

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

Silvia Natalia Rincón Barajas

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera Industrial

Director

MA. Javier Arias Osorio

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales
Bucaramanga
2022

Dedicatoria

A mi compañero incondicional y amor de mi vida, Carlos.

Tabla de Contenido

1. Objetivos 14

1.1. Objetivo General..... 14

1.2. Objetivos Específicos 14

2. Generalidades del Proyecto..... 14

2.1. Marco Referencial..... 14

2.1.1. Marco de antecedentes 14

2.1.2. Marco Teórico 16

2.1.2.1. Logística y Cadena de Suministro..... 16

2.1.2.2. Problema de Optimización. 17

2.1.2.3. Técnicas de Optimización. 18

2.1.2.3.1. Modelo determinístico..... 19

2.1.2.4. Modelo programación lineal. 19

2.1.3. Proceso productivo de la carne..... 20

2.2. Metodología Trabajo de Investigación 23

2.2.1.	Revisión de literatura.....	23
2.2.2.	Análisis de la información.....	24
2.2.3.	Definición, desarrollo y evaluación de modelo matemático y evaluación.....	24
2.2.4.	Documentación.....	25
3.	Revisión de la literatura	25
3.1.	Análisis bibliométrico.....	25
3.2.	Revisión preliminar de literatura	29
3.2.1.	Cadena de suministro de carne bovina.	29
3.2.2.	SCND Problem.....	33
4.	Formulación del Modelo	37
4.1.	Descripción del problema SCND en la carne	37
4.2.	Modelo Matemático.....	38
4.3.	Consideración mono-objetivo.....	42
5.	Diseño y Desarrollo de la Técnica de Optimización.....	46
5.1.	Selección de la técnica.....	46
5.2.	Desarrollo de la técnica.....	47
5.3.	Descripción de los algoritmos del NSGA II	50
5.4.	Evaluación de la Técnica	52

6. Conclusiones 56

7. Recomendaciones..... 57

Listado de Tablas

Tabla 1 Tabla de objetivos. 13

Lista de Figuras

Figura 1 Tipos de corte de carne 21

Figura 2 Proceso productivo de carne bovina, porcina y de ave de corral 23

Figura 3 Documentos por año 26

Figura 4 Documentos encontrados según área..... 26

Figura 5 Cantidad de documentos por autor. 27

Figura 6 Documentos según país. 28

Figura 7 Densidad palabras clave. 29

Figura 8 Tipo 1 de cadena de suministro en el proceso pecuario de la carne. 32

Figura 9 Tipo 2 de cadena de suministro en el proceso pecuario de la carne. 32

Figura 10 Tipo 3 de cadena de suministro en el proceso pecuario de la carne. 33

Figura 11 Costos de localización para plantas y puntos de venta en la instancia #1. 42

Figura 12 Costo Total de la función objetivo 1 42

Figura 13 Resultado variable H1I 42

Figura 14 Resultado variable X 43

Figura 15 Costos de localización para plantas y puntos de venta en la instancia #2. 43

Figura 16 Resultado variable H1I 43

Figura 17 Costo Total de la función objetivo 1 43

Figura 18 Resultado variable X 44

Figura 19 Resultado Variable H1I 45

Figura 20 Resultado variable H2I 45

Figura 21 Resultado variable X 46

Figura 22 Costo total función 2..... 46

Figura 23 Cromosoma ejemplo.....	48
Figura 24 Ejemplificación del cruce aleatorio	49
Figura 25 Ejemplificación de mutación aleatoria	49
Figura 26 Instancia 1	52
Figura 27 Instancia 2.....	52
Figura 28 Instancia 3.....	53
Figura 29 Instancia 4.....	54
Figura 30 Instancia 5.....	54

Resumen

Título: Modelo determinístico bi-objetivo para el diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes.^a

Autor: Silvia Natalia Rincón Barajas^b

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

Descripción:

Una cadena de suministro (CS) o supply chain, es un conjunto integrado por actores y actividades con el fin último de satisfacer a su 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, donde se hallan productos como lácteos, carnes bovinas, carnes porcinas, pollo, mariscos, verduras, frutas, etc. De ese sector se destacan grandes empresas a nivel nacional como lo son Alpina, Mc Pollo, Frigorífico Vijagual, entre otros.

En este proyecto se trabajó el problema PFSCND (Perishable Food Sply 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.

^a Trabajo de Grado

^b Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Estudio Industriales y Empresariales. Director: MA. Javier Arias Osorio.

Abstract

Title: Bi-objective deterministic model for the design of a cut meat supply chain network^a

Author: Silvia Natalia Rincón Barajas^b

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

Description:

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.

^a Bachelor Thesis

^b Faculty of Physical-mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Director: MA. Javier Arias Osorio.

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 norma 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 son 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.

Convencida 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 estudiara 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.

Tabla 1

Tabla de objetivos.

Objetivo	Cumplimiento
Realizar una revisión de literatura sobre el problema de diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes.	Capítulo 3
Formular un modelo matemático para el problema de diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes.	Capítulo 4
Definir y desarrollar la técnica a usar para dar solución al modelo formulado.	Capítulo 5 (5.1)
Evaluar la técnica a partir de instancias propias del problema abordado.	Capítulo 5 (5.4)
Elaborar un artículo de carácter publicable sobre la investigación.	Apéndice

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Diseñar y evaluar un modelo determinístico bi-objetivo para el diseño de red de cadena de suministro de carne en cortes.

1.2. Objetivos Específicos

- 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.
- Elaborar un artículo de carácter publicable sobre la investigación.

2. Generalidades del Proyecto

2.1. Marco Referencial

2.1.1. Marco de antecedentes

En el proyecto de grado realizado por Manuel Montes (2015) recalca la necesidad de incluir los estándares de calidad en el proceso productivo de la carne ya que es indispensable mantener los estándares de calidad del percedero y garantizar la inocuidad del alimento. Hace un recorrido

narrado sobre el recorrido que sigue la carne durante su proceso productivo y enfatiza el potencial que tiene Colombia como país productor de carne bovina mencionando que según proyecciones podría ubicarse como líder entre los principales países ganaderos. El autor del artículo decidió aterrizar su investigación en el costeo del proceso “carne porcionada” en la empresa Red Carnica SAS que se dedica a la producción y exportación de carne en países como Egipto.

Otra tesis interesante es la de Martínez y Rivera (2018) en la que caracterizaron la cadena de suministro de la asociación ruta de la carne en Boyacá. Esta asociación surgió como idea de la cámara de comercio para fomentar el turismo gastronómico en la región. En este trabajo se realizó la descripción de la cadena abarcando todo su proceso, participantes y contexto, siendo esto de gran ayuda para identificar el rol que cada actor cumple dentro ella y también convirtiéndose en un instrumento para la planeación estratégica, táctica y operacional en el organismo.

Andrade y Casarrubia (2019) diseñaron la distribución de carne de bovino congelada, para exportación a China para la empresa Red Cárnica SAS. Párrafo arriba hablábamos sobre dicha empresa y su capacidad de exportación, así como el potencial que tenía el país en calidad de carne y reglamentación sanitaria para su producción. China al ser un país tan poblado y ser una de las economías más grandes del mundo, compra importantes cifras de materias primas tanto para consumo como para su transformación, haciéndolo un atractivo demandante para la economía nacional ya que también es el segundo mayor importador de carne bovina a nivel mundial. Soportados en esto, los investigadores calcularon una posible distribución del producto hacia china teniendo en cuenta los requisitos sanitarios y estándares exigidos por el país extranjero, y los costos que acarrearía esta operación. Se concluyó que era viable y una gran oportunidad de negocio vender carne en este país.

2.1.2. Marco Teórico

2.1.2.1. Logística y Cadena de Suministro.

La Cadena de Suministro es el conjunto de actividades, instalaciones, distribución, proveedores y personas, que intervienen para entregarle un producto o servicio al cliente con los requerimientos deseados. La logística es el grupo de medios que ayudan a planificar y gestionar las actividades para brindarle al cliente lo que desea, en el momento necesario y en las condiciones necesarias. La diferencia entre estas dos recae, en que la logística abarca desde el aprovisionamiento de la empresa hasta la distribución, lo que quiere decir que va desde las compras de insumos de la planta hasta que sale camino al cliente, en cambio en la gestión de la cadena de suministro, coordina desde la cadena de mi proveedor hasta la cadena que consume el bien que produce.

El SCND (Supply Chain Network Design) implica abarcar instalaciones, medios de producción, productos y activos de transporte, así no sean propiedad de la organización, ya que tienen tres niveles de decisión: táctico, operativo y estratégico. Primordialmente, el objetivo de una cadena de suministro es el dinero, pero hay varios tipos de cadenas como sustainable, green, lean, sensible y risk. El diseño de estas se enfoca en las características propias de cada una y los objetivos que tenga la organización.

Un producto se puede decir perecedero si, su calidad tiende a deteriorarse notablemente, su valor disminuye con el paso del tiempo o la reducción de su calidad tiene consecuencias graves. El diseño de las cadenas de suministro de alimentos perecederos debe tener especial cuidado ya que la vida útil fácilmente se puede ver afectada, para analizar la incertidumbre de la vida del alimento se han abordado diferentes metodologías mencionadas en la revisión de literatura.

2.1.2.2. Problema de Optimización.

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.

Modelo mono-objetivo: Es un problema en el cual se busca maximizar o minimizar el valor de una sola función u objetivo, sus variables generalmente tienen restricciones lo que acota a un rango en el espacio de búsqueda.

Modelo multi-objetivo: “El problema de optimización multiobjetivo es similar al problema de optimización global, excepto que para el caso multiobjetivo se intenta encontrar una solución que optimice simultáneamente todas las funciones objetivo”(Zavala, 2009, 398), como mencionábamos anteriormente las funciones pueden presentar conflicto entre sí ya que al tratar de optimizar una, la otra puede empeorar y así sucesivamente, por lo cual hay que procurar en este tipo de optimización que la solución se ajuste lo mejor posible a todos los objetivos. También se conoce como optimización multicriterio.

El NSGA II es un algoritmo 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).

En la programación lineal encontramos el problema de **transporte**, que básicamente consiste en distribuir o enviar desde un centro de distribución A a un punto B minimizando el costo de distribución, algo importante a recalcar es que este modelo asume que las cantidades de demanda y oferta son fijas, pero se pueden hacer adaptaciones para permitir holgura en estos. El segundo supuesto para tener en cuenta es sobre el costo, que tiene que ser directamente proporcional al número de unidades distribuidas. A pesar de que su nombre indique que sea para transporte, también es aplicado en problemas que no estén relacionados con ello.

En el problema de **asignación**, se adjudican recursos que pueden ser personas, máquinas, instalaciones, etc, a tareas o destinos. Se dice que es un tipo especial de problemas de transporte. Estos problemas pueden ser muy grandes (transporte y asignación), debido a su numerosa cantidad de variables y restricciones, y requerir un gran esfuerzo computacional si se usa el método simplex, pero para ello hay métodos simplificados que reducen el esfuerzo.

El problema de **localización** se busca ubicar instalaciones teniendo en cuenta la zona, los requerimientos del cliente y las restricciones, esto para poder llevar un producto o servicio al consumidor. Se pueden considerar múltiples instalaciones para localizar. De igual manera sucede con el problema de **inventarios**, allí la función objetivo se centra en minimizar los costos asociados al stock de la organización, las variables pueden considerar retrasos, cantidades de stock, gastos de mantenimiento del stock, entre otras.

2.1.2.3. Técnicas de Optimización.

Antes de hablar sobre algunas técnicas de solución para los problemas de optimización, es fundamental revisar los modelos matemáticos, por ello a continuación se definen brevemente.

2.1.2.3.1. Modelo determinístico.

Los modelos determinísticos son aquellos donde se asume que los datos de entrada son conocidos, como lo sería la demanda, a la hora de analizar el problema. Aquí no se tienen en cuenta el azar o se simulan eventos hipotéticos procurando disminuir la incertidumbre (Ingenio Empresa, 2017).

Los modelos probabilísticos (también llamados estocásticos) difieren de los determinísticos, en que los primeros no sólo se enfocan en los resultados, si no en los riesgos que conlleva la decisión, esto quiere decir que para el segundo modelo mencionado se tiene certeza del valor de los parámetros y para los estocásticos algún elemento es desconocido ya que parte (o totalidad) de sus parámetros tiene una probabilidad de distribución asociada, allí se contempla la incertidumbre, por lo tanto la determinación de los eventos futuros se verá afectada por los eventos predecibles y la incertidumbre.

2.1.2.4. Modelo 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. Está claro al mencionar esto, aumenta la dificultad de solucionar el problema descartando la opción de usar el

método de solución simplex y siendo idóneo usar un algoritmo como el Branch and Bound. Estos modelos permiten una gran flexibilidad siendo óptimo en la representación de condiciones lógicas y alternativas, lo que sería muy complejo para un método de programación lineal.

Entre 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.

2.1.3. Proceso productivo de la carne.

La carne bovina en canal debe pasar por ciertos procesos y tratamientos para poder obtenerse. En principio, el animal en pie puede provenir de un criadero, posteriormente este se va a pasar por el proceso de ceba en el cual se engorda al animal hasta cumplir el peso y la edad requeridos para

poder realizarse el sacrificio. Una vez cumplido estos requisitos el vacuno es enviado a la planta de beneficio donde se le hacen exámenes pre y post mortem para asegurarse de que la carne que llegue al consumidor esté en condiciones salubres. En la planta de beneficio se insensibiliza al animal y en seguida se desangra, se cortan su cabeza, piel y extremidades para poder obtener el canal o la media canal que según protocolo debe ser enviada a refrigeración. Después de cumplir con las respectivas horas de refrigeración se envía la canal al cliente o se desposta, esto según el pedido. De esta cadena se pueden obtener carne en canal, media canal, carne despostada, carnes frías, entre otras. (DNP, 2018).

Para obtener carne en trozos o despostada la canal se envía a la planta de desposte en donde se le retira la grasa sobrante, se quitan hematomas y se realiza el corte deseado. En la siguiente imagen se observan los tipos de clasificación en cortes existentes.

Figura 1

Tipos de corte de carne



Nota: Adaptado de Frigorífico Guadalupe (2020)

Cuando se tienen los cortes, la carne sigue a ser empacada o pasa a otra transformación para obtener subproductos cárnicos procesados y carnes frías, en los cuales se mezclan con grasas y

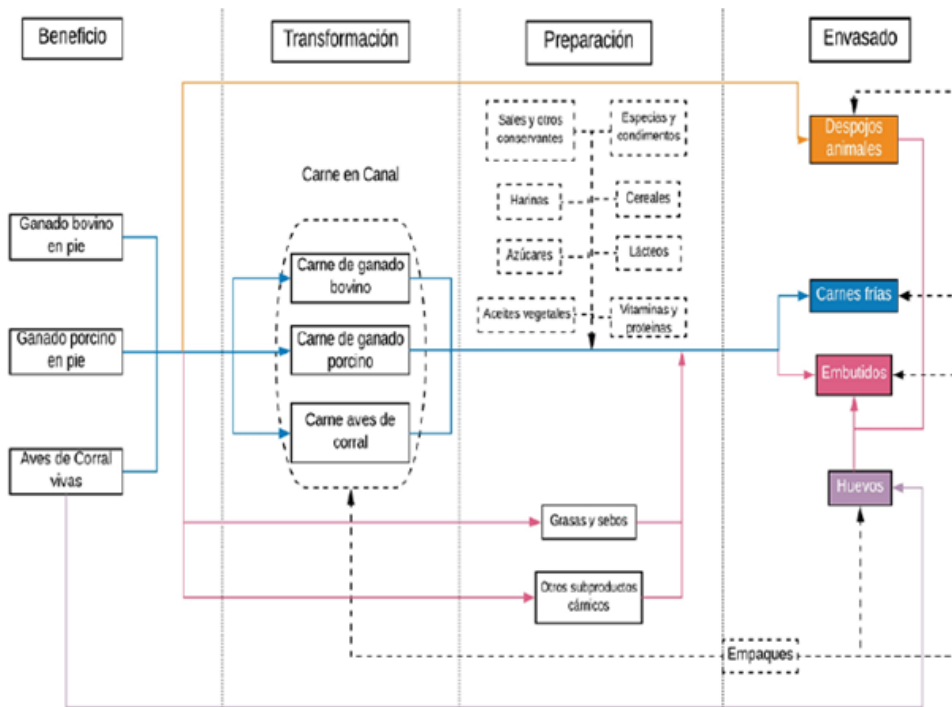
algunos otros aditivos para conservar o sazonar. Se hace uso de tripas de animales o envoltorios artificiales especiales (óptimos para consumo) para empacar y dar forma. Dependiendo del producto que se quiera lograr, pasaran por algunas otras etapas como ahumado, cocción, entre otras y por último empacados en su envoltorio externo. Hay tres clases de envoltorios: primarios, los cuales están en contacto con el producto antes que cualquier otro, secundarios que contienen al primario y brindan información técnica del producto, y los terciarios que contienen al secundario y se usan para transportarlos. Los cortes de carnes, algunos despojos y carnes frías son empacadas al vacío para no alterar sus propiedades organolépticas.

En Colombia el ente regulador que se encarga del control, inspección y vigilancia de este perecedero es el INVIMA basándose en el decreto 1500 de 2007 y en el 1282 de 2016. En el 1500 se encuentran los requisitos en materia de prevención de riesgos a lo largo de la cadena productiva, en particular sobre acondicionamiento de predios, aplicación de buenas prácticas en uso de medicamentos y alimentación animal en la producción primaria, instalaciones, utensilios, equipos para el sacrificio, desposte y desprese en las plantas de beneficio, envase y rotulado, transporte y comercialización de los productos cárnicos y derivados. En el segundo decreto expedido por el Ministerio de Salud y Protección Social, se establece el trámite necesario para la obtención de la autorización sanitaria provisional, con la cual un establecimiento puede hacer beneficio, desposte, desprese, almacenamiento y expendio de carne y/o productos cárnicos derivados.

Las empresas que deseen exportar estos comestibles deben cumplir con el HACCP que monitorea y garantiza la higiene de los alimentos. Minsalud promueve la aplicación de este sistema para asegurar la inocuidad del alimento y establecer el procedimiento de certificación. (DNP, 2018).

Figura 2

Proceso productivo de carne bovina, porcina y de ave de corral



Nota: Adaptado del DPN (2018).

2.2. Metodología Trabajo de Investigación

En esta sección se especifican las fases metodológicas para llevar a cabo la presente investigación.

2.2.1. Revisión de literatura

Para la revisión de literatura, se procede a realizar una búsqueda de artículos que tratan la temática escogida para elaborar un marco referencial. En base a esto se siguió la presente metodología:

- Definir las palabras clave para construir ecuaciones de búsqueda relacionadas con el diseño de cadenas de suministro para agro-alimentos.
- Seleccionar los artículos resultantes de aplicar la ecuación de búsqueda en la base de datos Scopus, relevantes para el desarrollo del proyecto.

2.2.2. Análisis de la información

Se hace un barrido literario con los conceptos desagregados de la literatura para el entendimiento de esta, de igual manera se comprende y analiza el contexto que rodea a la investigación y las salientes que pueda tener. Se desagregan los conceptos o teorías más pertinentes al tema para así poderlos acoger posteriormente dentro de la investigación y que puedan ser una guía para ella.

2.2.3. Definición, desarrollo y evaluación de modelo matemático y evaluación

Teniendo como referencia la información proveniente del análisis de revisión de literatura, y los planteamientos presentados anteriormente, se procede a diseñar el modelo matemático con las variables y características propias del problema planteado, a su vez se usa la información recabada para hacer la elección del algoritmo en el que se aplicará el problema de SCND para perecederos que necesitan cadena de frío como lo es la carne en este caso. Se desarrolla y evalúa para sacar las respectivas conclusiones sobre la investigación.

2.2.4. Documentación

Se construye el libro final donde se consolida el trabajo investigativo detalladamente y se plasman las conclusiones arrojadas por éste. Adicionalmente se elabora un artículo donde se resume brevemente los aspectos más relevantes de la tesis.

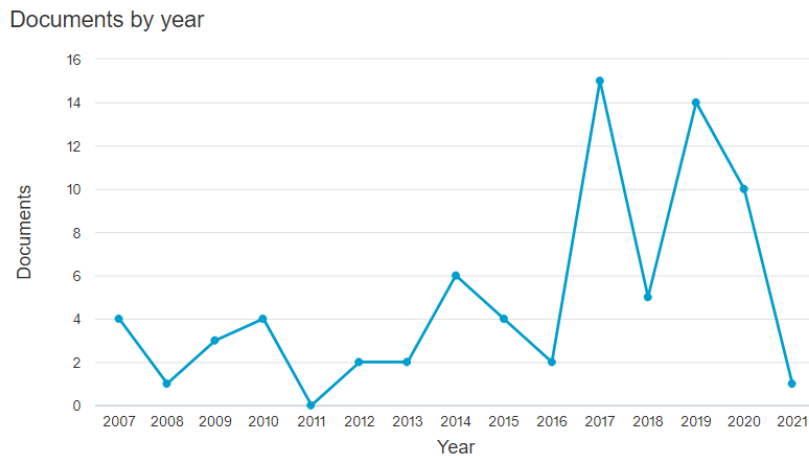
3. Revisión de la literatura

3.1. Análisis bibliométrico

Inicialmente, en la búsqueda de información pertinente al problema que se aborda, se realiza una revisión de literatura para encontrar los elementos concernientes y así tener una guía o base en la investigación. Para ello, se parte por estructurar una ecuación de búsqueda que permita el hallazgo de los documentos más convenientes para el estudio, esta se lleva a cabo usando las palabras claves o “Keywords”. En este caso la ecuación quedó conformada así: TITLE-ABS-KEY (“supply chain” AND “perishable” AND food OR meat) arrojando en el buscador de Scopus 73 artículos relacionados al tema.

Figura 3

Documentos por año

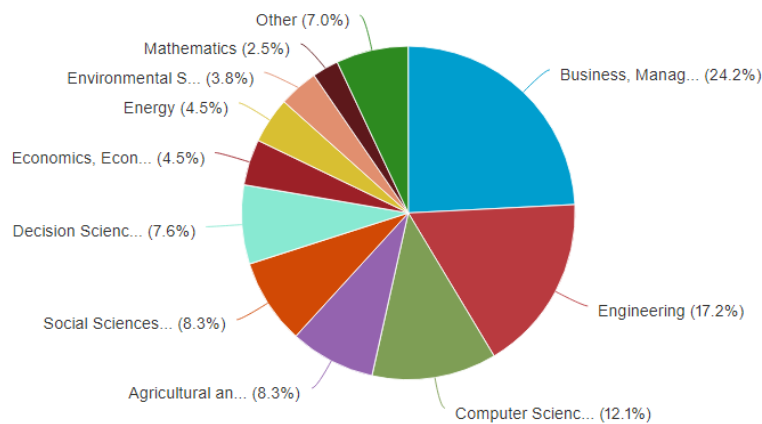


Analizando la Figura 3 vemos que este tema se ha abordado desde hace varios años, pero el interés en el campo de la investigación se ha venido incrementando en el último tiempo, mostrando un auge en tres de los últimos cuatro años.

Figura 4

Documentos encontrados según área

Documents by subject area



También, y observando la Figura 4, se puede entender que las áreas asociadas a la investigación de este tema remarcado en la ecuación de búsqueda son las relacionadas con negocios y administración, así como desde la ingeniería y las ciencias computacionales. En los artículos leídos efectivamente se encuentran muchos casos aplicados en diferentes tipos de industrias en dónde la mayoría experimentan cambios positivos con los modelos propuestos.

También se puede mencionar que un elemento transversal a las áreas que se encuentran de manera repetida es el de las aplicaciones tecnológicas en partículas, la identificación por radio frecuencia (RFiD) para mejorar la trazabilidad de los productos y tener más precisión en la toma de decisiones durante el transporte de ellos.

Figura 5

Cantidad de documentos por autor.

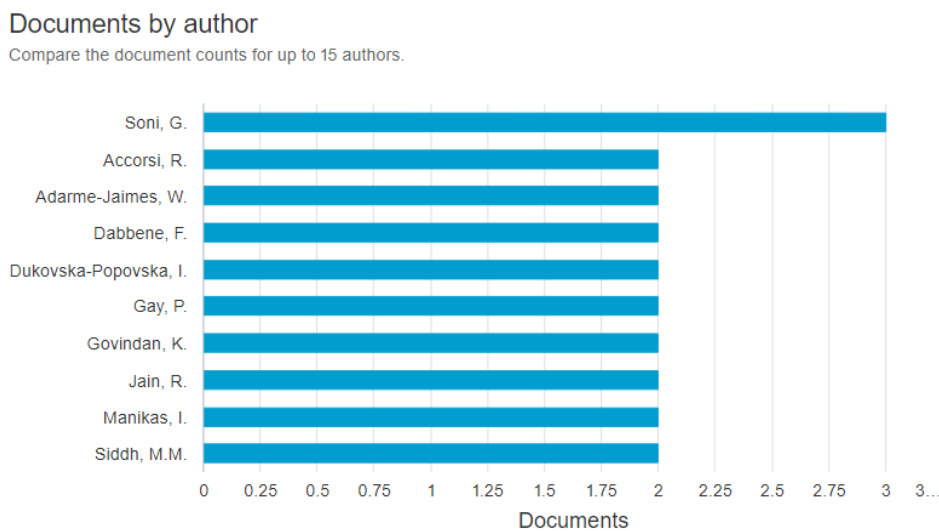
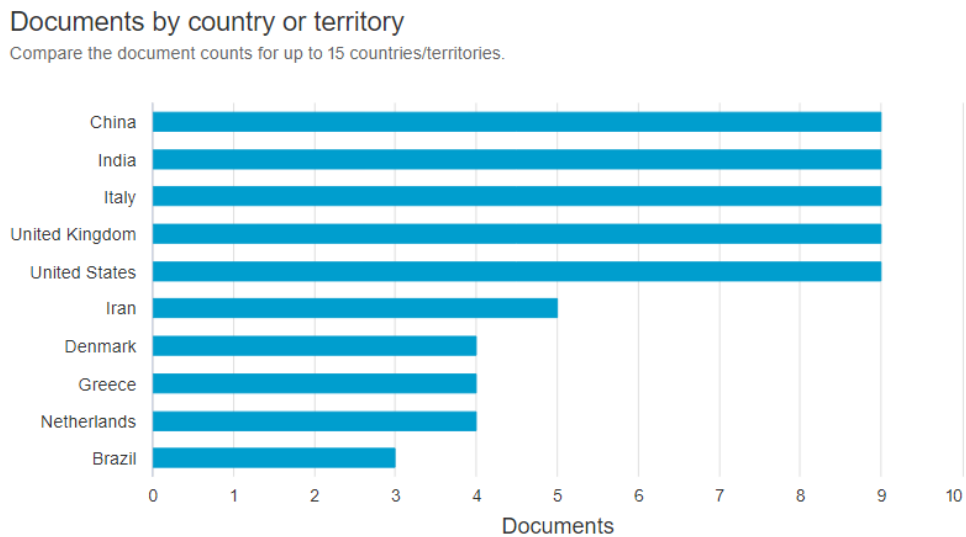


Figura 6

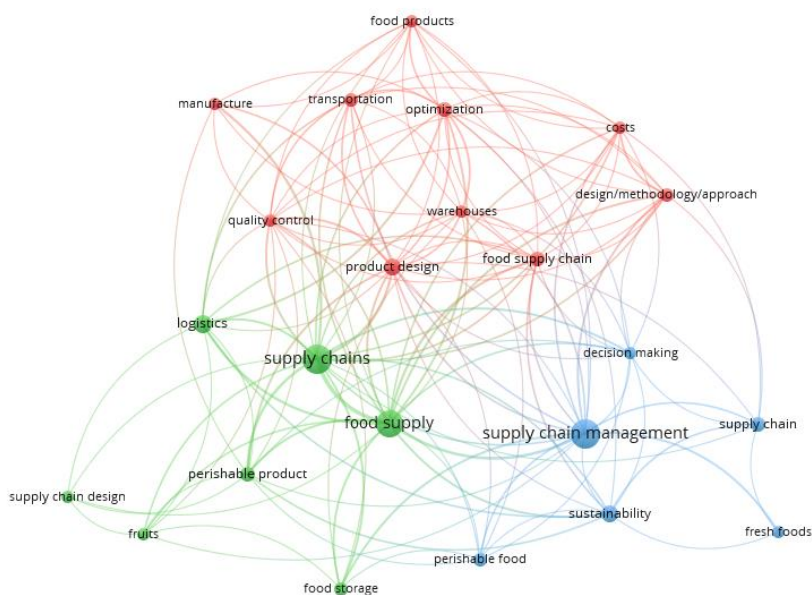
Documentos según país.



En las figuras 5 y 6 se encuentran los autores encontrados y los países asociados al tema de investigación, respectivamente. En ella se observa que dentro de los autores que han publicado más de un artículo del tema está, Soni, G. Y desde los países puede mencionarse que varios de ellos como China, India, Italia, Reino Unido y Estados Unidos han sido muy activos en investigar las cadenas de suministro como tal, tanto su diseño como la afectación de la percibibilidad de las cadenas agroalimentarias, e incluso los impactos ambientales que puedan conllevar sus operaciones.

Figura 7

Densidad palabras clave.



La Figura 7 presenta una red la densidad de palabras clave que arrojan los artículos encontrados en la revisión. En ella, se puede observar que las más recurrentes son Cadenas de Suministro, Suministro de alimentos, Administración de Cadena de Suministro seguido de Logística, Productos Perecederos, Cadena de Suministro de alimentos, entre otras.

3.2. Revisión preliminar de literatura

3.2.1. 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. Entre los actores que pueden conformarla se encuentran proveedores, fabricantes, distribuidores, entre otros. En ella hay tres niveles de decisión: Operacional, Táctico y Estratégico. Las características de estas varían según los modelos. Las CS se pueden aplicar para cualquier producto o servicio, ejemplo de ello son las cadenas de los

alimentos perecederos tales como la carne, la leche, el yogurt, etc. El reto que representan las cadenas en la agroindustria de productos frescos es su creciente pérdida de vida útil con el paso del tiempo dependiendo enormemente de la temperatura y humedad en la que se encuentren los productos (Blackbourn y Scudder, 2009).

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).

Algunos productos agrícolas son vendidos por los campesinos a las asociaciones agrícolas, quienes a su vez en algunas ocasiones se encargan de expender el bien a algunas grandes superficies o a corporaciones de comercialización que se encargan de revenderlas y así sucesivamente hasta que llegan al consumidor final.

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

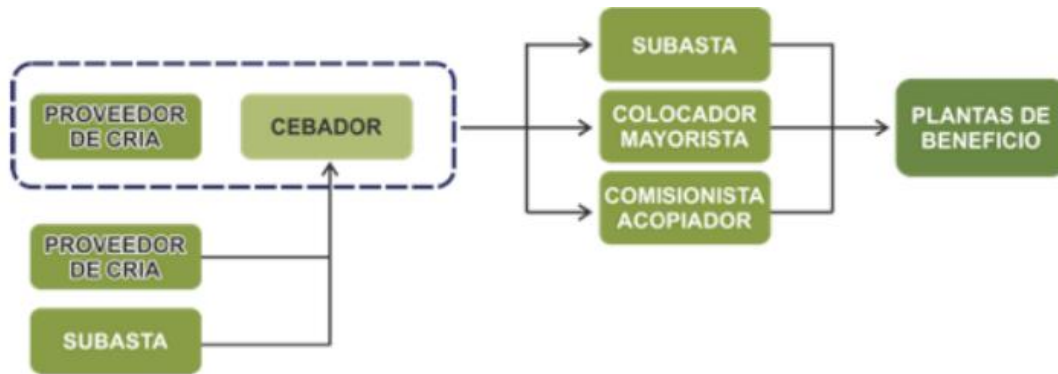
(Rijpkema et al, 2014), en el diseño de una CS es muy importante hacer una compensación entre los costos de transporte, escasez, inventario, desperdicio de producto y pérdida de vida útil. Adicionalmente en varios modelos se ve la aplicación multi-objetivo en la cual abarcan el impacto medio ambiental. Una cadena de suministro alimenticia se puede decir sostenible si no consume más energía de la que suministra como valor nutricional (Gallo et al, 2017), hay que mencionar que una cadena de suministro sostenible abarca el impacto tanto ambiental como social, y en este último aspecto se han guiado por los ODS (objetivos y metas de desarrollo sostenible) de la ONU para mirar en qué manera se puede afectar a la sociedad, tanto positiva como negativamente.

En los últimos años la sostenibilidad en las cadenas de suministro se ha vuelto un tema recurrente y hoy en día casi fundamental, (Rijpkema 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) A continuación algunos ejemplos de cómo pueden ser estas SC:

Figura 8

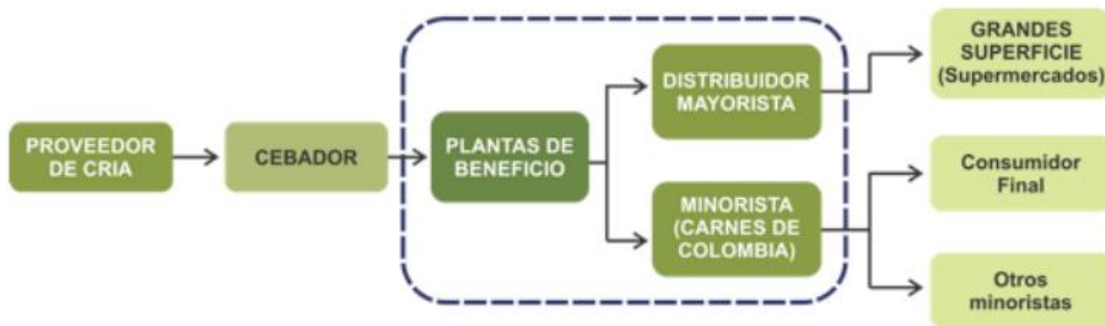
Tipo 1 de cadena de suministro en el proceso pecuario de la carne.



Nota: Adaptado de Estudio "Innovación y modelos de organización empresarial en la agroindustria en Colombia: un estudio comparado por departamentos." Adaptado de RED RAET (2010).

Figura 9

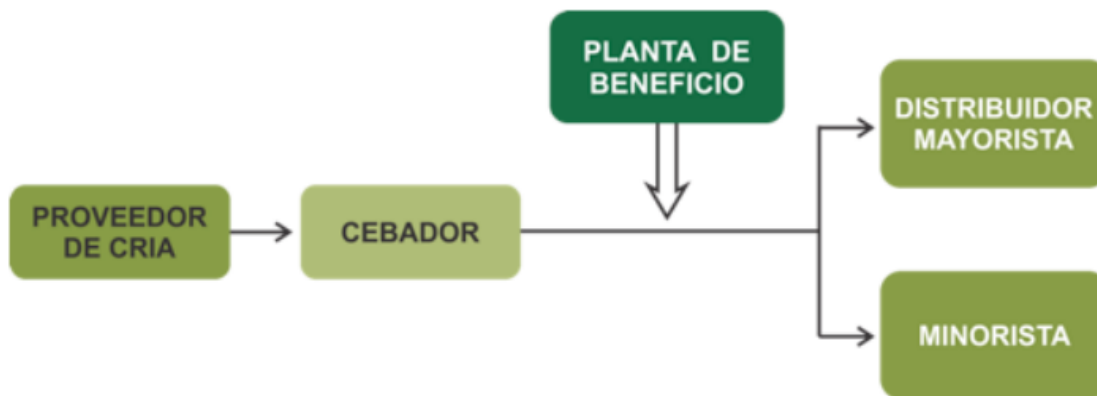
Tipo 2 de cadena de suministro en el proceso pecuario de la carne.



Nota: Adaptado de Estudio "Innovación y modelos de organización empresarial en la agroindustria en Colombia: un estudio comparado por departamentos." Adaptado de RED RAET (2010).

Figura 10

Tipo 3 de cadena de suministro en el proceso pecuario de la carne.



Nota: Adaptado de Estudio "Innovación y modelos de organización empresarial en la agroindustria en Colombia: un estudio comparado por departamentos." Adaptado de RED RAET (2010).

3.2.2. 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 apropiados para los problemas multiobjetivo, siendo de su preferencia el MCGP (Multi Coefficients Goal Programming) 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 enjambres de partícula 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.

4. Formulación del Modelo

4.1.Descripción del problema SCND en la carne

Se decide diseñar una cadena de suministro para alimentos perecederos que requieran cadena de frío, donde se busca disminuir el impacto ambiental además de minimizar el costo total de la misma. De igual manera, se escoge como producto de esta SC la carne, ya que es un alimento que necesita refrigeración desde su producción hasta su consumo y que está comprobado que, al ser un producto indispensable en cada hogar, tiene un índice de contaminación mayor a mucho otros productos, desde su obtención, pasando por la crianza de cada bovino, hasta el proceso como tal de distribución.

Se presenta un caso de PFSCND el cual consiste en el diseño de una red de cadena de suministro enfocado en productos perecederos. Sabemos que la gestión de la cadena de suministro tiene por objetivo satisfacer al cliente y para esto integra todos sus procesos y actividades como si fueran una sola organización dando como resultado un continuo flujo de información que permite el dinamismo del proceso. Como se ha mencionado anteriormente, SCND se encarga de administrar la red de la cadena de suministro abarcando tres niveles de decisión: Operativo como lo puede ser cumplir con la demanda de los puntos de venta, Táctico en cuanto a su manejo de inventario y Estratégico para decidir abrir plantas en determinadas localizaciones. Al tener por producto un perecedero de vida útil corta y de manejo de frío obligatorio, se rectifica la necesidad de dar un manejo estratégico a este caso.

4.2. Modelo Matemático

Suposiciones

El modelo de optimización es bi-objetivo, contando con una función objetivo enfocada en costos y otra en el consumo energético del vehículo. 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).

La carne por su naturaleza perecedera requiere de una cadena de frío entre los -8 y 0 grados centígrados y de un empaque envasado al vacío para proporcionar inocuidad y longevidad al comestible. La perecebilidad se refleja en el uso indispensable de una cadena de frío ininterrumpida, la cual es considerada para este trabajo en la potencia total consumida por el

vehículo. 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 formula 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.

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 node 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

$$\text{Min} \sum_i C1L_i \times Y1L_i + \sum_j C2L_j \times Y2L_j + \sum_i \sum_t C1I_{it} \times H1I_{it} + \sum_j \sum_t C2I_{jt} \times H2I_{jt}$$

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

Restricciones

a. Inventario

1) Inventario en nodos i , en cada periodo t

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

2) Inventario en nodos j, en cada periodo t≠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

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

- 8) $X_{ijt} \geq 0$ y enteras $H1I_{it} \geq 0$ y enteras $H2I_{jt} \geq 0$ y enteras
- 9) $Y1L_i \in \{0,1\}$ $Y2L_j \in \{0,1\}$

4.3. Consideración mono-objetivo

En este apartado se considera el problema descrito bajo una óptica de un solo objetivo, es decir, cada función se analiza por aparte, esto con el fin de realizar una exploración sobre el funcionamiento del modelo. Para tal fin se hace uso del software GAMS y a continuación se muestran dos instancias propias.

La primera instancia aplicada a la función objetivo de costos de localización e inventario, se puede apreciar en la imagen siguiente junto con los resultados obtenidos de esta. Como podemos observar, las demandas de todos los puntos de venta se satisfacen usando sólo la planta #3 y no se acumulan unidades de producto para los periodos siguientes.

Figura 11

Costos de localización para plantas y puntos de venta en la instancia #1.

```

Parameters
C1L(i) costo fijo de localizacion para las plantas /i1=9600000,i2=8700000,i3=9000000/
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 13
Resultado variable H1I

	t1	t2	t3	t4
	Level			
i1	0	0	0	0
i2	0	0	0	0
i3	97323	87020	93630	89400

Figura 12
Costo Total de la función objetivo 1

```

Proven optimal solution
MIP Solution:      21462614.000000
Final Solve:      21462614.000000

Best possible:      21462614.000000
    
```

Figura 14

Resultado variable X

		t1	t2	t3	t4
		Level			
i1	j1	0	0	0	0
	j2	0	0	0	0
	j3	0	0	0	0
	j4	0	0	0	0
	j5	0	0	0	0
i2	j1	0	0	0	0
	j2	0	0	0	0
	j3	0	0	0	0
	j4	0	0	0	0
	j5	0	0	0	0
i3	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

Para la segunda instancia se varía el costo de locación de la planta #3 incrementando su valor.

Figura 15

Costos de localización para plantas y puntos de venta en la instancia #2.

Parameters

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 16

Resultado variable H1I

		t1	t2	t3	t4
		Level			
i1		0	0	0	0
i2		97323	87020	93630	89400
i3		0	0	0	0

Figura 17

Costo Total de la función objetivo 1

Proven optimal solution
 MIP Solution: 23508410.000000
 Final Solve: 23508410.000000

 Best possible: 23508410.000000

Figura 18

Resultado variable X

		t1	t2	t3	t4
		Level			
i1	j1	0	0	0	0
	j2	0	0	0	0
	j3	0	0	0	0
	j4	0	0	0	0
	j5	0	0	0	0
i2	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
i3	j1	0	0	0	0
	j2	0	0	0	0
	j3	0	0	0	0
	j4	0	0	0	0
	j5	0	0	0	0

Corriendo en el programa las instancias 1 y 2 para la función objetivo 1, se evidencia que el modelo tiene buen funcionamiento y proporciona resultados coherentes, como lo es asignar la producción a la planta más económica, y no realizar envíos anticipados ya que, al analizar sólo los costos de localización e inventario, el almacenamiento generaría sobrecosto. Cabe resaltar que se cumple con la demanda de cada punto de venta.

En la función objetivo perteneciente a costos del consumo energético, se analizan las dos mismas instancias presentadas anteriormente para su correcto análisis. La primera instancia arroja los resultados que se plasman en las siguientes imágenes y de las cuales podemos observar los manejos de inventario para plantas y puntos de venta. En H1I el programa decide acumular en inventario la capacidad productiva de su respectiva planta, esto sucede debido a que la función 1 era la que albergaba los costos de mantener inventario, en la función dos, al no tener una

consecuencia por acumular más inventario, acumula la máxima capacidad productiva de la planta. En el inventario de los puntos de venta se puede observar que se respeta la restricción de no existencia de inventario en el primer periodo.

Figura 19
Resultado Variable H1I

	t1	t2	t3	t4
Level				
i1	350000	350000	350000	350000
i2	300000	300000	300000	300000
i3	1e+06	1e+06	1e+06	1e+06

Figura 20
Resultado variable H2I

	t1	t2	t3	t4
Level				
j1	0	18000	0	0
j2	0	0	0	57240
j3	0	1760	1260	630
j4	0	0	18030	9030
j5	0	15030	0	0

También encontramos que se envían en el primer periodo de la planta 1 al punto de venta 1, 33.813 Kg de carne, esto obedeciendo a los 15.813 Kg que se necesitan para el periodo 1 y 18.000 Kg necesario para cumplir la demanda del segundo periodo, por lo que se ven en el inventario para el segundo periodo del punto de venta y se entiende por qué en el segundo periodo no se hacen envíos al punto de venta 2. En cuanto a los periodos 3 y 4 se encuentra que se hizo envío de la respectiva demanda de cada punto de venta. El punto de venta 1 sólo recibe envíos de la planta 1, como también sucede en los puntos de venta 2, 3 y 5, esto concuerda con las distancias que hay entre las plantas y puntos de venta, ya que la planta 1 es la más cercana a todos ellos, y al sólo analizar el consumo de energía que es proporcional a la distancia, esta es la opción que mejor minimiza el costo. El punto de venta #4 es más cercano a la planta dos, razón por la cuál el programa decide hacer los envíos desde allí.

Se observa que todos los envíos realizados por las plantas satisfacen las demandas de todos los puntos de venta y que los casos en los que se presentó envío anticipado correspondían a un menor costo en la función 2.

Figura 21

Resultado variable X

		t1	t2	t3	t4
		Level			
i1	j1	33813	0	15000	16500
	j2	57240	45690	117240	0
	j3	2360	0	0	0
	j4	0	0	0	0
	j5	29850	0	9000	6000
i2	j1	0	0	0	0
	j2	0	0	0	0
	j3	0	0	0	0
	j4	8850	25830	0	0
	j5	0	0	0	0
i3	j1	0	0	0	0
	j2	0	0	0	0
	j3	0	0	0	0
	j4	0	0	0	0
	j5	0	0	0	0

Figura 22

Costo total función 2

```

Proven optimal solution
MIP Solution: 2857710302.920000
Final Solve: 2857710302.920000

Best possible: 2857710302.920000
    
```

En la instancia #2 no se obtiene variación para esta función ya que el costo de localización de plantas no afecta a la función objetivo analizada.

5. Diseño y Desarrollo de la Técnica de Optimización

5.1. Selección de la técnica

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. Los algoritmos evolutivos (AE) son una búsqueda aleatoria basada en el proceso de evolución natural que se da en las especies. Allí mediante la

selección, reproducción y mutación de los individuos, los mejores candidatos sobreviven y continúan con este proceso pasando sus mejores características genéticas a sus futuras generaciones. Los MOEA, (algoritmos evolutivos multiobjetivo) son capaces de encontrar múltiples soluciones óptimas en una sola corrida, esta cantidad de soluciones proporciona variedad en los resultados. El NSGA II es un MOEA elaborado a partir del NSGA, en Deb 2002, junto con sus estudiantes, desarrolló el NSGA II y lo probó junto con otros AE en diversos problemas, la conclusión de este estudio fue satisfactoria en la mayoría de los problemas estudiados siendo notable su habilidad para converger hacia el frente de Pareto, destacándose la diversidad y el elitismo.

En la revisión de literatura no se encontraron aplicaciones del NSGA II en productos perecederos que requieran constante cadena de frío, por lo tanto, se decide hacer uso de esta técnica para el problema de SCND aplicado en carne despostada que se estudia en el presente proyecto.

5.2. Desarrollo de la técnica

Como se ha mencionado, el NSGA II es un algoritmo evolutivo que tiene como base la evolución natural para realizar una búsqueda de soluciones. Estos algoritmos son generalmente reconocidos por su efectividad en problemas multiobjetivo, ya que en su búsqueda pueden analizar simultáneamente varias posibles soluciones.

Inicialmente, se parte de una población aleatoria de soluciones P_0 que será la generación de padres con la que se creará la descendencia, a continuación, se hace el cruce dando lugar a la reproducción de los padres escogidos en el proceso anterior, de allí se pasa a la mutación donde se modifican algunas posiciones de los cromosomas resultantes del cruce o reproducción para obtener nuevas soluciones, de allí sale Q_0 . Finalmente, se unen P_0 y Q_0 para hacerles un ordenamiento no

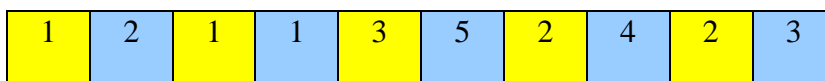
dominado, se clasifican en sus respectivos frentes y de los mejores se escogen los N individuos que integrarán la siguiente generación ($P_o(t + 1)$). Esto se repite hasta cumplir el criterio de parada. Cabe recalcar que durante el ordenamiento no dominado se pueden encontrar varias soluciones en un mismo frente, en este caso se escoge la solución que tenga menos densidad poblacional a su alrededor, lo cual permite diversificar las soluciones del problema.

Para el presente estudio se decide aplicar NSGA II a través del programa MATLAB.

Primero se genera aleatoriamente la población inicial, para ello se hace uso de la función `randperm` para crear los vectores que integrarán la población inicial. Teniendo los individuos el paso a seguir es evaluarlos en las dos funciones objetivo del problema, Transporte que es la función objetivo 2, que se encarga de minimizar los costos de energía generados en el transporte del alimento, y Costo abarcando los costos de localización y almacenamiento de inventario en la función objetivo 1.

Partiendo de la población P_t , se realiza un cruce aleatorio para la reproducción y una mutación aleatoria con probabilidad baja, teniendo en cuenta a Villegas (2003) que sugiere aplicar la mutación en pequeños porcentajes para preservar el buen funcionamiento del algoritmo. Los cromosomas serán los periodos, estos a su vez estarán conformados por los genes que serán plantas y puntos de venta, las siguientes gráficas evidencian la organización mencionada anteriormente. Después de obtener la población Q_t , se vuelven a evaluar los individuos en las funciones objetivo.

Figura 23
Cromosoma ejemplo

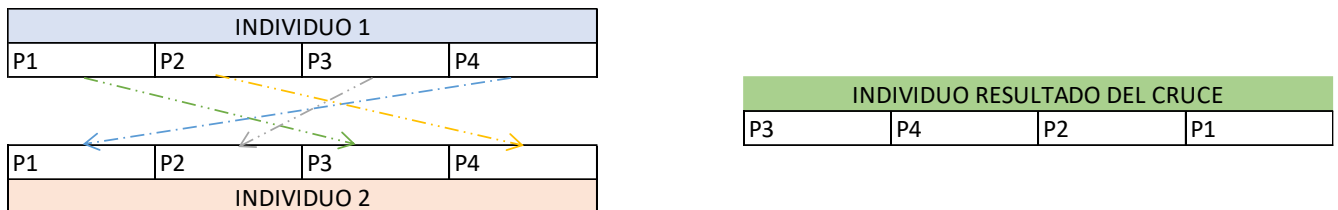


Los genes impares representados por los cuadros amarillos son las plantas de donde sale la carne despostada y los genes pares son los puntos de venta. Para el caso de la imagen se evidencia

que de la planta 1 se enviará al punto de venta 2 y 1, de la planta 2, a los puntos de venta 3 y 4, y de la planta 3 se enviará al punto de venta 5.

Figura 24

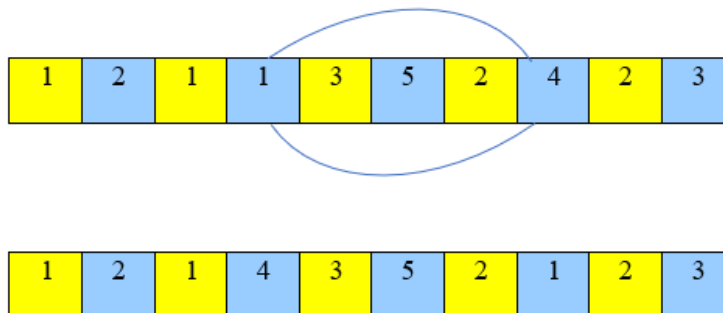
Ejemplificación del cruce aleatorio



La imagen superior evidencia un cruce aleatorio, aquí, se escogen al azar las posiciones (periodos o cromosomas) que cambiarán entre sí para dar origen al nuevo individuo. Ahora, en cuanto a la mutación aleatoria, como muestra la imagen a continuación, consiste en escoger aleatoriamente dos genes que representen puntos de venta e intercambiarlos entre sí. Como mencionamos anteriormente, la probabilidad de que un cromosoma mute, es baja.

Figura 25

Ejemplificación de mutación aleatoria



El siguiente paso es unir las poblaciones P_t y Q_t , cada una de estas de tamaño N , para obtener R_t de tamaño N . Inicialmente al unir las poblaciones de padres e hijos, quedará de tamaño $2N$, para llevarla a su tamaño requerido se hará uso del ordenamiento no dominado, aquí se usan los valores resultados de evaluar las funciones objetivo y según su valor se irán ordenando por frentes

según como sean no dominados. En el primer frente estarán los individuos sobre los cuales ningún otro ejerce dominancia, en el segundo frente se manejará el mismo razonamiento omitiendo los individuos del primer frente, para el tercer frente el procedimiento será igual, pero omitiendo los individuos de los dos frentes anteriores y así sucesivamente. Después de esto se obtienen los N individuos para seguir con la siguiente generación $P(t+1)$, esto repite tantas veces como se desee. Para el ordenamiento no dominado se hará uso de la distancia de apilamiento o crowding, en los casos que haya un empate.

5.3.Descripción de los algoritmos del NSGA II

Debido a que el problema propuesto no se encuentra en la literatura no se puede hacer una evaluación comparativa con los resultados de otro estudio, por lo tanto, se decide realizar una revisión detallada del programa verificando que se cumplan las etapas que conforman un NSGA II y confirmando que las ecuaciones del modelo matemático estén bien.

A continuación, se describen los elementos que conforman el código programado. Se elaboraron 4 programas, donde 3 de ellos (“Población descendiente”, “NSGA” y “Función objetivo”) tienen las partes del NSGA II especificadas y luego en el programa principal “Programa” se llama lo programado en los 3 apartados mencionados anteriormente.

Función objetivo: Aquí se encuentra la información del problema en cuestión, inicialmente se genera la población inicial, esta contiene la organización de qué planta a qué punto de venta se enviará el producto como se mostró en la figura 19. A partir de este, se crea el vector inventario que lleva la información de las demandas. En la línea 30 se hallan los valores de la función 1 separándolos por localización e inventario tanto para puntos de venta como para plantas, esto para hacer la optimización de la cantidad a enviar. En la línea 88 hasta 226 se establecen los comandos

para encontrar la cantidad a enviar más apropiada, para esto se itera de 20 en 20 a partir de la demanda, se analiza para cada individuo de la población el costo de localización e inventario para encontrar la cantidad ideal a enviar. Después de hallado, se saca el costo de ambas funciones. En resumen, el programa “Función Objetivo” provee la población inicial que cumple con las características del problema, evalúa su valor en las funciones objetivo y guarda el dato para utilizarlo más adelante.

Población descendiente: Inicialmente se hace una aclaración para evitar que un mismo individuo se cruce, por lo tanto, se declaran que deben ser dos individuos diferentes los escogidos como padres. En la línea 20 se establece la realización del cruce, este se hace de manera aleatoria entre los dos individuos progenitores, de modo que se intercambian sus cromosomas como se explicó más arriba. A partir de la línea 37 se establecen las condiciones para la mutación, en cada cromosoma se hace el sorteo para escoger (con una probabilidad de 1 a 100) cuáles cromosomas son los que se mutarán, la probabilidad se pide como dato de entrada al correr el programa y tiene que ser proporcionado manualmente por quien esté haciendo uso de él, esta probabilidad se recomienda que sea una cifra pequeña. Después de tener los cromosomas a mutar, dentro de estos se escoge aleatoriamente dos genes para intercambiar sus posiciones.

NSGA: Se declara cómo se hará el ordenamiento no dominado. Se hace uso de combinatoria para obtener todos los individuos a analizar y hacer su ordenamiento posteriormente. Para cada función objetivo se hace el ordenamiento no dominado. Para obtener el rango de no dominancia se escogen aleatoriamente 2 individuos entre el listado arrojado por la combinatoria y se evalúan en las dos funciones objetivo, posterior a esto se encuentra cuál es el no dominado y se asigna un número o categoría de no dominancia a cada uno, entre menor sea el número, mejor posición. Cuando se presenta un empate se utiliza la distancia de apilamiento o conglomeración, esto se encuentra plasmado en las líneas 57-88.

Programa: En esta sección se llaman todas las matrices y datos a usar, así como funciones establecidas en los apartados anteriores tal como mutación, cruce, distancia de apilamiento, etc. En la línea 74 se crean los padres Pt, función traída de “Función objetivo” y evalúa los individuos para el futuro ordenamiento previo a Rt. De 170-187 se crea Qt mediante el cruce y la mutación. A partir de 196 se procede a sacar la población Rt haciendo uso del ordenamiento no dominado establecido anteriormente.

5.4.Evaluación de la Técnica

Como etapa final se realiza un análisis de los resultados obtenidos. En las gráficas que se suministran a continuación, “A” hace referencia a la distancia de apilamiento y “M” a la probabilidad de mutación. El eje horizontal representa a la función objetivo 2 y el eje vertical pertenece a la función objetivo 1.

Figura 26

Instancia 1

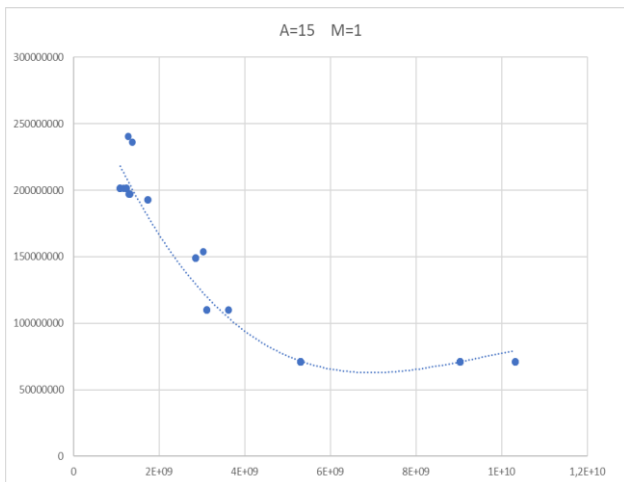


Figura 27

Instancia 2

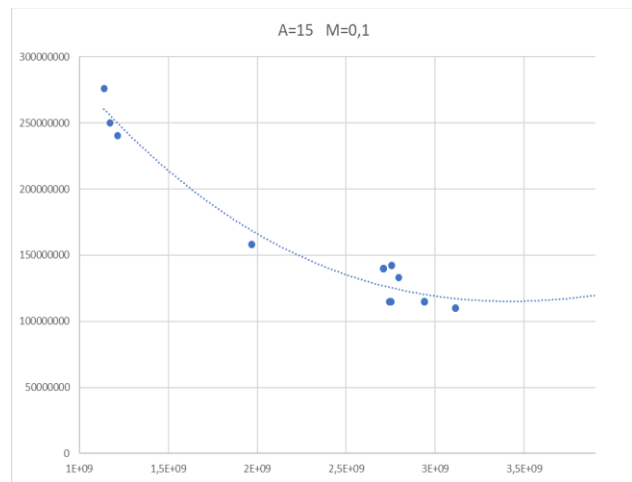
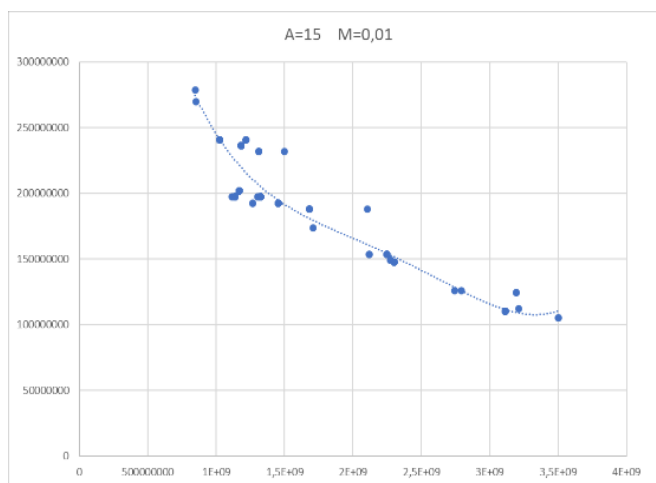


Figura 28

Instancia 3



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 $F1=1.088.577.026 COP$ $F2=201.672.116 COP$ 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 COP para el último tramo de la cadena de suministro, por lo tanto, cada kg de carne tendría un valor 3.550 COP. En cuanto a su extremo superior hallamos $F1=\$71.172.116 COP$ $F2= 10.312.041.288 COP$ dando un costo total de \$10.383.213.404 COP y de \$28.263 COP por Kg de carne despostada.

Para la instancia 2 en su primer extremo $F1=\$250.000.000$ COP $F2=\$1.170.100.683$ COP con un costo total de $\$1.420.100.683$ COP y $\$3.865$ COP por Kg, extremo final $F1=\$110.172.116$ COP $F2= 3.114.474.063$ COP, costo total $\$3.224.646.179$ COP y $\$8.777$ COP por Kg.

En instancia 3 primer extremo $F1=\$278.427.984$ COP $F2= \$845.855.867$ COP, costo total $\$1.124.283.851$ COP y $\$3.060$ COP por Kg, extremo final $F1=\$105.172.116$ COP $F2= \$3.499.819.791$ COP, costo total $\$3.604.991.907$ COP, $\$9.812$ COP 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 29

Instancia 4

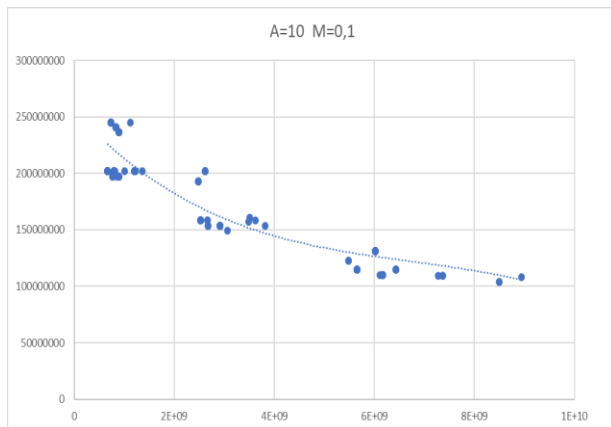
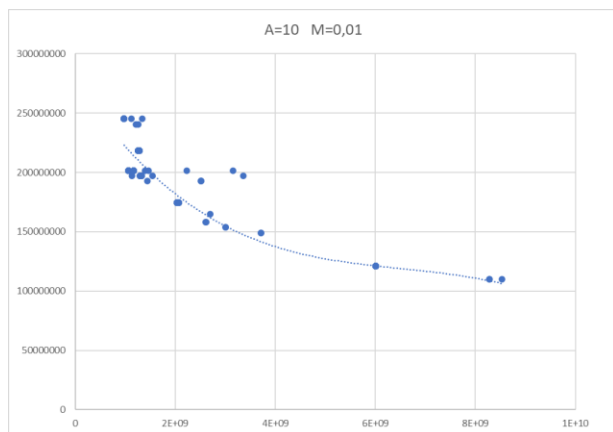


Figura 30

Instancia 5



En las instancias 4 y 5 se puede observar que tienen la misma mutación que las instancias 2 y 3 respectivamente, pero en estas últimas (4 y 5) se usó $A=10$. En las 3 situaciones analizada

anteriormente se puede denotar que a medida que se reduce la probabilidad de mutación se obtienen frentes de Pareto más visibles, situación contraria a las imágenes que se muestran en las figuras 29 y 30.

Contrastando las 4 instancias se observa que cuando hay una distancia de apilamiento mayor hay mejor comportamiento gráfico con una probabilidad de mutación menor, pero cuando se disminuye el apilamiento da mejor resultado el aumentar la mutación. Con esto se corrobora la importancia en conjunto que tiene la distancia crowding y la probabilidad de mutación para obtener mejores poblaciones de soluciones.

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

En Matlab se usó la instancia #2 presentada en el análisis mono-objetivo, en la cual la planta 3 tiene un cero de más en el costo de localización en comparación con las otras dos. En GAMS la función 1 arrojó un resultado de $\$23.508.410$ COP y la función 2 $\$2.857.710.302$ COP para un total de $\$2.881.218.712$ ($\$7.842$ COP / Kg), este valor se obtiene de sumar cada función analizada por aparte en la sección mono-objetiva. Cada una está minimizada individualmente persiguiendo distintos objetivos con configuraciones de envíos y almacenamientos diferentes, por lo cual, si se utiliza la misma configuración (la óptima para F1 o F2) en ambas funciones, claramente los resultados empeorarían en el otro criterio y así en el costo total.

En Matlab (comparando el menor valor hallado $\$3.060$ COP / Kg), se ve la mejora que aporta el estudio multi-objetivo en contraste con el mono-objetivo. Analizar cada función por aparte

puede llegar a soluciones coherentes, pero al optimizar las funciones de manera integrada se pueden encontrar soluciones óptimas. Hoy en día es esencial el análisis multicriterio, las organizaciones a la hora de tomar decisiones o hacer sus planeaciones deben tener en cuenta simultáneamente todos los factores que los afectan para ser más competitivos en el mercado que se desenvuelve en la globalidad y cambia constantemente.

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, logrando la formulación del modelo matemático, definición y desarrollo de la técnica NSGA II para el 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.
- 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.
- 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, sobre todo en las de carácter perecedero con vida

útil corta, como una herramienta para mejorar tanto económica como medio ambientalmente

- 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.
- 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 percibibilidad 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.

7. Recomendaciones

Para futuras investigaciones sería importante analizar los eslabones faltantes de la SC para una mejor comprensión de toda la cadena de suministro de la carne. También sería conveniente hacer el análisis de la cadena dándole mayor énfasis o ponderación a la función objetivo 2 y estudiar las variaciones que presente el modelo.

Referencias Bibliográficas

- 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%20LA%20CADENA.pdf?sequence=1>>
- Arosa-Carrera, C., Vargas-Bacci, M. and Barrera-Rojas, L., 2019. *Innovación En La Cadena De Suministro, Desde La Perspectiva Del Productor De Carne Bovina*. [online] Revistaespacios.com. Available at: <<https://www.revistaespacios.com/a19v40n37/19403704.html>> [Accessed 26 January 2021].
- 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.
- F. Dabbene, P. Gay, N. Sacco, Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, Part I: Background and methodology, *Biosystems Engineering*, Volume 99, Issue 3, 2008, Pages 348-359, ISSN 1537-5110,
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.11.011>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511007003510>)
- 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 & Ariafar, Shahram & Tang, S. & Mohd ariffin, Mohd khairol 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>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262033105X>)
- 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>
- Víctor Martínez-Cagigal (2022). Non Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/65494-non-sorting-genetic-algorithm-ii-nsga-ii>), MATLAB Central File Exchange.
- Montes Causil, O., 2015. *Producción De Carne De Res Porcionada Empacada Al Vacío Para Integrar La Cadena Productiva Y El Servicio Ofrecido Por La Empresa Red Cárnica S.A.S.* [online] Repositorio.unicordoba.edu.co. Available at: <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/1051>
- Nguyen Quoc Viet, Behzad Behdani & Jacqueline Bloemhof (2020) “Datadriven process redesign: anticipatory shipping in agro-food supply chains”, *International Journal of Production Research*, 58:5, 1302-1318, DOI: 10.1080/00207543.2019.1629673.
- Patidar, R. and Agrawal, S. (2020), "A mathematical model formulation to design a traditional Indian agri-fresh food supply chain: a case study problem", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 27 No. 8, pp. 2341-2363. <https://doi.org/10.1108/BIJ-01-2020-0013>
- Rebollar Rebollar, s., Albarran Portillo, b., Garcia Martinez, a., Hernandez Martinez, J., González Razo, F. and Guzman Soria, E., 2011. *La Cadena Productiva De Ganado Bovino En El Sur*

Del Estado De México. [online] Ri.uaemex.mx. Available at:
<<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/38655>>

Reza Zanjirani Farahani, Shabnam Rezapour, Tammy Drezner, Samira Fallah, Competitive Supply Chain Network Design: An Overview of Classifications, Models, Solution Techniques and Applications, Omega, <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.006>

Tjendera Santoso, Shabbir Ahmed, Marc Goetschalckx, Alexander Shapiro, A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty, European Journal of Operational Research, Volume 167, Issue 1,2005, Pages 96-115, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.046>.

Tsao, Yu-Chung. (2013). Designing a Fresh Food Supply Chain Network: An Application of Nonlinear Programming. Journal of Applied Mathematics. 2013. 1-8.
10.1155/2013/506531.

Uribe, María & Arboleda, Lubian. (2016). Análisis sobre el incumplimiento de la normatividad vigente frente a la cadena de frío en la red de distribución de las pymes del sector cárnico de bovinos en bogotá. Revista ingeniería, matemáticas y ciencias de la información. 3. 59-67. [10.21017/rimci.2016.v3.n6.a15](https://doi.org/10.21017/rimci.2016.v3.n6.a15).

Villegas Juan (2003). Problemas de localización Multiobjetivo. [online]

<https://juangvillegas.files.wordpress.com/2011/08/tesis1.pdf>

Weiwei Gong, Daoliang Li, Xue Liu, Jun Yue & Zetian Fu (2007) Improved two-grade delayed particle swarm optimisation (TGDPSO) for inventory facility location for perishable food distribution centres in Beijing, New Zealand Journal of Agricultural Research, 50:5, 771-779, DOI: [10.1080/00288230709510350](https://doi.org/10.1080/00288230709510350)

Wentao Wu, Paul Cronjé, Pieter Verboven, Thijs Defraeye, Unveiling how ventilated packaging design and cold chain scenarios affect the cooling kinetics and fruit quality for each

single citrus fruit in an entire pallet, Food Packaging and Shelf Life, Volume 21, 2019, 100369, ISSN 2214-2894, <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100369>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214289419300614>)

Willem A. Rijpkema Roberto Rossi Jack G.A.J. van der Vors, (2014), "Effective sourcing strategies for perishable product supply chains", International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Vol. 44 Iss 6 pp. 494 – 510