

Modelo determinístico bi-objetivo para el diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes

MA.Javier Eduardo Arias Osorio. Silvia Natalia Rincón Barajas

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga, Colombia

jearias@uis.edu.co

RESUMEN

Una cadena de suministro (CS) es un conjunto integrado por actores y actividades con el fin último de satisfacer al consumidor, proveyéndole a este un producto o servicio. Las características de estas varían según los modelos y se pueden encontrar en variedad de organizaciones como lo es la industria de alimentos perecederos.

En este proyecto se trabajó el problema PFSCND (Perishable Food Spply Chain Network), puntualmente con la carne bovina despostada, analizando su trayecto desde que sale de la planta despostadora hasta llegar al punto de venta donde lo podrá adquirir el consumidor final. Se tendrán en cuenta varias opciones de plantas y de puntos de venta con el fin de encontrar la ubicación que ayude a optimizar tanto los costos totales de la cadena como a minimizar el impacto ambiental asociado a la cantidad de energía consumida.

Por lo tanto, se decidió diseñar un modelo bi-objetivo enfocado no sólo en los costos que pueda acarrear la operación del eslabón a estudiar, sino también en reducir los efectos medio ambientales que resulten como consecuencia de este. La industria alimentaria consume gran parte de recursos naturales, y en muchas ocasiones estos esfuerzos se ven desperdiciados ante la temprana perecibilidad de sus productos, por eso hoy en día es esencial agregar en nuestros estudios las consecuencias ambientales de las diferentes operaciones productivas o una manera de mermar su impacto, para lograr producir de manera más limpia.

Palabras clave

Diseño de red de cadena de suministro de carne, carne despostada, multiperiodo, bi-objetivo, modelo determinístico.

A supply chain (SC) is a set made up of actors and activities with the ultimate goal of satisfying the consumer, providing him with a product or service. The characteristics of these vary according to the models and can be found in a variety of organizations such as the perishable food industry.

In this project, the PFSCND (Perishable Food Spply Chain Network) problem was worked on, specifically with butchered beef, analyzing its journey from when it leaves the butchering plant until it reaches the point of sale where it can be purchased by the final consumer. Several options for plants and points of sale will be taken into account in order to find the location that helps to optimize both the total costs of the chain and to minimize the environmental impact associated with the amount of energy consumed.

Therefore, it was decided to design a bi-objective model focused not only on the costs that the operation of the link to study may entail, but also on reducing the environmental effects that result as a consequence of it. The food industry consumes a large part of natural resources, and on many occasions these efforts are wasted due to the early perishability of their products, which is why today it is essential to add in our studies the environmental consequences of the different productive operations or a way of reduce its impact, to achieve cleaner production.

Keywords

Meat supply chain network design, butchered meat, multi-period, bi-objective and deterministic model.

1. Introducción

Las cadenas de suministro están presentes en cualquier producto o servicio que podamos imaginar, pero a pesar de tener gran recorrido y contar con basta literatura se encuentra en constante transición y actualización atendiendo las necesidades y demandas cambiantes de sus consumidores y su entorno. Los alimentos perecederos no son la excepción y hay unos que conllevan más dificultad que otros como lo es la carne, que durante todo su ciclo necesita cadena de frío para que llegue al cliente final en excelente estado. La carne es un producto agrícola de extremo cuidado ya que sus propiedades características representan un reto a la hora de diseñar para este una CS (Cadena de Suministro), y que si no es bien planeado puede acortar su vida útil aún más. Como consecuencia de esto existen normas a nivel internacional como lo es HASSAP y a nivel nacional se tiene el ente regulador INVIMA, que se encarga de inspeccionar y hacer cumplir los parámetros dictaminados en esta normal a la cual se acoge nuestro país para satisfacer la demanda tanto nacional como internacional.

Desde hace algún tiempo en todos los ámbitos el impacto ambiental ha venido calando hasta volverse casi coyuntural y este posicionamiento es incuestionable con todas las repercusiones que hemos visto al haber pasado por alto por tanto tiempo las consecuencias de nuestro proceder. Indudablemente las cadenas de suministro de productos agro-frescos no es una exención, el desperdicio de recursos que se genera cuando los alimentos se estropean es enorme, se pierden recursos naturales como agua, uso de suelo, se disipan combustibles fósiles que se requieren para su transporte y refrigeración, así como la emanación de CO₂ hacia el entorno quitándole pureza al aire y lo que ello significa.

Con todo esto en mente los investigadores se han puesto en la tarea de diseñar cadenas sostenibles en las que no sólo se minimice su costo total si no, que también se reduzcan el impacto ambiental que genere yendo desde aminorar el desperdicio de alimentos por una mala planificación hasta reducir el consumo de energía y de emisiones de CO₂. Convencidos en el beneficio que representan estos planteamientos, en el presente trabajo se diseña una cadena de suministro para carne en cortes, se analiza desde la planta de beneficio donde se realiza el desposte, hasta los puntos de venta en los cuales se estudiará la decisión de ubicación, integrando los dos objetivos de disminuir el costo total de la cadena y el costo de transporte que se asocia al impacto ambiental buscando disminuir la cantidad de energía utilizada.

Entre la literatura encontrada se hallaron artículos en los que se resaltaba la necesidad de tener en cuenta la perecibilidad en los productos de vida corta, ya que en muchas ocasiones este elemento se desprecia en el modelo matemático haciéndolo poco práctico. También se encontraron múltiples artículos donde se agregaba en el modelo el impacto ambiental pero siempre se encontraba en cuanto a las emisiones de CO₂ o al consumo de combustible, por lo cual en este proyecto se quiso abarcar el impacto desde el consumo de energía para tener una óptica diferente.

1.1 Objetivos

- Realizar una revisión de literatura sobre el problema de diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes.
- Formular un modelo matemático para el problema de diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes.
- Definir y desarrollar la técnica a usar para dar solución al modelo formulado.
- Evaluar la técnica a partir de instancias propias del problema abordado.

2. Revisión de Literatura

Cadena de suministro de carne bovina

Una cadena de suministro (CS) es un conjunto integrado por actores y actividades con el fin último de satisfacer a su consumidor. En ella hay tres niveles de decisión: Operacional, Táctico y Estratégico.

Los alimentos perecederos generalmente se distribuyen en cadenas de suministro apoyadas en cadenas de frío. En el transcurso que sufre el producto desde su cosecha hasta la distribución final, dichos productos se deterioran progresivamente debido a la presencia y crecimiento de microorganismos. Estos agentes pueden crecer lentamente si los parámetros ambientales están bajo control o rápidamente en caso contrario. Para combatir las amenazas de deterioro de la calidad, se han desarrollado mecanismos de monitoreo basados en tecnología de sensores. (Shi et al, 2010). En la cadena de frío, el almacenamiento es de gran importancia y cuidado, debido a que la presencia de inconvenientes es 4 veces más recurrente que durante el transporte, sin embargo, es clave considerar la cadena de frío como un todo para mejores resultados. (Xu et al, 2014).

Se puede encontrar en diversos artículos diversidad de métodos que se han usado para solucionar problemas relacionados con el tema de cadenas de suministro en alimentos perecederos, como lo son programación lineal, generación de columnas, algoritmo genético, entre otros. En algunos artículos también se encuentra el uso de la

distribución de Weibull (Gong et al, 2010) para igualar la tasa de descomposición que sufren los alimentos. En cuanto al costo total es usual ver que se integren factores como ubicación, instalaciones, inventario, mantenimiento de este último, transporte, deterioro del alimento, entre otros, y según (Rijkema et al, 2014), en el diseño de una CS es muy importante hacer una compensación entre los costos de transporte, escasez, inventario, desperdicio de producto y pérdida de vida útil. Adicionalmente en varios modelos se ve la aplicación multi-objetivo en la cual abarcan el impacto medio ambiental. En los últimos años la sostenibilidad en las cadenas de suministro se ha vuelto un tema recurrente y hoy en día casi fundamental, (Rijkema et al, 2014) donde según (Yakavenka et al, 2019) cerca del 40% de los cultivos agrícolas se desperdician y para poder lograr los cultivos, en la UE, la producción y eliminación de residuos alimentarios conduce a su vez a la emisión de 170 millones de toneladas de emisiones de CO₂ y consume 261 millones de toneladas de recursos (Kretschmer et al. 2013).

En la carne se pueden encontrar diferentes tipos de cadenas de suministro, esto se debe primordialmente a que el cebador es un productor que realiza trabajos como cría, levante y ceba, en algunas ocasiones también dedicados a la ganadería de doble propósito. Pero este individuo también puede comprar animales ya listos para el proceso de ceba a otros productores. (Arosa et al, 2019).

SCND Problem

Un criterio fundamental a la hora de diseñar una cadena de suministro de alimentos perecederos o (PFSCND por su sigla en inglés) es la naturaleza perecedera de los productos y su variabilidad, tanto por el riesgo que representa para la salud pública como el riesgo rentable que representa para la cadena, ya que ignorar estos factores puede desembocar en que los alimentos lleguen inútiles o con una vida útil poco servible para el consumidor final.

Anteriormente, la perecibilidad sólo se consideraba como gestión de inventarios (Blackburn y Scudder, 2009) en la actualidad, se usan funciones de distribución conocidas, como Weibull que se usa para medir el deterioro de los alimentos, pero hay otras varias maneras de hacerlo, como lo son temperatura interna, tasa de crecimiento de los microbios que afectan el producto, tasa de respiración, entre otros.

A la hora de diseñar la cadena no se puede hacer individualmente nivel por nivel como lo explican (Dabbene et al, 2007), donde al final de los diseños se observa que entre los diferentes niveles de la cadena hay que hacer arreglos y compensaciones para que al final el global de la cadena sea exitosa. Allí se encuentra la alternativa de modelar entre otras opciones con optimización matemática, para ayudar a entender las características y relaciones de la cadena, y ayudar a encontrar las cantidades y especificaciones más convenientes según la situación o alimento.

En los problemas de SCND para alimentos perecederos se observa una dinámica híbrida que envuelve a estos, ya que el tiempo es un factor de cambio (ejemplo de ello es la descomposición u otras características físicas) como a su vez lo son los eventos dentro de la cadena (logísticos). Algunas de estas características también son usadas como variables de control para los alimentos.

Otro tema que se halla interesante en la presente revisión es el estudio sobre envíos anticipados, que presenta una oportunidad para adelantarse a las necesidades del cliente y poder llevar el alimento en el momento indicado con la calidad adecuada. Adicionalmente también es una posibilidad a la reducción de costos operativos, ya que en ocasiones para evitar desperdicios se envían lotes más pequeños, creando la necesidad de mayor cantidad de viajes. Sin embargo, como menciona (Lee, 2017), es importante tener en cuenta tanto la frecuencia de pedidos como el tiempo que transcurre entre ellos, por la connotación de vidas útiles muy cortas que hace inviable la consolidación de pedidos. Una de las maneras de llevar a cabo esta aplicación es por medio de un enfoque basado en datos, en el cual se utilizan los registros de pedidos hechos por clientes en previas ocasiones para predecir cómo podría ser la demanda y llevar a cabo los AS (anticipated sends) por parte de los proveedores, este caso se explica en (Quoc et al, 2020).

En (Gallo et al, 2017) exponen un interesante caso en el cual el objetivo es minimizar el consumo total de energía, y este objetivo es similar al que se encuentra en varios otros artículos pero aquí está asociado con las operaciones de frío y las condiciones externas (climáticas), a su vez se tiene en cuenta la pérdida de vida útil integrando en el modelo la energía que se pierde al echar a perder el alimento y teniendo en cuenta estos factores se halla la ruta óptima. Cabe resaltar que al final concluyen que, si la vida útil del producto es muy corta, para tener en cuenta su perecibilidad es mejor guiarse por el tiempo, en cuanto a un alimento con una vida útil algo más larga sí se puede considerar con la energía perdida, siendo este último más favorable en cuanto a sostenibilidad medioambiental.

Analizando los artículos en cuanto a sus modelos matemáticos y métodos de solución, en Jouzdani y Govindan (2020) desarrollaron un modelo multiobjetivo abarcando costo, consumo de energía (impacto ambiental) y congestión de tráfico (impacto social). La incertidumbre en cuanto a la vida útil del producto se modeló con una variable aleatoria Weibull y la perecibilidad se estudia respecto al uso del refrigerador del vehículo transportador (variable decisión). Los autores mencionan la programación por metas (Goal Programming) como uno de los métodos más usados y más

apropiados para los problemas multiobjetivo, siendo de su preferencia el MCGP (Multi Coefficients Goal Programing) donde se puede expresar el modelo como lineal, y donde se puede dar el peso deseado según criterio de expertos. En su aplicación se encuentra que es viable reducir el daño ambiental y social sin comprometer en mayor medida el objetivo económico.

Cordeau y Pasin (2003) plantean dos maneras para solucionar su algoritmo, por descomposición de bifurcación y límite basado en simplex o un enfoque de descomposición de Benders. La conclusión al experimentar con ambos métodos es que las dos propuestas son buenas y equiparables, aunque Benders se destaca en problemas complejos y por su capacidad de reoptimización ante restricciones impuestas. Los autores destacan que la metodología explicada es una buena alternativa a métodos metaheurísticos, ya que no brindan una buena medida de desviación de la optimización. También se hizo uso de Benders en Bihandi et al (2008) pero modificando el modelo basado en restricciones sustitutas, resolviendo problemas de diseño de redes en contextos determinista con múltiples productos básicos y de un solo periodo, resolviendo un modelo de programación lineal de enteros mixtos binarios que abarcaba ubicación, capacidad para proveedores, selección de plantas y almacenes, asignación de rango de productos, transporte y flujos de producción. Al final concluyeron que la nueva adaptación del método es más rápida ya que la solución inicial era muy cercana a la óptima, reduciendo el número de iteraciones en algunos casos.

Gong et al (2007) presenta un modelo que minimiza el costo total de transporte de productos agri-frescos y los desechos de la cadena, se desarrolla haciendo una búsqueda local en la optimización del enjambre de partículas retardadas de dos grados, para problemas discretos se definen dos enjambres de partículas de distribución y un enjambre de partículas de punto final para los puntos de demanda. En el experimento, el método fue fácil de aplicar y no requirió mucho conocimiento previo sobre el problema para llegar a una solución.

Dabbene et al (2008) presenta una optimización para cadenas de suministro de alimentos frescos donde proponen un algoritmo para optimizar, que es una técnica de gradiente estocástico, combinada con una estimación de gradiente ad-hoc, elegido porque tiene requisitos computacionales reducidos, capacidad para manejar incertidumbre y facilidad de implementación. En Yakavenka et al (2009) diseñaron un modelo de programación lineal de enteros mixtos multiobjetivo para cadenas de suministro sostenibles de alimentos perecederos y se resolvió con Excel Open Solver, encontrando el costo de ser sostenible y una solución viable considerando los objetivos planteados, la metodología consistió en hallar primero una solución óptima para cada función objetivo, esto se hacía buscando el óptimo para un objetivo y dejando los dos restantes como restricción, y así sucesivamente con los otros dos objetivos, y posteriormente encontrar la solución equilibrada que tuviera en cuenta los tres objetivos planteados.

Por su parte, Darestani y Hemmati (2019) diseñan un modelo para una red de cadena de suministro de perecederos cuyo objetivo es minimizar el costo total y las emisiones de gases de efecto invernadero, factores como demanda, costo operativo, costo de transporte de mercancía y capacidad del CD se consideraron como parámetros inciertos para poder controlarlos. Se da solución usando el método de criterio general, método de suma ponderada y método de Torabi-Hassini, métodos usados para optimización problemas multiobjetivo, y se apoyan en el método TOPSIS para seleccionar cuál de los dos es más eficiente, siendo en ese caso, Torabi-Hassini el más eficaz.

Patidar y Agrawal (2020) formularon un MILP (modelo de programación lineal de enteros mixtos) de tres escalones, múltiples periodos, multiproducto, para minimizar el costo total de distribución y las pérdidas poscosecha. El modelo se bifurcó en dos al poner la decisión de integrar y no integrar la perecibilidad y se resolvió usando el paquete LINGO 17.0.

3. Métodos

Los **problemas de optimización** buscan el máximo o mínimo de una variable que tiene un conjunto de posibles respuestas (Duran, 2006), siendo el resultado el mejor posible para la ocasión analizada. Un problema de optimización consta de función objetivo, variables y restricciones, al resolver un problema de optimización se encuentra el mejor valor para las variables, de modo que se optimice la función según las restricciones establecidas (Ramos et al, 2010). La optimización multiobjetivo, como su nombre lo dice, trata de satisfacer diversas funciones objetivo que pueden presentar conflicto entre sí.

Programación lineal: Estos problemas se caracterizan porque las funciones que conforman el problema son lineales, tanto sus funciones objetivo como las restricciones. Debido a su reducida complejidad son ampliamente usados en

prácticas administrativas, comerciales, en problemas de ingeniería y hasta ciencias sociales, dando una buena aproximación a la realidad (Muñoz, sf).

En esta clase de problemas es muy usual utilizar el método *símplex*, que consiste en un procedimiento algebraico que se basa en la solución de sistemas de ecuaciones, generalmente se resuelve en computadora y sirve para solucionar problemas muy grandes. Este método es iterativo, lo que permite mejorar la solución en cada paso.

Modelo de programación lineal entera mixta, es similar al modelo de programación lineal con la diferencia que pueden haber además de variables continuas, enteras y binarias.

En cuanto a las **técnicas de optimización**, tenemos los métodos exactos y aproximados. Los primeros, descartan familias de posibles resultados para asegurarse de encontrar el óptimo global, pero su desventaja es que pueden tardar mucho, algunos de los más conocidos son Branch and Bound el cual su algoritmo de ramificación y acotación consiste en una enumeración sistemática de soluciones candidatas mediante la búsqueda en el espacio de estados; Depth first, Best first. Los aproximados se pueden dividir en Heurísticos, que se encargan de buscar soluciones óptimas en menos tiempo pero que no son la global, donde la estructura del algoritmo se usa para obtener una buena solución, es un método más intuitivo; Y metaheurísticos, que son similares a los heurísticos ya que se basan en ellos, pero que pueden ser aplicables a diversos tipos de problemas ya que tienen una estructura general y pautas para el diseño, adaptándolo a una situación específica. Para esta técnica se emplea el algoritmo genético que son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos y son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de estas. Los algoritmos evolutivos se usan frecuentemente en la optimización multiobjetivo debido a su habilidad para aproximarse al frente de Pareto, estos pueden buscar mayor cantidad de soluciones factibles que otros algoritmos tradicionales.

El NSGA II es un algoritmo genético que permite solucionar problemas multiobjetivo, en grandes rasgos se crea aleatoriamente una población de Padres P_t , de los cuales se genera la descendencia Q_t , esto con el objetivo de posteriormente unir padres e hijos ($P_t \cup Q_t$) y obtener como resultado la población R_t que alberga los individuos con los mejores rasgos para transmitir a la generación P_{t+1} y las que proceden a esta. Aunque esto requiere un mayor esfuerzo, se justifica por el hecho de permitir una verificación global de dominancia entre la población de padres y descendientes. Una vez el proceso de ordenamiento no dominado ha finalizado, la nueva población es generada a partir de las configuraciones de los frentes no dominados (Correa et al, 2008).

4. Datos

El modelo de optimización es bi-objetivo, contando con una función objetivo enfocada en costos y otra en el consumo energético del sistema de refrigeración durante el transporte. Este está conformado por un solo escalón, el primer nivel corresponde a las tres plantas despostadoras de donde sale la carne en cortes y el segundo nivel a los cinco puntos de venta a donde llega la carne y se vende al consumidor final. Las decisiones son de localización e inventario en los dos niveles y transporte entre ellos, con la finalidad de satisfacer la demanda en cada periodo (modelo multiperiodo).

Las demandas son las mostradas en la siguiente imagen, para estas se buscó un censo realizado por el gobierno colombiano en el que se describían los consumos en Kg de carne bovina por cada departamento y desagregado por cada municipio. Se escogieron 5 municipios y se decidió que se iba a abarcar el 20% de la demanda para el análisis del estudio.

	t1	t2	t3	t4
j1	15813	18000	15000	16500
j2	57240	45690	60000	57240
j3	600	500	630	630
j4	8850	7800	9000	9030
j5	14820	15030	9000	6000

Figura 1. Demandas

En las imágenes se observan los costos de localización para plantas y puntos de venta, y las capacidades máximas de almacenamiento de i (plantas) y j (puntos de ventas), también se tienen los costos de mantener producto almacenado en plantas y PV. Los datos son de elaboración propia, para su elaboración se listaron qué costos se abarcarían tanto en

plantas como en punto de ventas (cada uno por separado), se investigó valores de los rubros en el mercado colombiano y se hizo un redimensionamiento al tamaño del problema establecido.

```
C1L(i) costo fijo de localizacion para las plantas /i1=9600000,i2=8700000,i3=90000000/
C2L(j) costo de localizacion puntos de venta /j1=3000000, j2=1500000, j3=700000, j4=700000, j5=700000/
CP(i) capacidad del nodo i /i1=350000, i2=300000, i3=100000/
CV(j) capacidad del nodo j /j1=100000, j2=200000, j3=2900, j4=40000, j5=48000/;
```

Figura 2. Costos y capacidades

	t1	t2	t3	t4
i1	35	40	20	38
i2	20	25	15	30
i3	18	22	12	12

Figura 3. Costo de mantener unidad en i (peso colombiano)

	t1	t2	t3	t4
j1	40	45	42	40
j2	69	72	65	69
j3	800	900	750	750
j4	112	120	100	90
j5	67	60	100	120

Figura 4. Costo de mantener unidad en j (peso colombiano)

La perecebilidad de la cadena se ve refleja en el uso indispensable de una cadena de frío ininterrumpida, la cual es considerada para este trabajo como la potencia total consumida por el vehículo para el sistema de refrigeración. El consumo de potencia se evidencia en la constante K cuyo valor se encuentra mediante la siguiente ecuación.

$$K = (23.45 [Kg * m] \times 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]) \times \left(\frac{2\pi \times 1900 [rev/min]}{60} \right)$$

$$K \cong 45,771 [Kw/km]$$

El Primer término de la fórmula está conformado por el torque del vehículo a una velocidad de 52 Km/h, en el segundo término se encuentra la velocidad angular. La velocidad usada corresponde a una aproximación del promedio de velocidad a la que marchará el vehículo transportador.

En cuanto al modelo matemático, consta de dos funciones objetivo y 9 restricciones. A continuación, se adjuntas los datos.

Índices

i: nodos plantas – Nivel 1. Estos nodos son fijos (es decir, se abren o no para todos los periodos).

$$i = \{1,2,3\}$$

j: nodos puntos de venta – Nivel 2. Estos nodos son fijos (es decir, se abren o no para todos los periodos).

$$j = \{1,2,3,4,5\}$$

t: periodo (meses)

$$t = \{1,2,3,4\}$$

Parámetros

$C1L_i$: Costo de localización puntos *i* (nodos de plantas – Nivel 1)

$C2L_j$: Costo de localización puntos *j* (nodos puntos de venta – Nivel 2)

$C1I_{it}$: costo de mantener una unidad en inventario, en el nodo *i* y en el periodo *t*

$C2I_{jt}$: costo de mantener una unidad en inventario, en el nodo j y en el periodo t

CT_{ijt} : costo unitario de transporte (por Km) de enviar una unidad del nodo i al nodo j en el periodo t

d_{jt} : demanda del nodo j en el periodo t

S_{ij} : Distancia (Km) de los nodos i a los nodos j .

K : constante de consumo de energía por unidad de producto

CP_i : capacidad del nodo i

CV_j : capacidad del nodo j

Variables

$Y1L_i$: decisión de abrir una planta en el nodo i

$Y2L_j$: decisión de abrir una punto de venta en el nodo j

$H1I_{it}$: cantidad de inventario en el nodo i en el periodo t

$H2I_{jt}$: cantidad de inventario en el nodo j en el periodo t

X_{ijt} : número de unidades enviadas desde el nodo i al nodo j en el periodo t

Funciones Objetivo

$$\text{Min} \sum_i C1L_i \times Y1L_i + \sum_j C2L_{jt} \times Y2L_j + \sum_i \sum_t C1I_{it} \times H1I_{it} + \sum_j \sum_t C2I_{jt} \times H2I_{jt}$$

$$\text{Min} K \times \sum_i \sum_j \sum_t CT_{ijt} \times S_{ij} \times X_{ijt}$$

Restricciones

a. Inventario

- 1) Inventario en nodos i , en cada periodo t = al último

$$H1I_{it} \geq \sum_j X_{ijt} \quad \forall_i, \forall_t = \text{último}$$

- 2) Inventario en nodos j , en cada periodo $t \neq$ del último

$$\sum_i X_{ijt} + H2I_{jt} = d_{jt} + H2I_{j(t+1)} \quad \forall_j, \forall_t \neq \text{último}$$

- 3) Inventario en nodos j , en cada periodo t = al último

$$\sum_i X_{ijt} + H2I_{jt} = d_{jt} \quad \forall_j, \forall_t = \text{último}$$

b. Localización

- 4) Si se envía en cualquier periodo t desde nodo i , entonces este debe abrirse

$$M \times Y1L_i \geq \sum_j \sum_t X_{ijt} \quad \forall_i$$

- 5) Si se envía en cualquier periodo t al nodo j , entonces este debe abrirse

$$M \times Y2L_j \geq \sum_i \sum_t X_{ijt} \quad \forall_j$$

c. Capacidad

6) La cantidad de unidades a ofertar por el nodo i, por periodo, no puede exceder su capacidad

$$CP_i \geq H1I_{it} \quad \forall_i, \forall_t$$

7) La cantidad de unidades a ofertar por el nodo j, por periodo, no puede exceder su capacidad

$$CV_j \geq \sum_t X_{ijt} + H2I_{jt} \quad \forall_j, \forall_t$$

8) $X_{ijt} \geq 0$ y enteras $H1I_{it} \geq 0$ y enteras $H2I_{jt} \geq 0$ y enteras

9) $Y1L_i \in \{0,1\}$ $Y2L_j \in \{0,1\}$

5. Resultados

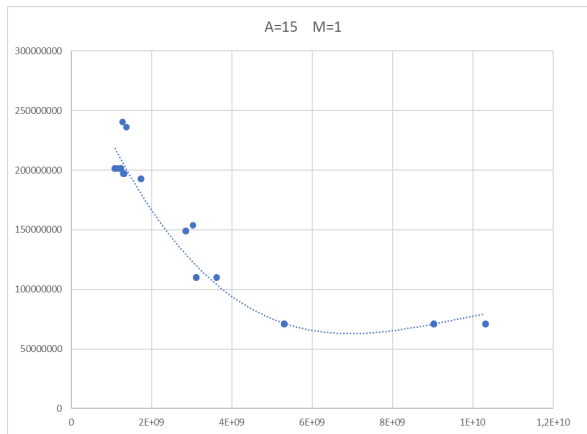


Figura 5. A=15 M=1

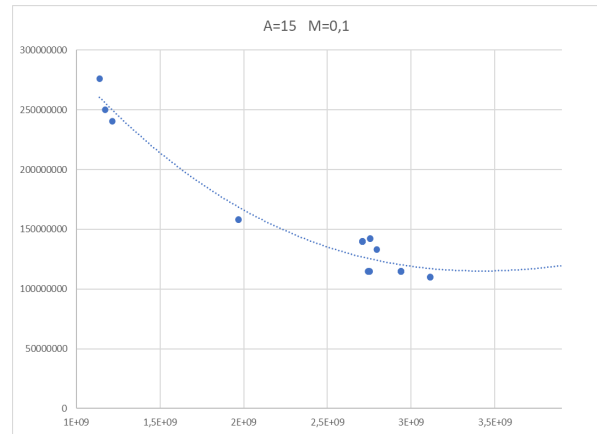


Figura 6. A=15 M=0.1

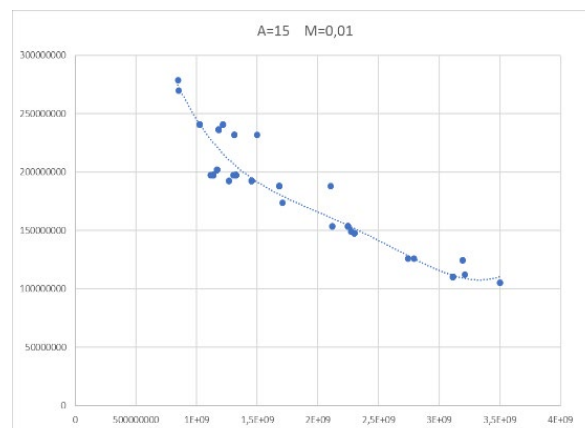


Figura 7. A=15 M=0.01

Las imágenes pertenecen a tres instancias diferentes abordadas para el estudio, la primera instancia tiene una distancia de apilamiento de 15 y una probabilidad de mutación 1, la instancia 2 tiene apilamiento de 15 y mutación de 0.1, y la instancia 3 apilamiento de 15 y probabilidad de mutación 0.01. Como se puede observar las tres instancias tienen la distancia de apilamiento en común y entre ellas se varía su probabilidad de mutación. Adicionalmente se observa que a medida que disminuye la probabilidad de mutación se compacta más las zonas de resultado y muestra un frente de Pareto más denso y marcado.

En cuanto a los costos de cada función para la instancia 1 encontramos que en el extremo inferior del frente obtenemos $F1=\$1.088.577.026$ $F2=\$201.672.116$ para un total de 367.373 Kg a enviar desde sus plantas de beneficio para satisfacer la demanda de los cinco puntos de venta, se obtiene un costo total de $\$1.290.249.142$ para el último tramo de la cadena de suministro, por lo tanto, cada kg de carne tendría un valor $\$3.550$. En cuanto a su extremo superior hallamos $F1=\$71.172.116$ $F2= 10.312.041.288$ dando un costo total de $\$10.383.213.404$ y de $\$28.263$ por Kg de carne despostada. Para la instancia 2 en su primer extremo $F1=\$250.000.000$ $F2=\$1.170.100.683$ con un costo total de $\$1.420.100.683$ y $\$3.865$ por Kg, extremo final $F1=\$110.172.116$ $F2= 3.114.474.063$, costo total $\$3.224.646.179$ y $\$8.777$. En instancia 3 primer extremo $F1=\$278.427.984$ $F2= \$845.855.867$, costo total $\$1.124.283.851$ y $\$3.060$ por Kg, extremo final $F1=\$105.172.116$ $F2= \$3.499.819.791$, costo total $\$3.604.991.907$, $\$9.812$ por Kg. De los anteriores resultados podemos concluir que los valores encontrados son satisfactorios a la realidad del precio en el mercado colombiano, teniendo en cuenta que sólo se está abarcando el último escalón sin tener en cuenta precios de materias primas que son abarcados en otros escalones.

De igual manera se encontró que la función objetivo 2 correspondiente al consumo energético necesario para hacer los envíos, es predominante en cuanto al costo del último eslabón, dando cabida a futuras investigaciones donde se optimice primeramente esta función o se le agregue un peso ponderado mayor al de la función 1 estudiada en el presente estudio.

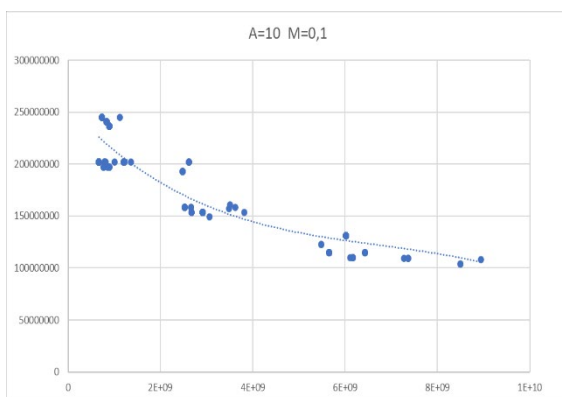


Figura 9. A=10 M=0.1

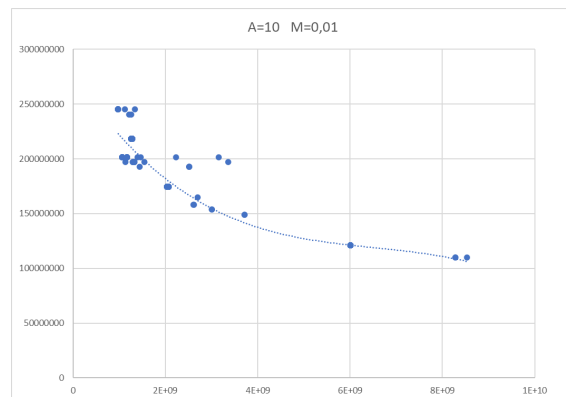


Figura 8. A=10 M=0.01

En las instancias 4 y 5 se puede observar que tienen la misma mutación que las instancias 2 y 3 respectivamente, pero en las dos últimas instancias puestas (4 y 5) se hizo uso de $A=10$. En las 3 situaciones analizada anteriormente se pudo denotar que a medida que se reducía la probabilidad de mutación se obtenían gráficos más claros, situación contraria a las imágenes que se muestran en las dos últimas figuras. Contrastando las 4 instancias se observa que cuando hay una distancia de apilamiento mayor hay mejor comportamiento gráfico con una probabilidad mutación menor, pero cuando se disminuye el apilamiento da mejor resultado el aumentar la mutación. Con esto se corrobora la importancia de la distancia crowding y de la probabilidad de mutación para obtener mejores poblaciones de soluciones.

Haciendo el análisis de costos para la instancia 4 en el primer extremo $F1=\$201.672.116$ y $F2=\$667.775.048$, costo total $\$869.447.164$, $\$2.366$ por Kg. Último extremo $F1=\$108.172.116$ y $F2=\$8.940.398.547$, costo total $\$9.048.570.663$, $\$24.630$ por Kg. Instancia 5 en el primer extremo $F1=\$201.672.116$ y $F2=\$1.170.100.683$, costo total $\$1.371.772.779$, $\$3.734$ por Kg. Último extremo $F1=\$110.172.116$ y $F2=\$8.535.142.263$, costo total $\$8.645.314.379$, $\$23.532$ por Kg.

6. Conclusiones

- Se realizó la revisión de literatura sobre el problema de diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes que permitió la modelación del problema estudio.
- Se formuló el modelo matemático para el problema de diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes guiado con la información recopilada de la revisión de literatura.
- La literatura hallada permitió definir y desarrollar la técnica NSGA II para dar solución al modelo de la PFSCND.
- Mediante el uso del software GAMS se comprobó la funcionalidad y coherencia del modelo matemático planteado, como se evidencia en el apartado de estudio mono-objetivo en el libro tesis.
- El tramo estudiado de la SC cumplió los tres niveles de decisión que conforman el SCM, Operativo cumpliendo con la demanda de los puntos de venta, Táctico dando manejo al inventario y Estratégico al decidir si abrir o no plantas en determinadas localizaciones.
- Se encontró que para $A=15$, entre menor sea la probabilidad de mutación, más compacto y definido será el gráfico de resultados de las funciones objetivo.
- Los costos totales hallados en todas las instancias estudiadas para el último eslabón de la cadena, concuerdan con los precios que se manejan actualmente en el mercado colombiano. Con esto, nuevamente se evidencia la coherencia en el funcionamiento del modelo matemático.
- Se evidencia que para el último eslabón de la cadena de suministro el consumo energético acarrea gran parte del costo total. Esto permite reafirmar la importancia de manejar problemas desde una óptica multicriterio.
- Se confirmó la importancia que tiene la distancia crowding y la probabilidad de mutación para las soluciones en las instancias examinadas como se pudo apreciar en el análisis de las instancias 4 y 5.
- Se ratificó la importancia que tiene el análisis multiobjetivo en las cadenas de suministro, sobre todo en las de carácter precedero con vida útil corta, como una herramienta para mejorar tanto económica como medio ambientalmente.
- A pesar de que el NSGA II es uno de los métodos más utilizados en optimización multiobjetivo no se encontró en la literatura estudiada una aplicación que tuviera en cuenta la perecibilidad del producto. Con la presente investigación se demostró que el método puede ser aplicado en cadenas de suministro para productos con vida útil corta.
- Se elaboró un artículo de carácter publicable que resumiera lo estudiado en la presente tesis.

Referencias

- Aravind Seshadri (2021). NSGA-II:A multi-objective optimization algorithm (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm>), MATLAB Central File Exchange.
- Andrade Baron, J., & Casarrubia Peñata, M. (2019). *Diseño de un canal de distribución de carne de bovino congelada con destino a China, Red Cárnica SAS Ciénaga de Oro, Córdoba*. Repositorio.unicordoba.edu.co.
- Arias Cardenas, L., 2019. *Administración De La Cadena De Suministros Y Gestión Comercial En Alimentos Cárnicos Del Grupo Nutresa*. [ebook] Available at: <<https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/1721/ADMINISTRACION%20DE%20ALIMENTOS%20CARNICOS%20DEL%20GRUPO%20NUTRESA.pdf?sequence=1>>
- Blackburn, Joseph & Scudder, Gary. (2009). Supply Chain Strategies for Perishable Products: The Case of Fresh Produce. *Production and Operations Management*. 18. 129 - 137. 10.1111/j.1937-5956.2009.01016.x.
- Campos Vasquez, N., Garcia Alvarez, D., & Vivas Serrato, C. (2015). *OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE DISTRIBUCIÓN DEL CONGLOMERADO PYMES DEL SECTOR CÁRNICO DE BOGOTÁ, D.C.- GESTIÓN DISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN* [Ebook] (3rd ed., pp. 57-70).
- Cordeau, JF., Pasin, F. & Solomon, M.M. An integrated model for logistics network design. *Ann Oper Res* **144**, 59–82 (2006). <https://doi.org/10.1007/s10479-006-0001-3>.
- DPN (2018) Cadena productiva de Carnes y Productos Cárnicos Estructura, Comercio Internacional y Protección. Dirección de Estudios Económicos.
- Gallo, A., Accorsi, R., Baruffaldi, G., & Manzini, R. (2017). Designing Sustainable Cold Chains for Long-Range Food Distribution: Energy-Effective Corridors on the Silk Road Belt. *Sustainability*, 9(11), 2044. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/su9112044>
- Ismail, Napsiah & Ariafer, Shahram & Tang, S. & Mohd ariffin, Mohd khairul anuar & Memariani, Azizollah. (2014). Effects of Integration on the Cost Reduction in Distribution Network Design for Perishable Products. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. 1-10. 10.1155/2014/739741.

- Javid Jouzdani, Kannan Govindan, On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals, *Journal of Cleaner Production*, Volume 278, 2021, 123060, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123060>.
- Jesus Argueta Villamar, M. J. L. A. y. H. (n.d.). Problemas de Optimización. Unam.Mx. Retrieved February 2, 2021, from http://www.objetos.unam.mx/matematicas/matema/Daplica/da_aplicacion09_d.html
- K. Govindan, A. Jafarian, R. Khodaverdi, K. Devika, Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food, *International Journal of Production Economics*, Volume 152, 2014, Pages 9-28, ISSN 0925-5273, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028>.
- Martínez Albarracín, K. and Rivera Roncancio, L., 2018. *Caracterización De La Cadena De Suministro De La Asociación Ruta De La Carne En El Departamento De Boyacá*. [online] Repositorio.uptc.edu.co. Available at: <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2524>
- Villegas Juan (2003). Problemas de localización Multiobjetivo. [online] <https://juangvillegas.files.wordpress.com/2011/08/tesis1.pdf>