escenario se incrementó en un 20%. Para el caso de las emisiones de CO₂, se observa este mismo comportamiento con tendencia creciente y dependiente de la tasa de disposición final y el cual se presenta en la gráfica 9. También, para este tipo de disposición se muestra en las gráficas 10 y 11 el consumo total de energía y de CO₂. En estas el comportamiento tiene la misma analogía que con las gráficas anteriores, pues la tendencia creciente depende de la tasa de disposición a procesar aluminio. Además, cabe destacar que en ambas gráficas se aprecia que el consumo de energía es muy similar en todos los escenarios, así como también la generación de CO₂, esto debido a que no cambia la producción requerida de latas de aluminio.

Gráfica 8. Emisiones de NO_x en la disposición a proceso de aluminio secundario en los escenarios 1, 2, 3 y 4 de estudio



Fuente. Elaboración propia

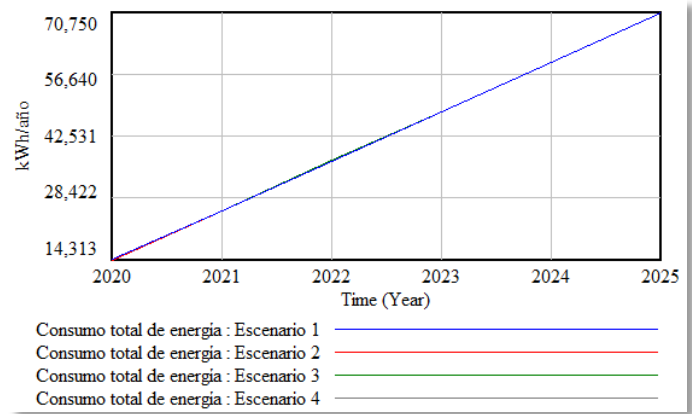
Gráfica 9. Emisiones de CO2 en la disposición a proceso de aluminio secundario en los escenarios 1, 2, 3 y 4 de estudio



Fuente. Elaboración propia

Gráfica 10. Consumo total de energía en los escenarios 1, 2, 3 y 4 de estudio

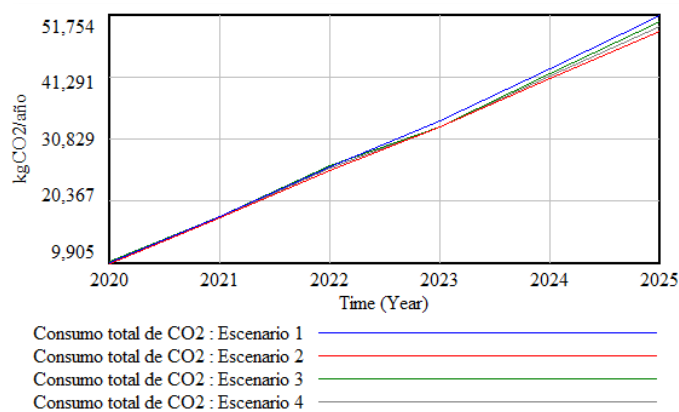
Time (Year)	2020	2021	2022	2023	2024	2025
"Consumo total de energía" Runs:	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4		
Consumo total de energía	14,328	25,567	36,882	48,146	59,490	70,853
: Escenario 2	14,313	25,560	36,835	48,058	59,337	70,616
: Escenario 3	14,336	25,571	36,906	48,059	59,404	70,750
: Escenario 4	14,324	25,565	36,870	48,059	59,371	70,683



Fuente. Elaboración propia

Gráfica 11. Emisión total de CO2 en los escenarios 1, 2, 3 y 4 de estudio

Time (Year)	2020	2021	2022	2023	2024	2025
"Consumo total de CO2" Runs:	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4		
Consumo total de CO2	10,098	17,666	26,110	33,970	42,747	51,754
: Escenario 2	9,905	17,570	25,529	32,952	40,944	48,936
: Escenario 3	10,195	17,715	26,400	32,962	41,773	50,588
: Escenario 4	10,050	17,642	25,964	32,957	41,358	49,762



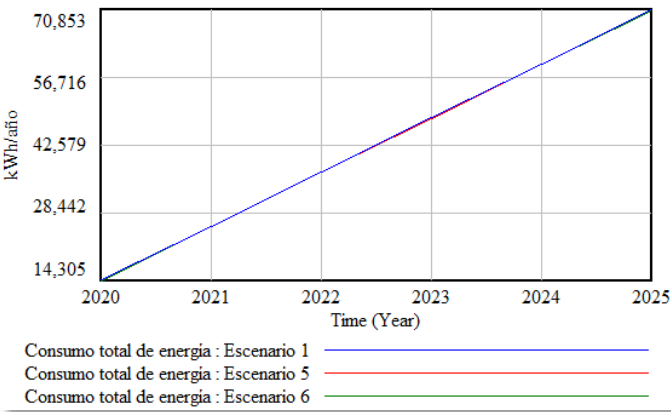
Fuente. Elaboración propia

5.4.2 Escenarios 5 y 6

Para efectos de simulación, se utilizaron distintas tasas en las disposiciones finales con el propósito de observar la variación tanto en el consumo total de energía como en la generación total de CO2. La gráfica 12 muestra cómo a pesar de que en el escenario 5 se presenta la mayor tasa en disposición a aluminio secundario, el impacto ambiental es insignificante en comparación al escenario actual (1), pues en este último, el gasto energético necesario en la electrólisis con la que se transforma la alúmina en aluminio es notablemente mayor. Por el contrario, en la gráfica 13 se puede apreciar que pese a que la emisión total de CO2 en los tres escenarios evaluados presenta una tendencia creciente en vista de que está directamente relacionado con la cantidad de latas de aluminio a fabricar, el escenario 5 presenta la mayor tasa de disposición a aluminio secundario y por ende, mayor generación de CO2 a la atmósfera, incluso que los escenarios 1 y 6.

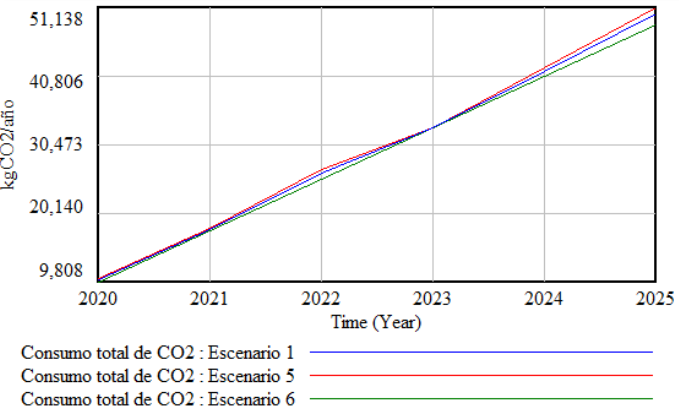
Gráfica 12. Consumo total de energía en los escenarios 1, 5 y 6 de estudio

Time (Year)	2020	2021	2022	2023	2024	2025
"Consumo total de energía" Runs:	Escenario 1	Escenario 5	Escenario 6			
Consumo total de energía	14,328	25,567	36,882	48,146	59,490	70,853
: Escenario 5	14,344	25,575	36,929	48,060	59,427	70,794
: Escenario 6	14,305	25,556	36,812	48,058	59,315	70,571



Fuente. Elaboración propia

Gráfica 13. Generación total de CO2 en los escenarios 1, 5 y 6 de estudio

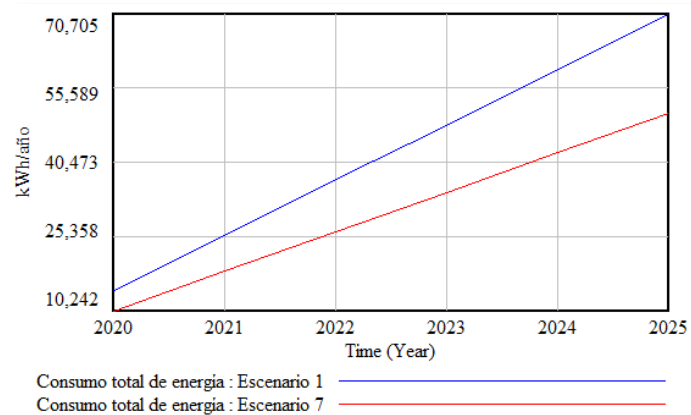


Fuente. Elaboración propia

5.4.3 Escenario 7

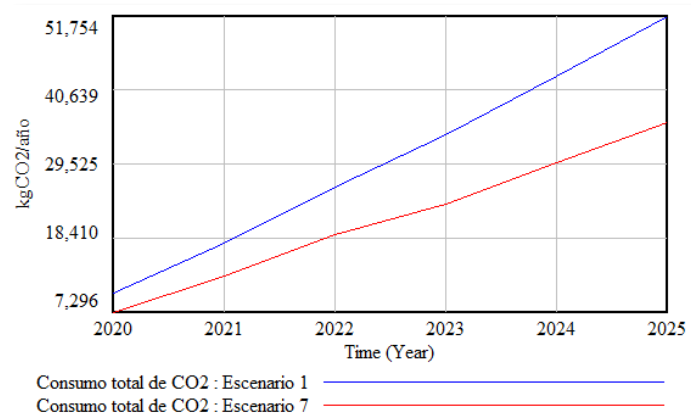
En este escenario se puede observar que satisfaciendo el 50% de la demanda de latas de aluminio a partir del material reciclado, disminuye el consumo de energía y la generación de CO₂ en un porcentaje ampliamente notoria, casi del 50%. En las gráficas 14 y 15 se observa la relación de las variables que influyen tanto en el consumo de energía como en la emisión total de CO₂ respectivamente.

Gráfica 14. Consumo total de energía en los escenarios 1 y 7 de estudio



Fuente. Elaboración propia

Gráfica 15. Generación total de CO₂ en los escenarios 1 y 7 de estudio



Fuente. Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se llega a la conclusión de que es requerido un alto grado de compromiso por parte de los habitantes del municipio de Zarzal, Valle del Cauca para que el planteamiento de una red de logística inversa para los residuos de bebidas envasadas en latas de aluminio tenga éxito y sea implementada de forma eficiente para un mayor aprovechamiento y recuperación de este tipo de material, pues mediante el desarrollo de la caracterización de la gestión actual que se da en el municipio a los residuos que son generados por la comunidad, se evidencia que pese a que la empresa prestadora del servicio público de aseo busca sensibilizar a la comunidad frente a temas de reciclaje de materiales aprovechables desde la fuente, los residuos recolectados siguen siendo dispuestos a rellenos sanitarios haciendo que no se estén aprovechando, por lo que se puede concluir que al no brindarle un tratamiento adecuado a los materiales recuperables, tal como el caso del aluminio, haya un impacto negativo en el medio ambiente ya sea tanto por la producción de latas de aluminio virgen como por los residuos generados una vez han culminado su ciclo de vida, pues según la información suministrada por el PGIRS, en tan sólo el último trimestre del año 2015 se recogieron 88.476 kg de residuos de aluminio.

Aun así, es necesario resaltar que las problemáticas ambientales asociadas a la gestión inadecuada de los residuos de latas de aluminio no sólo son consecuentes de las tendencias de consumo y prácticas de reciclaje desarrolladas por la población, sino que también es indispensable que el gobierno ayude al fortalecimiento de programas en pro del cuidado ambiental con respecto a la gestión de los materiales aprovechables mediante proyectos factibles que impliquen la colaboración de toda la población en general y que comprenda desde la separación en la fuente domiciliaria hasta técnicas avanzadas de recolección selectiva, pues en lo que respecta a la identificación de los actores relevantes dentro de la cadena de logística inversa de las latas de aluminio, se puede apreciar que es necesario articular de manera íntegra a todas las partes interesadas, abarcando desde la comunidad hasta las autoridades competentes para dar cumplimiento a la actividad de recolección, pues se concluye que en Colombia hay una gran oportunidad para seguir gestionando y avanzando en el aprovechamiento de materiales recuperables y aportar así a la economía circular.

En esta línea de ideas, cuando se habla de reciclaje de latas de aluminio, se hace referencia a las dos disposiciones presentadas como alternativas de gestión para este tipo de residuos, pues gracias al modelo sistémico propuesto, se logró demostrar que cuando las latas se disponen bien sea a aluminio secundario o para otros usos tales como artesanías, se reduce de forma representativa la cantidad de emisiones de CO₂ a la atmósfera, el consumo energético, de agua y de la principal materia prima, la bauxita. Con la simulación de distintos escenarios haciendo uso

de la dinámica de sistemas, se puede afirmar que producir latas de aluminio primario es el mayor generador de impactos ambientales, pues se espera que para el año 2025, las emisiones de CO₂ sean aproximadamente de 69,111 kgCO₂, el consumo de energía sea de 100,802 kWh, y el consumo de agua sea de 614,904 litros; esto sobrepasa en gran medida los impactos generados cuando el aluminio es reciclado. Además, debido a que la tasa de recolección de este material actualmente es poca, la demanda de aluminio primario va a seguir siendo alta durante los próximos años.

Por último, y gracias al desarrollo de este trabajo de investigación, algunas consideraciones finales a tener en cuenta son que:

- Colombia tiene gran oportunidad en el aprovechamiento del aluminio, pues es el tercer con mayor reporte de los residuos de metales generados. Aun así, es imprescindible que se fortalezcan los programas de reciclaje, en vista de que según la información presentada durante el trabajo, la gestión ambiental que se está ejerciendo no es suficiente para su aprovechamiento de forma efectiva.
- Existe una oportunidad potencialmente rentable para crear valor a las empresas que emplean este material y que desean incursionar en la sostenibilidad.
- El aprovechamiento de las latas de aluminio que han culminado su ciclo productivo dentro del mercado es viable porque genera menores costos de producción gracias al ahorro de los insumos primarios para su fabricación y a su capacidad de ser reciclado indefinidamente sin verse afectada su calidad.

Se espera que este trabajo de grado logre concientizar a la población, a las empresas de bebidas envasadas en latas de aluminio y a los consumidores en particular, sobre las formas actuales de consumo y su aporte en el reciclaje de materiales recuperables, pues la problemática ambiental que se está viviendo no sólo nos afecta a nosotros, sino también a las generaciones próximas.

7. REFERENCIAS

- Abd Hamid, K. B., Ishak, M. Y., & Abu Samah, M. A. (2015). Analysis of municipal solid waste generation and composition at administrative building café in Universiti Putra Malaysia: A case study. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(5), 1969–1982. <https://doi.org/10.15244/pjoes/39106>
- Aluminio, R. (n.d.). *Reciclaje del aluminio en mexico*: 1–5.
- Antonio, R. M. (2015). *Metalurgia del aluminio 2.5*.
- Aracil, J. (1995). Dinámica de sistemas. *Publicaciones de Ingeniería de Sistemas*, 4, 1–88.
- Avelar-Sosa, L., García-Alcaraz, J. L., & Castrellón-Torres, J. P. (2014). The effects of some risk factors in the supply chains performance: A case of study. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(5), 958–968. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)70602-9](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)70602-9)

- Ayuntamiento de Albacete. (2006). *Guía Didáctica Sobre Gestión De Los Residuos Urbanos En Albacete*. 1–39.
- Banco Mundial. (2018, September). Los desechos: un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos.
- Bernon, M., Tjahjono, B., & Ripanti, E. F. (2018). Aligning retail reverse logistics practice with circular economy values: an exploratory framework. *Production Planning and Control*, 29(6), 482–497. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1449266>
- Bonev, A., & Alexandrov, A. (1993). *LEY 99 DE 1993*. 1(August), 117–125.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2020). Así cambiará el reciclaje en Colombia tras entrada en vigencia de una norma - Cluster de Comunicación Gráfica, Cámara de Comercio de Bogotá.
- Canal Educa. (n.d.). *Presentación Huella hídrica ANEXO III*.
- Carbajo-de-Lera, P., Alfalla-Luque, R., & Medina-Lopez, C. (2011). La cadena de suministro del sector metalúrgico: un análisis de sus principales eslabones (The Supply Chain in the metallurgical sector: an analysis of the main links). *WPOM-Working Papers on Operations Management*, 2(2), 14. <https://doi.org/10.4995/wpom.v2i2.867>
- Carmago, S., Chud, V., & Osorio, J. (2017). Modelo de simulación dinámica para evaluar el impacto ambiental de la producción y logística inversa. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 200–217. <https://doi.org/10.14482/inde.32.2.5406>
- Castillo, J. L., Martinez, M., & Rojas, J. (2014). *Factibilidad técnico económica de una planta recicladora para la producción de aluminio secundario*.
- Colorado, H. A., & Echeverri-Lopera, G. I. (2019). The solid waste in Colombia analyzed via gross domestic product: Towards a sustainable economy. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 1–22. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20191046>
- Contreras, Z. (2013). *Strategies for Reuse of Household Aluminum*. 5, 33–37.
- Cortes, I., & Acevedo, Y. (2012). *ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS*.
- De La Cruz, L. O. V., Marrero Fornaris, C. E., & Pérez Pravia, M. C. (2017). Contribución a la logística inversa mediante la implantación de la reutilización por medio de las redes de Petri. *Ingeniare*, 25(1), 154–169. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000100154>
- Delgado, F. M. (2016). *Fabricación y caracterización de la aleación de aluminio reciclado con adición de silicio particulado* *Fabricación y caracterización de la aleación de aluminio reciclado con adición de silicio particulado*.
- Diabat, A., Al-Salem, M., & Simchi-Levi, D. (2014). An integrated supply chain problem with environmental considerations. *International Journal of Production Economics*, 164, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.004>
- Domínguez, M., García, C., & Arias, J. M. (2009). Recomendaciones para la conservación y transporte de alimentos perecederos. *Grupo Dominguez*, 13.
- Du, F., & Evans, G. W. (2007). A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service. *Computers and Operations Research*, 35(8), 2617–2634.

- <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.020>
- EcoInventos. (2013, September). Ideas creativas para reutilizar o reciclar aluminio.
- Haas, D. A., Murphy, F. H., & Lancioni, R. A. (2003). *Managing Reverse Logistics Channels with Data Envelopment Analysis*. 42(3), 59–69.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a waste: A global review of solid waste management. *Urban Development Series Knowledge Papers*, 15, 1–116. <https://doi.org/10.1201/9781315593173-4>
- Kleindorfer, P. R., Singhal, K., & Van Wassenhove, L. N. (2005). Sustainable operations management. *Production and Operations Management Society*, 14(4), 482–492. https://doi.org/10.9774/gleaf.9781783531219_10
- Kumar, S., & Putnam, V. (2008). Cradle to cradle: Reverse logistics strategies and opportunities across three industry sectors. *International Journal of Production Economics*, 115(2), 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.11.015>
- Lontana Group. (n.d.). Aluminio, Información técnica, historia y propiedades · Alu-Stock S.A.
- López Escobar, J. M. (2010). *Prensado automatizado de latas de aluminio provenientes del desecho para contribuir en el reciclado*. 1–92.
- Lopez Orozco, A. (2015). “Actualización Del Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos – Pgirs – Del Municipio De Zarzal, Valle Del Cauca Acorde a Lo Dispuesto En El Decreto 2981 De 2013 Y La Resolución 0754 De Noviembre 25 De 2014 Proferida Por Los Ministerios De Vivienda, Ciu. (24), 1–460.
- Manabì, P. D. E., El, E. N., & Lectivo, A. Ñ. O. (2010). *ESTUDIO INTEGRAL PARA LA RECUPERACIÓN DE CHATARRA DE ALUMINIO*.
- Maquera, G. (2013). Logística verde e Inversa, Responsabilidad Universitaria Socioambiental Corporativa y Productividad. *Apuntes Universitarios*, 0(1), 31–54. <https://doi.org/10.17162/au.v0i1.16>
- Mill, F., Pilar, D., Jairo, J., & Fl, O. (2015). Reciclaje de aluminio oportunidades de desarrollo en Bogotá (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 18(2), 135–152.
- MinAmbiente. (2018). Res 1407 De 2018. 05/12/2014, pp. 1–20.
- Naim, M. M., & Towill, D. R. (1994). *Establishing a framework for effective materials logistics management* (pp. 81–88). pp. 81–88. The International Journal of Logistics Management.
- Nikolaou, I. E., Evangelinos, K. I., & Allan, S. (2012). A reverse logistics social responsibility evaluation framework based on the triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.009>
- Osorio, J., & Peña, C. (2018). Estudio dinámico del reciclaje de envases pet en el Valle del Cauca. *Revista Lasallista de Investigacion*, 15(1), 159–165. <https://doi.org/10.22507/rli.v15n1a6>
- Palacios Gómez, J. E. (2015). *PROPUESTA DE UN MODELO TARIFARIO QUE INCENTIVE LA SEPARACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS EN LA FUENTE, EN EL MARCO DE LA LOGÍSTICA INVERSA*. 123.
- Peiro Sáez, J. M. (2014, October). Cómo todo funciona - Aluminio - YouTube.

- Recytrans. (2014, November). La Gestión de Residuos .
- Ripanti, E. F., & Tjahjono, B. (2019). Unveiling the potentials of circular economy values in logistics and supply chain management. *International Journal of Logistics Management*, 1–30. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2018-0109>
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. S. (1998). Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices. *Logistics Management*, 1–283.
- Russo, I., & Cardinali, S. (2012). Product Returns and Customer Value: A Footware Industry Case. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 79–97. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2747-7_5
- Senge, P. (1995). *La quinta disciplina*. 1–75.
- Sistema español de inventario de emisiones. (2019). *Fabricación de Aluminio (Emisiones de Proceso)*. 1–11. Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040301-fabric-aluminio_tcm30-502319.pdf
- Sturzenegger, G. (2014, May). ¿Sabes cuánta basura generas en un día? .
- Sun, Q. (2016). Research on the influencing factors of reverse logistics carbon footprint under sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(29), 22790–22798. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8140-9>
- Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (2018). *Disposición Final de Residuos Sólidos Nacional Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018 Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018 Elaborado 2019*. 97.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019). *Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento 2018*. 115.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, & Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Disposición Final de Residuos Sólidos Informe Nacional – 2018 Elaborado 2019*. 97.
- Superservicios. (2018). Informe nacional sobre el pesaje y registro de las cantidades de residuos efectivamente aprovechados de los prestadores de la actividad de aprovechamiento - 2018. *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*.
- Torrellas Hidalgo, R. (2013). *Vista de La exposición al aluminio y su relación con el ambiente y la salud | Tecnogestión: Una mirada al ambiente*. Retrieved from <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/article/view/5646/7188>
- Vasiliauskas, A. V., & Jakubauskas, G. (2007). Principle and benefits of third party logistics approach when managing logistics supply chain. *Transport*, 22(2), 68–72. <https://doi.org/10.1080/16484142.2007.9638101>
- Waste Atlas. (2018). Waste Atlas - Interactive map with visualized waste management data.

ANEXOS

Dirección de Regionalización
Sede Regional Zarzal



Zarzal, 23 de octubre de 2021

Señores
CAÑAVERAL
Zarzal, Valle del Cauca

Asunto: Solicitud de información

Cordial saludo,

El programa de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle es un programa que cuenta con cuarenta años de funcionamiento en la ciudad de Santiago de Cali, en la actualidad, el programa académico inició operaciones en el año 2009 en la ciudad de Zarzal, para cubrir los municipios del área de influencia de la Universidad del Valle en el Norte del Valle.

El programa de Ingeniería Industrial se aprobó para Zarzal en el año 2008 y renovó mediante resolución 21031 del 11 de diciembre de 2014, bajo el código IES 1203, con código de programa 53613, con renovación de registro calificado de mediante resolución 21031 de diciembre 11 de 2014, del Ministerio de Educación Nacional y malla curricular aprobada por Resolución 060 de 2013, donde se contempla la asignatura Trabajo de Grado, como actividad académica obligatoria, que permite a los estudiantes tener un mayor acercamiento con el mundo empresarial a través del planteamiento de soluciones imperantes a distintas problemáticas que a diario deben de afrontar los diversos sectores productivos de la región.

Conocedores del aporte de su compañía en la comercialización de productos de consumo masivo en el municipio de Zarzal, Valle del Cauca y de los desarrollos productivos que le permiten generar un impacto positivo en la región, me permito solicitar comedidamente su colaboración para obtener información clave y que pueda ser utilizada para la culminación del trabajo de grado titulado "Modelo de gestión de logística inversa para la recolección y aprovechamiento de latas de aluminio en un municipio del Norte del Valle del Cauca" desarrollado por dos estudiantes del programa de ingeniería industrial.

De acuerdo con lo anterior, en mi calidad de Coordinador del Programa de Ingeniería Industrial, presento a la estudiante: Natalia Castañeda Colonia, Código: 201664683 y C.C. 1.116.448.303 de Zarzal-Valle, del programa de Ingeniería Industrial, para que realice algunas preguntas, que como se mencionó anteriormente, son de gran interés y aporte para este proyecto.

Cordialmente,


JULIAN GONZALEZ VELASCO
Coordinador Programa Académico
Universidad del Valle - Seccional Zarzal
Teléfono: (052) 220 91 93 Ext. 6740
Celular: 314 701 8383

SUPERTIENDAS CAÑAVERAL S.A.
NIT. 805.028.041 - 4
ADMINISTRACION ZARZAL


Administrador Cañaveral

Calle 14 No. 7-134 Barrio Bolivar
Teléfonos: 2209193-2035069
Zarzal - Valle del Cauca - Colombia
<http://zarzal.univalle.edu.co>
Correo Electrónico: zarzal@correounivalle.edu.co