

Trabajo de grado en modalidad de aplicación
[183018] Diseño de un Proceso de Logística Inversa para la Reutilización de Botellas de Vidrio
en el Sector Cervecerero. Caso: Cervecería Artesanal Moonshine.

María Fernanda Carvajal Buelvas^{a,c}, Alberto José Gómez Calero^{a,c}, Sofía
Mattos Guzmán^{a,c}, Juan Ignacio Vives Campo^{a,c}

Clara Mabel Solano Vanegas^{b,c}, Raúl Fabián Roldán Nariño^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

1. Resumen de Diseño en Ingeniería

Global warming is one of the most recognized environmental issues worldwide, thus, industrial sectors such as the beer industry are seeking for new approaches to reduce their negative manufacturing impact on the environment, leading eventually to a sustainable development. Moonshine, a craft brewery, has recognized this need and that is why it is interested in proposals related to reverse logistics process that implicates the reuse of the glass bottles they are currently using. This project implies a three-stage design. Firstly, a washing and disinfection process for the re-utilization of glass bottles was designed. Secondly, the definition of distribution and recollection of the glass bottles routes, from the customers to Moonshine's facilities, were established. Lastly, in order to evaluate the impact of the aforementioned stages, a financial and environmental measuring is presented using indicators such as cost-benefit and carbon and water footprint, respectively, thus facilitating Moonshine's decision-making, as to whether they will apply the proposal in the future.

The washing and disinfection process design began with the data recollection for each process. Afterward, a Value Stream Mapping (VSM) was developed which allowed for the visualization of Moonshine's current processes along with this new proposed one. This is how different activities that do not add value to the process were identified. To establish improvement plans in the proposed design, a Lean Manufacturing tool was implemented. Subsequently, the process was established taking into consideration the sanitary standards established for containers intended to hold food or beverages for human consumption. In order to guarantee the fulfillment of these standards a sample was submitted for a microbiological study and results that meet these standards were obtained.

In this work, a vehicle routing problem (VRP) with simultaneous pick-up and delivery and time windows (VRPSPDTW) is considered. This VRP involves the pickup and delivery of beer bottles at different customer locations, with earliest and latest deadlines, and deterministic pickup and delivery demands. As a first approach to solve this combinatorial optimization problem, a Greedy Algorithm designed for VRPSPDTW was used. With the resulting distance obtained from this heuristic, a second approach to improve this solution was employed. This approach consisted on implementing a Tabu Search metaheuristic that was adapted to the Greedy Algorithm, using as a fitness measure, the total travel distance found before. The obtained result improved the first solution found.

A Life Cycle Assessment (LCA) for a 330-mL beer bottle, on both the actual and proposed situation, was implemented in order to measure and compare the carbon and water footprint. The actual situation includes the following stages; transports from the bottle producer to the distributor and from the distributor to Moonshine's facilities, considering the number of bottles required to satisfy customer's demand; current washing process; beer fill process; and current transport from Moonshine's plant to its customers. The proposed situation comprises the following stages; transports from the bottle producer to the distributor and from the distributor to Moonshine's plant, for 15% of the customer's demand; actual washing process, for 15% of the customer's demand; proposed washing and disinfection process, for 85% of the customer's demand; beer fill process; and transport from Moonshine's facilities to its customers with the obtained routes from the metaheuristic. Emissions for each one of these stages were calculated and a decreased result on the carbon footprint was found on the proposed situation.

Finally, to evaluate this proposal's financial impact and viability, a cost-benefit indicator is contemplated. To obtain this indicator a cash flow was created. This cash flow took into account a five-year forecast for revenues and expenses. The final result determined that the proposal was financially feasible. Furthermore, a Monte Carlo simulation was applied in order to comprehend the impact of risk and uncertainty in the financial potential outcomes. This uncertainty was considered for the Weighted Average Capital Cost (WACC) and the forecast of sales growth, on short and medium term. Results found through this simulation showed that the cost-benefit relation was stable on the short and medium term.

Keywords– Reverse logistics, Life Cycle Assessment, Carbon Footprint, Lean Manufacturing, Heuristics, Metaheuristics, Monte Carlo Simulation.

2. Justificación y Planteamiento del Problema

Debido a la gran cantidad de residuos desechados, las empresas hoy en día están adoptando modelos de cadena de suministro inversa con el fin de transformar los desperdicios, ya sea para darles un nuevo uso o para eliminarlos,

reduciendo los costos y disminuyendo los índices de contaminación al medio ambiente. La logística inversa se encarga de la recuperación y reciclaje de botellas, embalajes y residuos peligrosos, así como de los procesos de retorno de excesos de inventario, devoluciones de clientes, productos obsoletos e inventarios estacionales. De acuerdo con lo anterior la logística inversa es el proceso que, en lugar de llevar un producto de la fábrica al consumidor se enfoca en transformar un bien desechado por este para su reutilización (Acosta, Olivares, Peñuñuri, Muñoz, & Millán, 2013). De esta forma, al considerar procesos de logística inversa se cierra el ciclo de la cadena de suministro. (Lopez, Giraldo, & Arenas, 2011).

La logística inversa involucra la recolección de un bien desechado. Lo anterior implica la necesidad de identificar las distintas rutas para realizar este proceso y seleccionar la mejor según las condiciones de cada cadena de suministro, para alcanzar los objetivos estratégicos a través de decisiones y acciones coordinadas (Haime Levy, 2009). Este proceso de recolección, se aborda como un problema de enrutamiento de vehículos VRP (Vehicle Routing Problem), el cual se ha analizado desde hace varios años en diferentes sectores económicos, considerándolo como un problema de optimización combinatoria que al ser solucionado permite definir una red de transporte. El transporte de bienes actualmente es uno de los factores que abarca en mayor medida los recursos en toda la red logística, llegando a ser alrededor del 35% de los costos totales logísticos (Solomon, 2003) por lo cual se hace necesario que esta tarea sea eficaz.

Los impactos positivos aumentan la concientización de los productores y consumidores sobre la importancia de proteger el medio ambiente, tanto así que hoy en día estos esfuerzos son altamente valorados por los gobiernos (Lozano Lozano, 2018), quienes incluso proponen, para estas empresas, incentivos como la reducción de la carga tributaria. Esto se aprecia, para el caso de Colombia en la Ley 1715 de 2014; a saber, artículo 11, el cual trata de la deducción de renta y complementarios; artículo 12, en el cual se establece una exclusión de IVA; artículo 13, en donde se establecen beneficios arancelarios y; artículo 14, depreciación acelerada, lo cual consiste en recuperar la inversión original de los activos fijos y diferidos, vía fiscal, mediante un porcentaje mayor en los primeros años a partir de la adquisición.

La empresa Moonshine, una micro-empresa productora y comercializadora de cerveza artesanal ubicada en Bogotá, como respuesta a su interés por disminuir el impacto negativo de su operación en el medioambiente, ha permitido el desarrollo de esta propuesta donde se diseña un proceso de logística inversa, considerando, por un lado, el diseño de los procesos que permiten la reincorporación de botellas de vidrio al sistema de producción y por otro lado la definición de las rutas de entrega y recolección de botellas a los clientes. Moonshine cuenta con 5 años de experiencia y el catálogo de sus productos consta de cuatro referencias de cervezas. Mensualmente la empresa compra a su proveedor alrededor de 150 cajas que contienen 24 botellas de vidrio color ámbar de 330 mL, las cuales son utilizadas para envasar las distintas referencias de cerveza. La cerveza se comercializa a sus 30 clientes, los cuales son restaurantes, pubs, bares y tabernas ubicados en Bogotá (Moonshine, 2018).

Para vender y distribuir sus productos, Moonshine realiza la distribución de la cerveza todos los jueves a través de un distribuidor, quien llega a las instalaciones de la empresa a las 9 de la mañana y recibe la ruta con la lista de paradas a realizar. Esta entrega de producto se efectúa en furgones con capacidad de 24 cajas de cerveza de Moonshine. La ruta comienza desde la planta de Moonshine, que está ubicada en la calle 134a # 50-30, y de ahí se dirige hacia el sur que es donde se encuentran sus clientes. Para realizar la entrega de productos cada cliente tiene una disponibilidad horaria distinta; los restaurantes reciben el pedido antes del mediodía o después de las 4 de la tarde. Contrario a estos, los pubs, bares y tabernas reciben el producto después de las 3 de la tarde, ya que en las mañanas no se encuentran abiertos.

Actualmente Moonshine no realiza ninguna acción orientada a la disminución de su impacto ambiental. Es por esto que considerar la inclusión de procesos de logística inversa, según se define en esta propuesta, es coherente con su interés a favor del entorno. De hecho, según la revisión bibliográfica realizada, se evidencia que estos esfuerzos de reutilización reducen el impacto contaminante en el medio ambiente (Mata & Costa, 2001) ya que el reutilizar una botella de vidrio una sola vez, logra la reducción del GWP (Global Warming Potential) en un 40% (Amienyo & Azapagic, 2016). Por todo lo anterior, este estudio se presenta como una respuesta a la siguiente pregunta: **¿Contribuirá el diseño de un proceso de logística inversa para la reutilización de botellas de vidrio en Moonshine, a la reducción de su impacto ambiental? Y ¿cuál será la repercusión financiera de esta propuesta?**

3. Antecedentes

La logística inversa es un proceso utilizado para recolectar algún producto que haya terminado su vida útil o haya sido desechado por los consumidores, y que posteriormente este sea recuperado a través de alguna de las tres actividades que generan mayor valor en la recuperación de residuos: reutilización, reciclaje o re-fabricación (Monroy & Ahumada, 2006). Para diseñar un proceso de logística de ciclo cerrado, que tenga como objetivo la reutilización se deben considerar todos los procesos de: distribución y recolección, recuperación, y reutilización (Eskandarpour, Masehian, Soltani, & Khosrojerdi, 2014).

En cuanto a los procesos de distribución y recolección, que implican la definición de rutas eficientes, estos han sido resueltos según la revisión de artículos científicos, mediante la utilización de diferentes variantes del problema de enrutamiento de vehículos (VRP). Estas variaciones, se encuentran directamente relacionadas con las tipologías presentes en el contexto del problema, es decir las restricciones y/o características de las variables que permiten plantear una aproximación a los problemas reales. Lo anterior, normalmente tiene variaciones como son el número de depósitos y vehículos, el tipo de demanda de los clientes, que puede estar relacionado con un tiempo límite de visita o que requiera de varios depósitos, las restricciones de los vehículos en cuanto a capacidad, tipo de flota, tiempo de carga y descarga de bienes o del recorrido total (Contreras Castañeda & Silva Rodriguez, 2014).

Tal como se presenta en la Tabla 1, para extender el VRP tradicional Hermosilla & Baran (2014) agregan la restricción de asociar una ventana de tiempo para la recolección en cada consumidor, es decir que se define un intervalo en el que cada cliente debe ser atendido y se obtiene el problema del ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (Vehicle Routing Problem with Time Windows, o VRPTW). Esto también implica que el instante en el que se inicia el servicio de un cliente debe ser mayor o igual al inicio de su ventana de tiempo y el instante en que se llega a cada cliente debe ser menor o igual al fin de su ventana de tiempo. Si un vehículo llega a la ubicación de un consumidor antes del inicio de su ventana de tiempo, este debe esperar hasta esa hora para iniciar el servicio.

Otra variación del modelo original VRP es conocido como logística inversa o de entrega y recogida simultánea (Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick Up and Delivey, o VRPSPD). La entrega y recogida simultánea es un aspecto importante que debería ser considerado cuando se modela el problema de distribución de bienes, ya que el hecho de retirar aquellos considerados como obsoletos agrega valor al servicio otorgado a los clientes (Lagos, y otros, 2018). El VRPSPD es un problema de optimización combinatoria muy difícil de resolver, en la medida que el tamaño del problema aumenta. En estos casos, los métodos de programación exacta tienden a fallar puesto que no son capaces de encontrar la solución óptima para dichas instancias del problema (Chen & Wu, 2005).

A partir del planteamiento anterior, los autores Lagos, et al. (2018) buscaron soluciones de buena calidad para el VRPSPD considerando adicionalmente ventanas de tiempo, es decir un VRPSPDWTW (Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pick Up and Delivery and Time Windows), con una metaheurística llamada enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization, o PSO). Esta metaheurística implica la interacción de varios individuos sin un control o guía central, lo que mejora la capacidad de exploración del algoritmo. Otros autores como Crispim & Brandao (2005), desarrollaron una Búsqueda Tabú, inicializando la solución con el resultado generado a partir de un método de barrido. El VRPSPDWTW es una versión más compleja del tradicional VRP, para el cual, algunos investigadores como Laporte G. (1992) y Vigo & Toth (2002), establecen que su objetivo es minimizar el costo, ya sea que se encuentre en términos de dinero, tiempo o distancia recorrida. Otros métodos metaheurísticos han sido propuestos en la literatura para mejorar las soluciones obtenidas en una heurística en particular, según se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Revisión de artículos relacionados con el problema de ruteo de vehículos del caso de estudio. Fuente. Elaboración Propia.

Autores	VRP		Solución	
	Ventanas de tiempo	Carga y descarga simultánea	Modelo Matemático	Heurística/ Metaheurística
(Hermosilla & Baran, 2014)	x			Colonia de Hormigas
(Pacheco & Delgado, 1999)	x			Concentración Heurística y GRASP
(Mingyong & Erbao, 2009)	x	x		Improved Differential Evolution Algorithm
(Kontoravdis & Bard, 1995)	x			GRASP

(Liu, Xie, Augusto, & Rodríguez, 2013)	x		x	Algoritmo genético
(Arboleda Zuñiga, Gaviria Gómez, & Álvarez Romero, 2017)	x			Tabú
(Reil, Bortfeldt, & Mönch, 2017)	x			Algoritmo de ahorros, heurística de barrido, heurística de insercion
(Pradenas, Oportus, & Parada, 2012)	x		x	Tabú
(Lagos, y otros, 2018)	x	x		Scatter Search
(Niaz, Gabor, & Samad, 2008)	x	x		Particle Swarm Optimization
(Phan & Suzuki, 2016)	x		x	Tabú
(Bernal, Escobar, & Linfati, 2017)	x			Tabú y Algoritmo Genético
(Suprayogi & Priyandari, 2017)	x	x		Tabú
(Fan, Xu, & Xu, 2009)	x		x	Tabú
(Boubahri, Addouche, & El Mhamedi, 2010)	x	x		Algoritmo Genético
(Kuckoglu & Ozturk, 2014)	x			Colonia de Hormigas
(Crispim & Brandao, 2006)	x	x		HMA: Algoritmo de recocido simulado y Tabú
				Método de Barrido y Tabú

El diseño de la logística inversa implica definir procesos de reincorporación de la botella al sistema de producción inicial. Luego de revisar artículos relacionados, se observa cómo los autores proponen la incorporación de métodos de limpieza y desinfección de las botellas de vidrio. Padrón (2008) realiza este proceso incorporando máquinas que utilicen como insumo agua y soda cáustica (NaOH) en altas temperaturas mezclada con sustancias químicas para mejorar la humectabilidad y la precipitación de químicos, removiendo así las marcas de óxido y suciedad de las botellas. Adicionalmente, este autor realiza el diseño del proceso teniendo en cuenta los principios del pensamiento Lean que identificaron Womack et al. (1996), quienes se centran en la identificación de la cadena de valor, mediante la eliminación de desperdicios y agregando valor en cada parte del proceso.

Para el diseño de un proceso, uno de los principios utilizados en los artículos revisados es el propuesto por Womack et al. (1990), a partir de la definición del flujo del proceso. Seis Sigma es otra metodología que comparte la misma filosofía y objetivo con Lean Manufacturing, pero ha tenido un desarrollo diferente. Las herramientas y el enfoque también han diferido, ya que según Lean Seis Sigma México (2011), Lean busca ante todo eliminar desperdicios en los procesos y reestructurarlos para hacerlos más eficientes, rápidos y ágiles a la hora de responder a las necesidades de los clientes. Seis Sigma persigue también la mejora de los procesos, aunque en un sentido más amplio y menos definido a priori: calidad, eficiencia, niveles de servicio.

Desde un punto de vista ambiental, Catalan (2013) afirma que reutilizar el vidrio tiene más ventajas que reciclarlo, debido al ahorro de energía que supone utilizar varias veces una misma botella. En el proceso de fabricación del vidrio se utiliza más cantidad de material del necesario, para dotarlos de mayor resistencia y poder hacer más rotaciones, antes de que finalice su ciclo de vida y puedan ser reciclados. El vidrio es un material totalmente reciclable y no hay límite en la cantidad de veces que puede ser reprocesado. Al reciclarlo no se pierden las propiedades del material y se ahorra una cantidad de energía de alrededor del 30% con respecto al proceso de fabricación de vidrio nuevo (Catalan, 2013). De hecho, se ha utilizado como parte de la norma ISO 14040 (2005) el análisis del ciclo de vida como instrumento para medir el impacto ambiental de cada producto, material o servicio a lo largo de su ciclo de vida y así soportar las decisiones ambientales (VonBlotnitz & Curran, 2006).

Luego de revisar los documentos relacionados a los procesos involucrados en la logística inversa, se puede observar que este proceso requiere la asignación de recursos (financieros, humano, tiempo) suficientes para llevar a cabo las distintas actividades involucradas y por lo tanto resulta necesario realizar una medición financiera que permita calcular el impacto de la utilización de estos recursos (Ballesteros Riveros & Ballesteros Silva, 2017). Por lo anterior,

se propone un diseño por etapas del proceso de logística inversa para la empresa Moonshine, considerando inicialmente el diseño de los procesos de lavado y desinfección desde los principios de Lean Manufacturing y acorde a las normativas vigentes. Posteriormente se definen las rutas de distribución y recolección de botellas de vidrio, entendiendo el problema como un VRPSPDTW. Este modelo de ruteo se abordó por medio de una heurística atendiendo a las restricciones del problema y se mejoró esta solución inicial por medio de una metaheurística. Finalmente, para establecer el impacto ambiental del proceso de logística inversa propuesto, se analizó el ciclo de vida de la botella, conforme lo establece la norma ISO 14040 realizando la evaluación financiera respectiva.

4. Objetivos

Objetivo General

Diseñar un proceso de logística inversa para la reutilización de botellas de vidrio en el sector cervecero. Caso: Cervecería artesanal Moonshine, Bogotá, Colombia.

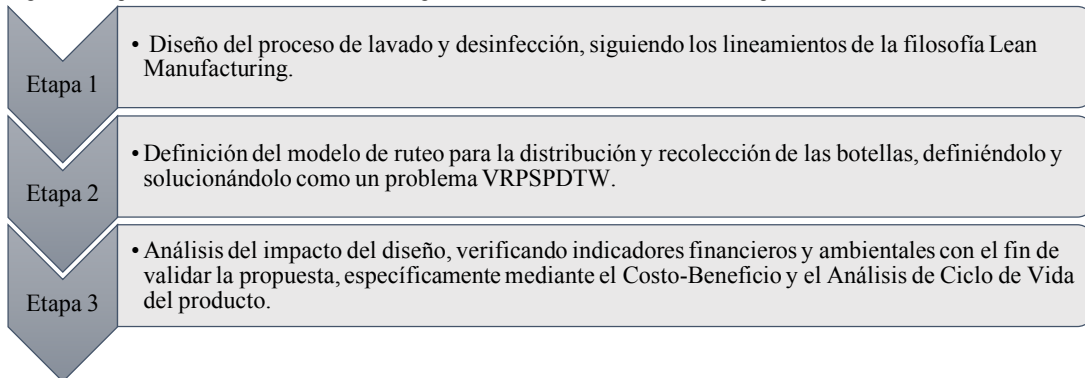
Objetivos Específicos

- Identificar los procesos y datos de desempeño actual de las áreas de producción, envasado y distribución en Moonshine.
- Diseñar el proceso de lavado y desinfección requerido para retornar la botella al proceso.
- Definir un modelo matemático que permita establecer la ruta de distribución de botellas llenas y recolección de envases vacíos.
- Validar la propuesta del proceso de logística inversa evaluando el impacto financiero (costo-beneficio) y el impacto ambiental (ciclo de vida).

4.1. Declaración de Diseño

Se desarrolló un diseño de un proceso de logística inversa que permite la reutilización de botellas de vidrio para la cervecería artesanal Moonshine. Este diseño se realizó en tres etapas:

Figura 1. Etapas de Desarrollo del Diseño de Logística Inversa. Fuente. Elaboración Propia.



4.2. Requerimientos Esperados de Diseño

- El proceso de lavado y desinfección de botellas atiende los requerimientos de higiene establecidos para el manejo de alimentos.
- El modelo de ruteo se realizó en una aplicación en Excel, software con el que actualmente cuenta la empresa, permitiéndole su utilización en un futuro, si aceptan la propuesta.
- El Análisis de Ciclo de Vida del producto (botella de vidrio) se realizará según lo establecido en la norma ISO.

4.3. Restricciones de Diseño

Considerando lo enunciado en la sección anterior, la propuesta está sujeta a las siguientes restricciones:

- El modelo propuesto no corresponde a un plan de negocios: la evaluación del impacto de la propuesta considera el análisis de los costos implicados en los procesos propuestos, así como la medición del impacto ambiental.
- Este trabajo no considera la implementación de la propuesta en Moonshine.

4.4. Normas y Estándares

Debido a que las botellas son el principal elemento de este proceso, y que estos son utilizados para contener bebidas para el consumo humano, existen normas para regular y garantizar su limpieza, las cuales se contemplaron en el desarrollo del trabajo:

- Resolución 683 de 2012, expide el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que deben cumplir los materiales, objetos, botellas y equipamientos destinados a entrar en contacto con alimentos y bebidas para consumo humano.
- Resolución 2674 de 2013, por la cual se reglamenta el artículo 126 del decreto de ley 019 de 2012, establece que los alimentos que se fabriquen, envasen o importen para su comercialización en el territorio nacional, requiera de notificación sanitaria, permiso sanitario o registro sanitario, según el riesgo de estos productos en salud pública, de conformidad con la reglamentación que expida el Ministro de Salud y Protección Social.
- Para el diseño del proceso de lavado y desinfección se consideraron las siguientes normas:
 - Metodología 5 S's, que hace parte de la herramienta de Lean Manufacturing (McCarty et al., 2004).
 - Familia ISO 14000: Serie de procedimientos que enmarcan los requisitos para el diseño de un sistema de gestión ambiental.

5. Metodología

A continuación, se presenta la metodología utilizada para realizar cada una de las etapas descritas en la Figura 1.

5.1. Etapa 1: Diseño de los Procesos de Lavado y Desinfección

Durante esta etapa se recolectaron todos los datos relacionados con los procesos productivos de Moonshine, adicionalmente, se plantea la metodología utilizada para el diseño del proceso de lavado de las botellas a reutilizar.

5.1.1. Identificación de los Procesos y Datos de Desempeño Actual de Moonshine

Moonshine maneja cuatro tipos de cervezas: Witbier, Amber Ale, Pepper Strong Ale y Zippa Ipa. Actualmente, la empresa cuenta con 3 operarios quienes se encargan de realizar los procesos que se presentan en la Figura 2 En este apartado se describe cada uno de estos y se presenta el diagrama de procesos correspondientes. Para representar estos diagramas se utilizó BPMN (Business Process Modeling Notation) y las convenciones de los diagramas se presentan en el Anexo 1.

Figura 2. Procesos Actuales Moonshine. Fuente. Elaboración Propia



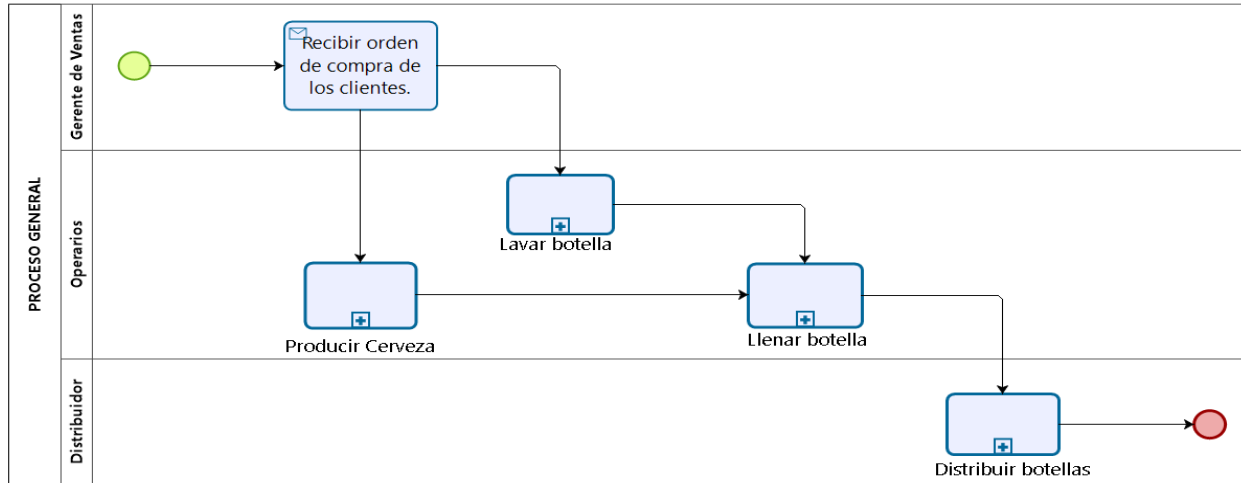
5.1.1.1. Abastecimiento

Para el proceso de abastecimiento, la empresa actualmente cuenta con diferentes proveedores, quienes realizan la entrega de los insumos (según Tabla 2) mediante transportes propios una vez al mes. Específicamente en el caso de las botellas, las cajas son entregadas mensualmente a la empresa por un solo camión los días lunes. En la Figura 3 se observa el proceso general de Moonshine, este inicia en el momento en que el gerente de ventas recibe los pedidos de los diferentes clientes para así proceder y dar indicaciones a los operarios de iniciar los diferentes procesos de producción, lavado, llenado y distribución.

Tabla 2. Materia Prima Moonshine. Fuente. (Moonshine, 2019)

Insumo	\$ Costo	Periodicidad
Botella	\$ 700/botella	156 cajas/mes
Tapa	\$ 80/unidad	4.000/mes
Etiqueta	\$ 120/unidad	4.000/mes
Grano de Malta	\$ 5.000.000/1000 kg	1.000 kg/mes
Lúpulo	\$ 111.125/10 kg	10 kg/mes
Levadura	\$ 750.000/kg	1 kg/mes
Pipeta de CO ₂	\$ 60.000/pipeta de 25 kg	3 und de 25 kg/mes
Agua	\$183.500 mensual	483 L / 200 L cerveza

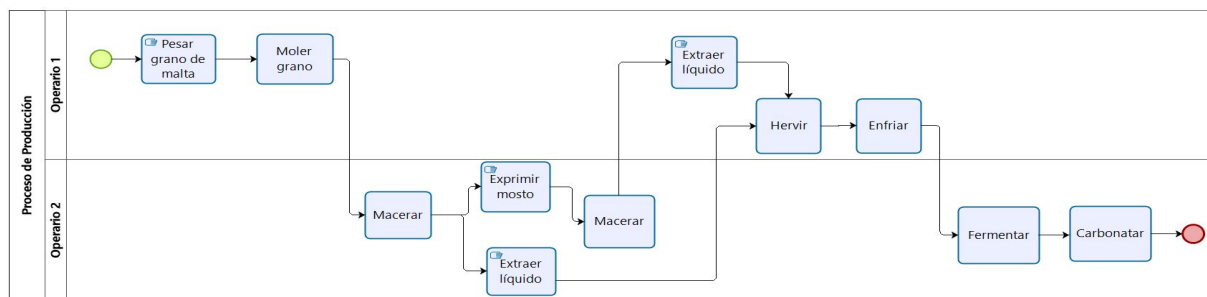
Figura 3. Procesos Generales Moonshine. Fuente. Elaboración Propia.



5.1.1.2. Producción

En la Figura 4. se presenta el proceso de producción de la cerveza. Este inicia con el operario 1, quien realiza el pesaje de los granos de malta y la molienda de estos mismos en un molino de rodillos (ver Imagen 1 del Anexo 2). La cantidad que se muele generalmente está entre 45 y 50 kg. Los granos de malta molidos son introducidos posteriormente en un recipiente de acero inoxidable o tanque de maceración, presentado en la Imagen 2 del Anexo 2, en el cual se les agrega agua y se realiza la maceración. Luego, el operario 2 comienza el proceso de macerado el cual consiste en mezclar 160 L de agua a una temperatura de 71°C con el grano molido, lo cual genera una transformación enzimática de amilasas y los almidones se convierten en azúcares fermentables, adicionalmente, se presenta el proceso químico de solubilización proteica que permite la retención de espuma en la cerveza. La solubilidad proteica es útil en productos alimenticios donde se requieren propiedades como formación de espuma (Mizubuti et al., 2000), o donde la proteína estará en solución. Una vez realizado este proceso, la mezcla se exprime con el fin de obtener los compuestos solubles de la malta separada del mosto (líquido que resulta de la combinación del agua y el grano de malta molido). Este mosto resultante es transferido al tanque de hervido, pero no se inicia el proceso de ebullición hasta que se obtiene un mosto adicional producto de la re-maceración de los compuestos solubles restantes.

Figura 4. Proceso de Producción de Cerveza. Fuente. Elaboración Propia.

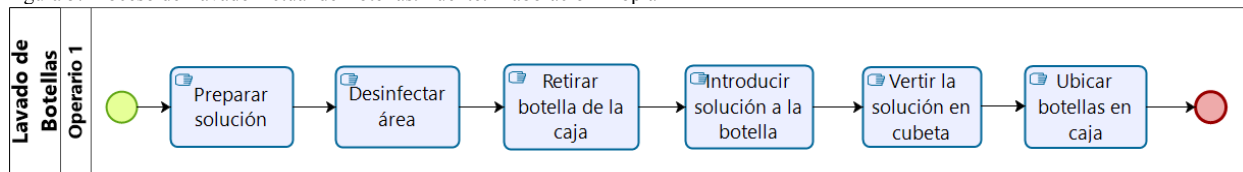


El proceso de hervido del mosto, es realizado durante 1 hora a punto de ebullición (92°C). Este proceso garantiza una inocuidad de la cerveza y un producto estable en el tiempo, además, durante esta etapa se agregan entre 100 y 200 gramos de lúpulo con el fin de darle el carácter amargo a la cerveza, cabe resaltar que el lúpulo es un conservante natural que permite que la vida útil de la cerveza sea más larga. Una vez concluye el hervido del mosto se obtiene un volumen aproximado de 200 L los cuales son enfriados rápidamente a través de tres intercambiadores de calor de acero inoxidable, el cambio de temperatura se realiza desde el punto de ebullición hasta llegar a 20°C. Una vez concluido este proceso, el operario 2 agrega 100 gramos de levadura al mosto y se da inicio a la fermentación. Este proceso se lleva a cabo en los fermentadores (Imagen 3, Anexo 2), los cuales están sellados y únicamente tienen una salida de presión para aliviar el gas. Finalmente se concluye la fermentación y se procede a la jornada de carbonatación, donde se le inyecta CO2 a 20 psi aproximadamente y se enfría alrededor de unos 6°C (Moonshine, 2019). Además de estas materias primas, el proceso de producción necesita agua, el cual consume 283 litros para producir 200 litros de cerveza (lo que equivale a un bache), y a su vez, 200 litros de agua para el intercambio de calor. Es decir, que el proceso de producción en general consume o necesita 483 litros de agua (según Tabla 2). En un día de producción se elaboran 2 baches y esta se realiza 1 vez por semana.

5.1.1.3. Lavado

Para comenzar el proceso de lavado, como se muestra en la Figura 5, el operario 1 prepara la solución a utilizar la cual se compone de 1 L de agua y 3 ml de ácido peracético mezclados en un aspersor como el que se muestra en la Imagen 4, Anexo 2. Seguido a esto, se desinfecta con alcohol el área (Imagen 5 del Anexo 2) en el cual se realiza el lavado para prevenir que se ensucien las botellas durante el proceso. Una vez esté preparada la solución y desinfectada el área, se rocía la solución dentro de cada botella e inmediatamente se agita esta misma para que las sustancias actúen en cada área dentro de la botella. El tiempo aproximado de esta actividad es de 3 segundos por unidad. Posteriormente, las botellas se reposan alrededor de 2 minutos con el líquido dentro, luego este líquido es vertido en un balde y las botellas son ubicadas en cajas con capacidad de 24 unidades. Este proceso es realizado de forma manual y su duración aproximada es de 1 minuto y 16 segundos por caja.

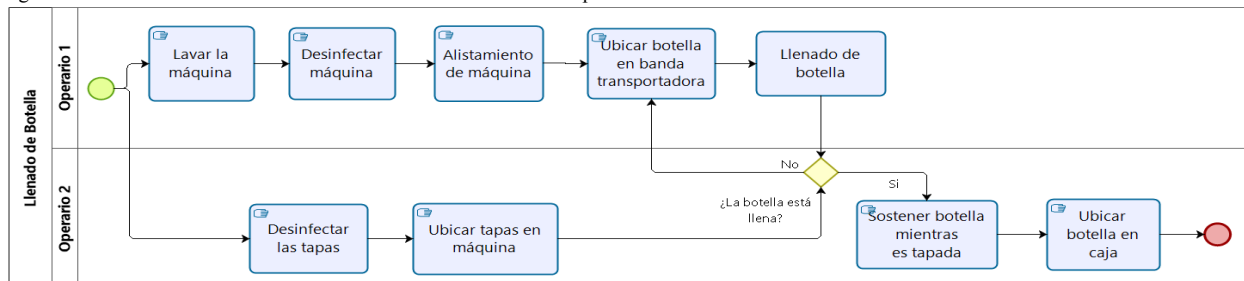
Figura 5. Proceso de Lavado Actual de Botellas. Fuente. Elaboración Propia



5.1.1.4. Envasado y Tapado

Posterior al proceso de lavado se procede a realizar el envasado y tapado. Como se puede observar en la Figura 6, el primer paso en el llenado es el lavado de la máquina de envasado y tapado que se muestra en la Imagen 6 del Anexo 2, el cual lo realiza el operario 1 con una manguera, este proceso dura aproximadamente 52 segundos. Luego, se enciende la máquina y se deja escurrir durante 5 minutos para así verificar su correcto funcionamiento. Posteriormente, se realiza la desinfección con alcohol, la cual dura 29 segundos aproximadamente. Esta se realiza por medio de un aspersor. Después este mismo operario efectúa el alistamiento de la máquina, proceso en el que se realizan todas las conexiones necesarias para el llenado de la cerveza. Conexiones que van desde los tanques de fermentación hasta la máquina de llenado. También se realiza la verificación del correcto funcionamiento de las bandas transportadoras, y se ubican las tapas de las botellas en la máquina, tal como se muestra en la Imagen 7 del Anexo 2, este proceso dura en promedio 14 minutos y 48 segundos.

Figura 6. Proceso de Envasado de Cerveza. Fuente. Elaboración Propia.

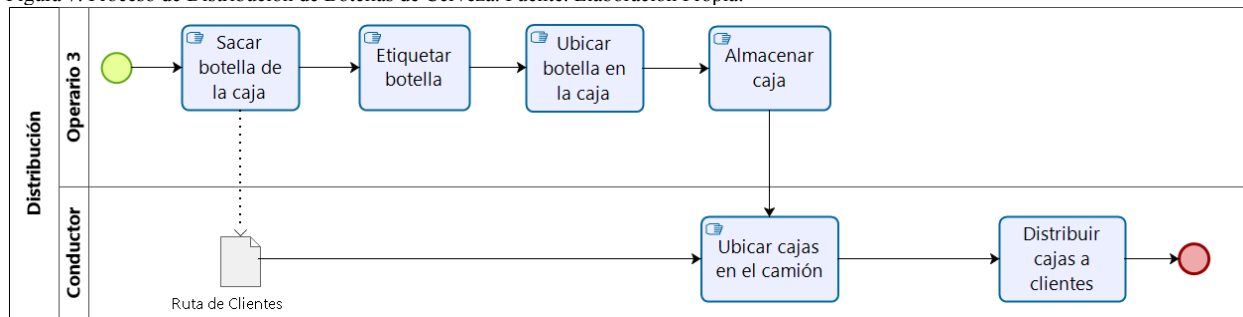


Una vez alistada la máquina, el operario 1 ubica las botellas en la banda transportadora en lotes de 4 unidades para ser llenadas. El llenado de cada lote tiene un tiempo de ciclo promedio de 29 segundos. Seguido de esto, el operario 2 realiza una inspección para asegurar que cada botella tenga la cantidad requerida de cerveza, en caso de que una botella no pase la inspección esta es devuelta e ingresada nuevamente al proceso de llenado tal como se muestra en la Figura 6. En caso de pasar la inspección se procede a realizar el tapado de la botella. Este proceso se realiza una botella a la vez. Cada vez que se realiza el tapado de 4 botellas de cerveza estas son ingresadas por el operario 2 a una caja con capacidad de 24 unidades. La duración es de 1 minuto y 4 segundos en promedio. El tiempo de ciclo de cada botella en el proceso de envasado y tapado es de 288 botellas por hora. La máquina utilizada en este proceso fue fabricada a la medida, en el Anexo 3 se presenta la información técnica de dicha máquina.

5.1.1.5. Distribución

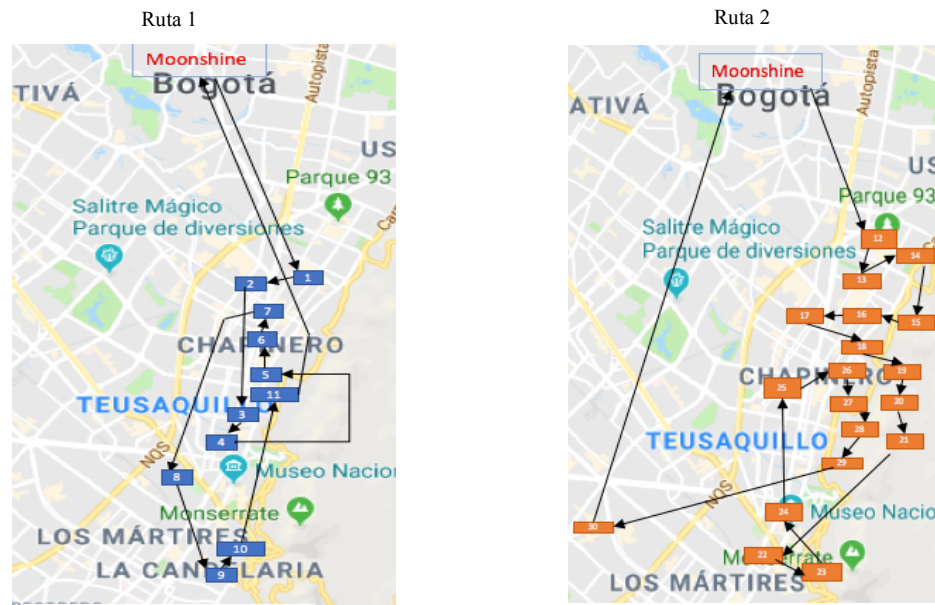
El primer paso para poder realizar el proceso de distribución es etiquetar cada una de las botellas. Según se observa en la Figura 7, el operario 3 saca las botellas de la caja, luego les adhiere la etiqueta y las vuelve a ingresar a la misma caja en las que van a ser transportadas y así sucesivamente hasta completar la cantidad de cajas que serán despachadas. Una vez las cajas están llenas y cerradas se ubican en el área de almacenado donde quedan listas para ser despachadas a los clientes. La distribución es realizada por medio de un distribuidor, quien dispone de furgones. Esta persona llega a la planta los días jueves a las 9 de la mañana, espera que le asignen la ruta a efectuar, y luego procede a realizar la carga de los productos al furgón. Este último proceso tarda alrededor de 4 minutos y 15 segundos en ser realizado.

Figura 7. Proceso de Distribución de Botellas de Cerveza. Fuente. Elaboración Propia.



Actualmente, Moonshine realiza dos rutas para distribuir la cerveza y así satisfacer la demanda de sus clientes. La distribución de rutas (ver Figura 8) se realiza actualmente de la siguiente manera: la Ruta 1 se realiza en 6 horas aproximadamente, y la distancia total recorrida es de 41,9 km. La Ruta 2 se realiza en 7 horas aproximadamente, y la distancia total recorrida es de 56,93 km. Para estas dos rutas, se tiene en cuenta que hay un tiempo en el cual no se distribuye producto, porque el conductor se detiene a almorzar, sin embargo, el tiempo de cada ruta mencionado anteriormente, no discrimina dicho intervalo de tiempo. En total, las dos rutas suman una distancia de 98,83 km. Los tiempos promedios de llegada y salida del furgón en cada uno de los clientes y se puede observar que, para algunos casos, la restricción de ventanas de tiempo estaba siendo violada (Anexo 4).

Figura 8. Rutas Actuales de Distribución



Fuente: Elaboración Propia

5.1.2. Diseño de los Procesos de Lavado y Desinfección

Para diseñar el proceso de lavado y desinfección propuesto, primero se revisó el procedimiento de lavado actual y se identificó que este no es un lavado con ciclo completo, es decir, no se realiza la limpieza alcalina y tampoco la ácida, solo se realiza la parte de desinfección, debido a que las botellas son nuevas. Entonces, se realizó una propuesta de lavado más profunda que pueda garantizar la limpieza de las botellas para poder ser reutilizadas. El procedimiento propuesto busca realizar el proceso de lavado y desinfección de las botellas de manera secuencial, utilizando sustancias a concentraciones establecidas para garantizar la idoneidad de los envases para su uso posterior. Al sumergir una botella en soda cáustica y en ácido peracético, se busca realizar una limpieza alcalina y ácida, respectivamente. El uso de detergentes ácidos, alternados con los alcalinos logran la eliminación de olores indeseables y la disminución de los recuentos microbianos. Por tal razón, se propuso un lavado de ciclo completo, el cual está conformado por las siguientes etapas:

1. Limpieza alcalina por medio de aplicación de solución de agua y soda cáustica al 1%.
2. Limpieza ácida con una solución de agua y ácido peracético al 1%.
3. Desinfección con agua y alcohol 50%-50%.

Con el fin de visualizar los procesos de Moonshine junto con el proceso de lavado y desinfección propuesto, se realizó un Mapa del Flujo de Valor (VSM), el cual representa el flujo de una botella de cerveza a través de cada etapa, desde el proveedor hasta el cliente final. Esta representación permite identificar el tiempo mínimo que permanece una unidad en el sistema y los tiempos en los cuales no se agrega valor al producto. A partir de la interpretación de este mapa se presenta una herramienta de Lean Manufacturing para el proceso de lavado y desinfección propuesto con el fin de agregar valor al bien final. La herramienta que se plantea, son las 5's. Al implementarlas en el diseño del proceso de lavado y desinfección, se esperan diferentes beneficios, dentro de los cuales se encuentra una rápida y efectiva clasificación de las botellas para discernir entre las que serán lavadas y las que serán desinfectadas, una organización estricta del puesto de trabajo para la realización de dichas labores, permitiendo desempeñarlas con mayor comodidad y eficiencia.

5.2. Etapa 2: Definición del Modelo de Ruteo para la Distribución y Recolección de la Botella

El problema de ruteo consiste en la distribución de cerveza y recolección de botellas vacías a los diferentes clientes de Moonshine utilizando la flota de furgones que posee el distribuidor y partiendo de una única planta de producción. Para la implementación de la logística inversa que se propone en este trabajo es necesario considerar la carga y descarga simultánea de las botellas, y los tiempos de servicio de cada cliente. Estos, tienen una demanda de descarga

realizada a través de la solicitud de productos a la cervecería y una demanda de carga que se establece a partir de un porcentaje de la demanda de descarga, según la información proporcionada por cada cliente (ver Anexo 6). Para la definición de las rutas, como primera aproximación, se establece un modelo de programación lineal entera mixta que se adapta a las características del problema. Una vez este problema es caracterizado como NP-hard se procede a realizar una segunda aproximación que consiste en solucionarlo a partir de una heurística. Finalmente, se realiza una metaheurística cuyo punto de partida es el resultado obtenido en la instancia previa con el fin de mejorar la solución obtenida.

5.2.1. Modelo de Programación Lineal Entera Mixta

Para la solución de este problema, en primera instancia se presenta un modelo de programación lineal entera mixta, el cual se establece como un VRPSPDTW (vehicle routing problem with simultaneous pick and delivery and time windows). A continuación, se presenta el modelo matemático propuesto por Antwi & Xu (2018).

Conjuntos:

N – Conjunto de nodos que incluye al depósito
 N_1 – Conjunto de nodos sin incluir al depósito
 A – Conjunto de arcos
 V – Conjunto de vehículos

Variables:

X_{ijk} – binaria, si toma el valor de 1, implica que el arco (i,j) , es utilizado por el vehículo k . Toma el valor de 0 en caso contrario. $i \neq j$
 Z_{ij} – Cantidad de mercancía para entregar a los clientes posteriormente de pasar por el nodo i y transportada en el arco (i, j) , $\forall (i,j) \in A$
 Y_{ij} – Cantidad de mercancía recogida de los clientes hasta el nodo i y transportada en el arco (i, j) , $\forall (i,j) \in A$
 W_{ik} – Tiempo de llegada del vehículo k al nodo i , $\forall i \in N, k \in V$

Parámetros:

E – Inicio del horizonte de tiempo
 L – Fin del horizonte de tiempo
 a_i – Inicio de la ventana de tiempo en el nodo i . $\forall i \in N$
 b_i – Fin de la ventana de tiempo en el nodo i . $\forall i \in N$
 s_i – Tiempo de servicio en el nodo i . $\forall i \in N$
 t_{ij} – Tiempo de viaje entre el nodo i y el nodo j . $\forall (i,j) \in A$
 d_i – Cantidad de despacho en el nodo i . $\forall i \in N$
 p_i – Cantidad a ser recogida en el nodo i . $\forall i \in N$
 C – Capacidad del vehículo
 M – Número muy grande. $\forall i \in C, j \in C$
 k – Cantidad máxima de vehículos necesarios

$$\text{Min } Z = \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} X_{ijk} \quad (1)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in N} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N_1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ijk} = \sum_{i \in N} X_{j,i,k} \quad \forall j \in N, k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N_1} X_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} Y_{ji} - \sum_{i \in N} Y_{ij} = p_j \quad \forall j \in N_1 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} Z_{ij} - \sum_{i \in N} Z_{ji} = d_j \quad \forall j \in N_1 \quad (6)$$

$$Y_{ij} + Z_{ij} \leq C * \sum_{k \in V} X_{ijk} \quad \forall i \in N, j \in N \quad (7)$$

$$W_{ik} + S_i + t_{ij} - W_{jk} \leq M * (1 - X_{ijk}) \quad \forall i \in N, j \in N, k \in V \quad (8)$$

$$a_i * \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} X_{ijk} \leq W_{ik} \leq b_i * \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} X_{ijk} \quad \forall k \in V \quad (9)$$

$$E \leq W_{i,k} \leq L \quad \forall k \in V \quad (10)$$

$$W_{0k} = E \quad \forall k \in V \quad (11)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in V, (i,j) \in A \quad (12)$$

$$X_{ijk}, Y_{ijk}, Z_{ij} \geq 0 \quad \forall k \in V, (i,j) \in A \quad (13)$$

La Ecuación (1) es utilizada para minimizar el tiempo total recorrido. La Ecuación (2) establece que cada cliente debe ser visitado una única vez por el vehículo k. La Ecuación (3) garantiza el balance en cada uno de los clientes. Es decir, si el vehículo k visita un cliente, entonces este mismo vehículo debe salir de ese cliente. La Ecuación (4) define que por lo menos un vehículo debe ser utilizado para servir a los clientes. Las Ecuaciones (5) y (6) garantizan el balance para las demandas de carga y descarga de los clientes de manera separada. La Ecuación (7) garantiza que la carga total del vehículo no exceda su capacidad. En la Ecuación (8) si el vehículo k es asignado al arco (i,j), entonces $X_{ijk}=1$ y la ecuación significa que la hora de llegada del vehículo k al nodo j debe ser igual o mayor a la hora de llegada del vehículo k al nodo i, más el tiempo de servicio en el nodo i, más el tiempo de viaje desde el nodo i hasta el nodo j. Si el vehículo k no es asignado al arco (i,j), entonces $X_{ijk}=0$ y la desigualdad no se cumplirá. La Ecuación (9) establece que todos los vehículos k deben llegar dentro de la ventana de tiempo para el proceso de carga y descargue en los nodos. La Ecuación (10) indica que todos los vehículos k deben realizar las operaciones de carga y descarga dentro del horizonte de tiempo. La Ecuación (11) define que la hora de inicio de cada vehículo desde el depósito debe ser igual a la hora de inicio del horizonte de tiempo. La Ecuación (12) impone la restricción binaria a la variable X_{ijk} . Finalmente, en la Ecuación (13) se establece la no negatividad de las variables X_{ijk} , Y_{ij} y Z_{ij} . El [modelo matemático](#) del caso de estudio se clasifica como NP-hard debido a la cantidad de clientes y a la complejidad de las restricciones, por lo tanto, el modelo matemático no proporciona una solución óptima en un tiempo razonable.

5.2.2. Heurística: Algoritmo Greedy para un Problema de Ruteo de Vehículos con Carga y Descarga Simultánea y Ventanas de Tiempo.

Se realizó un algoritmo Greedy que cumpliera con las restricciones del modelo matemático (2-13). Adicionalmente, se tuvo en cuenta la misma función objetivo (1) debido a que en la recolección de datos se evidenciaron los inconvenientes que presenta la empresa relacionado a el cumplimiento de las ventanas de tiempo establecidas por sus clientes. Esta heurística se elaboró utilizando el criterio del algoritmo Vecino Más Cercano para visitar a los diferentes clientes, tomando como referencia principal la matriz de tiempos. Este algoritmo se diseñó en el lenguaje de programación Microsoft Visual Basic for Applications (VBA) utilizando la versión 7.1. Se tomaron como parámetros el ID (clasificación de 0 a 30) de cada uno de los 30 clientes, siendo el punto de partida y de regreso de los furgones la planta de Moonshine designada con ID "0". Adicionalmente, se establecieron dos matrices, una de distancia (km) y otra de tiempos (s), cada una con dimensiones de 31x31. También fueron consideradas las demandas promedio previstas por cada cliente tanto de carga como de descarga y las ventanas de tiempo de cada cliente según sus posibilidades. Adicionalmente, se consideró el tiempo de carga (s) y la capacidad de los furgones.

En el Algoritmo 1 se presenta el pseudocódigo de la heurística elaborada. La heurística proporcionó como resultado las rutas específicas de recorrido (asumiendo que un camión es asignado por ruta), el tiempo de recorrido de cada una de ellas, la hora de llegada y salida del camión en cada nodo, el número de botellas entregadas y recogidas en cada nodo, el número de cajas entregadas por ruta y el total de kilómetros recorridos por ruta.

Algoritmo 1: Heurística VRPSPDTW. Fuente. Elaboración Propia

```
1: procedure HEURISTICA(Clientes)
2:   Define R as rutas
3:   definirRuta(1)
4:   for i ∈ Clientes do
5:     idRuta ← 1
6:     nodoEnRuta ← False
7:     while not nodoEnRuta do
8:       if insertarNodoEnRuta(i, R(idRuta)) is True then
9:         nodoEnRuta ← True
10:      else
11:        if idRuta is equal to |R| then
12:          definirRuta(idRuta + 1)
13:          insertarNodoEnRuta(i, R(idRuta + 1))
14:          nodoEnRuta ← True
15:        else
16:          idRuta ← idRuta + 1
17:        end if
18:      end if
19:    end while
20:  end for
21: end procedure
```

5.2.3. Metaheurística: Búsqueda Tabú

Se realizó la metaheurística Búsqueda Tabú con el objetivo de ampliar el vecindario de exploración para obtener una mejor solución. Esta se inicializó con la distancia total recorrida y con la secuencia de clientes que se obtiene de la heurística mencionada anteriormente, la cual buscaba minimizar el tiempo de recorrido. El algoritmo establece como criterio de mejora la distancia total recorrida (fitness). Los cambios se establecen de nodo a nodo, es decir nodo 1 con nodo 2, nodo 1 con nodo 3 y así sucesivamente hasta agotar todos los cambios, lo que constituye el vecindario de exploración. Una vez estos nodos son recorridos se va actualizando la lista de cambios de la matriz Tabú, la cual utiliza una memoria Tabú de 5 iteraciones, estableciendo como criterio de parada el momento en que se encuentra una reducción de la distancia total recorrida. El algoritmo interactúa al mismo tiempo con la heurística para garantizar que todas las restricciones se cumplan.

Algoritmo 2. Búsqueda Tabú. Fuente. (Gamboa, Rego, & Glover, 2005)

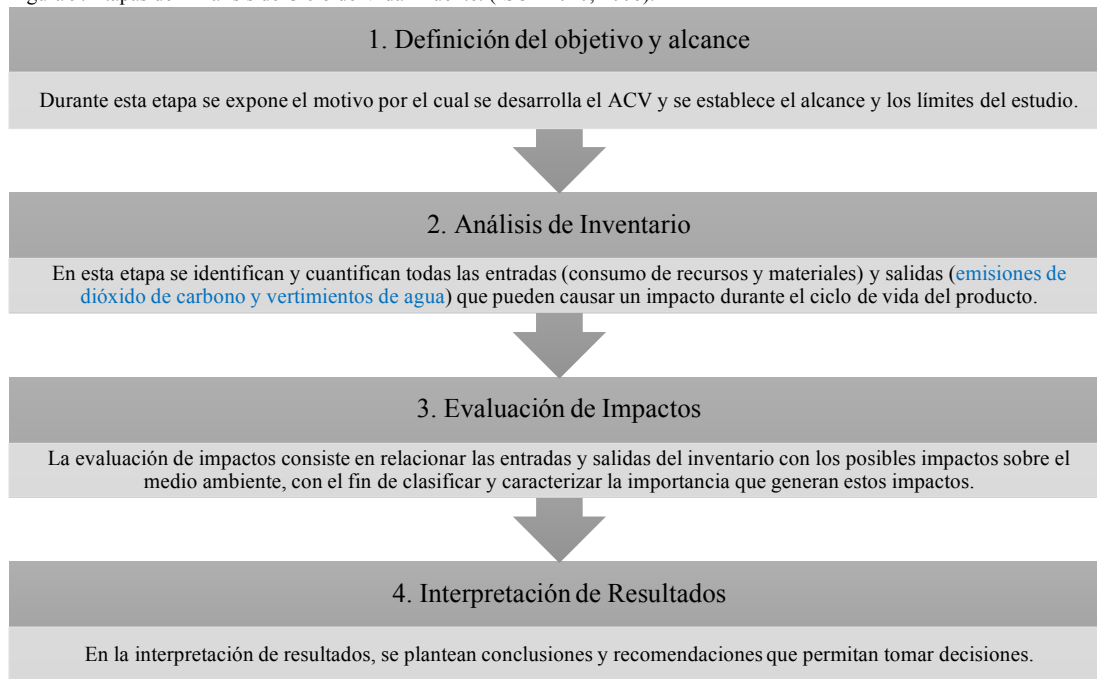
```
1: procedure TABU()
2:   sBest ← s0
3:   bestCandidate ← s0
4:   tabuList ← []
5:   tabuList.push(s0)
6:   while not stoppingCondition() do
7:     sNeighborhood ← getNeighbors(bestCandidate)
8:     for sCandidate ∈ sNeighborhood do
9:       if fitness(sCandidate) > fitness(bestCandidate) and not tabu then
10:        bestCandidate ← sCandidate
11:      end if
12:    end for
13:    if fitness(bestCandidate) > fitness(sBest) then
14:      sBest ← bestCandidate
15:    end if
16:    tabuList.push(bestCandidate)
17:    if tabuList.size > maxTabuSize then
18:      tabuList.removeFirst()
19:    end if
20:  end while
21:  return sBest
22: end procedure
```

5.3. Etapa 3: Análisis de Ciclo de Vida y Validación Financiera

5.3.1. Análisis de Ciclo de Vida

Siguiendo lo propuesto por la ISO 14040 (2006) para realizar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), se desarrollaron cuatro etapas según se observa en la Figura 9 las cuales fueron aplicadas a la situación actual de Moonshine y a la situación propuesta.

Figura 9. Etapas del Análisis de Ciclo de Vida. Fuente. (ISO 14040, 2006).



5.3.2. Validación Financiera

Con el propósito de determinar la viabilidad de la propuesta se realizó un análisis costo-beneficio para cada situación, la actual y la propuesta. Para esto, se utilizó la información otorgada por Moonshine (ingresos y costos operacionales) y se calculó lo siguiente: ingresos y egresos, proyecciones a cinco años (realizadas con proyecciones de inflación y proyecciones de crecimiento) y el costo de capital (WACC). A partir de la información anterior, se calculó el valor presente de los ingresos, de los costos y de los beneficios (el cual equivale al valor a pesos de hoy de los flujos netos de efectivo) operacionales. Para obtener el indicador financiero Beneficio/Costo, se utilizaron las Ecuaciones (14-16) (Newnan, 1985). Se calcula este indicador para ambas situaciones con el fin de comparar la viabilidad financiera de cada uno. Para que un proyecto sea viable se requiere que el indicador beneficio /costo sea mayor que 1 (Bravo, 2011).

$$\text{Indicador (Beneficio/Costo)} = \frac{\text{Valor Presente Beneficio}}{\text{Valor Presente Costo}} \quad (14)$$

El Valor Presente Beneficio está definido por la siguiente ecuación: $\sum I(1+i)^{-t}$ (15)

El Valor Presente Costo está definido por la siguiente Ecuación: $\sum E(1+i)^{-t}$ (16)

Donde:

I: Flujos netos de efectivo.

E: Costos.

i: WACC.

t: Periodo.

Se realizó una simulación de Montecarlo, la cual permite tener en cuenta el riesgo para variaciones estocásticas. En el presente caso de estudio, se analiza el riesgo de variaciones en el WACC y en el incremento de ventas, siendo estos dos factores determinantes a la hora de realizar las previsiones financieras del costo de caja y por lo tanto del indicador costo-beneficio. Lo que se buscó con esta simulación fue identificar el rango en el que puede fluctuar el indicador Beneficio/Costo, para lo cual se asignó un valor máximo, medio y mínimo tanto al WACC como al incremento de ventas bajo un nivel de confianza del 95%. Esto se realizó debido a la variabilidad que puede presentar la proyección de crecimiento por parte de Moonshine y los posibles cambios que enfrenta el financiamiento de la empresa a corto y mediano plazo, y con ello el costo de capital. Esta simulación se realizó teniendo en cuenta

únicamente estas dos variables, dado que el resto de parámetros en el costeo están fijados de acuerdo a directrices de la empresa.

6. Resultados

En esta sección se presentan los resultados en el orden del desarrollo de las etapas de diseño establecidas en la Figura 1.

6.1. Diseño de los Procesos de Lavado y Desinfección

El proceso de lavado y desinfección propuesto se observa en la Figura 10. Este proceso considera los datos para el lavado de 790 botellas y se describe de la siguiente manera, el primer paso consiste en agregar 100 L de agua a una temperatura de 75°C a un tanque con capacidad de 200 L. Luego, se introducen las botellas que han sido recolectadas en las ubicaciones de los clientes. Estas permanecen sumergidas por 1 hora, posteriormente, se retira manualmente las etiquetas a cada una de las botellas con ayuda de una espátula plástica. El siguiente paso consiste en sumergir cada botella en un tanque que contiene la solución compuesta por 1 L de soda cáustica y 99 L de agua. Luego, estas mismas botellas se sacan del tanque con la solución dentro, y se ubican en una mesa donde permanecen 20 minutos. Luego, se retira esta solución y se repiten los pasos anteriores con otra solución compuesta por 1 L de ácido peracético y 99 L de agua. Finalmente, se desecha este líquido, y se agrega a cada botella 100 mL de una mezcla de agua (50%) y alcohol (50%) para realizar el último enjuague. Se retira dicha mezcla y así quedan listas para iniciar el proceso de llenado.

Figura 10. Proceso de lavado y desinfectado propuesto. Fuente. Elaboración Propia.

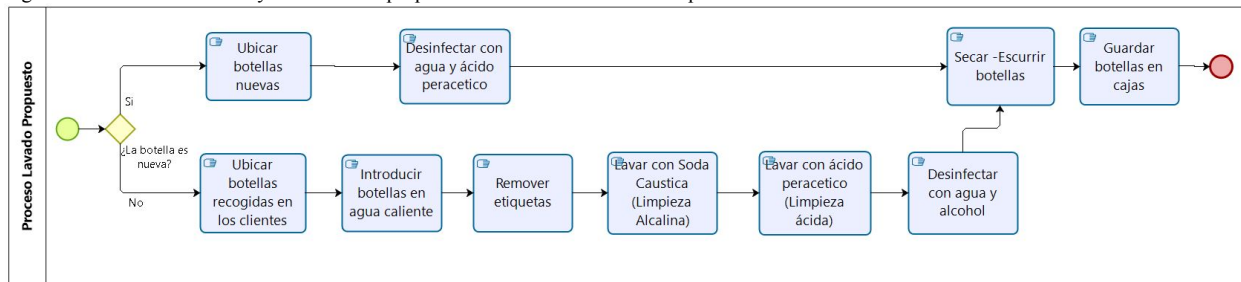
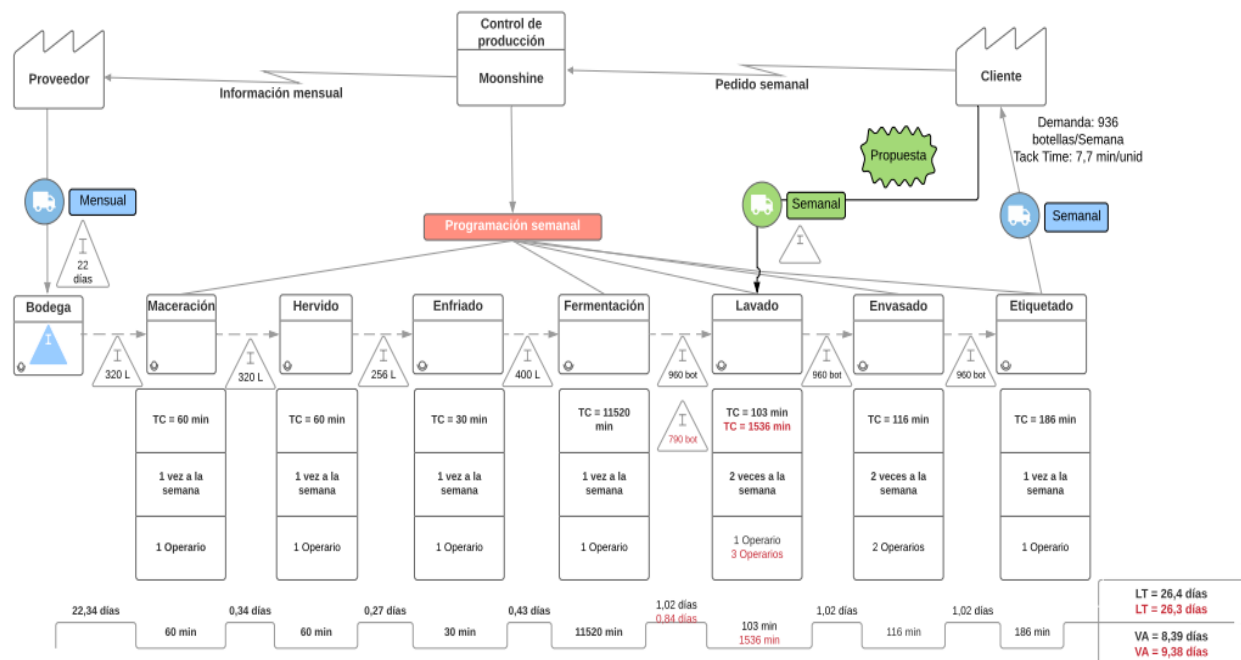


Figura 11. Diagrama Value Stream Mapping Procesos Moonshine. Fuente. Elaboración Propia



Se realizó un VSM (Figura 11) en el cual se consideraron los procesos productivos actuales de Moonshine, y se agregó el proceso de lavado propuesto que aparece indicado con color rojo. A partir de este mapa, se logró identificar, que el tiempo requerido para producir una botella de cerveza, si se emplea el proceso de lavado propuesto, es de 9,38 días, pero en realidad el tiempo que tarda en salir como producto terminado desde la planta es de 26,3 días. Adicionalmente, en color verde se indica la propuesta de valor relacionada con la logística inversa, donde se recogen los envases vacíos en los clientes y regresan nuevamente a Moonshine. Para esto se considera un porcentaje promedio de retorno del 85% del total de las botellas que son entregadas inicialmente, considerando la posibilidad de botellas rotas o perdidas. Dicho retorno hace referencia al nuevo proceso logístico propuesto.

Implementando las 5S's, se espera garantizar una mejora en el proceso propuesto, permitiendo que la empresa sea más competitiva y que las condiciones laborales sean propicias. A su vez, se busca disminuir los desperdicios, deshacerse de materiales innecesarios y evitar el despilfarro. A continuación, se propone la siguiente manera de aplicar las 5S's:

Seiri (Clasificar):

En el momento del retorno de las botellas a Moonshine, es necesario distinguir las que van a ser reutilizadas frente a las adquiridas. Esto ayuda a tener una mejor organización y saber qué tipo de lavado se debe realizar a cada una. Es decir, si es una nueva, se debe realizar el lavado por medio de ácido peracético como lo hacen actualmente, pero si se trata de una botella que se va a reutilizar, se debe realizar el proceso de lavado propuesto. Además, se deben clasificar los materiales y/o implementos necesarios para realizar el proceso de lavado y desinfección para que al momento de realizar el procedimiento no se realicen movimientos innecesarios, por el contrario, se debe contar con los implementos requeridos cerca del lugar donde se realizará el proceso, es decir, los tanques con el agua caliente, la solución de soda cáustica, la solución de ácido peracético y la mezcla de agua y alcohol.

Seiton (Orden):

Después de estar clasificados los implementos y materiales a utilizar, se deben ordenar según la frecuencia de uso y según el orden establecido del proceso, buscando así disminuir los tiempos de búsqueda de materiales. Una vez lavadas las botellas se deben organizar de tal manera que queden listas para ser envasadas nuevamente, o por primera vez si son botellas nuevas. Para ello se cuenta con las cajas de cartón que se observan en la Imagen 7 del Anexo 2, que es en la cual se porta el producto para su distribución.

Seiso (Limpieza):

Al momento de realizar el proceso de lavado, es importante tener el lugar limpio y desinfectado. En este caso, se limpia y desinfecta con agua y alcohol la mesa donde se ubican las botellas para realizar el proceso de lavado, además los operarios deben tener los implementos de limpieza e higiene como lo son: tapabocas, guantes, delantales o batas, y haber desinfectado sus manos previamente para evitar cualquier tipo de contaminación o alteración del producto. Además, al inicio y al final de la jornada laboral se debe realizar una limpieza general al lugar de trabajo, en este caso, la planta de producción, limpiar y secar los pisos, implementos y materiales.

Seiketsu (Estandarizar):

Cada operario debe tener claro sus funciones y el trabajo bien distribuido, para así evitar inconvenientes al momento de realizar cada una de las actividades diarias. Es decir, los operarios se deben encargar de verificar que las 3 S's anteriores se cumplan, creando rutinas para así estandarizar el trabajo y no generar desorden, asignando responsabilidades por áreas o por actividades a realizar, para finalmente hacer inspecciones periódicas que verifiquen el cumplimiento de la propuesta de mejora. Adicionalmente, los operarios se deben distribuir para realizar las diferentes actividades de lavado y desinfección de las máquinas, la limpieza del lugar de trabajo, la separación y organización de las botellas, y las inspecciones a realizar. Entonces, cada procedimiento debe estar estandarizado para que cada uno de los operarios tenga claridad sobre cómo desarrollar cada tarea, de la manera correcta y en el momento que se le asigne. Para ello, se cuenta con el POE (Procedimiento Operativo Estandarizado) de la limpieza y desinfección de botellas de vidrio para reutilización (Anexo 7).

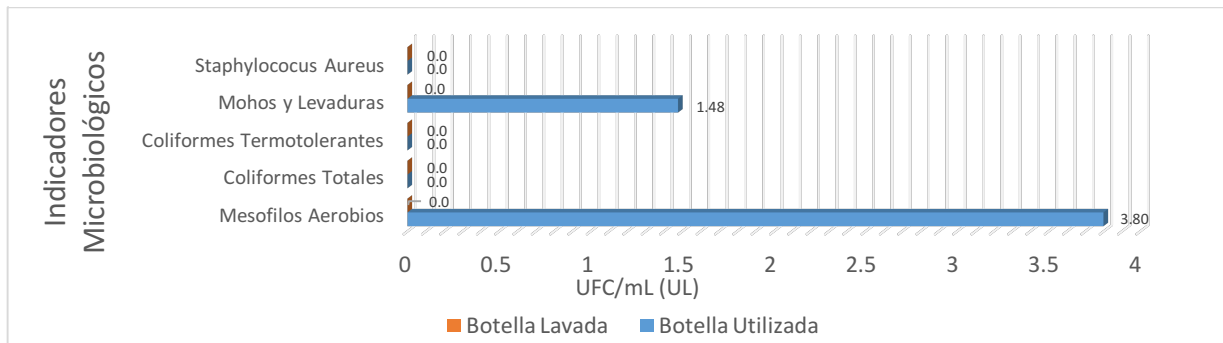
Shitsuke (Disciplina):

Para garantizar el correcto funcionamiento de todo el proceso productivo, es necesario tener disciplina y constancia, se debe velar para que la implementación de las 5S's anteriores se convierta en un hábito de los operarios y no en algo esporádico. En este caso, cada persona que interviene en los procesos de lavado y desinfección de botellas, debe ser disciplinado y cuidadoso, generando mayor productividad, seguridad en el trabajo, y disminución de errores y accidentes.

6.2. Validación Microbiológica del Diseño

Con el propósito de validar la limpieza de las botellas en el proceso de lavado y desinfección propuesto, se realizó un estudio microbiológico a una botella de cerveza vacía (su contenido fue consumido por una persona), y posteriormente lavada mediante este método. El estudio consistió en identificar la presencia de microorganismos como mesofilos aerobios, coliformes totales, coliformes termotolerantes, mohos y levaduras, y staphylococcus aureus. De acuerdo a los resultados observados en la Figura 12, se distingue una reducción en el indicador de microorganismos aerobios mesofilos de 3,8 UL (Unidades Logarítmicas), y en el de Mohos y Levaduras, una reducción de 1,47 UL, lo cual indica que el proceso de lavado y desinfección evaluado logró reducir la cantidad de microorganismos indicadores mesofilos aerobios y mohos y levaduras presentes en botellas usadas.

Figura 12. Grafica Resultados Estudio Microbiológico Botella Lavada VS Botella Utilizada. Fuente. Elaboración Propia



Los análisis microbiológicos realizados (ver Anexo 5) a la botella sin lavado y al proceso de limpieza y desinfección propuesto, demostraron que el procedimiento es adecuado y cumple con los estándares requeridos por el INVIMA para envases, por lo cual, la botella puede ser nuevamente llenada y distribuida con el producto, siempre y cuando se implemente el procedimiento evaluado. **Teniendo en cuenta lo anterior, Moonshine efectivamente podría reutilizar estas botellas, lo cual implicaría una disminución en los costos de adquisición de envases en los cuales la empresa está incurriendo mensualmente.** Para realizar correctamente el proceso de lavado y desinfección se debe seguir el paso a paso que se encuentra en el POE (Anexo 7).

6.3. Modelo de Ruteo para La Distribución y Recolección de Botellas

En este apartado se presentan los resultados de las aproximaciones utilizadas para definir el modelo de ruteo.

6.3.1. Heurística

A partir de la implementación del Algoritmo Greedy para un VRSPDTW (en el Anexo 21 se presenta este Algoritmo) se obtuvo como resultado las tres rutas que se presentan en la Figura 13 para satisfacer la demanda de carga y de descarga de los clientes de Moonshine. Se compararon los resultados de distancia total recorrida y tiempo total de recorrido obtenidos en la heurística con los de la situación actual de la empresa. En la Figura 14 se observa el incremento en la distancia recorrida de la solución heurística frente a la actual, esto se debe a que la función objetivo establecía como criterio de minimización el tiempo de recorrido. Teniendo en cuenta lo anterior, y observando la Figura 15 se comprueba que efectivamente el tiempo de recorrido disminuye considerablemente frente al actual. En el Anexo 8 se presentan los resultados obtenidos en la heurística.

Figura 13. Rutas obtenidas de la Heurística. Fuente. Elaboración Propia

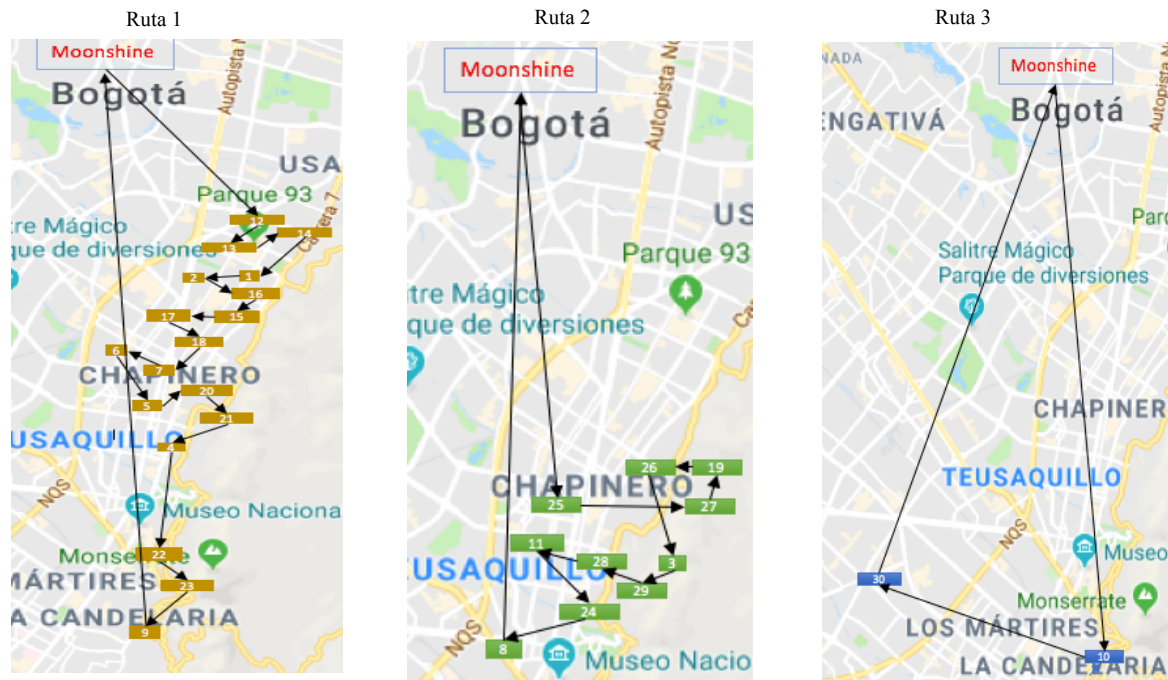


Figura 14. Comparación de distancia recorrida en la situación actual y la obtenida mediante la heurística. Fuente. Elaboración Propia.

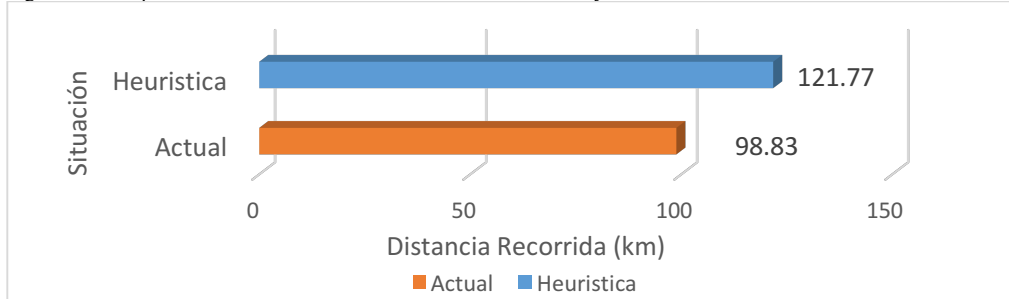
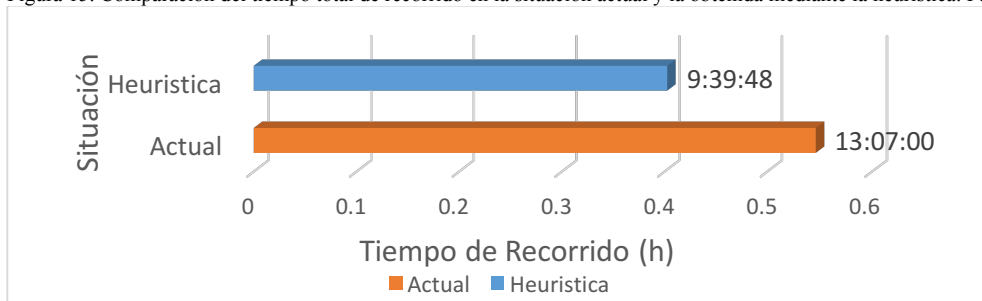


Figura 15. Comparación del tiempo total de recorrido en la situación actual y la obtenida mediante la heurística. Fuente. Elaboración Propia.



6.3.2. Metaheurística

Teniendo en cuenta los resultados de la heurística anterior, se utilizó el valor de la distancia total recorrida como referencia de mejora (fitness) en la metaheurística Búsqueda Tabú. La Figura 16 refleja las nuevas rutas obtenidas a través de este método (los resultados se observan en el Anexo 9). En la Figura 17 se muestra la comparación con el ruteo actual y con los resultados obtenidos de la heurística, en la cual se presenta una disminución en la distancia total recorrida de 7,91 km y 30,85 km respectivamente. En la Figura 18 se evidencia que el tiempo total de recorrido que

se obtiene de las rutas proporcionadas por la metaheurística, en comparación con las situaciones anteriores (heurística y situación actual) es menor. Esto se debe a que la combinación entre la heurística y la metaheurística disminuye la función objetivo en una mayor proporción. En el Anexo 21 se encuentra el aplicativo. Para Moonshine, la implementación de este ruteo podría verse reflejado en la mejora de su imagen corporativa ante sus clientes, ya que se está cumpliendo con las restricciones de ventanas de tiempo establecidas por cada uno de ellos.

Figura 16. Rutas obtenidas de la Metaheurística. Fuente. Elaboración Propia

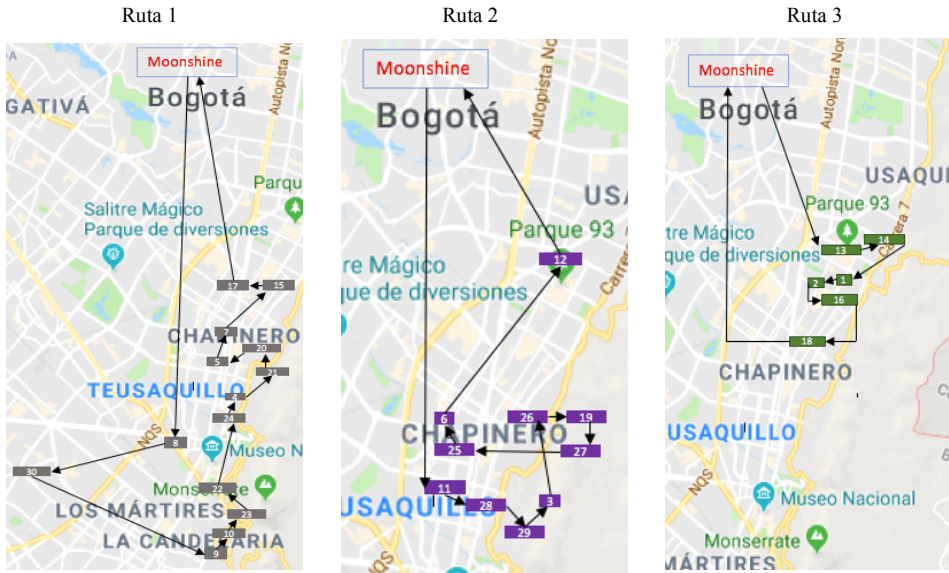


Figura 17. Comparación de Distancia Recorrida: Metaheurística, Heurística y Situación Actual. Fuente. Elaboración Propia

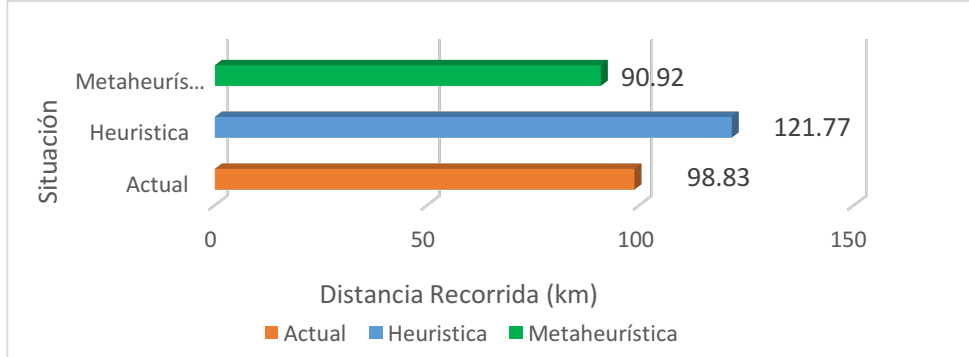
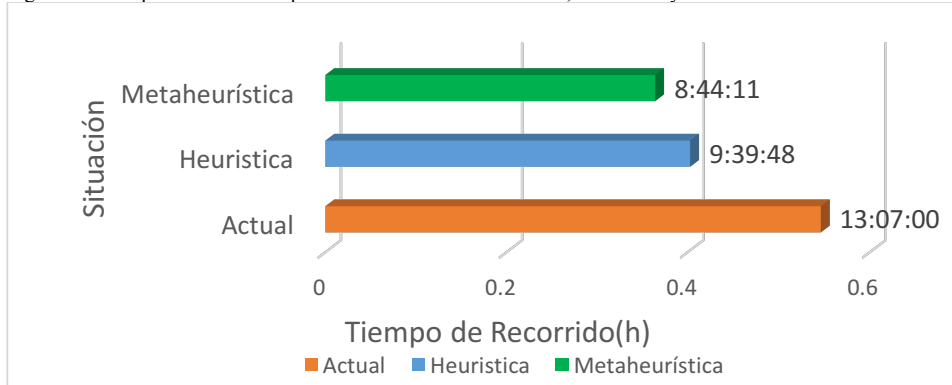


Figura 18. Comparación de Tiempo de Recorrido: Metaheurística, Heurística y Situación Actual. Fuente. Elaboración Propia



6.4. Análisis del Impacto del Diseño

En este apartado se presenta la validación del diseño de logística inversa propuesto para los siguientes aspectos: ambiental; el cual se realiza mediante un ACV; y financiero, el cual se evalúa mediante un indicador Costo-Beneficio y una simulación de Monte Carlo en la cual se consideran ciertas variables estocásticas.

6.4.1. Análisis de Ciclo de Vida

Los resultados obtenidos para cada etapa del ACV para las dos situaciones se presentan en los siguientes apartados.

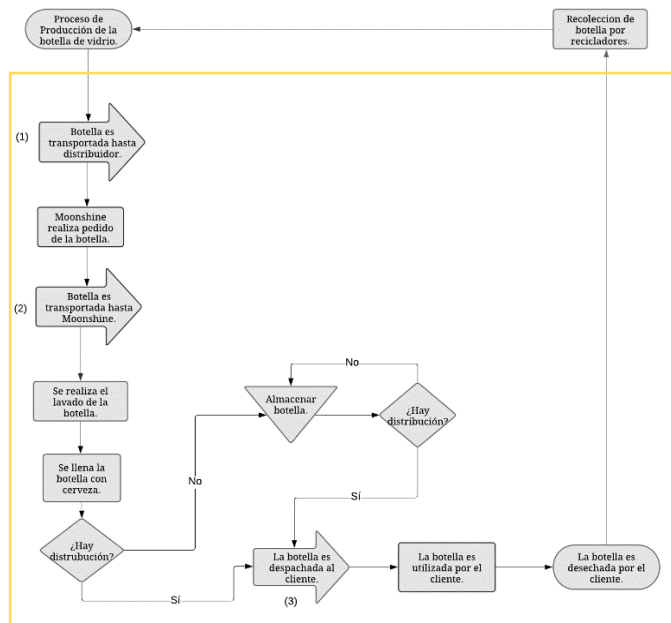
6.4.1.1. Definición de Objetivos y Alcance

En este apartado se presenta el propósito y los límites establecidos para el análisis para cada una de las situaciones, la que presenta Moonshine actualmente (Anexo 11), y la que se propone mediante la implementación de la logística inversa (Anexo 12). A continuación, se muestran los diagramas de flujo sobre los cuales se realizaron los ACV. En el Anexo 1 se establecen las convenciones utilizadas para representar cada proceso en cada uno de los diagramas. Para ambos casos, la unidad funcional del sistema es una botella de vidrio de 330 mL.

6.4.1.1.1. Situación Actual de Moonshine

El alcance del ACV de la unidad funcional (Figura 19 dentro del recuadro amarillo) parte desde que la botella es transportada por el productor de botellas hasta que esta es entregada al cliente, tal como se observa en el diagrama de flujo. El objetivo de este análisis es conocer la cantidad de kilogramos de CO₂ (huella de carbono) y la cantidad de litros de vertimientos (huella hídrica) que genera la empresa Moonshine al realizar la compra de una botella de vidrio. A partir de esta información se desea determinar los procesos que actualmente generan mayores emisiones, tanto de huella de carbono como de huella hídrica, para identificar oportunidades de mejora en el desempeño ambiental de la botella de vidrio. El proceso que sigue la unidad funcional dentro de los límites establecidos es el siguiente: la botella es transportada hacia el distribuidor por parte del productor. Luego, es transportada hasta Moonshine donde ingresa a un área de lavado, posteriormente, esta pasa a un área de llenado en el que se envasa la bebida, y finalmente pasa a la zona de distribución, donde se alista la botella llena para ser transportada hacia los clientes.

Figura 19. Diagrama de Flujo Actual de la Unidad Funcional. Fuente. Elaboración propia.

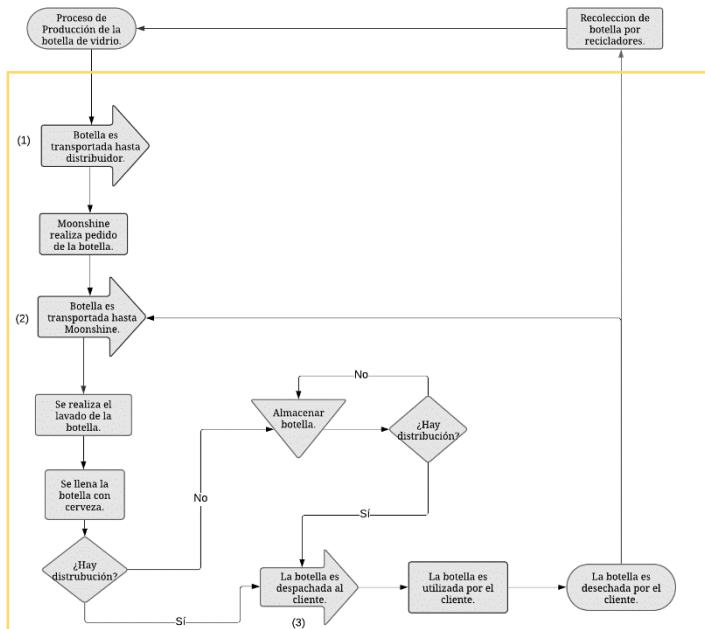


6.4.1.1.2. Situación Propuesta

En la Figura 20 se presenta el diagrama de flujo de la situación propuesta para la empresa Moonshine, la cual comprende la logística inversa y el proceso diseñado para el lavado y desinfectado de las botellas. Este estudio se

realiza con el fin de cuantificar las emisiones de huella de carbono y huella hídrica en kilogramos de CO₂ y litros de vertimientos, respectivamente. En la situación propuesta las botellas son recogidas en la ubicación de los diferentes clientes, siguiendo las rutas obtenidas a partir del resultado del ruteo, y son transportadas hasta Moonshine. Al contar con un porcentaje de 85% promedio de devolución de botellas por parte de los clientes, es necesario que Moonshine continúe comprando el 15% restante para satisfacer la demanda. Esta compra se realizará por medio de dos pedidos al año con los cuales sería suficiente para suplir las botellas faltantes.

Figura 20. Diagrama de Flujo: Situación Propuesta. Fuente. Elaboración Propia.



6.4.1.2. Análisis de Inventario

Durante esta etapa se recopilaron datos como: factores de conversión para cada emisión a analizar (ver Tabla 3), distancias recorridas en los diferentes transportes presentes en cada situación, consumo de energía de máquina de envasado y tapado, consumo de agua en los procesos de lavado, consumo de soda cáustica, ácido peracético y alcohol. A partir de esta información se presenta el análisis de inventario (entrada/salida) de cada situación.

Tabla 3. Factores de Emisión.

Gasolina corriente	2,30 kg CO ₂ /L
ACPM	2,68 kg CO ₂ /L
Energía Eléctrica	0,39 kg CO ₂ /Kwh

Fuente. (Jiménez, 2012)

6.4.1.2.1. Situación Actual

Para el análisis de inventario de la situación actual de Moonshine (ver Tabla 4), se considera el consumo de combustible de los transportes (1), (2) y (3), relacionados en la Figura 19. Los dos primeros, se realizan mensualmente en furgones con motor diésel, utilizando combustible ACPM. El transporte (1), recorre una distancia de 60,9 km según la ruta A (ver Anexo 10.) y el transporte (2) recorre una distancia de 16,2 km según la ruta B (ver Anexo 10). La cantidad de combustible consumido en los primeros dos transportes se realizó con un factor de conversión de 1 galón por cada 35 km recorridos, valor obtenido de los conductores de estos camiones. El transporte (3) se realiza semanalmente en un furgón con motor a gasolina (corriente), el cual recorre una distancia total de 98,83 km. Para el caso de la gasolina corriente se utilizó un factor de conversión de 1 galón cada 45 km. Los consumos de agua y energía se calcularon a partir del consumo histórico, teniendo en cuenta la información técnica de la máquina de llenado (Anexo 3).

Tabla 4. Análisis de inventario (entradas y salidas) para la unidad funcional en el proceso actual. Fuente. Elaboración Propia.

Entrada	Cantidades	Proceso	Salida
Combustible (ACPM)	0,000429 gal	Primer transporte	0,004299 kg CO ₂
	0,000114 gal	Segundo transporte	0,0011438 kg CO ₂
Combustible (gasolina corriente)	0,002346 gal	Tercer transporte	0,0201837 kg CO ₂
Alcohol	0,032051 mL	Lavado	0,032051 mL
Agua	3,205128 mL		3,205128 mL
Acido Peracético	0,064103 mL		0,064103 mL
Consumo energía	0,058761 Kwh	Llenado	0,022917 kg CO ₂

6.4.1.2.2. Situación Propuesta

En la identificación de entradas y salidas del sistema propuesto (ver Tabla 5), se consideran los transportes (1) y (2) los cuales se realizarán semestralmente, debido a la disminución significativa de pedidos de botellas nuevas. El transporte 3, fue obtenido del ruteo realizado de forma semanal (ver Figura 20), para el cual se utiliza un furgón con motor a gasolina y se recorre una distancia total de 90,92 km dividida en tres rutas de la siguiente manera: ruta 1, 43,4 km; ruta 2, 29,67 km; ruta 3, 17,85 km. El factor de conversión utilizado para estas rutas fue el mismo utilizado para la situación actual. La cantidad de agua, alcohol, soda cáustica y ácido peracético se refiere a la necesaria para implementar el proceso de lavado propuesto.

Tabla 5. Análisis de inventario (entradas y salidas) para la unidad funcional en el proceso propuesto. Fuente. Elaboración Propia

Entrada	Cantidades	Proceso	Salida
Combustible (ACPM)	0,000458 gal	Transporte 1	0,000717 kg CO ₂
	0,0001219 gal	Transporte 2	0,0001906 kg CO ₂
Combustible (gasolina corriente)	0,001221 gal	Ruta 1	0,008863 kg CO ₂
	0,000835 gal	Ruta 2	0,006059 kg CO ₂
	0,000502 gal	Ruta 3	0,003645 kg CO ₂
Soda Caustica	1,602564 mL	Lavado	1,602564 mL
Ácido Peracético	1,612563 mL		1,612563 mL
Agua	212,072650 mL		212,072650 mL
Alcohol	0,053419 mL		0,053419 mL
Consumo de Energía	0,006962 Kwh	Calentador de Agua	0,002715 kg CO ₂
	0,058761 Kwh	Llenado	0,029167 kg CO ₂

6.4.1.3. Evaluación de Impactos

A partir del análisis de inventario, se cuantifica la totalidad de los kg de CO₂ y los mL de vertimientos generados en ambas situaciones.

6.4.1.3.1. Situación Actual

En las salidas identificadas en el análisis de inventario de la situación actual, la totalidad de emisiones de CO₂ fue de 0,048544 kg y de vertimientos fue de 3,301282 mL. Para obtener la emisión total de CO₂ se tuvo en cuenta todos los procesos de transporte requeridos para esta situación, se obtuvo una emisión de dióxido de carbono de 0,025627 Kg, adicionado las emisiones generadas por la máquina de llenado la cual fue de 0,0229176 Kg. En el caso de los vertimientos, estos se calcularon realizando la sumatoria de las salidas de cada sustancia que hace parte del proceso de lavado.

6.4.1.3.2. Situación Propuesta

El análisis de inventario presentado para el proceso propuesto tiene en cuenta, por una parte, las emisiones del combustible (las cuales se consideraron los transportes (1), (2) y (3)) presentan una emisión total de 0,019476 Kg de CO₂. Los primeros dos transportes se ejecutan con una menor frecuencia, debido a la reducción en la compra de botellas nuevas, que disminuye de una frecuencia mensual a una semestral. Las rutas del transporte (3) se establecieron mediante la solución proporcionada por el VRPSPDTW. Esto supuso una reducción del 8% de la cantidad total de km recorridos frente a la situación actual, equivalente a 7,91 km. Por otra parte, en las emisiones de la energía eléctrica se obtuvo un total de 0,025632 Kg de CO₂, el cual se compone de la suma de las emisiones por parte de la máquina de llenado y el calentador. Sumando así un total de emisiones para esta situación de 0,0451074 Kg de CO₂. El total de vertimientos fue de 215,341200 mL, sumando las salidas de la soda caustica, el ácido peracético, el alcohol y el agua.

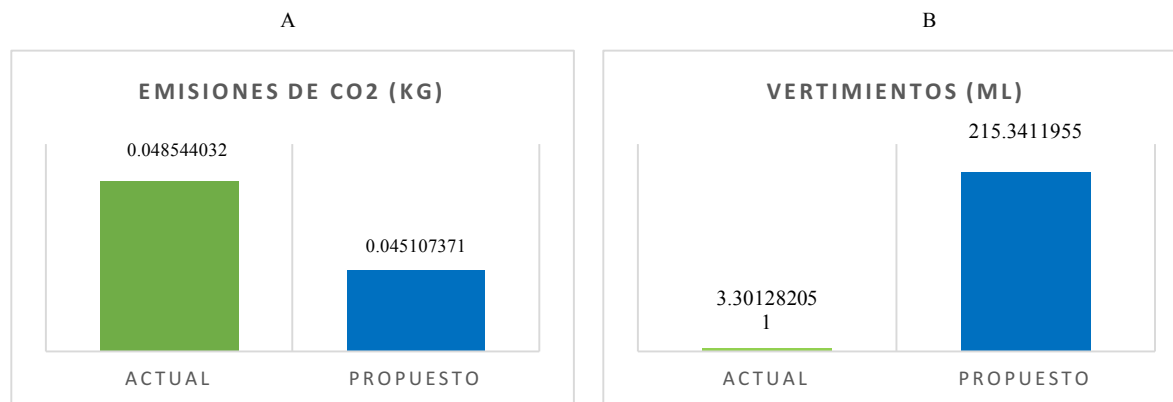
6.4.1.4. Interpretación de Resultados

Para esta etapa del ACV, se realizará un único apartado en el cual se compararán los resultados obtenidos en las tres etapas anteriores para ambas situaciones.

6.4.1.4.1. Situación Actual VS Situación Propuesta

En la situación propuesta, se observa una disminución de 0,0034 Kg por unidad funcional en las emisiones de CO₂ (ver Figura 21, A), frente a la situación actual. Esta disminución implica la reducción en la alteración de la atmosfera por parte de la operación de Moonshine, es decir, que el impacto en el medio ambiente será menor. Adicionalmente, en la situación actual se presenta un aumento de 212,04 mL en la cantidad de vertimientos, esto se debe a la cantidad de agua y demás sustancias necesaria para realizar el lavado (ver Figura 21, B).

Figura 21. Comparación Emisiones de CO₂ y de Vertimientos. Fuente. Elaboración Propia.



Al comparar los resultados obtenidos en ambas situaciones, y teniendo en cuenta que en la situación propuesta, se obtiene una disminución de las emisiones de CO₂ y un aumento de los vertimientos, se encuentra que el impacto generado por el CO₂ es mayor al de los vertimientos, ya que las emisiones de CO₂ pueden permanecer entre 70 y 100 años en la atmosfera (Castillo, 2019), mientras que los vertimientos pueden ser tratados, por ejemplo, mediante un filtro o mediante la utilización de un alcalino y un ácido que se degraden fácilmente en el agua y de esta manera ser reutilizados. Por esta razón, se puede afirmar que los impactos de las emisiones obtenidas en la situación propuestas son menores a las obtenidas en la situación actual de la empresa.

6.4.2. Resultados Beneficio-Costo

El análisis de viabilidad financiera ejecutado involucró el cálculo del indicador Beneficio/Costo, debido a que el proyecto fue realizado teniendo en cuenta una modificación de procesos, generando un cambio en la estructura de costos. Sin embargo, dado que en ninguna de las situaciones (actual y propuesta) no se realizó adquisición de activos ni fue necesario solicitar préstamos bancarios, no es necesario calcular indicadores como VPN, TIR y PAYBACK.

6.4.2.1. Situación Actual

Manteniendo el enfoque actual se realizó un flujo de caja con proyecciones a 5 años (ver Anexo 13) con el fin de obtener los beneficios, costos e ingresos operacionales. Con estos resultados se calculó el indicador beneficio-costo de la política actual de Moonshine. El indicador se obtuvo utilizando la Ecuación (14). Se observa que la situación actual es viable financieramente, dado que el indicador (1) obtenido es mayor que 1.

$$\text{Indicador (Beneficio/Costo)} = \frac{\$768.561.109,72}{\$235.489.788,23}$$

$$\text{Indicador (Beneficio/Costo)} = 3,26 \tag{1}$$

6.4.2.2. Situación Propuesta

Teniendo en cuenta los cambios realizados en los procesos actuales de Moonshine, lavado propuesto y transporte, se procedió a calcular el flujo de caja proyectado a 5 años (ver Anexo 14) que involucra estos nuevos conceptos. Lo anterior, con el fin de obtener el valor presente de beneficios, costos e ingresos. Utilizando estos valores y aplicando la Ecuación (14) se obtuvo el indicador beneficio-costo. Al comparar el indicador beneficio-costo (1) y (2), se observa que ambas situaciones son viables, sin embargo, el indicador obtenido en la situación propuesta se encuentra en un 28% por encima del actual. Esto se debe a que el proceso propuesto otorga un mayor beneficio operacional y un menor costo operacional, manteniendo los ingresos constantes.

$$\text{Indicador (Beneficio/Costo)} = \frac{\$810.422.194,04}{\$193.628.703,91}$$

$$\text{Indicador (Beneficio/Costo)} = 4,19 \tag{2}$$

Para estimar el porcentaje de mejora del proceso propuesto en comparación con los costos totales, se hizo un análisis del estado de resultados (P&G) de Moonshine, con el fin de obtener sus costos totales, los cuales involucran la actividad económica de la empresa por completo. Además, se obtuvieron las proyecciones de los costos totales a 5 años y fueron traídos a valor presente. Se identificó la proporción que tienen los costos del flujo de caja actual, el cual fue realizado identificando los conceptos que serían modificados por la solución propuesta (Anexo 13). Adicionalmente se identificaron los costos del flujo de caja propuesto (Anexo 14). Se realizó el cálculo de proporción que involucran tanto los costos del flujo de caja actual como del flujo de caja propuesto tomando como referencia los costos totales. Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia que los conceptos sobre los cuales se realizó el proyecto representan casi el 4% de los costos totales. Sin embargo, el proceso mejorado logra reducir estos costos en aproximadamente el 18% de los actuales. Los costos del proyecto propuesto representarían alrededor del 2% de los costos totales.

6.4.3. Resultados Simulación de Monte Carlo

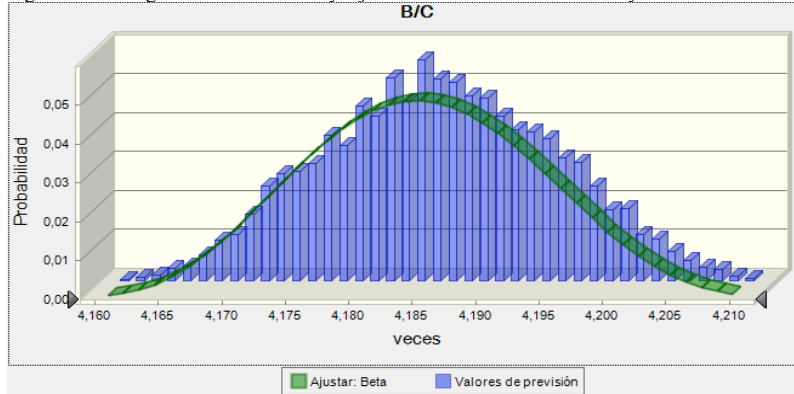
Para la simulación de Monte Carlo se utilizó una distribución triangular (esta permite asignar valores mínimos, medios y máximos) para la estimación del indicador Beneficio-Costo, estableciendo como variables el WACC y el crecimiento proyectado de Moonshine, tal como se muestra en el Anexo 16. y en el Anexo 17. Se establecieron los valores mínimos, medios y máximos según información proporcionada por la empresa (ver Tabla 6). Se realizaron 5000 réplicas de la simulación del modelo propuesto bajo un nivel de confianza del 95% y la media que se obtuvo fue de 4,19 (ver Figura 22). El valor de la media coincide con el valor del indicador B/C (2) obtenido anteriormente, lo cual implica que bajo un nivel de significancia del 5% la estimación de este indicador presenta un alto nivel de precisión. Lo anterior es respaldado por medio de un error estándar y una varianza mínima, un valor mínimo de 4,16 y un valor máximo de 4,21 en la totalidad de las réplicas generadas.

Tabla 6. Valores significativos. Fuente. Elaboración Propia.

Variable	Valor Mínimo	Media	Valor Máximo
Costo de Capital (WACC)	11%	12,6%	15%
Incremento de Ventas	12%	15%	18%

Para determinar una distribución de probabilidad que mejor se ajustara al conjunto de datos se utilizó la prueba de bondad de ajuste Anderson-Darling (A-D), ya que esta permite evaluar una distribución en particular o varias a la vez. Se evaluaron 14 distribuciones de probabilidad (ver Anexo 15.), donde la que obtuvo el menor estadístico (A-D) fue la distribución Beta, tal como se observa en la Figura 22.

Figura 22. Histograma de Frecuencia y Ajuste Beta. Fuente. Software Crystal Ball



A pesar de los cambios en el WACC y en el crecimiento de las ventas, la proyección de la relación Beneficio/Costo, es estable, tal como se demuestra en las estadísticas descriptivas, el B/C fluctúa entre [4.16; 4.21] coincidiendo con la predicción inicial. El sesgo es 0,02 lo que demuestra que la distribución tiene un alto grado de simetría y es similar a la distribución normal.

La previsión del incremento de ventas es de las variables con mayor incertidumbre, debido a su dependencia del crecimiento económico que presente el sector y la economía en general (por ejemplo, el PIB), además de las dinámicas internas de Moonshine. Cabe resaltar que Moonshine al ser una compañía nueva en el mercado, no posee información histórica que relacione estas variables con sus flujos de caja, sin embargo, proporcionó los datos mínimo, medio y máximo que han tomado estas variables en la historia reciente para la realización del estudio. Debido a ello se utilizó la distribución triangular, para modelar el comportamiento tanto del WACC como del incremento de ventas.

El resultado obtenido indica la estabilidad de la proyección, tanto a corto como a mediano plazo, pues bajo el peor escenario este permanecería mayor a 1, lo que indica su factibilidad, además es superior al indicador obtenido en la solución actual, demostrando que la utilidad generada por la solución propuesta es superior a la actual debido a la reducción en los costos.

7. Conclusiones y Recomendaciones

El análisis de ciclo de vida del producto y la implementación de la logística inversa han sido estudiados en gran profundidad. Sin embargo, no se evidencian estudios, según la revisión bibliográfica realizada, que entiendan la logística inversa y su conexión con el ciclo de vida del producto, en PYMES. En este caso de estudio, se observa cómo la implementación de la logística inversa influye directamente en la disminución de las emisiones obtenidas en los resultados del ACV. La aplicación de este diseño a una pequeña empresa encargada de la producción y distribución de cerveza artesanal, evidencia las oportunidades de mejora relacionadas a la competitividad que representa este tipo de cadenas de suministro cerradas en pequeñas empresas. Otras investigaciones que adopten esta perspectiva podrían relacionarse con el uso de otros algoritmos metaheurísticos en problemas similares al planteado en el presente trabajo y la adaptación del modelo que tenga en cuenta en su función objetivo la minimización de las emisiones de CO₂ u otras emisiones que impacten el medio ambiente.

El ruteo y diseño de lavado propuesto logran unir el aspecto táctico con lo estratégico de la empresa. En cuanto a lo estratégico, este impacta en la planeación de la empresa, logrando en el largo plazo una mejor imagen corporativa y a su vez, un aumento en la participación de las ventas. Y en cuanto a lo táctico, se realizó un ruteo determinando así el orden en que deben ser atendidos los clientes, y se diseñó un proceso de lavado para las botellas que van a ser reutilizadas.

En el caso de estudio, se propone el uso de una metaheurística Búsqueda Tabú como mejora a la solución inicial factible que proviene de la heurística Greedy, para la solución de un problema de ruteo de vehículos con carga y descarga simultánea y ventanas de tiempo. La metaheurística propuesta mejora la actividad de ruteo de la empresa Moonshine, al ampliar el vecindario de exploración hasta encontrar una mejor solución que disminuya la distancia total recorrida. La implementación de este ruteo permite a Moonshine respetar las ventanas de tiempo establecidas con anterioridad, lo que conlleva a que la empresa mejore su imagen corporativa ante sus clientes.

El aplicativo de ruteo propuesto se realizó teniendo en cuenta que Moonshine es una empresa que se encuentra en crecimiento, por ende, las características de este permiten modificaciones en los parámetros del modelo, lo cual implica flexibilidad para el manejo de la cantidad de clientes, variaciones en las ventanas de tiempo, cambios en la demanda, y cambios en las matrices de tiempo y distancia. Por lo tanto, este aplicativo permite a la empresa trabajar tanto con los clientes actuales como con los potenciales, contando con una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en el ruteo.

Para abordar la evaluación financiera desde otra aproximación, se sugiere incorporar en el modelo de simulación de Montecarlo, variables estocásticas adicionales, que consideren los cambios de la inflación y demás proyecciones macroeconómicas.

Implementar un sello ambiental, podría implicar que los clientes reconozcan la preocupación de Moonshine por el medio ambiente y, por ende, este se convierta en un factor diferencial en el proceso de decisión de compra de los consumidores.

Se recomienda a Moonshine otorgar incentivos a sus clientes con el fin de aumentar el porcentaje de devolución de botellas, debido a que el estudio realizado en este trabajo evidencia la disminución de costos y de emisiones de CO₂.

8. Glosario

- Logística: Es el proceso de gestionar estratégicamente el movimiento y “almacenamiento” de bienes, servicios, valores e información desde los proveedores a través de las organizaciones hasta el cliente final, sobre los principios de Rentabilidad y Responsabilidad social. La logística incluye la coordinación y colaboración con cada uno de los eslabones, que pueden ser proveedores, fabricantes, centros de distribución, comercializadores y clientes. (Silva, J.D, 2017).
- Logística inversa: Es el proceso de planificación, desarrollo y control eficiente del flujo de materiales, productos e información desde el lugar de origen hasta el de consumo, de manera que se satisfagan las necesidades del consumidor, recuperando el residuo obtenido y gestionándolo de modo que sea posible su reintroducción en la cadena de suministro, obteniendo un valor agregado y/o consiguiendo una adecuada eliminación de este. (Cure, Meza, Amaya, 2006).
- Cadena de suministro: Serie de entidades conectadas por medio de la relación comprador-vendedor, que se inicia con las materias primas básicas, que son extraídas de la tierra o cosechadas hasta llegar al producto terminado en las manos del consumidor final (Young & Esqueda, 2005).
- Reutilizar: Es toda actividad del hombre para evitar tirar la basura o desechar productos, materiales que pueden volver a ser utilizados con mismos o diferentes fines para lo que fue creado (McHarry, 2010).
- Heurística: Conjunto de técnicas o métodos para resolver un problema. También puede ser vista como una teoría que estimula el pensamiento del individuo, y en la de otros para encontrar la solución más viable al problema (Downsland, Díaz, 2001).
- Lean Manufacturing: Sistema y filosofía de mejoramiento de procesos (manufactura y servicios), basado en eliminar desperdicios y mejorar las operaciones. Incluye todas las prácticas y herramientas que propenden por una manufactura “esbelta”, “ágil”, sin exceso (desperdicios) y con productos de alta calidad. Su finalidad es generar valor agregado en cada una de las etapas del proceso garantizando la satisfacción del cliente en el momento indicado y haciendo uso de la mínima cantidad de materiales, trabajo y tiempo (Moreno Martin, 2010).
- 5s: Seiri, consiste en clasificar los elementos o herramientas de trabajo a fin de mantener lo estrictamente necesario; Seiton, ordenar e identificar lo necesario para facilitar su acceso; Seiso, se refiere a la limpieza del

área de trabajo; Seiketsu, se eliminan las causas de suciedad y el desorden y se elabora un procedimiento estándar de las S's anteriores y; Shitsuke, verificar que los estándares se cumplan y las mejoras se mantengan en el tiempo (Salado, Sanz, De-Benito-Martin, & Galindo, 2015).

- El Análisis de Ciclo de vida (ACV): Cantidad de emisión de gases relevantes al cambio climático asociada a las actividades de producción o consumo de los seres humanos (Schneider & Samaniego, 2010).
- Huella de carbono: Es un indicador que busca cuantificar la cantidad de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (directas e indirectas), medidas en emisiones de CO₂ equivalente, de una persona o una comunidad que son liberadas a la atmósfera debido a las actividades humanas por año (Droujkova M, 2016).

9. Referencias

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (2003). *Factores de emisión de los combustibles Colombianos*. Bogota : Unidad de Planeación Minero Energética.
- Acosta, M. P., Olivares, E., Peñuñuri, S. A., Muñoz, A. L., & Millán, R. (2013). An application of routing models for PET pickup for recycling.
- Amienyo, D., & Azapagic, A. (2016). *Life Cycle environmental impacts and costs of beer production and consumption in the UK*. UK: Springerlink.
- Amienyo, D., & Azapagic, A. (2016). Life Cycle Environmental Impacts And Costs Of Beer Production And Consumption In The UK.
- Antwi, D., & Xu, Y. (2018). Analysing the application of Vehicle Routing Problem (VRP) in the Distribution of a Brewery: A case study.
- Arboleda Zuñiga, J., Gaviria Gómez, J., & Álvarez Romero, J. (2017). Propuesta de ruteo de vehículos con flota heterogénea y ventanas de tiempo (HFVRPTW) aplicada a una comercializadora pyme de la ciudad de cali.
- Badole, C., Bimal, N., Rakesh, J., & Ajay, P. (2012). Supply Chain Modeling Scope and Methodology: A Review of Literature in the Last Decade. *Proceedings of the 2012 Industrial and Systems Engineering Research Conference*. Malaviya, India: G.Lim and J.W. Hermann eds.
- Ballesteros Riveros, D. P., & Ballesteros Silva, P. P. (2017). Importancia de la Logística Inversa en el Rescate del Medio Ambiente.
- Ballou, H. (2004). *Logística Administración de la cadena de suministro*. Cleveland: Pearson education.
- Barón Maldonado, D., & Rivera Cadavid, L. (2012). Cómo una microempresa logró un desarrollo de productos ágil y generador de valor empleando Lean.
- Bernal, J., Escobar, J. W., & Linfati, R. (2017). A Granular Tabu Search Algorithm for a Real Case Study of a Routing Problem with a Heterogeneous Fleet and Time Windows.
- Borda Elejabarrieta, J., & Larrinaga, M. A. (2003). Lean 6sigma: para medir y mejorar la logística y la producción.
- Borja, L. G. (18 de Marzo de 2018). Entrevista Personal. (J. I. Vives, Entrevistador)
- Boubahri, L., Addouche, A., & El Mhamedi, A. (2010). *Improved Ant Colony System for the VRPSPDTW: the case of logistic transport related to event organization*.
- Bravo, H. (2011). *La Economía del Cambio Climático en Impactos Sociales: Métodos y Técnicas de Análisis*.
- Castañeda, J., & Cardona, J. (2017). Diseño De Una Red De Logística Inversa Para Recolectar Aceite Vehicular Usado en La Ciudad de Pereira CVRP. 22.
- Catalan, C. (2013). *Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado h15, h20 y h30*. Valdivia.
- Chen, J., & Wu, T. (2005). Vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pickups.
- Civil Jorges, O. (2006). Diseño del Subsistema Logístico Inverso de Aprovisionamiento del Envase de Vidrio Vacío para Cervecería Bucanero S.A.
- Contreras Castañeda, E. D., & Silva Rodriguez, J. D. (2014). Logística Inversa Usando Simulación En La Recolección de Envases de Plaguicidas: Estado del Arte.
- Crispim, J., & Brandao, J. (2006). Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing problems with backhauls.

- Cure Vellojín, L., Meza González, J. C., & Amaya Mier, R. (2006). Logística Inversa: una Herramienta de Apoyo a la Competitividad de las Organizaciones.
- Eskandarpour, M., Masehian, E., Soltani, R., & Khosrojerdi, A. (2014). A Reverse Logistics Network For Recovery Systems And a Robust Metaheuristic Solution Approach.
- Fan, W., Xu, H., & Xu, X. (2009). Simulation on vehicle routing problems in logistics distribution. 28.
- Finnveden, G., & Moberg, A. (2005). Environmental systems analysis tools- an overview. *Journal of cleaner production*, 1116-1173.
- Gamboa, D., Rego, C., & Glover, F. (2005). Data Structures and Ejections Chains for Solving Large Scale Traveling Salesman Problems.
- Gechevski, D., Kochov, A., Popovska-Vasilevska, S., Polenakovik, R., & Donev, V. (2016). Reverse Logistics And Green Logistics Way To Improving The Environmental Sustainability.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computer and operations research*, 533-549.
- Gomez, R. (s.f.). Logística Inversa En Un Proceso De Impacto Ambiental Y Productividad.
- González La Rotta, E. C., & Becerra Fernández, M. (2017). Plataformas de intercambio con ruteo de vehículos. Una revisión del estado del arte. 84.
- Gonzales Correa, F. (2007). Manufactura esbelta (Lean Manufacturing). Principales Herramientas. *Revista panorama Administrativo*, 85-112.
- Hermosilla, A., & Barán, B. (s.f.). Comparación de un sistema de colonias de hormigas y una estrategia evolutiva para un problema Multiobjetivo de ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo.
- Hermosilla, A., & Baran, B. (2014). Comparación de un sistema de colonias de hormigas y una estrategia evolutiva para un Problema Multiobjetivo de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo.
- Herranz, S., & Garcia, J. (2017). *Análisis de ciclo de vida de los paneles de lana mineral de vidrio para la construcción de conductos de climatización. Verificación externa*. Madrid: CSIC.
- Ivanov, I., & Hartmann, D. (2006). Two Green Bottles, Standing On A Wall: An Environmental Assessment Of Two Bottle Types.
- Jimenez, J., & Hernandez, S. (2002). *Marco conceptual de la cadena de Suministro*. Obtenido de Sciences Engineering Medicine: <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt215.pdf>
- Kim, H., Kang, J.-G., & Kim, W. (s.f.). An Application of Capacitated Vehicle Routing Problem To Reverse Logistics Of Disposed Food Waste.
- Kirkpatrick, S., Gellat, C., & Vecchi, M. (1983). *Optimization by simulated annealing*. American association for the advancement of science.
- Kontoravdes, G., & Bard, J. F. (1992). A GRASP for Vehicle Routing Problem with Time Windows.
- Kontoravdis, V., & Bard, J. (1995). A grasp for the vehicle Routing problem with time windows. 7.
- Kuckoglu, I., & Ozturk, N. (2014). *An advanced Hybrid Meta-Heuristic algorithm for the vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows*. Turquia.
- Lagos, C., Guerrero, G., Cabrera, E., Moltedo, A., Johnson, F., & Paredes, F. (2018). An improved Particle Swarm Optimization Algorithm for the VRP with Simultaneous Pickup and Delivery and Time Windows.
- Lamb, C., Hair, J., & McDaniel, C. (2011). *Marketing*. Iztapalapa, México: Cengage Learning Editores S.A.
- Lett, L. A. (2014). Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular.
- Liu, R., Xie, X., Augusto, V., & Rodriguez, C. (2013). *Heuristi algorithms for a vehicle routing problem with simulataneus delivery and pickup and time windowsin home health care*. Francia: Elsevier.
- Lopez Lora, P. C. (18 de Marzo de 2018). Entrevista . (M. F. Carvajal Buelvas, Entrevistador)
- Lopez, M., Giraldo, E., & Arenas, J. (2011). *Logistica integral: Una propuesta practica para su negocio*.
- Marsmann, M. (2000). The ISO 14040 Family. *International Journal of Life Cycle Assesment*, 317-318.
- Méndez-Galarraga, M., Piagentini, A., & Salsi, M. (2018). Spray Washing Disinfection with Peracetic Acid. *International Journal of Fruit Science*.
- Min, J., & Jin, C. (2017). Genetic Algorithm-Based Approach to Vehicle Routing With Simultaneous Delivery and Pickup Under Capacity And Time Constraints. 3.

- Mingyong, L., & Erbao, C. (2009). An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries and time windows. *Engineering applications of artificial intelligence*, 188-195.
- Montalvo, A., & Jimenez, L. (s.f.). *Manual de Cálculo y Reduccion de Huella de Carbono para actividades de transporte por carretera*. Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE).
- Moreno Martin, M. (2010). *Filosofia lean aplicada a la ingenieria del software*. Sevilla.
- Newnan, D. G. (1985). *Análisis Económico en Ingeniería*. Mc Graw Hill.
- Niaz, A., Gabor, N., & Samad, A. (2008). *A Heuristic Method for the Vehicle Routing Problem with Mixed Deliveries and Pickups*.
- Pacheco, J. A., & Delgado, C. R. (2000). Diseño de Metaheurísticos para Problemas de Rutas con Flota Heterogénea: Concentración Heurística.
- Pacheco, J., & Delgado, C. (1999). Diseño de metaheurísticos para problemas de ruta con flota heterogénea: GRASP.
- Pacheco, J., & Delgado, C. (1999). *Diseño de metaheurística para problemas de Ruta con flota Heterogénea: Concentracion heurística*. España.
- Padrón, O. (2008). *Estudio para optimizar el proceso de lavado de botellas mediante evaluacion de aditivos de soda caustica*. Barranquilla.
- Patel, R. (2011). *Modeling lean six sigma in the small packaging industry in india*. New York: RIT scholar works.
- Pattara, C., Raggi, A., & Cichelli, A. (2012). Life Cycle Assessment and Carbon Footprint in the Wine Supply Chain.
- Perez Lopez, E., & Garcia Cerdas, M. (2014). *Implementacion de la metodologia DMAIC-Seis sigma en el envasado de licores en Fanal*. Costa Rica.
- Phan, D., & Suzuki, J. (2016). Evolutionary Multiobjective Optimization for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Demands.
- Pheng, L., Shang, G., & Peter, L. (2008). Using Lean Principles to Reduce Wastes in The Concreting Supply Chain.
- Porter, M. E. (1991). *Ventaja competitiva. Creación y sostenimiento de un desempeño superior*.
- Pradenas, L., Oportus, B., & Parada, V. (2012). *Disminucion de contaminacion en el problema de ruteo de vehiculos*. Rio de Janeiro: CLAIO SBPO.
- Pradenas, L., Oportus, B., & Parada, V. (2012). Disminución de Contaminación en el Problema de Ruteo de Vehículos.
- PREAD. Programa de Excelencia Ambiental Distrital. Alcaldía Mayor de Bogotá. (s.f.). *Enfoque de Ciclo de Vida Nivel IV*. Presentación, Bogotá.
- Ran, W., Chen, F., Wu, Q., & Liu, S. (s.f.). A Study Of The Closed-Loop Supply Chain Coordination On Waste Glass Bottles Recycling.
- Reil, S., Bortfeldt, A., & Mönch, L. (2017). Heuristics for vehicle routing problems with backhauls, time windows and 3D loading constraints.
- Reil, S., Bortfeldt, A., & Monch, L. (2016). Heuristicis for vehicle routing problems with backhauls, time windows, and 3D loadings constraints.
- Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). A Unified Heuristic for Vehicle Routing Problems with Backhauls.
- Salado, C., Sanz, P., De-Benito-Martin, J., & Galindo, J. (2015). Aprendizaje del Lean Manufacturing mediante Minecraft: Aplicacion a la heramienta 5s. *Revista Iberica de sistemas y tecnologias de informacion*, 60-75.
- Salgado, D. (2015). *Pruebas de Normalidad*. Obtenido de Estadística con Dago: <http://www.estadisticacondago.com/>
- Schneider, H., & Samaniego, J. (2010). *La huella de carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Francia: Comisión Economica para América latina y el Caribe.
- Senvar, O. (2018). Intelligent Life Cycle Assessment in Environmental Sustainability.
- Shi, X., Li, X., Yang, L., Li, Z., & Choi, J. (2012). Information Flow In Reverse Logistics: An Industrial Information Integration Study.
- Silva, J. (2017). Gestión de la Cadena de Suministro: Una Revisión Desde La Logística Y El Medio Ambiente.

- Suprayogi, & Priyandari. (2017). *Tabu Search for the Vehicle Routing Problem with Multiple Trips, Time Windows and Simultaneous Delivery-Pickup*.
- Tejada, A. (Junio de 2011). Mejoras de Lean Manufacturing en los Sistemas Productivos. *Ciencia y Sociedad*, 276-310.
- Thangiah, S. R., Potvin, J.-Y., & Sun, T. (1996). Heuristic approaches to vehicle routing problem with backhauls and time windows.
- Uzcategui Ponce, F. (2012). Medición del Impacto Ambiental En Un Sector Productivo Y Propuesta de Buenas Prácticas Para su Reducción.
- Uzcategui, F. A. (2012). *Medición del impacto ambiental en un sector productivo y propuesta de buenas prácticas para su reducción. Caso de Estudio: Producción de Leche. Finca El Paraiso*. Bogota.
- Vigo, D., & Toth, P. (2002). *The vehicle Routing problem*. Bologna: SIAM.
- VonBlottnitz, H., & Curran, M. (2006). A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, green house gas, and environmental life cycle perspective. *Journal of cleaner production*, 607-619.
- Wiedmann, T., & Minx, J. (2007). *A definition of carbon footprint*. United Kingdom: Isa research report.
- Womack, J. (1990). *The machine that change the worl*. Chicago.
- Womack, J., & D.T, J. (1996). *Lean Thinking*. EEUU.
- WORLD RESOURCE INSTITUTE, W. B. (2013). *A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Washington D.C.
- Xue, M., & Xu, Z. (2016). Application of Life Cycle Assessment on Electronic Waste Management: A Review.
- Zambrano, M. (2011). Estrategías de Logística Inversa Para La Recuperación De Envases Retornables De Empresas De Clase Mundial.
- Zhong, Y., & Cole, M. H. (2003). A vehicle routing problem with backhauls and time windows: a guided local search solution.