



Planeación de la distribución del aguacate Hass colombiano de exportación bajo un enfoque de sostenibilidad

Paula Andrea Nisperuza Canabal

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería

Director

Juan Guillermo Villegas Ramírez, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Nisperuza Canabal et al., 2024)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Nisperuza Canabal, P. A., Villegas Ramírez, J. G. & Álvarez López, G. A. (2024). <i>Planeación de la distribución del aguacate Hass colombiano de exportación bajo un enfoque de sostenibilidad</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Maestría en Ingeniería, Cohorte XXXII.

Grupo de Investigación Analítica e Investigación para la Toma de Decisiones (ALIADO).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).

Asesor: Germán Andrés Álvarez López



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a Dios, quien hizo posible desarrollar esta investigación, por permitirme llegar hasta el final a pesar de cada obstáculo presentado, por darme la fuerza y la templanza hasta el último día.

Estoy inmensamente agradecida con las personas que me inspiraron a realizar este proceso de aprendizaje, aquellos que son mis ejemplos a seguir académicamente, especialmente agradezco a Juan Guillermo Villegas y a German Álvarez, mis directores en este trabajo, quienes me impulsaron académica y moralmente en cada etapa de este proceso, gracias por dedicar su tiempo, su apoyo, sabiduría y experiencia.

Finalmente agradezco a todas aquellas personas que de manera directa e indirecta formaron parte de esta investigación, a mi familia, docentes y amigos, ¡Sin ustedes no hubiera sido posible!

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract	8
1. Introducción	10
2. Revisión de literatura	12
2.1 El papel de la logística en los procesos productivos	14
2.2 Transporte: Multimodalidad e intermodalidad.....	16
2.3 Diseño de redes de distribución para frutas y vegetales	18
2.4 Técnicas utilizadas en el diseño de redes de distribución de productos percederos.....	19
3. Red de distribución del aguacate Hass	21
3.1 Caracterización de red de distribución del aguacate Hass en Colombia	21
3.1.1 Producción mundial y nacional de la cadena de suministros del aguacate. .	21
3.1.2 Exportaciones y mercados a nivel mundial y nacional	24
3.1.3 Consumidores / mercados.....	24
3.1.4 Actores de la cadena de suministro del aguacate en Colombia.	24
3.1.5 Normatividad para exportación.....	26
3.1.6 Descripción de la cadena de suministro del aguacate Hass en Colombia.	28
3.1.7 Principales puertos importantes para exportación aguacate.....	30
3.1.8 Procesos transversales a todas las actividades de la cadena de suministro del aguacate.....	31
3.1.9 Diagnóstico y conclusiones sobre la cadena de suministros del Aguacate en Colombia	32
3.1.10 Retos y desafíos de la cadena de suministro de aguacate	33

4. Modelo de flujo de redes Multiobjetivo	34
4.1 Enfoque de solución del modelo de flujo de redes Multiobjetivo: ϵ – restricciones	42
5. Caso de estudio.....	42
6. Resultados y análisis	49
7. Conclusiones y recomendaciones.....	67
Referencias	69

Planeación de la distribución del aguacate Hass colombiano de exportación bajo un enfoque de sostenibilidad

Resumen

El aguacate Hass se ha convertido en uno de los productos mayor demandado a nivel mundial. En Colombia, el aguacate Hass ha mostrado un constante crecimiento tanto en áreas plantadas como en su producción. Esta fruta ha ganado gran participación en las exportaciones agrícolas realizadas por Colombia, las cuales han aumentado sostenidamente a partir del año 2014, esto debido a las tendencias en los hábitos alimenticios alrededor del mundo y la capacidad del país para cosechar este fruto casi durante todo el año.

En los últimos años se ha comprobado que los productos agrícolas frescos como frutas y vegetales tienden a deteriorarse en su proceso de distribución. Se considera que el aguacate dentro de la categoría de productos perecederos de frutas y vegetales presenta algunos desafíos extra durante toda su cadena de suministro, ya que se caracteriza porque es altamente susceptible a las infecciones latentes que se expresan durante la maduración, así como a las enfermedades fisiológicas y trastornos asociados con el deterioro por frío originados en los procesos de postcosecha. Colombia presenta condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo y cosecha del aguacate Hass durante todo el año, sin embargo, aún no existe una red de distribución eficientemente estructurada que aporte a la mejora de los procesos logísticos de dicho proceso. Esto a su vez, genera mayores pérdidas del producto, bajos rendimientos económicos en las organizaciones e impacta de manera negativa la sostenibilidad ambiental del país con altas emisiones de CO₂.

Por lo tanto, en este trabajo se propone una herramienta de apoyo a la decisión para el diseño sostenible de la red de distribución postcosecha del aguacate Hass en Colombia soportada en el transporte intermodal cuando este sea necesario. En el modelo propuesto se buscan tres objetivos fundamentales dentro de los sistemas de distribución. En primer lugar y como objetivo más común en este tipo de decisiones se maximiza la utilidad asociada al proceso de distribución, con lo cual se trata la sostenibilidad económica. En segundo lugar, desde la perspectiva medioambiental, se busca minimizar la huella de carbono generada en dicho proceso. Finalmente, en tercer lugar, como característica distintiva de este trabajo se incluye la minimización de la cantidad de producto perdido, no en términos económicos, sino como una característica en sí misma, esto, en concordancia con el objetivo de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas (ODS 12) de producción y consumo responsable, con el cual se busca reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha antes del año 2030. Esta herramienta está basada en un modelo de optimización multiobjetivo. El modelo planteado puede verse como un problema de flujo de costo mínimo multiobjetivo multiperiodo con pérdidas en los arcos y en el almacenamiento, el cual se modela haciendo uso de la programación lineal entera mixta.

Este modelo se verificó a través de un estudio de caso de una cadena de suministro de Aguacate Hass en una subregión de Antioquia en Colombia. Además, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar las diferentes estrategias de distribución y las compensaciones entre los objetivos estudiados en distintos escenarios de operación, evaluando entre otros, los beneficios que puede traer a esta cadena el uso de transporte intermodal.

Los resultados del modelo arrojaron que existe relación directa entre los tres objetivos evaluados y puestos en conflicto y se encontraron puntos de compensación eficientes que permitieron un buen porcentaje de logro para los objetivos. Además, se comprobó como el transporte intermodal ofrece una solución a los problemas logísticos y operacionales presentados en la cadena de suministros del aguacate Hass en el país.

Palabras clave: red de distribución, transporte intermodal, aguacate Hass, logística agrícola, sostenibilidad en cadenas de suministro

Abstract

The Hass avocado has become one of the most demanded products worldwide. In Colombia, the Hass avocado has shown constant growth both in planted areas and in its production. This fruit has gained a large share in agricultural exports made by Colombia, which have increased steadily since 2014, due to trends in eating habits around the world and the country's ability to harvest this fruit almost throughout the year.

In recent years it has been verified that fresh agricultural products such as fruits and vegetables tend to deteriorate in their distribution process. Avocado within the category of perishable fruit and vegetable products is considered to present some extra challenges throughout its supply chain, as it is characterized by being highly susceptible to latent infections that are expressed during ripening, as well as infections, physiological diseases and disorders associated with cold spoilage originating in postharvest processes. Colombia presents optimal conditions for the development of the cultivation and harvest of the Hass avocado throughout the year, however, there is still no efficiently structured distribution network that contributes to the improvement of the logistics processes of said process. This, in turn, generates greater product losses, low economic returns in organizations and negatively impacts the country's environmental sustainability with high CO₂ emissions.

Therefore, this work proposes a decision support tool for the sustainable design of the Hass avocado post-harvest distribution network in Colombia supported by intermodal transportation when necessary. In the proposed model, three fundamental objectives are sought within distribution systems. Firstly, and as the most common objective in this type of decisions, the utility associated with the distribution process is maximized, which is economic sustainability. Secondly, from an environmental perspective, we seek to minimize the carbon footprint generated in said process. Finally, thirdly, a distinctive feature of this work includes the minimization of the amount of product lost, not in economic terms, but as a characteristic in itself, in accordance with the United Nations sustainable development goal (SDG 12) of production and consumption responsible, which seeks to halve per capita global food waste at the retail and consumer level and reduce food losses in production and supply chains, including post-harvest losses by 2030. This tool is based on an approach multi-objective optimization model. The proposed model can be viewed as a multi-objective, multi-period, minimum cost flow problem with arc and storage losses, which is modeled using mixed integer linear programming.

This model was verified through a case study of a Hass avocado supply chain in a subregion of Antioquia in Colombia. In addition, a sensitivity analysis is carried out to evaluate the different distribution strategies and the trade-offs between the objectives studied in different operational scenarios, evaluating, among others, the benefits that the use of intermodal transport can bring to this chain.

The results of the model demonstrated that there is a direct relationship between the three objectives evaluated and placed in conflict and efficient compensation points were found that allowed a good percentage of achievement of the objectives. In addition, it was proven how intermodal transportation

offers a solution to the logistical and operational problems that arise in the Hass avocado supply chain in the country.

Keywords: distribution network, intermodal transportation, Hass avocado, agricultural logistics, sustainability in supply chains.

1. Introducción

El crecimiento del sector agrícola colombiano parece prometedor en los próximos años, esto debido a la gran demanda de productos agrícolas proveniente principalmente del mercado internacional, generado por la búsqueda de la mejora en la calidad de la dieta y el incremento en la población mundial (FINAGRO, 2020). Junto con el crecimiento dado, el sector agrícola ha presentado algunos cambios en los últimos 10 años. Mientras que en el año 2011 los productos con mayor dinámica exportadora en Colombia fueron el café, las flores y el banano (FINAGRO, 2020), las principales frutas exportadas entre enero y mayo de 2019 fueron el banano con una participación del 74,97%, seguido por, el aguacate, la uchuva, la gulupa, la lima tahití, la naranja y la granadilla (ANALDEX, 2019).

El aguacate Hass es una fruta que ha ganado gran participación en las exportaciones agrícolas realizadas por Colombia, las exportaciones han aumentado sostenidamente a partir del 2014 (MINAGRICULTURA, 2018), esto debido a las tendencias en los hábitos alimenticios alrededor del mundo y la capacidad del país para cosechar este fruto casi durante todo el año (ProColombia, 2018). Así, actualmente Colombia es el décimo país exportador, y el cuarto productor mundial de aguacate Hass. Las exportaciones pasaron de US\$10 millones en el 2015 a US\$90 millones en el 2019, con la Unión Europea como principal destino. Países Bajos, Reino Unido, España y Bélgica concentran 89% de las ventas internacionales (SAC, 2020). De acuerdo con estimaciones del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, Corpohass y ProColombia, la expectativa de crecimiento en las ventas internacionales para el año 2020 estuvo en una cifra cercana a los US\$120 millones (ProColombia, 2020).

El sector agrícola es uno de los que más aporta al producto interno bruto (PIB) de Colombia, sin embargo, es uno de los más abandonados en el desarrollo de procesos y prácticas logísticas y fitosanitarias (SAC, 2020). Esto conlleva a que, en el caso del aguacate Hass por ejemplo, por cada \$100 pesos de venta los productores de Aguacate Hass gastan \$11 pesos en el proceso logístico (ANALDEX, 2019).

El transporte es el elemento individual más importante de los costos logísticos (Zanjarini, Rezapour y Kardar, 2011), de tal manera que impacta en el nivel de servicio al cliente. La planificación del transporte desempeña un papel clave en la gestión del sistema logístico. La ruta que sigue un producto desde el fabricante hasta el usuario final es lo que se conoce como canal o red de distribución (Ghiani, Laporte y Musmanno, 2004).

Básicamente existen seis opciones para mover productos de un lugar a otro, dentro de los cuales se encuentran el transporte por carretera, ferrocarril, aire, agua y tuberías y el transporte digital o electrónico. Para hacer llegar los bienes y servicios a los clientes se podría seleccionar uno o más de estos seis modos distintos. Sin embargo, no todos los modos de transporte pueden ser viables para todos los productos.

Un aspecto fundamental que considerar dentro de los procesos logísticos es la naturaleza del producto. La naturaleza física de un producto afecta en gran medida casi todos los frentes de los sistemas logísticos y distribución, incluyendo el embalaje, la manipulación de materiales, el almacenamiento y el transporte. El costo y la estructura de una red de distribución para un producto determinado son directamente influenciados por las características particulares del producto tales como fragilidad, toxicidad, característica perecedera, entre otras (Rushton, Crouche y Baker, 2006). Estudiar y diseñar la red de distribución de un producto no perecedero no es igual de complejo que estudiar y diseñar la

red de distribución de un producto perecedero, ya que este último tiene requisitos adicionales relacionados a los procesos de transporte, almacenamiento y manipulación (Zanjarini, Rezapour y Kardar, 2011), especialmente el aguacate, el cual se considera que, dentro de la categoría de productos perecederos de frutas y vegetales, presenta algunos desafíos extra durante toda su cadena de suministro. Se caracteriza porque es altamente susceptible a las infecciones latentes que se expresan durante la maduración, así como a las enfermedades fisiológicas y trastornos asociados con lesiones por frío (Gamble et al., 2010).

Los alimentos perecederos como frutas y vegetales toman cada día más importancia en la sociedad debido a su impacto en la vida humana (Darestani y Hemmati, 2019). En particular, el segundo objetivo de desarrollo sostenible propuesto por las Naciones Unidas para el año 2030 es “Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible” (Naciones Unidas, 2015), para lo que se recomienda reducir el desperdicio mundial de alimentos y apoyar a los agricultores locales.

Por otra parte, de acuerdo con las estadísticas de las Naciones Unidas (2015), un tercio de los alimentos del mundo se desperdician mientras 821 millones de personas están desnutridas. Así mismo, el Departamento Nacional de Planeación (2016), indica que el 15,18% de toda la oferta mundial de alimentos destinados al consumo humano son desperdiciados anualmente por problemas en los canales de distribución y cadenas de suministro de los productos.

Lin, Rudy, Negenborn y Lodewijks, (2016) afirman que una mejor planificación y control de las actividades de transporte aportarían a que la cantidad de desperdicio de productos perecederos fuera reducida. Dentro de esta planificación y control del transporte son muchas las decisiones que deben tomarse para el diseño de la red de distribución. Por ejemplo, una decisión importante es la selección de los modos de transporte a usar de manera que se genere el mayor número de beneficios en términos de utilidades, huella de carbono y calidad del producto transportado.

Así, este trabajo propone una herramienta de apoyo a la decisión para la planeación de la distribución del aguacate Hass colombiano de exportación, bajo un enfoque de sostenibilidad soportada en el transporte intermodal cuando este sea necesario. El modelo propuesto busca la consecución de tres objetivos fundamentales dentro de los sistemas de distribución. El primer objetivo y comúnmente usado para este tipo de problemas es la maximización de la utilidad asociada al proceso de distribución, con lo cual se trata la sostenibilidad económica. El segundo objetivo, desde la perspectiva medioambiental, es minimizar la huella de carbono generada en todos los subprocesos que hacen parte de la distribución del producto y en tercer lugar como elemento distintivo de este trabajo, se incluye la minimización de la cantidad de producto perdido en concordancia con el objetivo de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas (ODS 12) de producción y consumo responsable, con el cual se busca reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha antes del año 2030.

Las pérdidas de producto, recientemente han adquirido gran importancia dentro de las cadenas de suministro agroalimentarias para tratar la sostenibilidad, estas pérdidas representan un gran problema hoy en día, ya que un porcentaje considerable de la población mundial todavía enfrenta hambre, desnutrición y otras consecuencias relacionadas (Yadav et al., 2022). Es importante resaltar que las pérdidas de producto en este modelo no se trabajan en términos económicos como normalmente se

han trabajado en la literatura, sino, como una característica estudiada en sí misma, tal como lo plantea Ivo de Carvalho et al., (2022), cuyo estudio afirma que, para trabajar la sostenibilidad dentro de una cadena de suministro, la cantidad de residuos o pérdidas dentro el sistema se debe considerar como una característica en sí misma. Finalmente, este estudio está basado en un modelo de optimización multiobjetivo. El modelo planteado puede verse como un problema de flujo de costo mínimo multiobjetivo multiperiodo con pérdidas en los arcos y en el almacenamiento, el cual se modela haciendo uso de la programación lineal entera mixta.

2. Revisión de literatura

Esta sección aborda estudios y trabajos desarrollados e implementados en el ámbito de las redes de distribución de productos perecederos y su relación con el proceso de transporte, específicamente con el transporte intermodal. Se describen los resultados de la revisión de literatura correspondiente, los aspectos y variables investigadas, así como las principales metodologías de análisis usadas.

El proceso de la adquisición de la información bibliográfica se hizo de manera estructurada usando las bases de datos Google Académico y Elsevier Scopus. Se usaron tres ecuaciones de búsqueda: 1. KEY ("transport" AND "intermodal" OR "multimodal" AND "perishable"); 2. KEY ("network" AND "distribution" AND "perishable") y 3. KEY ("transport" OR "intermodal" OR "multimodal" OR "network" OR "distribution" OR "perishable product"). Los ítems principales de la búsqueda de información para esta revisión de literatura son los mostrados en la **Figura 1**.

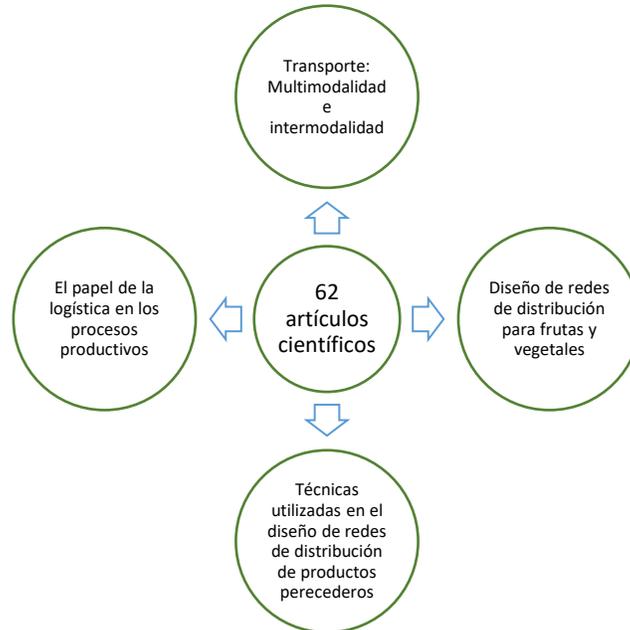


Figura 1. Componentes de la revisión de literatura

Estos 62 artículos científicos encontrados en la revisión de literatura con las tres ecuaciones de búsqueda se clasifican en los aspectos y variables investigadas que se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Aspectos y variables investigadas en revisión de literatura

Aspecto o variable investigada	Número de artículos referentes
Factores, efectos y problemas del uso del transporte intermodal/multimodal en productos perecederos	4
Optimización y modelación de transporte intermodal y multimodal en productos perecederos	6
Gestión de la cadena de suministros de productos perecederos	12
Sistemas de localización (identificación de radiofrecuencia) y ruteo	2
Planeación y programación de la producción, estimaciones y pronósticos	4
Sistemas de inventarios, puntos de pedido y reabastecimiento en productos perecederos	4
Internet de logística perecedera	1
Revisiones de literatura-transporte intermodal en la distribución de mercancías	2
Diseño de redes de distribución para productos perecederos (Ubicación, rutas, inventarios)	11
Diseño y planificación de redes de distribución con transporte intermodal - otros productos	1
Impacto del transporte intermodal en procesos de distribución	6
Transporte intermodal para distribución de productos perecederos	9
Total	62

Así mismo, en esta revisión de literatura se obtuvo que las principales metodologías de análisis de optimización para las redes de distribución de productos perecederos fueron las mostradas en la **Figura 2. Principales metodologías de optimización usadas en revisión de literatura**, siendo la programación multiobjetivo la más usada.

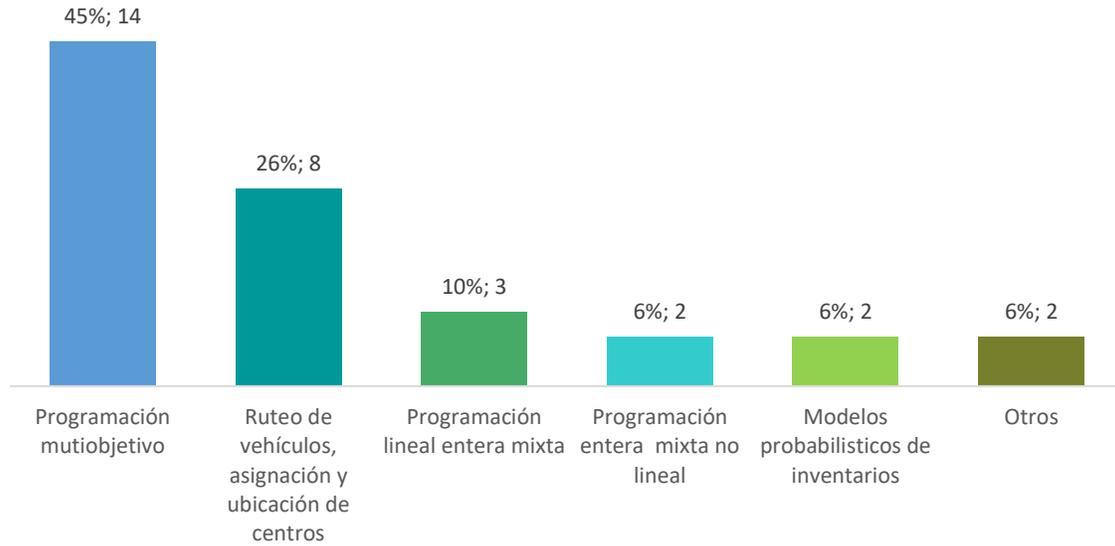


Figura 2. Principales metodologías de optimización usadas en revisión de literatura

2.1 El papel de la logística en los procesos productivos

La logística como parte integral de cada proceso productivo permite a las empresas llevar los productos correctos al lugar correcto, en el momento correcto, en las condiciones correctas y al costo correcto (Leinbach y Capineri, 2007). El rol del transporte dentro de la logística de cada organización es fundamental, es vital para que cada operación empresarial sea efectiva en casi todos los sectores de la economía. Una cuarta parte de los costos logísticos generales son asociados al transporte, por lo que su gestión se convierte en uno de los aspectos más importante en logística (Grabara, Kolcun y Kot, 2014). Las decisiones relacionadas con el transporte son diversas y complejas, van desde utilizar un transporte propio o externo, las rutas que deben ser usadas, y la selección de los contenedores, los vehículos, los modos de transporte, entre otros.

La investigación de operaciones se ha centrado principalmente en los problemas de transporte unimodales, tales como el ruteo de vehículos (VRP). Desde el año 2004 ha estado surgiendo la investigación del transporte intermodal como un nuevo campo de aplicación de la investigación de operaciones (Macharis y Bontekoning, 2004). El transporte intermodal (TI) es un tipo de transporte multimodal en el cual se usan como mínimo dos medios de transporte para una única unidad de carga. Sin embargo, este es un término que ha estado en constante evolución, hoy día es considerado como el transporte de mercancías puerta a puerta por dos o más modos de transporte considerando una unidad de carga (Jaržemskiene, 2010). El transporte intermodal aporta medidas para reducir las barreras que tradicionalmente son creadas por los diferentes modos de transporte por separado. El TI también reduce el consumo de energía, el impacto ambiental y fomenta un uso más racional de las infraestructuras (Colicchia, Creazza y Dallari, 2017). Para tratar el TI es necesario considerar aspectos tales como la sostenibilidad, tecnologías de información (E-commerce) y la globalización (Leinbach y Capineri, 2007). En particular, la sostenibilidad es un asunto de suma importancia cuando se habla de transporte, ya que engloba un conjunto de políticas que ayudan a garantizar que los procesos relacionados con el transporte enfrentan retos como el control de emisiones de dióxido de carbono, que son perjudiciales para los entornos ambientales, locales y globales, el uso no controlado de

energía y recursos petroleros finitos, y el impacto en las cadenas de suministro (Leinbach y Capineri, 2007).

Es claro que todas las cadenas de abastecimiento son afectadas de una manera u otra por los procesos de transporte generados dentro de las mismas, ya que este es el nexo o conexión entre todas las etapas de la producción, desde la transformación de las materias primas hasta la distribución de los bienes y los servicios en el mercado (Nijkamp, 2010). Dentro de las cadenas de suministros más afectadas por los procesos de transporte se encuentra especialmente la cadena de productos perecederos; generalmente el transporte de productos perecederos se realiza por carretera, que es una de las fuentes donde el producto está más expuesto a sufrir daño mecánico, el cual se manifiesta como pérdida de calidad (Buelvas, Nisperuza, Hernandez, y Lopez, 2018), eso sumado a otros riesgos potenciales tales como futuros impuestos ecológicos, riesgos de robos y aumento de los costos. Estas son algunas de las principales razones por las que es necesario estudiar y explorar nuevas alternativas logísticas como el transporte intermodal (Almada-Lobo et al., 2013).

Se consideran productos perecederos aquellos que son susceptibles a una diversidad de factores, como la temperatura, los gases atmosféricos y las vibraciones inducidas durante el transporte (Sittipod, Swasdee, Singh, y Singh, 2009). Normalmente el deterioro o degradación de tales productos depende de las características internas y externas que los afectan y el período de tiempo en que están sujetos a estas características, por ejemplo la temperatura y la humedad, entre otras (Manouchehri, Shahandeh, y Kadivar, 2020).

La cadena de abastecimiento de alimentos perecederos conlleva innumerables retos y desafíos en la ejecución de los procesos de almacenamiento, transporte y distribución. Yakavenka, Mallidis, Vlachos y Iakovou, (2019), afirman que los problemas más apremiantes generados en la cadena de suministro de los productos perecederos son los desperdicios de alimentos y los problemas ecológicos y ambientales. Dentro de estas categorías destacan, los 170 millones de toneladas aproximadas de emisiones de CO₂ en la producción y eliminación de desperdicios de alimentos, el 15% de combustible fósil mundial usado en la preservación de calidad de los productos perecederos y el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero generados en todo el mundo, producidos por la gestión de esta cadena de suministro.

Los procesos relativos al transporte intermodal tienen una mayor complejidad derivada de usar más de un modo de transporte, donde cada medio tiene sus características específicas, a pesar de esto, Macharis y Bontekoning, (2004), afirman que hasta el año 2004, muchos de estos problemas no se habían abordado ampliamente mediante técnicas de investigación de operaciones.

Según Kelleher, El-Rhalibi y Arshad, (2003), los autores que han tratado el transporte intermodal principalmente se han centrado en los siguientes temas o variables con el fin de brindar soluciones óptimas al transporte de carga: (i) tiempo de contenedor, tipo y capacidad; (ii) peso y tamaño de la carga; (iii) tiempos de entrega, prioridad de envío y preferencia por un modo de transporte específico; (iv) limitaciones geográficas regionales; (v) los puntos de origen y destino de la carga; y (vi) la infraestructura disponible.

El objetivo principal que se tiene al modelar sistemas de transporte intermodal es mejorar la competitividad del sistema. Moyano-Fuentes y Agamez-Arias, (2017) definen tres focos principales en los que se ha basado el desarrollo de la modelación de sistemas de transporte intermodal: (i) flete, modo de transporte y planificación del vehículo; (ii) terminales intermodales y actividades logísticas (iii) rutas de transporte y costes externos.

Por otra parte, Jaržemskiene, (2010), afirma que el transporte intermodal generalmente es tratado como un problema de diseño de redes. El diseño de redes es un problema que principalmente es aplicado al transporte, la logística, las telecomunicaciones, el diseño del sistema de energía y la planificación de la producción. En el diseño de redes, varios productos, ya sean, bienes, personas o información son trasladados desde un origen a un destino, a través de arcos de una red que tiene limitaciones de capacidad, costos fijos y costos variables (Crainic, 2002).

2.2 Transporte: Multimodalidad e intermodalidad

Con el fin de impulsar el comercio internacional, el desarrollo regional e integrar el territorio, la Vicepresidencia de la República y el Ministerio de Transporte de Colombia, desarrollaron el Plan Maestro de Transporte Intermodal (PMTI) (FEDESARROLLO, 2015). Sin embargo, son diversos los problemas que experimenta el PMTI en el momento de implementar un sistema intermodal de carga en el país. Según las cifras de la Cámara Colombiana de Infraestructura (CCI) en el año 2014, en Colombia por problemas de articulación entre los modos ferroviario y fluvial solo se alcanza a movilizar el 1,5% de mercancías mediante un sistema multimodal, mientras que en Europa el sistema multimodal mueve el 60% de las mercancías (Duque-Escobar, 2014).

Algunos casos de aplicación de transporte intermodal han comenzado a tener lugar en el país. A inicios del año 2020 la Alianza de Negocios Maersk-Broom Group y OPL, realizó la primera operación logística multimodal para aguacate Hass en contenedor Reefer con atmósfera controlada (AC) en Colombia. El proceso inició con un viaje terrestre hasta La Dorada (Caldas), en donde luego se realizó conexión ferroviaria que posteriormente dirigió el contenedor al Puerto de Santa Marta, lugar en el que MAERSK lo embarcó en una de sus motonaves con destino final Rotterdam en Holanda. Usaron flota propia con tecnología a gas, que permite que sus servicios logísticos sean ecoamigables. Esta operación permite evidenciar un gran potencial en la construcción e implementación de modelos operativos intermodales que vinculen camión, río, tren y transporte marítimo como una alternativa eficiente (El Herald, 2019; El Universal, 2019). Especialmente en un país que requiere y demanda soluciones logísticas que generen competitividad y al mismo tiempo generen mejoras en los tiempos de ciclo y los costos logísticos de sus clientes y productos. Sin embargo, esta operación resulta anecdótica y no se ha logrado un flujo de este tipo en operación regular (Nope Zambrano, 2020)

Con el uso del transporte intermodal se logran repartir cargas, para que los problemas que se generan en este proceso, ya sean de tipo ambiental, de costos, de calidad en los productos, de seguridad u otros, se traten de manera balanceada. Cada modo de transporte por separado lleva consigo problemas que lo hacen de cierta manera menos sostenible o rentable. El transporte terrestre y aéreo pueden contaminar el aire y el sistema marítimo a largo plazo puede contaminar nuestras fuentes hídricas. El impacto ambiental puede variar dependiendo de las opciones de transporte que se utilicen, por ejemplo, el transporte de una tonelada por kilómetro de un producto perecedero en Estados Unidos genera 1000 g de CO₂ si es vía aérea, 180 g de CO₂ si es vía terrestre y 18 g de CO₂ si es vía férrea (Rossi et al., 2021).

Con relación al transporte y los diferentes medios usados para mover bienes y servicios de un lado a otro, son muchos los trabajos y herramientas que han sido desarrolladas a través de los años. En el año 2002 los sistemas de transporte que usaban más de un modo de transporte ya habían adquirido una notable importancia, debido a su aporte en la reducción de costos en las organizaciones. Así lo

afirman Cartisano y Rusoo, (2002), quienes se enfocaron en realizar un modelo intermodal carreteramar que estimara el costo y rendimiento de un centro específico en el sistema de transporte. Malavasi, Quattrini y Ricci, (2006) desarrollaron un modelo basado en la teoría de colas, que permitió calcular el tiempo de tránsito para distintas terminales. Más tarde, Ge-feng, Guang-bin, Yi-jun y Wen-guo, (2008) considerando la incertidumbre difusa de la red de transporte intermodal, mediante un modelo de programación lineal entero trabajaron el problema de ubicación de las terminales de transferencia de ferrocarril / carretera.

Son diversas las líneas tratadas dentro el transporte intermodal, una de las más importantes ha sido el transporte de carga, con el cual se ha buscado reducir los impactos medioambientales negativos y desarrollar la economía de regiones y países (Yamada, Frazila Russ, Castro y Taniguchi, 2009). Yamada et al., (2009) propusieron un modelo para planificar estratégicamente el transporte, específicamente en el desarrollo de terminales de carga y diseño de redes interregionales de transporte de carga.

Por su parte los productos perecederos también han tomado mucha fuerza en los últimos años cuando se trata de transporte, estos han ocupado una parte fundamental dentro de la logística de la cadena de abastecimiento (Abbassi, Elhilali y Boukachour, 2018). Opara y Pathare, (2014) afirman que los daños generados en los productos perecederos como frutas y vegetales se originan en su mayoría en los procesos posteriores a la cosecha, como empaque, almacenamiento y transporte. Los productos perecederos suelen ser muy dependientes del transporte por carretera, sin embargo, existen distintos factores que ponen en riesgo este transporte. Futuros impuestos ecológicos y la tendencia a aumentar los costos del transporte terrestre son las principales razones que están apoyando la migración de las empresas transportadoras a un transporte de tipo intermodal (Perez-Mesa, García-Barranco, Piedra-Muñoz y Gldeano-Goméz, 2019).

Buscar nuevas formas de transporte para productos perecederos que disminuyan los costos directos e indirectos asociados a este proceso se ha vuelto fundamental, especialmente considerando que para este tipo de productos generalmente los costos son mayores debido a que requieren de condiciones especiales (Perez-Mesa et al., 2019). Hao y Yue, (2016) desarrollaron un algoritmo de programación dinámica para obtener la estrategia de combinación óptima de los modos de transporte, sistema de transporte multimodal de contenedores, afirmaron que la organización óptima de varios modos de transporte en el sistema de transporte multimodal de contenedores se relaciona directamente con el tiempo, el costo y la calidad del transporte de carga. Abbassi et al., (2018) propusieron un modelo bi-objetivo aplicado al transporte de productos agrícolas de Marruecos a Europa para minimizar tanto el costo de transporte en forma de unimodal o intermodal, con dos enfoques. El primero estuvo basado en un algoritmo genético de clasificación no dominada mejorado por una heurística de búsqueda local y el segundo fue el algoritmo GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) con heurística de búsqueda local iterada. Se analiza la eficiencia de los algoritmos al comparar sus resultados con el NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) usando algunas métricas de rendimiento. Por su parte, Lelen y Wasiak, (2016) presentaron un modelo para optimizar la selección de la tecnología de transporte multimodal para frutas y verduras no climatéricas transportadas en envases impermeables a gas, luz y líquidos. Este modelo trabaja con dos objetivos maximizar la seguridad de la carga y minimizar los costos de transporte.

Algunos autores se han centrado en estudiar el efecto que el transporte intermodal ha tenido sobre el rendimiento logístico de la cadena alimentaria de algunos productos perecederos. Orjuela-Castro,

Sepulveda-García y Ospina-Contreras, (2016) desarrollaron un modelo de dinámica de sistemas para evaluar de qué forma afectaba el transporte intermodal en la cadena de suministro de la Uchuva, teniendo en cuenta factores como las emisiones de CO₂, el costo, el tiempo y la calidad.

2.3 Diseño de redes de distribución para frutas y vegetales

Algunos autores, como Rabbani, Ramezankhani, Farrokhi-Asl y Farshbaf-Geranmayeh, (2015), clasifican a las frutas y los vegetales como alimentos altamente perecederos, debido a que se deterioran significativamente rápido y los clientes son sensibles a su frescura. En los últimos años este grupo de productos ha tenido un auge significativo en su producción y consumo (Darestani y Hemmati, 2019).

Los resultados del estudio de la dirección de seguimiento y evaluación de políticas públicas en Colombia, realizado por el Departamento Nacional de Planeación, (2016), arrojaron que anualmente se desaprovecha el 33% de la oferta mundial de alimentos para el consumo humano. De ese 33%, el 17,82% se pierde en procesos desarrollados hasta la cosecha y el 15,18% se desperdicia mayoritariamente en los procesos de postcosecha, por problemas en los canales de distribución y cadenas de suministro de los productos, malos hábitos de consumo y falta de coordinación estratégica entre los sectores privado y público. Algunos autores se enfocaron en tratar los problemas de pérdidas de alimentos. González-Estudillo, González-Campos, Nápoles-Rivera, Ponce-Ortega y El-Halwagi, (2017), se centraron en mejorar la producción del aguacate mediante un modelo de optimización para la planificación estratégica óptima de la producción, para satisfacer las demandas actuales y futuras teniendo en cuenta los factores económicos y el impacto ambiental.

Según Lin, Rudy, Negenborn y Lodewijks, (2016), mediante una mejor planificación y control de las actividades de transporte la cantidad de desperdicio de productos perecederos podría ser reducida. Especialmente cuando el diseño está enfocado a un producto perecedero debe tener en cuenta el deterioro de la calidad del producto. Según el trabajo desarrollado por Bortolini, Faccio, Ferrari, Gamberi y Pilati, (2015), hay tres criterios tradicionales de una red de distribución que se tienen en cuenta para proponer diferentes estrategias para su diseño. Estos tres criterios son: el costo, la sostenibilidad ambiental y el tiempo de entrega. Cuando el diseño de la red va enfocado a productos perecederos se ha sumado un cuarto criterio que es la característica perecedera de los productos (Bortolini et al., 2015).

Algunos autores se han enfocado en diseñar las redes de distribución de diversas frutas y vegetales. Bortolini et al., (2015), presentaron un estudio de caso real con seis productos cultivados en Italia y vendidos a varios minoristas europeos. Su estudio de caso se centró en una red de distribución para frutas y verduras cultivadas por un conjunto de productores italianos para abastecer a un conjunto de minoristas europeos. Las frutas y verduras que fueron consideradas tienen una vida útil muy diferente: las coles de Bruselas y los tomates tienen una vida útil corta, mientras que las manzanas, las naranjas, las peras y las papas tienen una vida útil más larga. Los agricultores italianos están unidos en un consorcio, mientras que los minoristas se encuentran en la parte continental de la UE, Austria, República Checa, Francia, Alemania, Países Bajos, Portugal y España, los modos de transporte considerados para la distribución de productos fueron tres: camiones, trenes y aviones. Por su parte, Lin, Negenborn, Duinkerken y Lodewijks, (2017), centraron su investigación en mejorar la programación de la logística del banano utilizando información de calidad en tiempo real.

Programaron actividades logísticas teniendo en cuenta tanto el proceso biológico como el procedimiento logístico de la fruta.

2.4 Técnicas utilizadas en el diseño de redes de distribución de productos perecederos

La literatura ofrece diversos enfoques para tratar las redes de distribución. Soto-Silva, Nadal-Roig, González-Araya y Pla-aragones, (2015), realizaron una revisión de literatura de los principales modelos y métodos de investigación de operaciones aplicados a la cadena de suministro de fruta fresca. Su trabajo arrojó como resultado que los problemas con mayor atención fueron los de transporte, ruteo, planificación y asignación en las etapas de producción y distribución. Por su parte las técnicas de modelado y los métodos matemáticos más usados fueron la programación lineal, entera o entera mixta. Por otra parte Lin, Yeh y Huang, (2016), centraron su estudio en realizar la evaluación de confiabilidad de una red de carga multiestatal para mercancías perecederas con múltiples proveedores y compradores. Se desarrolló un algoritmo en términos de caminos mínimos para evaluar la confiabilidad. La confiabilidad dada por una probabilidad de la red de entregar con éxito las cargas de los proveedores a los compradores sujetos a un presupuesto o un índice de rendimiento.

Diversos métodos heurísticos y metaheurísticos han sido desarrollados en el diseño de redes de distribución para productos perecederos. Kande, Prins, Belgacem y Redon, (2014, 2015) desarrollaron inicialmente un solucionador de programación lineal entera mixta (MILP), el cual compararon con distintas metaheurísticas basadas en búsquedas locales para una red de distribución de dos niveles con productos perecederos. Por su parte, Li, Yao y Niu, (2013) propusieron el algoritmo híbrido DEABC para resolver el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y dependientes del tiempo (VRPTWTD) considerando la aleatoriedad del proceso de distribución de alimentos perecederos. Esmizadeh y Bashiri, (2019) enfocaron su trabajo en la aplicación del problema de localización jerárquica de centros de acopio en sistemas de distribución para productos perecederos. El modelo determinó las ubicaciones de los centros en diferentes niveles y la estructura de asignación de los nodos para minimizar los costos totales de transporte y operación en la red, considerando la frescura de las mercancías.

Firoozi y Ariaifar, (2016) desarrollaron un modelo para el diseño de redes de distribución de artículos perecederos y tuvieron en cuenta la incertidumbre de la vida útil de los productos definiendo los peores escenarios. Albrecht y Steinrücke, (2017), desarrollaron un nuevo modelo de programación lineal entera mixta para coordinar la distribución continua y la planificación de ventas de productos perecederos con distintos grados de calidad. Burek y Nutter, (2018), usaron el método de resolución regional del inventario del ciclo de vida (LCI) combinado con el método de evaluación del impacto del ciclo de vida regional (LCIA) para evaluar tres tipos de centros de distribución (CD) de alimentos en diferentes zonas climáticas de Estados Unidos. De esta manera pudieron concluir que el uso de energía primaria en supermercados y CD perecederos fue generado por la refrigeración (con un 80%). Desde el punto de vista tecnológico, Scalia, Aiello, Micale y Enea, (2012), propusieron un sistema de posicionamiento basado en la Fuerza de señal recibida (RSS) para productos perecederos equipados con etiquetas RFID UHF activas, dentro de un almacén refrigerado (4C°), para conocer la ubicación en tiempo real de los productos y darles trazabilidad. Así mismo, otra de las tendencias investigativas ha sido el internet de la logística perecedera (IoPL). Algunos autores se han dedicado a la construcción de redes inteligentes de cadena de suministro de alimentos frescos. Pal y Kant, (2019), propusieron una arquitectura en capas para la IoPL, el cual es un modelo de software modelado a partir del Internet

cibernético. Este modelo mostró ser útil en el modelado sistemático y jerárquico de operaciones logísticas perecederas, que son extremadamente complejas. Mientras que Darestani y Hemmati, (2019), diseñaron una red de cadena de suministro para los productos perecederos, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas con su deterioro. Utilizaron el paradigma de colas para reducir el tiempo de espera en los centros de distribución. La función objetivo considerada para el modelo propuesto incluyó dos objetivos, minimizar los costos totales de la red y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Finalmente, algunos autores también se centraron en desarrollar sus trabajos en las redes de distribución específicamente en un determinado producto perecedero. Lin, Negenborn, Duinkerken y Lodewijks, (2016, 2017), en el 2016 propusieron un sistema de toma de decisiones para los proveedores de servicios logísticos de productos perecederos para reducir la pérdida de frescura mediante el transporte sincromodal y posteriormente, buscando minimizar el deterioro, desarrollaron un modelo matemático para programar actividades logísticas teniendo en cuenta tanto el proceso biológico como el procedimiento logístico del banano. Finalmente, Mutlu, Kayikci y Catay, (2017) en su revisión dan a conocer que las técnicas de solución para la planificación del transporte multimodal están clasificadas en cinco categorías: métodos de solución directa que utilizan programación lineal; métodos de solución estocástica usando programación dinámica; heurística y metaheurísticas como modelos de análisis de decisiones para la elección del modo y otros métodos, como encuestas y simulaciones. Así, con esta revisión de literatura es preciso decir que gran parte de los problemas de diseño de cadenas de suministro de productos perecederos con transporte intermodal, han sido tratados exitosamente mediante la aplicación de técnicas de modelación tales como la optimización y la simulación, por lo que este proyecto busca seguir con esta línea de modelación para desarrollar una solución lo suficientemente buena al diseñar una red de distribución eficientemente estructurada que aporte a la mejora de los procesos logísticos dentro de la cadena de suministros del aguacate Hass en Colombia de exportación bajo un enfoque de sostenibilidad.

A pesar de todos los beneficios en materia de exportación que el aguacate Hass está generando en Colombia, aun no existe una red de distribución eficientemente estructurada que aporte a la mejora de los procesos logísticos de dicho proceso. Colombia se encuentra en una etapa inicial de desarrollo de la industria del aguacate, los pequeños y medianos productores todavía están mal estructurados en la cadena de suministro del aguacate, con una alta tasa de fracaso en pequeñas producciones (Arias Bustos y Moors, 2018). Así mismo, en la literatura se encuentran diversos trabajos enfocados en otras frutas como el banano (Lin, Negenborn, Duinkerken y Lodewijks, 2017), la feijoa (Cañón, Ramírez, Gutiérrez-Franco y López-Ospina, 2014), y la Uchuva (Orjuela-Castro, Sepulveda-García y Ospina-Contreras, 2016), pero al aguacate no se le ha dado la atención que merece.

3. Red de distribución del aguacate Hass

Esta sección está compuesta por la caracterización de la red de distribución del aguacate Hass de exportación en Colombia, sus eslabones, actores, procesos, diagnóstico actual, retos y desafíos.

3.1 Caracterización de red de distribución del aguacate Hass en Colombia

La integración, planificación y operación de todas las actividades relativas al flujo de información, producción, transformación, transporte y distribución de un producto se le conoce como cadena de suministro (García Cáceres y López Ramírez, 2020).

El aguacate, *Persea americana*, es una fruta climatérica también conocida como palta o avocado, el aguacate actualmente se muestra como un frutal promisorio para los países productores, quienes lo ven cómo la oportunidad de abrir un nicho de mercado que ha estado cerrado, como es el de las frutas (Montoya, Arias y Velásquez, 2018). Por esta razón caracterizar la cadena de suministro del aguacate toma gran importancia.

El mercado del aguacate ha sido muy dinámico en los últimos años. La producción de aguacate en el contexto internacional presenta un crecimiento anual del 4,1% desde el año 2010 (Montoya, Arias y Velásquez, 2018). Durante los períodos 2011 a 2019 su volumen se triplicó, pasando de aproximadamente 60.000 t/año a más de 180.000 t/año en promedio (Namesny, Conesa, Hormaza y Lobo, 2020). Su crecimiento mundial se debe al constante consumo de productos saludables y sostenibles, sumado al trabajo de la industria agroalimentaria para mejorar la calidad de la oferta de frutas y hortalizas (Namesny, Conesa, Hormaza y Lobo, 2020).

De hecho, el 90% del mercado mundial de aguacate es de la variedad Hass y las proyecciones apuntan a que su consumo crecerá a un ritmo del 3% anual (Minagricultura, 2018). Dentro del campo del aguacate la variedad Hass es la más conocida y comercializada, se ha convertido en el estándar mundial (Namesny et al., 2020). Esto se debe a que esta variedad tiene mayor contenido de grasa que otras variedades, lo que le da un mejor sabor y una textura más suave y cremosa. Además, esta variedad tiene ventajas desde el punto de vista del cultivador, ya que presenta mayores rendimientos en comparación con otras variedades.

Esta caracterización fue realizada de acuerdo con las etapas desarrolladas en el trabajo de (García-Cáceres, Perdomo, Ortiz, Beltrán y López, 2014); (García Cáceres y López Ramírez, 2020), quienes caracterizaron las cadenas de valor y suministro del cacao y la carne bovina en Colombia. Con esta caracterización se buscó realizar un diagnóstico del estado actual de la cadena de suministro del aguacate Hass en Colombia, información que posteriormente se tomó como punto de partida para realizar el seguimiento a las variables obtenidas, lo que facilitó la toma de decisiones ya que indicó si las variables estaban tomando un camino favorable o desfavorable.

Para el desarrollo de cada una de las etapas del proceso de caracterización se utilizaron fuentes secundarias de información, tales como revistas, trabajos de grados, libros, sitios web, el Ministerio de Agricultura de Colombia, entre otras fuentes relevantes.

3.1.1 Producción mundial y nacional de la cadena de suministros del aguacate.

El estado mundial de la producción mundial de aguacate según Namesny et al., (2020), es el siguiente:

- La producción mundial de aguacate es de aproximadamente 6 millones de toneladas. El aguacate ocupa la posición 22 en la clasificación de las principales frutas producidas en el

mundo. La producción de variedades de interés para el comercio internacional, representan aproximadamente 3 millones de toneladas, es decir, el 50% del total.

- Casi el 85% de la producción mundial está controlado por América Latina. El número uno en producción mundial es México, el cual proporciona dos tercios de la cosecha mundial de estas variedades, posteriormente está Perú, un nuevo proveedor que ha logrado un rápido crecimiento en la última década; Chile y Colombia, recién llegado al mercado, pero con buen progreso. Finalmente, el suministro se completa con Brasil y la República Dominicana, mientras que la producción a pequeña escala está comenzando a aparecer en Guatemala y Ecuador.
- La segunda zona de producción de variedades para exportación es África, tres países exportan alrededor de 130.000 t, es decir, el 4% del comercio mundial. En el mismo nivel se encuentra el Mediterráneo, con unas exportaciones de aproximadamente 125.000 t. Israel y España son los líderes históricos.

En el ranking mundial del Aguacate, Colombia es el cuarto país productor y el tercero en términos de área cosechada, con una participación del 6% del área mundial (Minagricultura, 2018). Una de las ventajas competitivas que facilita la posición del país entre los mayores productores del fruto es el hecho de que las diferentes zonas de producción de aguacate Hass en Colombia están distribuidas entre las altitudes necesarias para su producción del aguacate Hass, son estas condiciones climáticas las que otorgan la capacidad a la industria colombiana para cosechar y ofrecer aguacate durante todo el año. El aguacate tiene disponibilidad de cosecha todo el año, sin embargo, por las condiciones agroecológicas y fisiológicas del cultivo el pico de cosecha se encuentra entre los meses de octubre y enero.

En Colombia como efecto combinado entre el aumento en el área cosechada (29%) y el rendimiento (5%) en los últimos 5 años la producción de aguacate creció el 34%. Se desarrolló un notable incremento del interés por el establecimiento de la variedad de aguacate Hass en el país, debido a la demanda del producto en mercados internacionales, esta variedad corresponde al 34% del total de área sembrada con aguacate en el país (Minagricultura, 2021).

En la **Figura 3** se observan las diferentes regiones colombianas productoras de aguacate Hass, la zona occidente-Eje cafetero que contiene los departamentos de Antioquia, Caldas, Quindío, Risaralda y Valle del Cauca, la zona Costa Atlántica con los departamentos Bolívar y Cesar, la zona Centro con el departamento Tolima, la zona de los Santanderes con Santander y finalmente la zona Oriente con Cundinamarca, Boyacá, Meta, Casanare y Arauca.

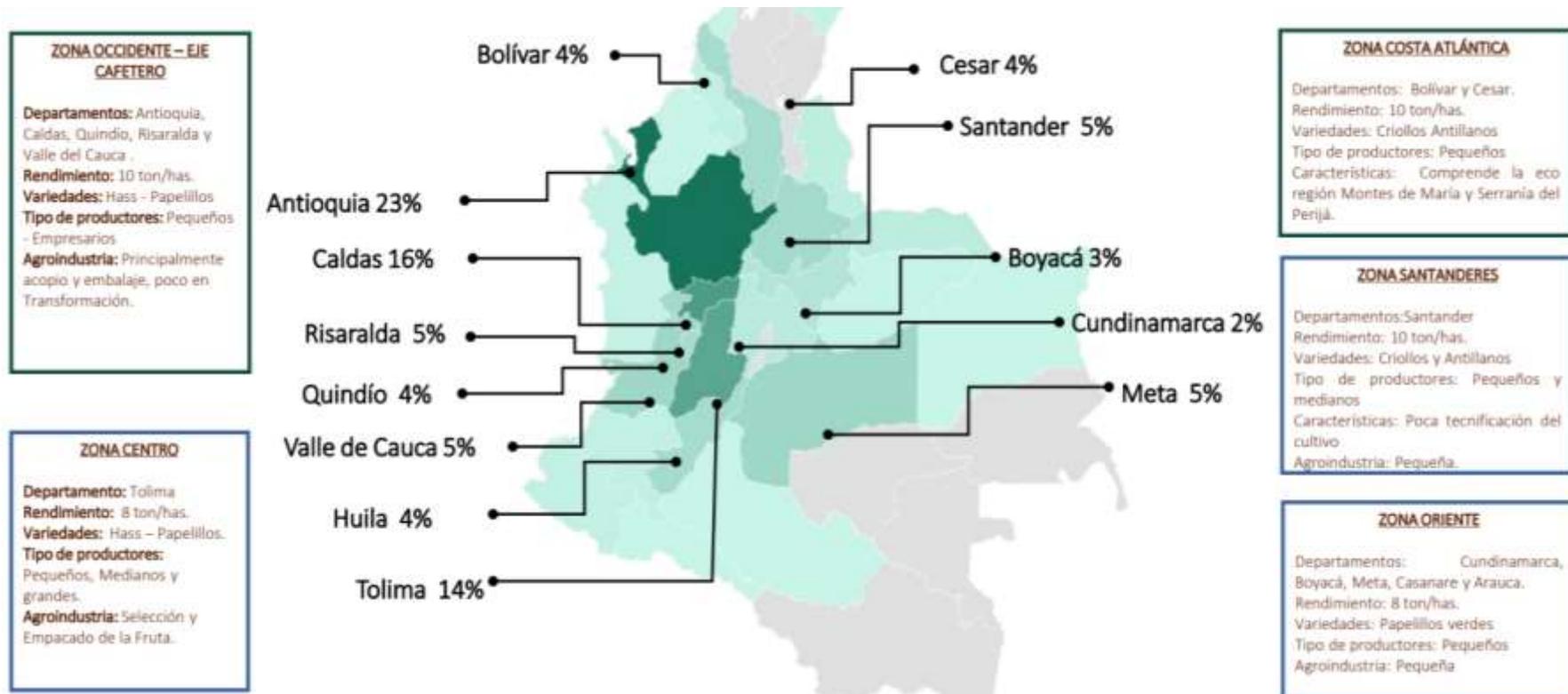


Figura 3. Zonas productoras de Aguacate en Colombia, (Minagricultura, 2021)

En una división departamental Tolima, Antioquia, Caldas, Santander, Bolívar, Cesar, Valle del Cauca, Risaralda y Quindío, representan el 86% del total del área sembrada del país. A nivel regional, el departamento de Antioquia se consolidó a nivel nacional como el que registra actualmente, la mayor área sembrada (21%) y producción (23%) de aguacate del país. Sin embargo, a nivel de rendimiento por hectárea el departamento líder Caldas con 11 Ton/ha. (Minagricultura, 2021).

3.1.2 Exportaciones y mercados a nivel mundial y nacional

En términos de volumen, en 2018/2019 el comercio mundial de aguacate se estimó en aproximadamente 2,2 millones de toneladas, excluyendo la producción local dirigida a los mercados nacionales de los países productores, lo que representa aproximadamente un 3% del comercio mundial de frutas. El aguacate ocupó la novena posición en el ranking de exportaciones de frutas por volumen, muy por detrás de los tres primeros, que son el banano (casi 21 millones de toneladas), la manzana (9 millones de toneladas) y la naranja (6 millones de toneladas) (Namesny et al., 2020).

Al enfocar el análisis en términos de valor, la importación del aguacate ha alcanzado los 5,1 mil millones de dólares, encontrándose en cuarta posición debajo del banano (aproximadamente 14 mil millones de dólares), la uva (9 mil millones) y la manzana (8 mil millones).

Con relación a los países, los principales exportadores de aguacate Hass en orden de importancia corresponden a México, Países Bajos, Perú, España y Chile. Países Bajos importa y re-exporta aguacate (International Trade Center, 2019a).

A pesar de que antes del año 2015 el mercado del aguacate Hass Colombia era casi desconocido en el mercado internacional, actualmente Colombia está en proceso de convertirse en uno de los países líderes en exportación de aguacate Hass (Namesny et al., 2020).

En términos de exportaciones con los resultados de los indicadores de Minagricultura, (2021), con relación a la cadena de suministros del aguacate Hass en Colombia se tiene que:

- Entre los años 2019 y 2020 las cifras sectoriales de exportación registraron un incremento absoluto de más de 28 mil toneladas, que equivale a un 48%.
- A finales del año 2020, los departamentos consolidados como principales exportadores del aguacate colombiano fueron: Antioquia, Risaralda y Valle del Cauca. El departamento de Antioquia durante el año 2020 entregó el 46% de la fruta exportada, seguido por los departamentos de Risaralda y Valle del Cauca con el 27% y 7%, respectivamente.
- Durante los meses de enero, febrero y marzo del año 2021, se logró la comercialización de 18.548 toneladas, estas exportaciones fueron lideradas por el departamento de Antioquia con una participación del 52%, seguido por Risaralda con un 21 % y Valle del Cauca con un 11%.

3.1.3 Consumidores / mercados

Básicamente existen 2 tipos de consumidores o mercados, los nacionales e internacionales. El 66% de la producción del aguacate Hass del país queda para consumo nacional, el consumo per cápita en Colombia es 12,3 Kg/persona/año. Dentro de los clientes nacionales se tienen supermercados, restaurantes, mercados al aire libre, agroindustrias, mayoristas y minoristas. Por su parte, el principal destino de exportación para el aguacate colombiano es el continente Europeo, encabezado por los Países Bajos, España y Reino Unido (Minagricultura, 2021). Actualmente Colombia es el principal proveedor de aguacate Hass de Europa con un 30% de participación (Portafolio, 2021).

3.1.4 Actores de la cadena de suministro del aguacate en Colombia.

La cadena de suministros de Aguacate Hass en Colombia está conformada: Productores de material vegetal; Productores de aguacate; Acopiadores o intermediarios; Agroindustrias o plantas procesadoras; Exportadores; Consumidores finales (Minagricultura, 2021). Así como se observa en la **Figura 4**.

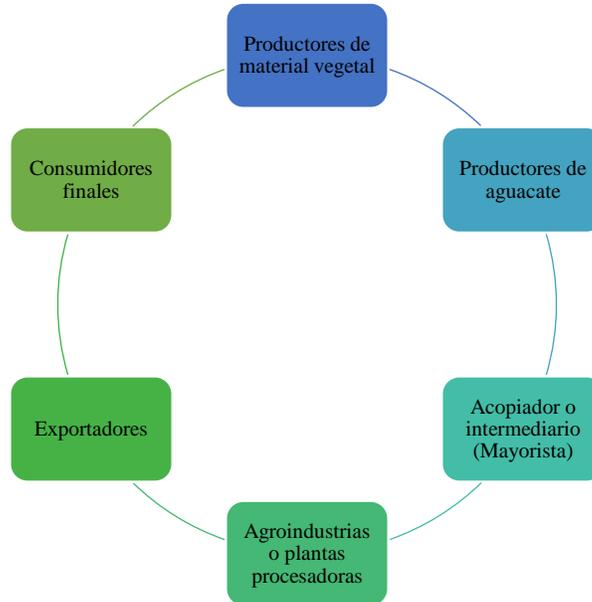


Figura 4. Eslabones de la cadena productiva del aguacate

- **Productores de material vegetal:** Persona que generalmente posee registro nacional para la multiplicación de materiales de propagación de frutales.
- **Productores de aguacate:** Encargadas de la siembra y cosecha, son los que garantizan que los aguacates sean cosechados en condiciones adecuadas, permitiendo la trazabilidad del producto.
- **Acopiadores o intermediarios (Mayoristas):** Se trasladan de finca en finca recolectando lotes de aguacate para transportarlos a plantas de tratamiento o venderlos a los mercados minoristas y obtener así una ganancia durante el proceso. Compran a gran escala.
- **Industrias aguacateras o plantas procesadoras:** Son compradores nacionales, quienes se encargan de dar tratamiento postcosecha a la fruta, selección, limpieza, embalado y acabado del producto.
- **Exportadores:** Son los encargados de hacer posible que el aguacate llegue a destinos exteriores e internacionales, haciendo uso de distintos modos de transporte y uso de tecnologías.
- **Consumidores finales: Quienes consumen el producto final:** Cualquier persona que desee consumir el aguacate o bien, establecimientos de libre servicio, mercaditos y ventas ambulantes para abastecen a los consumidores finales

Dentro de la cadena de suministro por lo general, estos actores establecen múltiples relaciones formando asociaciones y grupos de trabajo para lograr fácilmente sus objetivos.

Además, existen entidades de apoyo como universidades, centros de investigación e instituciones adscritas al gobierno que acompañan el proceso. Dentro de las entidades de apoyo que deben participar en la consolidación de la organización de cadena, se tienen las siguientes:

- **Investigación:** AGROSAVIA, CIAT, Universidades, Corporación Colombia Internacional - CCI
- **Públicas:** ICA, ADR, Mincomercio, Colombia Productiva, Procolombia, SENA.

Así mismo, algunas de las instituciones adscritas al gobierno que acompañan el proceso se encuentran:

- **Instituto Colombiano Agropecuario (ICA):** Otorga el certificado fitosanitario para el trámite de desembarque / desembarque.
- **Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA):** Otorga los certificados de inspección sanitaria para exportación de alimentos y materias primas, certificado de exportación y certificado de no obligatoriedad con los cuales se hace constar la aptitud de los alimentos para el consumo humano, materias primas o insumos para alimentos destinados al consumo humano.
- **Corporación de productores y exportadores de aguacate Hass de Colombia (CORPOHASS):** Junto con el ICA actúan como aseguradores para el gremio aguacatero colombiano del cumplimiento de la normativa exigida para las exportaciones hacia Estados Unidos.

3.1.5 Normatividad para exportación

Así mismo, la regulación en torno a la cadena de suministro del aguacate Hass de acuerdo a Jiménez Giraldo y Ospitia Gonzales, (2020), se centra en dos tipos de medidas. Las primeras se enfocan en mejorar las condiciones de producción y regular los aspectos fitosanitarios de la generalidad de frutas y cultivos tardíos, contenidas en las Resoluciones y decretos. De acuerdo a Garzón, (2020), las condiciones de manejo a los productores de aguacate en el país para que el producto pueda ser aceptado en los mercados internacionales son:

- Certificación de buenas prácticas de manufactura (planta empacadora).
 - Certificación de buenas prácticas agrícolas (productor).
 - Certificación de ICA huerto exportador.
 - Certificación ICA exportadora de vegetales frescos.
 - Certificación Planta empacadora “Packing House”.
 - Certificación Global Gap (opcional), una certificación de buenas prácticas agrícolas.

Las segundas regulan específicamente la producción y distribución de aguacate en materia de calidad y estandarización del producto, contenidas en normas técnicas que se especifican en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Normatividad colombiana aplicada al aguacate Hass (Jiménez Giraldo y Ospitia Gonzales, 2020)

Norma Técnica Colombiana	Descripción
NTC 1248	Productos agrícolas. Aguacates. Calidad
NTC 1248-2	Frutas frescas. Aguacate. Especificaciones de empaque
NTC 1248-3	Frutas frescas. Aguacate. Almacenamiento y transporte
NTC 2479	Embalajes. Indicaciones gráficas para el manejo de los artículos
NTC 5209	Frutas frescas. Aguacate. Variedades mejoradas. Especificaciones
NTC 5422	Empaque y embalaje de frutas, hortalizas y tubérculos frescos

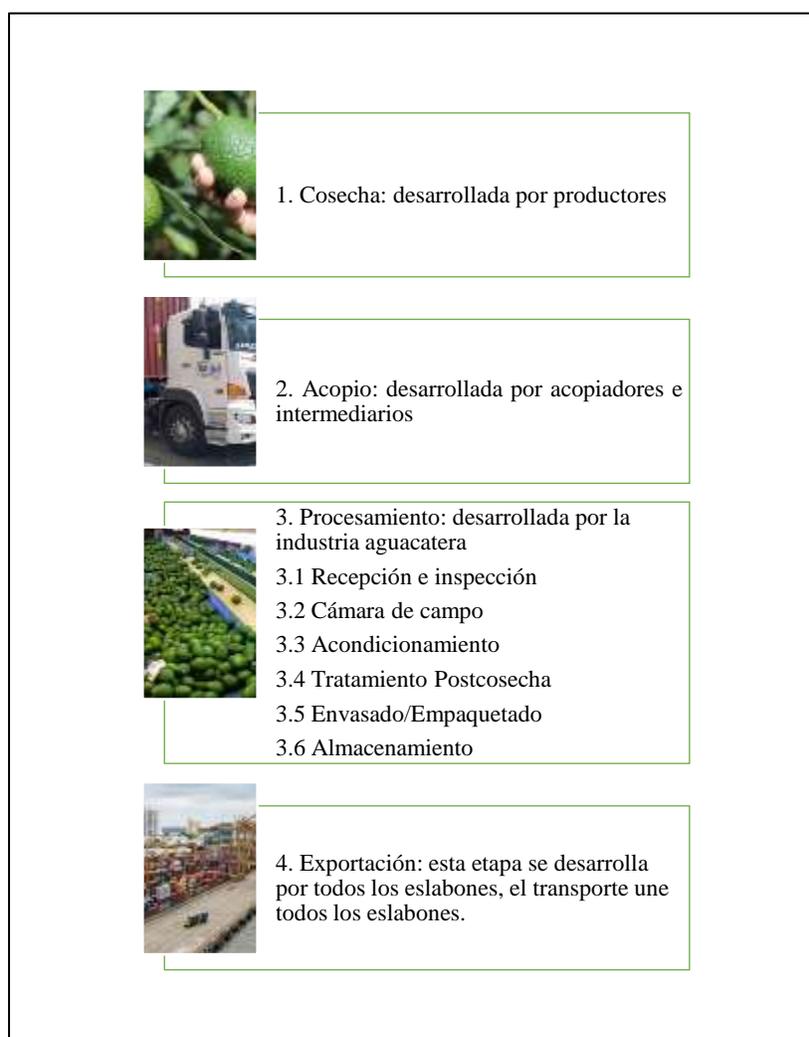


Figura 5. Actividades de la cadena de suministro del aguacate Hass

3.1.6 Descripción de la cadena de suministro del aguacate Hass en Colombia.

La descripción de esta cadena de suministro del aguacate no tendrá en cuenta la producción del material vegetal, se realizará desde el lugar de cultivo hasta que el producto es entregado al cliente final teniendo en cuenta todas las actividades implicadas en las diferentes etapas que la conforman. Estas etapas se describen a continuación con base al trabajo de Namesny, Conesa, Hormaza y Lobo, (2020), (

Figura 5). El mantenimiento satisfactorio de la calidad del aguacate durante estas actividades depende de la aplicación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA).

Es indispensable y de prioridad que posterior a la cosecha se mantenga la cadena de frío en todas las etapas de los procesos de almacenamiento y transporte. A partir de la cosecha de la fruta, esta debe ser pre enfriada y refrigerada, de esta forma se evitarán choques térmicos en el aguacate.

a. Cosecha

Se realiza de manera manual y en las horas más frescas del día. Los frutos se deben recoger con un material flexible y ser vaciados en cajas limpias. Debe evitarse que los aguacates tengan contacto con el suelo. Al realizar los cortes debe dejarse un pedúnculo para evitar procesos de maduración y deterioro de la fruta además de organismos patógenos y posibles pudriciones. Todos los elementos de cosecha deben estar limpios y desinfectados para evitar contaminación del árbol y la fruta.

Es muy importante establecer el momento óptimo de cosecha ya que, si el aguacate se recoge demasiado pronto, el contenido de aceite será bajo (materia seca baja), existirá presencia de fibras en la pulpa, y no madurará adecuadamente de forma que la cubierta exterior de la semilla quedará adherida a la pulpa y no se logrará desprender de la pulpa, el sabor y la firmeza no se desarrollarán plenamente siendo un aguacate no comestible, gomoso. Además, hay que tener en cuenta que, por legislación, y dependiendo de cada país, la fruta cosechada ha de cumplir con un mínimo de materia seca que depende de la variedad de aguacate.

b. Acopio

Debe hacerse en vehículos limpios y de uso exclusivo de transporte de la fruta, generalmente se hace en camiones refrigerados. Los conductores deben ser cuidadosos para evitar daño mecánico en los aguacates. Estos trabajadores deben tener buenas prácticas de higiene.

c. **Procesamiento:** Está compuesto de distintas operaciones, las cuales son mencionadas a continuación.

c.1. Recepción e inspección

La recepción de la fruta debe ser ágil para evitar que reciba sol o lluvia. Es muy importante hacer un registro administrativo de cada partida para asegurar la trazabilidad del lote. Cada lote es inspeccionado y el fruto que posea daño mecánico, pudriciones, pérdida de pedúnculo o deterioro debe ser separado de los frutos sanos.

c.2. Cámara de campo

Cuando se da una llegada masiva de frutos es necesario almacenarlas en una cámara de frío distinta a la que contiene el producto preparado para la comercialización. El fruto puede estibarse entre 3 y 4 días a una temperatura de 5 °C en estas cámaras. Este preenfriamiento es de beneficio debido a que disminuye la actividad metabólica de los frutos (respiración, transpiración y producción de etileno). Al no disponer de cámara de conservación, tendrán que almacenarse en un lugar a la sombra, fresco y ventilado.

c.3. Acondicionamiento

Esta operación consiste en extender la vida útil del aguacate y garantizar que su consumo sea seguro. El fruto se lava y/o cepilla para eliminar la suciedad que trae de campo, así como el inóculo responsable de la pudrición futura de los mismos. El lavado y la desinfección, sumado a la implementación de buenas prácticas agrícolas y buenas prácticas de higiene de los trabajadores, aporta a minimizar la carga microbiológica de los aguacates que pueden afectar al fruto y / o al consumidor. Posteriormente, los aguacates limpios y secos pasan por una cinta o banda transportadora y se clasifican con máquinas que los separan por peso / calibre / color.

c.4. Tratamientos postcosecha

Para minimizar las pérdidas postcosecha se debe:

- Llevar a cabo una buena sanidad durante el cultivo para reducir el inóculo en campo.
- Realizar un manejo cuidadoso en la recolección y postcosecha para minimizar los daños físicos que favorecen la entrada de hongos.
- Conservar en frío los aguacates lo antes posible (preenfriamiento, almacenamiento, transporte).
- Aplicar fungicidas autorizados eficaces.

Posteriormente se encuentra el encerado, que es una operación opcional, sin embargo, mejora la apariencia del fruto; además, los protege del ataque de patógenos, evita deshidratación al reducir el proceso de transpiración (Téliz y Mora, 2007).

c.5. Envasado/Empaquetado

El envase o empaque es variado y depende del distribuidor, sin embargo, debe cumplir con las siguientes características:

- Ser resistente para soportar el apilamiento en caso de hacer paletizado y las condiciones de temperatura y humedad relativa (90-95%) durante el transporte, almacenamiento y conservación.
- Tener ventanas de ventilación, para evitar la acumulación de etileno y temperatura que aceleran el proceso de maduración, y facilitar la circulación del aire frío a través de las cajas.
- Que ocupen poco espacio: las de cartón se montan en el momento que se utilizan y las de plástico es mejor que sean plegables.
- Reutilizables y reciclables.

La elección inadecuada del envase puede provocar deterioro de la calidad del producto, por ejemplo, si el envase no posee la permeabilidad requerida, la permeabilidad adecuada puede ocasionar la fermentación del producto por falta de oxígeno, o una acumulación de dióxido de carbono que provocaría una maduración irregular de los mismos.

Los empaques que usualmente se usan en Colombia están hecho de cartón corrugado y es de excelente calidad (Jiménez Giraldo y Ospitia Gonzales, 2020).

c.6. Almacenamiento

Una vez se haya realizado el paletizado, el producto se introduce en cámaras de conservación hasta su despacho. Se debe tener en cuenta que los aguacates son muy susceptibles a sufrir daños por frío, estos daños no solo dependen de la temperatura a la que se almacenan sino del tiempo que permanecen a dicha temperatura.

Hay otros aspectos que afectan en los daños generados por frío:

- El cultivo, región productora y estado de desarrollo (madurez y madurez fisiológica de consumo).
- La variedad, por ejemplo, el aguacate Hass es bastante tolerante, pero puede sufrir daños cuando se almacena a temperaturas inferiores a las recomendadas (5-13 °C para fruta con madurez fisiológica y 2-4 °C para fruta con madurez de consumo).
- La adecuada circulación del aire para evitar la acumulación de etileno y de calor. La renovación de aire dentro de las cámaras también es necesaria para evitar que se acumule dióxido de carbono y etileno, y disminuya el oxígeno; esto debido a que concentraciones en la atmósfera de la cámara por debajo de 2% conducen a fermentación de los frutos.
- La humedad es otro factor que ha de controlarse ya que durante el proceso de maduración los frutos transpiran y pierden agua, disminuye su peso y se arrugan. Es necesario mantener una humedad relativa entre el 85 y el 95%.
- La temperatura óptima para preservar la calidad de la fruta y alargar su vida comercial depende de la variedad y de la madurez del fruto, siendo menos susceptibles a los daños por frío cuánto más maduros estén.

d. Exportación

La exportación consiste en ubicar un producto en los mercados externos, cumpliendo los términos negociados entre vendedor y comprador, tiene como objetivo principal reducir al máximo los tiempos,

los costos y los riesgos que la operación pueda generar durante el trayecto desde el origen hasta el destino (Garzón, 2020).

Para decidir el medio de transporte de la exportación se debe tener cuidado de acuerdo con el estado del producto, ya que la resistencia mecánica de los frutos es menor que cuando están en madurez fisiológica.

Es recomendable el uso de atmósferas controladas, absorbedores de etileno o bloqueadores del mismo, evitan la maduración durante el tránsito, sobre todo cuando se comercializa en mercados que se encuentran a grandes distancias.

3.1.7 Principales puertos importantes para exportación aguacate

- **Sociedad portuaria regional de Cartagena:** El puerto tiene una profundidad de 49 pies y una extensión de 40 Ha. Cuenta con 8 muelles los cuales alcanzan una profundidad máxima de 46 pies, tiene 5 bodegas cubiertas con capacidad de 28.713 m² y 5 patios con capacidad de 38.221 m².
- **Sociedad portuaria regional de Barranquilla:** El puerto tiene una profundidad de 32.81 pies y una extensión de 100 Ha. Cuenta con 8 muelles los cuales alcanzan una profundidad máxima de 36 pies, tiene 8 bodegas de granel sólido con capacidad de 28.904 m² y 14 patios con capacidad de 195.913 m².
- **Terminal de contenedores de Buenaventura:** El puerto tiene una profundidad de 27 pies y una extensión de 620 Ha. Cuenta con 14 muelles los cuales alcanzan una profundidad máxima de 31 pies, tiene 12 bodegas cubiertas con capacidad de 100.897 m² y patios con capacidad de 58.200 m².
- **Sociedad portuaria de Santa Marta:** El puerto tiene una profundidad de 75 pies y una extensión de 33 Ha. Cuenta tiene 3 bodegas cubiertas con capacidad de 17.596 m² y 6 patios con capacidad de 110.020 m².

3.1.8 Procesos transversales a todas las actividades de la cadena de suministro del aguacate

De acuerdo a Garzón, (2020), tres procesos transversales en toda la cadena de suministro del aguacate son los siguientes:

3.1.8.1 Cadena de frío

Uno de los procesos transversales a toda la cadena de suministro del aguacate es la cadena de frío, este proceso se mantiene en cada actividad, ya sea producción, almacenaje, distribución, embalajes, transporte, carga y descarga. En la cadena de frío cada producto mantiene una temperatura y humedad relativa controlada, durante todo el tiempo del proceso, desde el mismo momento de inicio de la producción hasta que se entrega el consumidor final. Mediante la cadena de frío el producto es preservado de temperaturas críticas de riesgo, evitando al máximo la proliferación bacteriana que le permita afectar la salud del consumidor final.

Es indispensable y de prioridad que posterior a la cosecha se mantenga la cadena de frío, el aguacate, específicamente, necesita de un grado de refrigeración de 3 a 5°C después de salir de la planta de empaque y embalaje, durante todo el proceso logístico, sin que esta cadena se rompa. A partir de la

cosecha de la fruta, esta debe ser pre enfriada y refrigerada, de esta forma se evitarán choques térmicos en el aguacate y la afección de las características físicas del producto y por ende su grado de maduración.

3.1.8.2 Sistema de atmosfera controlada.

Para retardar la maduración del aguacate durante el proceso de distribución se utiliza un sistema de atmósfera controlada, el cual permite que la fruta sea entregada en óptimas condiciones fisicoquímicas. La atmosfera controlada permite la selección de la composición de los gases dentro del contenedor, es decir, la cantidad de Dióxido de Carbono (CO₂) y Oxígeno (O₂) que se necesita para el producto, el porcentaje restante será ocupado en la mayor parte por el Nitrógeno (N₂) y un mínimo porcentaje de otros gases inertes. La mayor ventaja de este sistema es que puede ser adaptado a cualquier contenedor refrigerado, sin modificar su estructura o maquinaria.

3.1.8.3 Transporte

El transporte es un proceso logístico transversal a todos los actores y actividades de la cadena de suministro del aguacate, que consiste en situar un producto desde un punto de salida hasta punto de llegada. El transporte debe ser en contenedores refrigerados o camiones limpios y refrigerados con el fin de disminuir la actividad metabólica del producto y evitar las condensaciones de agua sobre la cáscara del fruto que facilitan su deterioro y son consecuencia de fluctuaciones en la temperatura.

Para el transporte por carretera se utiliza un vehículo refrigerado el cual permite reducir y mantener la temperatura interior del contenedor a -20° C. El furgón refrigerado son los semirremolques más eficientes ya que tienen la mayor capacidad de carga y un peso vehicular más bajo. Otros modos de transporte para llegar al lugar de exportación son transporte férreo, transporte marítimo y transporte aéreo, todos con contenedores refrigerados y atmosfera controlada.

3.1.8.4 Otros aspectos para considerar: Pérdidas y desperdicios en la cadena

A lo largo de las cadenas de suministro de productos perecederos como frutas y vegetales se presentan pérdidas y desperdicios, las pérdidas ocurren entre la etapa de producción, postcosecha y procesamiento, mientras que el desperdicio tiene lugar en las etapas de venta minorista y consumo.

Anteriores trabajos han afirmado que este porcentaje de pérdidas y desperdicios en la cadena de suministro del aguacate se mueve dentro de un rango del 42-45% (Arias Bustos y Moors, 2018). Información que es coherente con el trabajo desarrollado por Castilla Acevedo y Hernandez Diaz, (2009), quienes en su estudio determinaron que el desperdicio generado para el productor era del 25%, para el intermediario 5%, para el mayorista 15% y finalmente para el minorista 15% aproximadamente.

Arias Bustos y Moors, (2018), en su trabajo afirman que la mayoría de estas pérdidas y desperdicios se originan por ineficiencias entre los actores que participan dentro de la cadena de suministro de aguacate, tales como, ineficiencias a nivel empresa, a nivel de la cadena o a nivel institucional, a su vez este trabajo plantea que mediante la colaboración innovadora es posible reducir estas pérdidas y desperdicios mediante la mejora o creación de relaciones interorganizacionales a través de las cuales los participantes del actores de la cadena pueden intercambiar información, alinear incentivos, participar en asociaciones efectivas y mejorar su uso de la tecnología.

3.1.9 Diagnóstico y conclusiones sobre la cadena de suministros del Aguacate en Colombia

A pesar de la gran expansión mundial que ha tenido el mercado del aguacate, en la actualidad este se basa en sólo dos pilares: La Unión Europea y Estados Unidos. Estos dos países representan más del 80% del comercio internacional. Los mercados restantes están muy lejos en términos de volumen. La Unión Europea es el segundo mercado del mundo, sin embargo, su crecimiento es aún mayor que el estadounidense, aumento un 18% más por año en promedio entre 2015/2016 y 2018/2019 (Namesny et al., 2020).

En Colombia la variedad de aguacate Hass a pesar de ser solo el 26% del total de aguacate producido, sus exportaciones representan un poco más del 90% del total de exportaciones de la subpartida de aguacates, lo que implica que las demás variedades (pieles verdes) representan menos del 10%. Se estima que cerca del 70% del área sembrada de esta variedad en el país se encuentra en edad productiva y el restante en etapa de desarrollo, por lo tanto, se espera que la producción anual del fruto se incremente paulatinamente.

De acuerdo a los resultados de los indicadores de Minagricultura, (2020) con relación a la cadena de suministros del aguacate Hass en Colombia se tiene que:

- Desde el año 2019 la dinámica productiva y comercial fue muy buena a tal punto que las exportaciones aumentaron un 48% al año 2018, registrando importaciones casi nulas de este producto (Minagricultura, 2018).
- El aguacate colombiano tiene como principal destino de exportación el continente europeo, encabezado por los Países Bajos, España y Reino Unido.
- Con el fin de consolidarse en el mercado estadounidense, en el año 2020, el país logró la admisibilidad sanitaria.
- En el año 2021 el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural logró firmar el protocolo de admisibilidad con Corea del Sur para la exportación de la Aguacate Variedad Hass a este país del continente asiático.

3.1.10 Retos y desafíos de la cadena de suministro de aguacate

En los últimos años ha sido notable el dinamismo, crecimiento y avance de la cadena de suministro del aguacate Hass en Colombia, no obstante, aún queda mucho por trabajar y finalmente poder convertirse en uno de los principales países líderes en exportación de aguacate Hass de alta calidad. Algunos de los retos y desafíos que se presentan en la cadena del aguacate Hass son:

- Uno de los mayores desafíos de los exportadores latinoamericanos es la optimización de la cadena de suministros de aguacate Hass en un escenario climático cambiante (Namesny et al., 2020).
- Con el fin de aportar al logro de uno de los objetivos mundiales de desarrollo sostenible para el año 2030 de disminuir la pérdida y el desperdicio de alimentos (Departamento Nacional de Planeación, 2016), se debe trabajar en la cadena de suministro del aguacate Hass en Colombia.
- La búsqueda de alternativas tecnológicas que maximicen la calidad y sean más amigables con el medio ambiente (Namesny et al., 2020).
- Ampliar la canasta exportadora nacional y redinamizar la inserción internacional de los productos locales en los mercados extranjeros, apertura de nuevos mercados como el asiático,

ya que implica mayores tiempos de viaje y requiere más exigencias en los procesos (Parra Ramírez y Serrano Scarpetta, 2017).

4. Modelo de flujo de redes Multiobjetivo

El modelo de distribución para el aguacate Hass se estudiará bajo el enfoque de un modelo de flujo de redes multiobjetivo. De esta manera, es visto como un modelo formado por arcos y nodos, donde estos elementos establecen las conexiones entre los diferentes eslabones de la cadena de suministro. La red de distribución se define como un grafo $G(N,A)$ donde N es el conjunto de nodos y A es el conjunto de arcos de la red (Eksioglu et al., 2009). Es una red dirigida donde los arcos representan una estructura combinada de origen, final y modo de transporte y los nodos los eslabones de la cadena de suministro. Dentro de la red existen unos nodos especiales donde tienen lugar los cambios de modos de transporte, estos nodos son de transbordo o transferencia. En la **Figura 6** se puede observar la red que se busca modelar en este trabajo, los actores, eslabones y actividades implicadas en la cadena de suministro. En esta red existen 4 tramos, el primer tramo es el conformado desde los productores a las plantas procesadoras; el segundo tramo va desde las plantas procesadoras hasta los nodos de intercambio; el tercer tramo va desde los nodos de intercambio hasta los puertos marítimos y finalmente el último tramo va desde los puertos marítimos hasta los clientes finales.

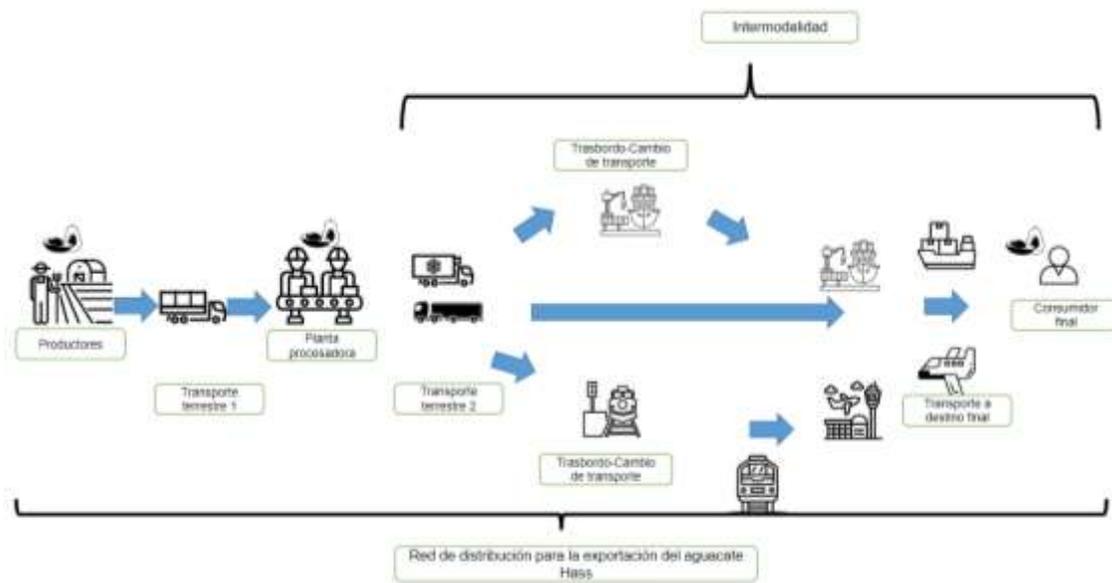


Figura 6. Cadena de suministro del aguacate Hass

Así, la formulación del problema de optimización multiobjetivo se presenta a continuación:

Inicialmente se definieron las variables de decisión y parámetros del modelo:

Tabla 3. Conjuntos de modelo

Conjunto	Descripción
$i \in C$	Índice para los productores o lugares de cosecha
$f \in F$	Índice para los clientes o destinos finales
$v \in V$	Índice para los modos de transporte (Tipo de transporte, tecnología de refrigeración, atmósfera)
$t \in T$	Índice para los periodos de tiempo
$p \in P$	Índice para las plantas de procesamiento
$k \in K$	Índice para lugares de cargue o descargue (centro de distribución) (aeropuertos, terminales ferroviarias o puertos). Nodos en los cuales es posible realizar cambios de modo de transporte

Tabla 4. Variables de decisión del modelo

Variable	Descripción
----------	-------------

X_{ipvt}	El número de unidades compradas y transportadas desde el lugar de cosecha i hasta la planta de procesamiento p usando el modo de transporte v en el periodo de tiempo t
Y_{ijvt}	El número de unidades de producto transportados desde un nodo de origen $i \in P \cup K$ hasta un nodo de destino $j \in K \cup F$ y con el modo de transporte v , en un periodo de tiempo t
S_{pt}	Inventario en unidades de producto en la planta de procesamiento p en el periodo de tiempo t

Tabla 5. Parámetros para la operación del modelo

Parámetro	Descripción	Observación
r_{ipv}	Porcentaje de producto perdido durante el transporte desde el nodo $i \in C$ hasta el nodo p con el modo de transporte v	Este producto perdido puede ser causado por los modos de transporte, el tipo de carretera o la calidad de la fruta que ofrece el productor i
$l1_{pkv}$	Porcentaje de producto perdido durante el transporte desde el nodo p hasta el nodo k con el modo de transporte v	Este producto perdido puede ser causado por el modo de transporte que sea usado en el tramo que va desde una planta procesadora hasta un lugar de cargue y descargue.
$l2_{kk'v}$	Porcentaje de producto perdido generado durante el transporte desde el nodo k hasta el nodo k' con el modo de transporte v	Este producto perdido puede ser causado por el modo de transporte usado en el tramo que va desde un lugar de cargue y descargue hasta otro lugar de cargue y descargue.
$l3_{kfv}$	Porcentaje de producto perdido generado durante el transporte desde el nodo k hasta el nodo f con el modo de transporte v	
l_{tkf}	Tiempo de entrega entre del nodo de cargue y descargue y el cliente final	Tiempo de entrega en semanas
q_p	Capacidad de almacenamiento de la planta p	En toneladas de aguacate
g_p	Capacidad de procesamiento de la planta p	En toneladas de aguacate
u_{ijv}	Capacidad de transporte en cada arco (i, j) con el modo de transporte v	En toneladas de aguacate
a_{it}	Disponibilidad de cosecha $i \in C$ de cada productor en cada periodo t	En toneladas de aguacate
d_{ft}	Demanda en unidades de producto del destino final f en el periodo de tiempo t (Toneladas)	En toneladas de aguacate
w	Porcentaje de producto perdido en la planta de procesamiento por el paso del tiempo	Cantidad de fruta perdida cada semana, en %.

s_{ip}	Inventario inicial de las plantas de procesamiento	En toneladas de aguacate
d_{ij}	Distancia recorrida en cada arco (i, j)	En kilómetros

Tabla 6. Parámetros para compatibilidad entre nodos los cuales determinan la existencia de un arco o no en el modelo

Parámetro	Descripción	Observación
$comp1_{ip}$	Indica si existe compatibilidad entre un nodo de cosecha y una planta de procesamiento	Parámetro binario, 1 si existe compatibilidad, 0 si no existe compatibilidad
$comp2_{pk}$	Indica si existe compatibilidad entre una planta de procesamiento y los lugares de cargue y descargue	Parámetro binario, 1 si existe compatibilidad, 0 si no existe compatibilidad
$comp3_{kk'}$	Indica si existe compatibilidad entre los lugares de cargue y descargue	Parámetro binario, 1 si existe compatibilidad, 0 si no existe compatibilidad
$comp4_{kf}$	Indica si existe compatibilidad entre los lugares de cargue y descargue y los clientes finales	Parámetro binario, 1 si existe compatibilidad, 0 si no existe compatibilidad

Tabla 7. Parámetros para las funciones objetivo del modelo

Parámetro	Descripción	Observación
cc_i	Costo de compra al productor $i \in C$	En \$/t
cp_p	Costo de procesamiento en la planta $p \in P$	En \$/t
ca_p	Costo de almacenamiento en la planta $p \in P$	En \$/t
$ce1_{ipv}$	Costo de transporte desde el nodo i hasta el nodo p con el modo de transporte v	En \$/km * t
$ce2_{pkv}$	Costo de transporte desde el nodo p hasta el nodo k con el vehículo v	En \$/km * t
$cmm_{kk'v}$	Costo de transporte multimodal	En \$/km*t, Incluye el costo de envío, pero también el costo de cargar en una terminal y descargar en la terminal de destino
$ce3_{kfv}$	Costo de transporte desde el nodo k hasta el nodo f con el vehículo v	En \$/km * t
$et1_{ipv}$	Cantidad de CO ₂ generado durante el transporte desde el nodo i hasta el nodo p con el modo de transporte v	En t de CO ₂ /km* t de aguacate

$et2_{pkv}$	Cantidad de CO ₂ generado durante el transporte desde el nodo p hasta el nodo k con el modo de transporte v	En t de CO ₂ /km* t de aguacate
$et3_{kfv}$	Cantidad de CO ₂ generado durante el transporte desde el nodo k hasta el nodo f con el modo de transporte v	En t de CO ₂ /km* t de aguacate
ea_p	Cantidad de CO ₂ generado durante el almacenamiento en las plantas de procesamiento	En t de CO ₂ / t de aguacate
$et4_{kk'v}$	Cantidad de CO ₂ generado durante el transporte entre las terminales de transporte k y k'	En t de CO ₂ /km* t de aguacate*

Objetivos: Al ser un modelo de optimización multiobjetivo el modelo plantea los siguientes objetivos:

- **Función objetivo 1- Económico-sostenible:** Maximizar la utilidad asociada a todo el proceso de distribución del aguacate Hass de exportación en Colombia. El conjunto de ecuaciones (1) desde la A hasta la D incluyen todos estos costos logísticos, costos de compra (A), costos de procesamiento (B), de almacenamiento (C) y de transporte (D). Por su parte la función de ingresos (0A) indica todas las entradas obtenidas por la venta de la fruta durante el horizonte de planeación. La utilidad (0B) es el resultado de descontar todos los costos a los ingresos obtenidos.

Ingresos

$$\sum_{k \in K} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T | t + lt_{kf} \leq 12} price_f comp4_{kf} Y_{kfv} \quad (0A)$$

Utilidad

$$Utilidad = Ingresos - (CostoCompra + CostoProc + CostoAlmac + CostoEnvio1 + CostoEnvio2 + CostoEnvio3 + CostoEnvio4) \quad (0B)$$

Costo de compra

$$\sum_{i \in C} cc_i \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} comp1_{ip} X_{ipvt} \quad (1A)$$

Costo de procesamiento en las plantas

$$\sum_{p \in P} cp_p \sum_{i \in C} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} comp1_{ip} X_{ipvt} \quad (1B)$$

Costo de almacenamiento en las plantas

$$\sum_{p \in P} ca_p \sum_{t \in T} S_{pt} \quad (1C)$$

Costo de transporte

Entre productores y plantas

$$\sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} ce1_{ipv} di_{ip} comp1_{ip} X_{ipvt} \quad (1D1)$$

Entre plantas y lugares de cargue y descargue

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} ce2_{pkv} di_{pk} comp2_{pk} Y_{pkvt} \quad (1D2)$$

Entre lugares de cargue y descargue

$$\sum_{k \in K} \sum_{k' \in K} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} cmm_{kk'v} di_{kk'} comp3_{kk'} Y_{kk'vt} \quad (1D3)$$

Entre cargue y descargue y clientes finales

$$\sum_{k \in K} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} ce3_{kfv} di_{kf} comp4_{kf} Y_{kfv} \quad (1D4)$$

- **Función objetivo 2 - Ambiental:** Minimizar la cantidad de CO₂ producido durante todo el proceso de distribución del aguacate Hass de exportación en Colombia. El conjunto de ecuaciones (2) desde la A hasta la B incluyen las cantidades de CO₂ producidas, por el almacenamiento en las plantas (A) y las generadas por las variaciones en los modos de transporte (B).

Emisiones generadas por el almacenamiento en las plantas

$$\sum_{p \in P} ea_p \sum_{t \in T} S_{pt} \quad (2A)$$

Emisiones generadas en el envío

Entre productores y plantas

$$\sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} et1_{ipv} di_{ip} comp1_{ip} X_{ipvt} \quad (2B1)$$

Entre plantas y lugares de cargue y descargue

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} et_{pkv} di_{pk} comp_{pk} Y_{pkvt} \quad (2B2)$$

Entre lugares de cargue y descargue

$$\sum_{k \in K} \sum_{k' \in K} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} et_{kk'v} di_{kk'} comp_{kk'} Y_{kk'vt} \quad (2B3)$$

Entre cargue y descargue y clientes finales

$$\sum_{k \in K} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} et_{kfv} di_{kf} comp_{kf} Y_{kfv} \quad (2B4)$$

- **Función objetivo 3 – Producto perdido total:** Minimizar la cantidad de producto perdido total durante todo el proceso de distribución del aguacate Hass de exportación en Colombia. El conjunto de ecuaciones (3) desde la A hasta la B incluyen las cantidades de producto perdido, por el almacenamiento en las plantas (A) y por las variaciones en los modos de transporte (B).

Producto total perdido en el almacenamiento en las plantas

$$w \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} S_{pt} \quad (3A)$$

Producto total perdido en el envío

Entre productores y plantas

$$\sum_{i \in C} \sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} r_{ipv} comp_{ip} X_{ipvt} \quad (3B1)$$

Entre plantas y lugares de cargue y descargue

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} l_{pkv} comp_{pk} Y_{pkvt} \quad (3B2)$$

Entre lugares de cargue y descargue

$$\sum_{k \in K} \sum_{k' \in K} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} l_{kk'v} comp_{kk'} Y_{kk'vt} \quad (3B3)$$

Entre cargue y descargue y clientes finales

$$\sum_{k \in K} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} l_{kfv} comp_{kf} Y_{kfv} \quad (3B4)$$

Restricciones

En los orígenes:

- **Disponibilidad de cosecha:** El conjunto de restricciones (4) indica que de un nodo de cosecha no puede salir una cantidad de aguacate mayor que su disponibilidad.

$$\sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \text{comp1}_{ip} X_{ipvt} \leq a_{it} \quad \forall i \in C, \forall t \in T \quad (4)$$

En las plantas de procesamiento:

- **Capacidad de procesamiento de la planta:** El conjunto de restricciones (5) asegura que la capacidad de procesamiento de la planta debe ser mayor o igual a la cantidad total de producto procesada.

$$\sum_{i \in C} \sum_{v \in V} \text{comp1}_{ip} X_{ipvt} \leq g_p \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (5)$$

- **Capacidad de almacenamiento de la planta:** El conjunto de restricciones (6) garantiza que la capacidad de almacenamiento de la planta debe ser mayor o igual a la cantidad total de producto almacenada.

$$s_{pt} \leq q_p \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (6)$$

- **Inventario en la planta de procesamiento:** El conjunto de restricciones (7) indica que el inventario en la planta de procesamiento es igual al producto que se recibe desde los puntos de cosecha disminuido por el porcentaje de pérdida en transporte, menos el producto que se deteriora por el paso del tiempo menos el producto que se envía a los puntos de cargue o descargue, más el inventario del periodo.

$$s_{pt} = (1 - w)(s_{p,t-1}) + \sum_{i \in C} \sum_{v \in V} \text{comp1}_{ip} X_{ipvt} (1 - r_{ipv}) - \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \text{comp2}_{pk} Y_{pkvt} \quad (7)$$

$$\forall p \in P, \forall t \in T$$

- Las restricciones (8) a planta de procesamiento cuenta con un nivel inicial de inventario del producto.

$$s_{p0} = s_{i_p} \quad \forall p \in P \quad (8)$$

En los puntos de cargue y descargue

- **Capacidad de transporte:** El conjunto de restricciones (9) aseguran que la capacidad de transporte entre un nodo de origen y un nodo de destino para cada modo de transporte debe ser mayor o igual a la cantidad de producto transportada.

$$Y_{ijvt} \leq u_{ijv} \quad \forall i \in P \cup k, \forall j \in K \cup F, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (9)$$

- **Balance de flujo:** El conjunto de restricciones (10) aseguran que la cantidad de producto que sale de un nodo de origen es entregada a un nodo destino. Nótese que el flujo entrante se ve afectado por el porcentaje de pérdida debido a la variación en los modos de transporte y medios de conservación.

$$\sum_{i \in P \cup k} \sum_{v \in V} \text{comp}_{ik} Y_{ikvt} (1 - l_{ikv}) = \sum_{j \in K \cup F} \sum_{v \in V} \text{comp}_{kj} Y_{kjvt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \text{comp}_{2pk} Y_{pkvt} (1 - l_{pkv}) + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \text{comp}_{3kk'} Y_{kk'vt} (1 - l_{kk'v}) \quad (10A)$$

$$= \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \text{comp}_{3kk'} Y_{kk'vt} + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \text{comp}_{4kf} Y_{kfv} \quad \forall k \in K - \{\text{LaDoradaCaldas, LaTebaidaQuindio}\}, \forall t \in T$$

(10B)

$$\sum_{p \in P} \sum_{v \in V} \text{comp}_{2pk} Y_{pkvt} (1 - l_{pkv}) = \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \text{comp}_{3kk'} Y_{kk'vt} \quad \forall k \in \{\text{LaDoradaCaldas, LaTebaidaQuindio}\}, \forall t \in T$$

En los clientes finales

- **Cumplir la demanda:** El conjunto de restricciones (11) permite garantizar que la cantidad total de aguacate Hass exportada debe ser igual a la cantidad total que ha sido demandada (Se debe cumplir con las cantidades demandadas por cada destino, considerando porcentaje de pérdida en tránsito).

$$\sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \text{comp}_{4kf} Y_{kfv, t - l_{tkf}} (1 - l_{kfv}) = d_{ft} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (11)$$

4.1 Enfoque de solución del modelo de flujo de redes multiobjetivo: ϵ – restricciones

Para dar solución al modelo de flujo de redes multiobjetivo anteriormente planteado se utiliza un método a posteriori o de generación, este tipo de métodos involucran al tomador de decisiones sólo después de encontrar el frente de Pareto. Estos métodos son los más ventajosos para este tipo de problemas ya que permiten claramente definir el equilibrio entre todos los objetivos, proporcionando

al tomador de decisiones una visión completa del problema. Se decidió no usar un método a priori, es decir, aquellos donde el tomador de decisiones expresa sus preferencias al principio y luego el problema se resuelve agregando las funciones objetivo en una sola, tales como el promedio ponderado, debido a las desventajas que poseen este tipo de métodos, en especial la dificultad de definir y proporcionar algunos parámetros como, por ejemplo, las ponderaciones para cada objetivo. (Mesquita-Cunha et al., 2023).

Para este modelo se seleccionó el método ϵ – restricciones, el cual es uno de los métodos exactos mejor conocidos para resolver problemas de optimización tipo multiobjetivo (Haimes, 1971). ϵ – restricciones es considerado como uno de los métodos a posteriori más populares para resolver problemas multiobjetivo de programación lineal entera mixta. La funcionalidad de este método radica en restringir cada objetivo recurriendo a variaciones para cada objetivo mediante un parámetro ϵ (Mesquita-Cunha et al., 2023).

Así, se usó el método de ϵ – restricciones para para analizar las compensaciones de las funciones objetivo, se agregaron restricciones sobre los valores totales de las pérdidas o las emisiones de manera que el modelo se viese obligado a sacrificar la utilidad en favor de obtener menores emisiones y/o menores pérdidas de fruta. Los experimentos computacionales de esta investigación se llevaron a cabo en el software Xpress 8.10 y las gráficas se obtuvieron usando MATLAB 2023b.

Al usar el método ϵ – restricciones para este trabajo resulta un modelo de la forma:

Max (Utilidad)

Sujeto a:

- ***Conjunto de restricciones (4)-(11)***
- ***Pérdidas totales $\leq \epsilon_1 \vee$ Emisiones totales $\leq \epsilon_2$***

5. Caso de estudio

Esta sección muestra la verificación del modelo propuesto mediante el desarrollo de un caso de estudio. Se describen todos los parámetros usados en el modelo y como se obtuvo la información necesaria para su construcción.

La aplicación del modelo se verifica a través de un estudio de caso de una cadena de suministro de Aguacate Hass en una subregión de Antioquia-Colombia, conformada por los departamentos de Antioquia, Caldas, Quindío, Risaralda, Tolima y Valle del Cauca tal como se muestra en la **Figura 7**. Los datos se obtuvieron con fuentes secundarias de información referentes a las cadenas de suministro de frutas y vegetales y su proceso de distribución, también se usaron las respuestas obtenidas a entrevistas que fueron realizadas a algunos productores y procesadores de aguacate Hass en Colombia.



Figura 7. Región de Colombia estudiada

A continuación, se detalla cada uno de los parámetros usados en el modelo multiobjetivo estudiado:

Productores: Inicialmente se tenía como fin que las fincas de los productores de aguacate Hass colombiano conformaran este primer eslabón en el modelo propuesto. Sin embargo, teniendo en cuenta la dificultad en términos de costos y tiempo para recolectar la información real de cada finca productora de aguacate Hass este eslabón quedó conformado por los municipios productores de aguacate Hass en Colombia. Para escoger el primer eslabón de la cadena de suministros del aguacate Hass en Colombia se siguió un procedimiento paso a paso, inicialmente se seleccionaron los departamentos de Antioquia (23%), Caldas (16%), Tolima (14%), Risaralda (5%), Valle del Cauca (5%) y Quindío (4%), siendo estos los que mostraron mayor producción de este producto en el año 2021, de acuerdo a las cifras sectoriales (Ministerio de Cultura y Desarrollo Rural, 2021). De estos departamentos se escogieron los municipios que hasta el año 2022 habían sido habilitados para producir aguacate Hass de acuerdo a los estándares del Instituto Colombiano Agropecuario ICA (Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), 2022). A cada municipio se le asignó la producción generada en el año 2019 por las evaluaciones agropecuarias municipales desarrolladas por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), 2019). De acuerdo a estas evaluaciones la producción total de aguacate Hass en Colombia para el año 2019 fue 827.761, 19. Para el estudio se tomaron 386.578,6 correspondientes a la producción total de los municipios anteriormente mencionados que equivalen a un 46,7% de la producción anual total de aguacate Hass en Colombia para el año 2019, lo que es un porcentaje altamente significativo.

Clientes finales: Como destinos o clientes finales se escogieron los países con mayor nivel de exportación en el año 2022 entre los meses de enero y septiembre del mismo año según el informe de la Asociación Nacional de Comercio Exterior para el año 2022 (Asociación Nacional de Comercio Exterior (ANALDEX), 2022), estos fueron: Países Bajos, Estados Unidos, Reino Unido, España y Bélgica; siendo Países Bajos el principal país de destino del aguacate Hass colombiano de exportación

Formas de transporte: Para los objetivos de este trabajo inicialmente se plantearon como alternativas cuatro formas de transporte, la ferroviaria, la terrestre, la fluvial-marítimo y la aérea. Sin embargo, conociendo los altos costos del transporte aéreo y que hoy día en Colombia, entre el 80% y el 90% de las mercancías se transportan por carretera, dejando como menos utilizados a las formas ferroviaria y fluvial-marítimo. Este último modo enfrenta múltiples barreras constructivas y tecnológicas, falta de inversión en recursos y vías de acceso debido a la infraestructura existente de los puertos colombianos (Wlamyr et al., 2022). De esta manera, en el análisis solo nos centraremos en las formas de transporte terrestre, ferroviario y fluvial-marítimo.

- **Forma de transporte terrestre:** Este tipo de transporte fue correspondiente al movimiento de la fruta en el interior del país, desde cada municipio productor hasta las plantas de procesamiento y posteriormente hasta los puertos marítimos.
- **Forma de transporte fluvial-marítimo:** Este tipo de transporte fue correspondiente al movimiento de la fruta desde el interior del país, es decir desde los puertos fluviales a los puertos marítimos y desde estos últimos hacia el exterior del país, los clientes finales.
- **Forma de transporte ferroviario:** Este tipo de transporte fue correspondiente al movimiento de la fruta desde las plantas de procesamiento pasando por los nodos de intercambio ferroviario, esta forma de transporte requiere conexiones con los lugares de intercambio para llegar al puerto y es fundamental en la intermodalidad.

Tecnologías de conservación: Los productos perecederos como frutas y vegetales se caracterizan por tener una corta vida útil y perder de manera rápida su frescura y calidad si no se conservan las condiciones óptimas de temperatura y humedad relativa (Kargwal et al., 2020). Esta es la razón por lo que las tecnologías de conservación usadas para este modelo serán: Ambiente sin sistema de conservación, ambiente con sistema de conservación basado en la refrigeración, donde se controla la temperatura, y ambiente con refrigeración y atmosfera controlada donde además de la temperatura se busca controlar la humedad relativa de las frutas.

Modos de transporte: Para efectos del modelo los modos de transporte son las combinaciones entre las formas de transporte y las tecnologías de conservación:

Tabla 8. Modos de transporte con tecnología de refrigeración

Modo de transporte	
TSR	Terrestre sin refrigeración
TCR	Terrestre con refrigeración
TCRA	Terrestre con refrigeración y atmosfera controlada

FICR	Fluvial-marítimo con refrigeración
FICRA	Fluvial-marítimo con refrigeración y atmosfera controlada
FeCR	Ferroviaria con refrigeración
FeCRA	Ferroviaria con refrigeración y atmósfera controlada

Capacidad de almacenamiento de las plantas: teniendo en cuenta las fluctuaciones existentes entre las plantas de procesamiento en Colombia, se decidió trabajar con la misma capacidad de almacenamiento para todas las plantas del modelo, la cual es de 10 contenedores por periodo. Los contenedores son de 40 pies y su capacidad máxima de carga es generalmente 29 toneladas (29.000 kg.), lo que a la semana serían 290 toneladas en promedio (PortalFrutícula, 2016; TecnóAlimen, 2019).

Capacidad de procesamiento de las plantas: teniendo en cuenta las fluctuaciones existentes entre las plantas de procesamiento en Colombia, las cuales procesan en un rango de 8 a 40 toneladas por hora, se decidió trabajar con la misma capacidad de procesamiento para todas las plantas del modelo, la cual es de 23 toneladas en promedio por hora, lo que a la semana serían 920 toneladas en promedio si se trabajan 8 horas diarias 5 días a la semana. Para estimar tanto la capacidad de procesamiento como la de almacenamiento se recurrió a la información disponible en las fuentes secundarias del sector.

Puntos de intercambio: Los puntos de intercambio o puntos estratégicos dentro de este modelo enfocado en la zona de producción que se estudió son los mostrados en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Puntos de intercambio

Punto de intercambio	Descripción
La Dorada, Caldas	Punto intermodal
La Tebaida, Quindío	Punto intermodal
Santa Marta, Magdalena	Puerto marítimo
Barranquilla, Atlántico	Puerto marítimo
Buenaventura, Valle del Cauca	Puerto marítimo
Cartagena, Bolívar	Puerto marítimo

Disponibilidad de la cosecha: Para este parámetro se tuvo en cuenta la producción de cada municipio en el año 2019, la cual se dividió entre 52 para obtener la posible producción semanal de cada municipio, estos datos fueron tomados de las evaluaciones agropecuarias municipales desarrolladas por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), 2019)

Costos de procesamiento en la planta: El costo de procesamiento que se tendrá para cada kilogramo de fruta dentro de la planta será de aproximadamente \$26,37/Kg, lo cual corresponde a un 3% de los costos totales promedio de producción para un kg de aguacate, asignados a costos de empaque. (Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario - FINAGRO, 2018)

Costos de almacenamiento en la planta: El costo de almacenamiento que se tendrá para cada kilogramo de fruta dentro de la planta será de aproximadamente 10% del valor de compra, esto basado en los costos de almacenamiento ofrecidos en el trabajo de González-Estudillo et al., (2017).

Costos: estos costos están asociados a las distancias que hay entre los nodos implicados y dependen del modo de transporte empleado.

Costos de transporte: Para los costos asignados a cada modo de transporte este trabajo se basó en el estudio realizado por Márquez Díaz, (2011), quien modeló el transporte de carga en Colombia. Con su análisis logró estimar los costos marginales sobre la red estratégica de los modos de transporte carretero, fluvial y ferroviario en Colombia para el año 2005. De este modo desarrolló un indicador de costo interno para cada uno de los modos de transporte, encontrando lo siguiente: \$74/ton*km en el modo de transporte carretero, \$19/ton*km en el modo de transporte fluvial y \$27/ton*km en el modo de transporte ferroviario. Estos precios se llevaron al año 2023 mediante la variación anual del índice de los precios del consumidor de cada año a partir del año 2005 dados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

Tabla 10. Costos por tonelada transportada por Km recorrido por modo de transporte (2023)

Modo de transporte	Costo por tonelada transportada por km recorrido (2023)
Terrestre	\$194,5/ton*km
Ferroviano	\$71/ton*km
Fluvial	\$50/ton*km

Para los costos de transporte con refrigeración se usó como fuente el trabajo de Vilakazi & Paelo, (2017), donde en promedio el costo del transporte refrigerado aumenta un 70% con respecto al transporte no refrigerado. Por su parte para el costo del transporte con refrigeración y atmosfera controlada se usó el porcentaje dado por la Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER), (2017), el cual es un aumento aproximado del 16% cuando el transporte es con refrigeración y atmosfera controlada.

Tabla 11. Costos por tonelada transportada por Km recorrido por modo de transporte y tecnologías de conservación

Modo de transporte	Costo sin refrigeración	Costo con refrigeración	Costos con refrigeración y atmósfera controlada
Terrestre	\$194,5/ton*km	\$330,6/ton*km	\$383,5/ton*km
Ferroviano	\$71/ton*km	\$120,6/ton*km	\$139,9/ton*km
Fluvial-marítimo	\$50/ton*km	\$84,9/ton*km	\$98,5/ton*km

Porcentaje de CO₂ generado

Para el porcentaje por modo de transporte y tecnología de refrigeración y conservación se tomaron las estadísticas para el año 2018 ofrecidas por el portal de estadística en línea alemán Statista, (2018).

Tabla 12. Porcentaje de CO₂ por tonelada transportada por Km recorrido por modo de transporte

Modo de transporte	CO ₂ sin refrigeración	CO ₂ con refrigeración
Terrestre	0,2/ton*km	0,66/ton*km
Ferrovial	0,05/ton*km	0,06/ton*km
Fluvial-marítimo	0,01/ton*km	0,02/ton*km

Por otra parte, para el porcentaje de aumento de CO₂ generado cuando el transporte es con refrigeración y atmosfera controlada, se aumentarán en un porcentaje de 15% aproximadamente debido a que requieren un mayor porcentaje de energía para su correcto funcionamiento (Wang et al., 2022).

Tabla 13. Porcentaje de CO₂ por tonelada transportada por Km recorrido por modo de transporte y tecnologías de conservación

Modo de transporte	CO ₂ sin refrigeración	CO ₂ con refrigeración	CO ₂ con refrigeración y atmósfera controlada
Terrestre	0,2/ton*km	0,66/ton*km	0,76/ton*km
Ferrovial	0,05/ton*km	0,06/ton*km	0,07/ton*km
Fluvial-marítimo	0,01/ton*km	0,02/ton*km	0,023/ton*km

Porcentaje de emisiones de CO₂ en las plantas de procesamiento: El trabajo de Johannes y Eeden, (2022) indica que en las plantas de procesamiento por cada tonelada de producto se genera 8.2 kg de CO₂.

Periodos de tiempo y horizonte de planeación: La planeación se realiza para un trimestre, un cuarto de año, es decir 12 semanas, dividido en semanas. Es decir, las decisiones se toman para cada semana dentro del horizonte de planeación.

Porcentaje de producto perdido: El porcentaje de producto perdido por tonelada transportada por kilómetro recorrido por cada modo de transporte esta dado de la siguiente manera: para el transporte terrestre sin tecnología de refrigeración ni conservación se tomó como porcentaje de producto perdido el promedio de los calculados en el informe de Unites States Agency Internacional Development (USAID)-funded Cold Chain Bangladesh Alliance (CCBA), (2016) para frutas y vegetales. Así para el transporte refrigerado y refrigerado con atmosfera controlada se tomaron los datos del trabajo realizado por Bower et al., (1989) promediando el porcentaje de la decoloración del mesocarpio y las anomalías vasculares.

Para el transporte fluvial y marítimo como referencia se tomó el trabajo de Jin Choi et al., (2016), quien estudió el efecto de las atmosferas controladas en el transporte de las fresas a través de contenedores en largos periodos de tiempo.

Tabla 14. Porcentaje de producto perdido por tonelada transportada por Km recorrido por modo de transporte y tecnologías de conservación

Modo de transporte	% Pérdidas sin refrigeración	% Pérdidas con refrigeración	% Pérdidas con refrigeración y atmósfera controlada
Terrestre	0.119/ton*km	0.096/ton*km	0.023/ton*km
Ferroviano	0.0143/ton*km	0.012/ton*km	0.0098/ton*km
Fluvial-marítimo	0.024/ton*km	0.02/ton*km	0.01/ton*km

Para el transporte por modo ferroviano el porcentaje de pérdidas durante el transporte para frutas y vegetales fue tomado de Liu et al., (2013). Cuando se tiene la tecnología de refrigeración y atmosfera controlada el porcentaje de pérdidas se reduce aproximadamente un 18% de acuerdo al trabajo de Céline et al., (2020). Para los datos de pérdidas de producto sin refrigeración en los modos ferroviano y fluvial-marítimo, se utilizó el porcentaje de aumento en el modo de transporte terrestre, el cual fue equivalente a un aumento del 19.3% cuando se pasa de transporte refrigerado al no refrigerado.

Porcentaje de producto perdido en la planta de procesamiento por el paso del tiempo: El porcentaje de producto perdido semanalmente en la planta de procesamiento será de aproximadamente 0,33%. (Dhall et al., 2012).

Capacidad de transporte: Para fines de ejecución del modelo se tomó que la capacidad de transporte en cada arco con cualquier modo de transporte será la demanda semanal más grande entre los destinos finales, que en este caso son 842 toneladas de aguacate semanales, esto con el fin de que no haya limitaciones en enviar la fruta y observar otras interacciones dentro del modelo. Usando valores diferentes de este parámetro es posible modelar, por ejemplo, escenarios de escasez de contenedores como el generado durante la pandemia de COVID 19.

Inventario inicial de las plantas de procesamiento: Se supuso que el inventario inicial de cada planta de procesamiento sería igual al 50% de la capacidad de almacenamiento de dichas plantas, es decir, en este caso 145 toneladas aproximadamente iniciando el primer periodo.

6. Resultados y análisis

Esta sección describe los análisis y resultados obtenidos al verificar el modelo propuesto mediante el caso de estudio anteriormente descrito. Para esta verificación fueron propuestos y evaluados tres escenarios base, los cuales son descritos a continuación.

Escenarios evaluados: Para verificar la utilidad del modelo de optimización se utilizaron tres escenarios bases, cada uno con características diferentes. Una vez obtenida una solución base para analizar las compensaciones de las funciones objetivo, se trabajó con el método ϵ – restricciones

teniendo como función principal la maximización de utilidades. Para analizar las compensaciones entre estos tres objetivos se exigieron, iterativamente reducciones de 5% en las emisiones y pérdidas totales de la cadena, de manera que cada iteración se corrió maximizando las utilidades y tomando los otros objetivos como restricciones que fueron variando en un porcentaje de 5% para cada corrida. Así mismo, como alternativa de análisis, se introdujeron escenarios en los que hay nuevos elementos que actualmente no están presentes en la cadena de suministro de aguacate Hass de exportación.

- **Escenario 1:** En este escenario la red de distribución modelada no tiene acceso al modo de transporte ferroviario ni al modo de transporte fluvial, además durante el proceso no se cuenta con la tecnología de conservación de atmosfera controlada.

Dentro del modelo para el tramo de la red que va desde **los productores hasta las plantas procesadoras** solo existen las opciones de modo de transporte terrestre sin refrigeración o transporte terrestre con refrigeración, de la misma forma ocurre para los tramos de **planta procesadora-nodos de intercambio** y de **nodos de intercambio-nodos de intercambio**. Para el último tramo que va desde los **nodos de intercambio a los destinos finales** solo existe una opción de modo de transporte el cual es modo de transporte marítimo con refrigeración.

En este escenario los únicos puntos intermodales o de transbordo son los cuatro puertos que hace parte de este modelo: el puerto de Barranquilla, el puerto de Cartagena, el puerto de Buenaventura y el puerto de Santa Marta.

Los valores de los parámetros $r, l_1, l_2, l_3, ce_1, ce_2, cmm, ce_3, et_1, et_2, et_3, et_4$, los cuales dentro del modelo toman valores pequeños (entre 0 y 1), debían ser apagados para este escenario, por lo que se les asignaron valores muy altos (1000) para que el modelo pudiera descartarlos, por el contrario, los valores de los parámetros u_1, u_2, u_3 los cuales normalmente toman valores relativamente grandes dentro del modelo (842), y que de igual manera debían ser apagados para este escenario, se les asignaron valores muy pequeños (cero).

- **Escenario 2:** En este escenario la red de distribución modelada no tiene acceso al modo de transporte ferroviario ni al modo de transporte fluvial. En este escenario si se cuenta con la tecnología de conservación de atmosfera controlada.

A diferencia del primer escenario, donde se considera que las condiciones de transporte y tecnologías de conservación son las más normales y comunes en el ámbito colombiano, este segundo escenario pretende analizar el impacto de una tecnología de conservación que está incursionando en el mercado colombiano de aguacate de exportación la cual es la utilización de atmosfera controlada, de esta manera poder analizar el impacto que esta tecnología de conservación tiene en las tres dimensiones de sostenibilidad que se estudian en el modelo.

- **Escenario 3:** En este escenario la red de distribución modelada si tiene acceso al modo de transporte ferroviario y al modo de transporte fluvial, además si se cuenta con la tecnología de conservación de atmosfera controlada.

Finalmente, en este tercer escenario agregamos un nuevo elemento a esta cadena de suministro, este es, la intermodalidad dentro del proceso de distribución. En el pasado reciente se han realizado pruebas piloto de uso de transporte multimodal de aguacate Hass de exportación (ZonaLógica, 2020). Para el desarrollo de este trabajo esta opción puede resultar atractiva dada la ubicación de la zona de mayor producción de aguacate Hass de exportación en el país y su cercanía con los nodos de transbordo multimodal La Dorada y La Tebaida, lo cual permitiría utilizar estos modos de manera intermedia para llegar a los puertos de exportación de Santa Marta (desde la Dorada en modo ferroviario), Barranquilla y Cartagena (desde la Dorada en modo Fluvial) y Buenaventura (desde La Tebaida en modo ferroviario). Si bien estas alternativas no son una realidad en el momento, estudiar estos escenarios permite vislumbrar el potencial que ofrecen, toda vez que en el país el debate sobre los beneficios e inversiones necesarias para utilizar transporte multimodal es constante (Ministerio de Transporte de Colombia (MinTransporteCo), 2021).

1. Análisis del escenario 1: Sin modo ferroviario, sin modo fluvial y sin atmosfera controlada

Posterior a las corridas realizadas para el primer escenario se obtuvo que la solución óptima maximizando el primer objetivo mediante el método ϵ – restricciones fue la mostrada en la **Tabla 15**. En este primer escenario el punto óptimo para la maximización de utilidades indicó un total de utilidades equivalentes a \$ 38243327650 para el primer objetivo de maximizar utilidades, 6348541 toneladas de CO₂ emitidas y finalmente un total de 3111 toneladas de aguacate perdidas.

Así también, la mejor opción para la distribución del producto en los dos primeros tramos fue el transporte terrestre con tecnología de refrigeración en un 100%. Se observa el conflicto entre los objetivos estudiados, ya que, aunque el transporte sin refrigeración es el que más utilidades genera, el transporte con refrigeración es el que permite menores pérdidas del producto transportado.

Tabla 15. Solución óptima en escenario 1

Funciones Objetivo	
Utilidad	\$ 38243327650
Emissiones generadas	6348541 toneladas de CO ₂
Pérdidas de producto	3111 toneladas de aguacate

Para esta solución la demanda satisfecha fue de 13204 toneladas de aguacate para un año, repartidos para cada cliente final como se muestra en la **Tabla 16**, fue posible observar que la demanda atendida guardó relación con la demanda potencial (esto es 67586 toneladas de fruta), es decir que a Países Bajos por tener mayor demanda potencial se le atendió un mayor número de toneladas de aguacate.

Tabla 16. Demanda atendida con solución óptima en escenario 1

Cliente final	Demanda satisfecha	Demanda potencial
Países Bajos	8512 toneladas	43745 toneladas

Estados Unidos	679 toneladas	3129 toneladas
Reino Unido	1740 toneladas	8897 toneladas
España	1953 toneladas	10023 toneladas
Bélgica	318 toneladas	1792 toneladas

Para maximizar las utilidades se atendió un 19.5% de la demanda potencial total anual de los clientes finales. Al satisfacer esta demanda se generaron 6348541 toneladas de CO₂ y se perdieron en todo el proceso de distribución 3111 toneladas de aguacate, es decir, un 23.6% del total del producto entregado, cifra que es consistente con los valores de pérdida de cadenas de suministro agroalimentarias similares (Kader, 2005).

Compensaciones entre los objetivos para el escenario 1 variando de emisiones de CO₂

Con el objetivo de aportar a la toma de decisiones en el proceso de distribución del aguacate Hass el modelo se encarga de mostrar un conjunto de soluciones óptimas en el espacio objetivo. En la **Tabla 17** se muestran las compensaciones que podía haber entre estos tres objetivos enfrentados mediante el método ϵ – restricciones, así, al dejar el objetivo de maximización de la utilidad fijo y variar el porcentaje de emisiones de CO₂ generadas se obtuvo el siguiente frente de Pareto:

Tabla 17. Soluciones de frontera de Pareto para escenario 1, variando el porcentaje de emisiones de CO₂

	Porcentaje de disminución de emisiones de CO₂ generadas	Utilidad	Emisiones de CO₂	Pérdidas de producto
1	6348541	38243327650	6348541	3111
2	5% (≤ 6031114)	38149173070	6031114	3111
3	10% (≤ 5713687)	38043928930	5713687	3111
4	15% (≤ 5396260)	37902830020	5396260	3111
5	20% (≤ 5078833)	37758020010	5078833	3111
6	25% (≤ 4761405)	37601870670	4761405	3111
7	30% (≤ 4443978)	37416409050	4443978	3111
8	35% (≤ 4126551)	37204202880	4126551	3111
9	40% (≤ 3809124)	36963638690	3809124	3111
10	45% (≤ 3491697)	36700606410	3491697	3118
11	50% (≤ 3174270)	36333465970	3174270	3181
12	55% (≤ 2856843)	35550190780	2856843	3380
13	60% (≤ 2539416)	33884525940	2539416	3258
14	65% (≤ 2221989)	32025524830	2221989	3101
15	70% (≤ 1904562)	28951687260	1904562	2858
16	75% (≤ 1587135)	25071915380	1587135	2468
17	80% (≤ 1269708)	21022804000	1269708	2054
18	85% (≤ 952281)	16754990360	952281	1668
19	90% (≤ 634854)	11826106260	634854	1169

20	95% (≤ 317427)	6426384663	317427	622
21	100% (≤ 0)	0	0	0

Este conjunto de soluciones fue muy dinámico, la solución óptima de la primera corrida mostró que en los dos primeros tramos se usó siempre la tecnología de refrigeración, sin embargo, en busca de reducir la huella ambiental a partir de la solución número 10 se empieza a incluir el transporte sin refrigeración en el primer tramo. Del mismo modo, estos conjuntos de soluciones son mostradas gráficamente en las **Figura 8** y **Figura 9** respectivamente.

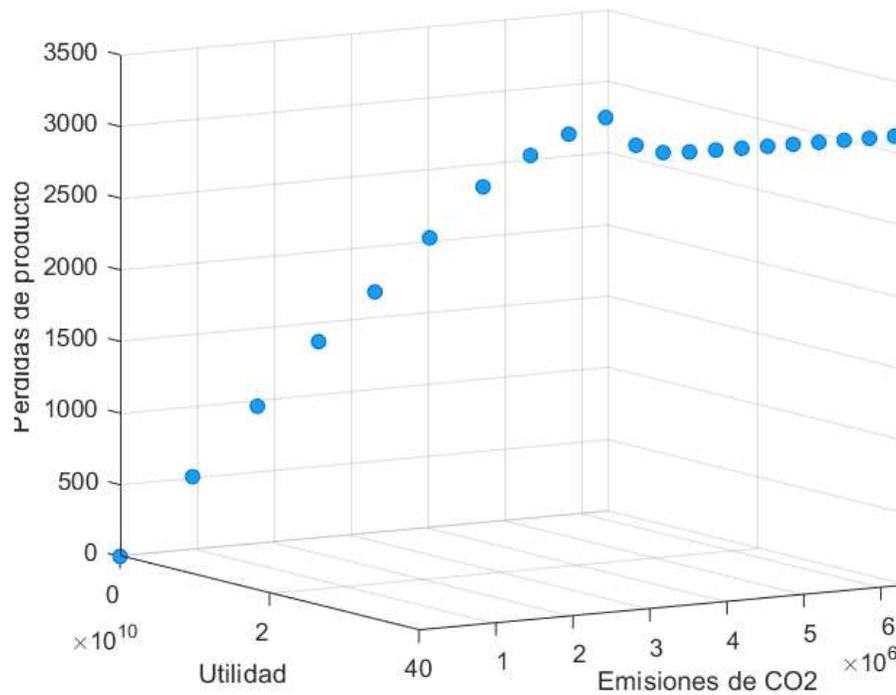


Figura 8. Frontera Óptima de Pareto 3D, escenario 1, variando el porcentaje de emisiones de CO₂

En la **Figura 8** se puede observar el comportamiento de los tres objetivos en un espacio tridimensional, su crecimiento, decaimiento, sin embargo, con fines de estudio del comportamiento entre el objetivo de utilidades y el de las emisiones de CO₂ generadas se hace muy útil la **Figura 9**.

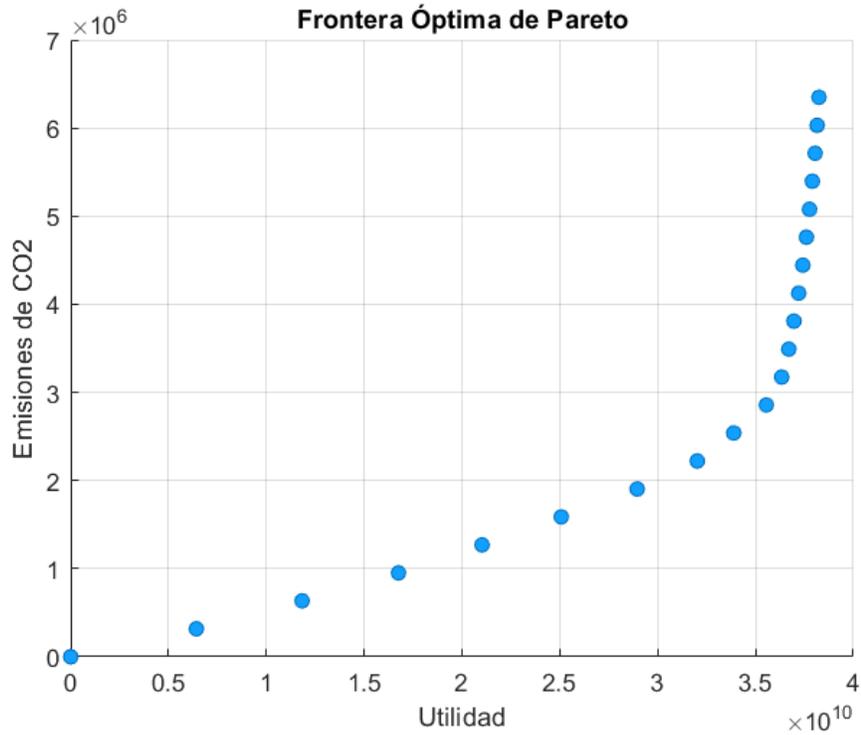


Figura 9. Frontera Óptima de Pareto 2D, escenario 1, variando el porcentaje de emisiones de CO₂

La **Figura 9** nos permite observar el conjunto de soluciones no dominadas al enfrentar las utilidades a las emisiones de CO₂ generadas. Es visible que a medida que las utilidades aumentan las emisiones de CO₂ también aumentan, es decir si queremos la utilidad más alta para el escenario 1 también obtendremos la mayor generación de emisiones de CO₂, por lo que al evaluar esta frontera estaríamos de acuerdo que sería más sostenible sacrificar un porcentaje de utilidades para que nuestra huella ambiental no sea demasiado elevada y la decisión sea sostenible. Por ejemplo, una solución sostenible para este escenario sería la solución número 14 de la **Tabla 17**, en la cual al sacrificar solo un 16% de las utilidades nos permite disminuir en un 65% la huella ambiental generada en el proceso de distribución.

Compensaciones entre los objetivos para el escenario 1 variando el producto perdido

La **Tabla 18** nos muestra las compensaciones obtenidas al fijar el objetivo de maximización de la utilidad y variar el porcentaje de producto perdido, con lo que se obtuvo el siguiente frente de Pareto:

Tabla 18. Soluciones de frontera de Pareto para escenario 1, variando el porcentaje de producto perdido

#	Porcentaje de disminución de producto perdido	Utilidad	Emisiones de CO ₂	Pérdidas de producto
1	3111	38243327650	6348541	3111

2	5% (≤ 2955)	36359055020	6180105	2955
3	10% (≤ 2800)	34470004910	6051169	2800
4	15% (≤ 2644)	32580361750	5659647	2644
5	20% (≤ 2488)	30690718590	5268125	2488
6	25% (≤ 2333)	28800491490	5035783	2333
7	30% (≤ 2177)	26900604250	4811652	2177
8	35% (≤ 2022)	24995806470	4450385	2022
9	40% (≤ 1866)	23091008700	4089117	1866
10	45% (≤ 1711)	21186210920	3727849	1711
11	50% (≤ 1555)	19279698700	3370004	1555
12	55% (≤ 1400)	17371959140	3014609	1400
13	60% (≤ 1244)	15464210200	2659233	1244
14	65% (≤ 1088)	13553576660	2309616	1088
15	70% (≤ 933)	11637324470	1971215	933
16	75% (≤ 777)	9719246008	1636460	777
17	80% (≤ 622)	7800568032	1302903	622
18	85% (≤ 466)	5880945023	971232	466
19	90% (≤ 311)	3959865740	642468	311
20	95% (≤ 155)	2034056715	319995	155
21	100% (≤ 0)	0	0	0

Este conjunto de soluciones se caracterizó por el hecho de reducir cantidad de producto perdido, por lo que en el primer eslabón siempre se usa transporte terrestre con refrigeración el cual genera menor porcentaje de producto perdido en el proceso de transporte.

Así mismo las **Figura 10** y **Figura 11** nos muestran el comportamiento gráfico de las soluciones de la frontera eficiente de Pareto. En la **Figura 10** se puede observar el comportamiento de los tres objetivos en un espacio tridimensional, mientras que la **Figura 11** nos da una visión en dos dimensiones del comportamiento directo que experimentan las utilidades con respecto al porcentaje de producto perdido.

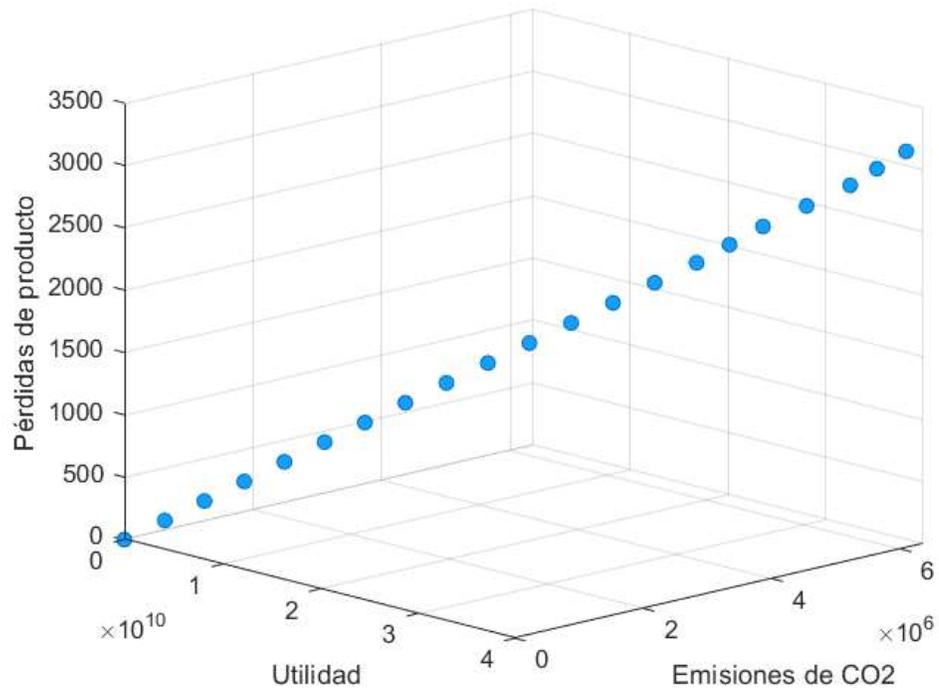


Figura 10. Frontera de Pareto 3D, escenario 1, variando el porcentaje de producto perdido

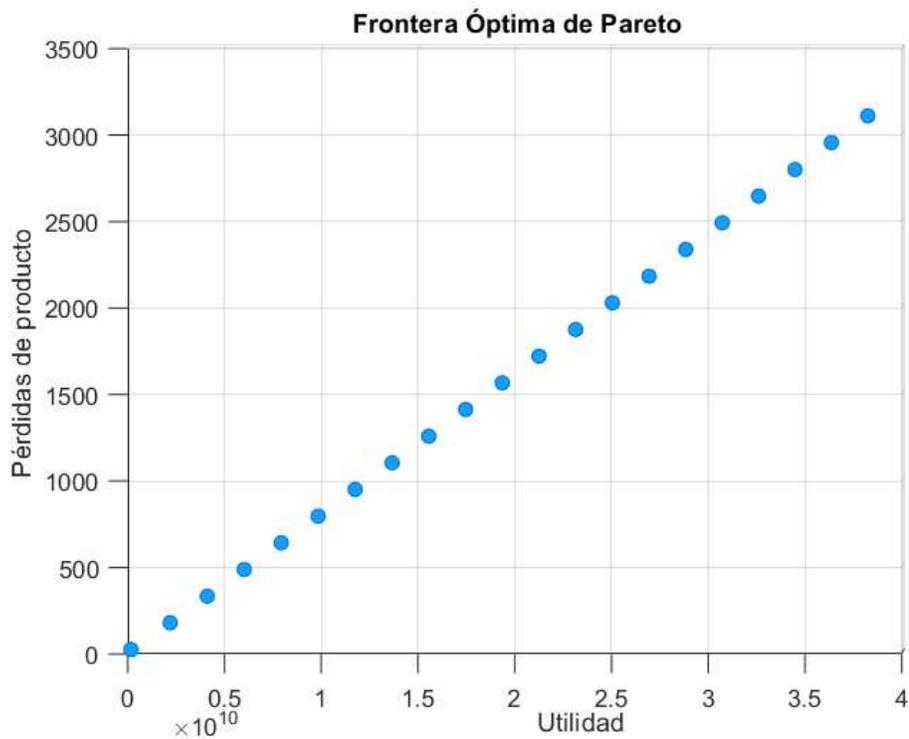


Figura 11. Frontera de Pareto 2D, escenario 1, variando el porcentaje de producto perdido

La **Figura 11** nos permite observar el conjunto de soluciones no dominadas al enfrentar las utilidades a los porcentajes de producto perdido. Es visible que a medida que las utilidades aumentan los

porcentajes de producto perdido también aumentan, de hecho, la **Figura 11** nos permite observar una relación totalmente directa y lineal, por lo que cada vez que las utilidades aumentan un 5% el producto perdido también aumentará un 5%.

2. Análisis del escenario 2: Sin modo ferroviario, sin modo fluvial y con atmosfera controlada

Para el escenario 2 se obtuvo que la solución óptima para el escenario 2 maximizando el primer objetivo mediante el método ϵ – restricciones fue la mostrada en la **Tabla 19**. En este segundo escenario el punto óptimo para la maximización de utilidades indicó un total de utilidades equivalentes a \$ 49260025340 para el primer objetivo de maximizar utilidades, 7405084 toneladas de CO₂ emitidas y finalmente un total de 2099 toneladas de aguacate perdidas.

En este segundo escenario donde tenemos un plus, que es la atmosfera controlada, la mejor opción para la distribución del producto en los dos primeros tramos fue el transporte terrestre con tecnología de refrigeración en un 100%, de igual manera en el último tramo hasta los clientes finales el transporte usó atmosfera controlada. Se observa el conflicto entre los objetivos estudiados, ya que, aunque el transporte con tecnología de conservación sin refrigeración o con refrigeración son los que más utilidades generan, el transporte con atmosfera controlada es el que permite menores pérdidas del producto transportado.

Tabla 19. Solución óptima en escenario 2

Funciones Objetivo	
Utilidad	\$ 49260025340
Emisiones generadas	7405084 toneladas de CO ₂
Pérdidas de producto	2099 toneladas de aguacate

Al realizar un análisis comparativo entre el escenario 1 y el escenario 2 observamos que las utilidades aumentan en un 28.8%, a costa de sacrificar la huella ambiental, la cual aumenta en un 16.64% y el producto perdido disminuye en un 32.5%, mostrando una mejora en dos de los tres objetivos estudiados. Esto ofrece una primera visión de las compensaciones existentes entre las tres dimensiones de la sostenibilidad en esta cadena de suministro. Además, resalta los beneficios en términos de producto perdido y utilidades de la introducción de la tecnología de atmosfera controlada. Sin embargo, es necesario resaltar que dichos beneficios se obtienen con un sacrificio en términos ambientales debido a los mayores requerimientos de energía que dicha tecnología requiere.

Para esta solución la demanda satisfecha fue de 14463 toneladas de aguacate para un año, repartidos para cada cliente final como se muestra en la **Tabla 20**, fue posible observar que la demanda atendida igual que en el escenario 1 guardó relación con la demanda potencial, es decir que a Países Bajos por tener mayor demanda potencial se le atendió un mayor número de toneladas de aguacate, en ese mismo orden, la segunda demanda más alta fue la de España, luego la demanda de Reino Unido, posteriormente Estados Unidos y finalmente Bélgica.

Tabla 20. Demanda atendida con solución óptima en escenario 2

Cliente final	Demanda satisfecha	Demanda potencial
Países Bajos	9326 toneladas	43745 toneladas
Estados Unidos	743 toneladas	3129 toneladas
Reino Unido	1906 toneladas	8897 toneladas
España	2139 toneladas	10023 toneladas
Bélgica	349 toneladas	1792 toneladas

Para maximizar las utilidades se atendió un 21.4% de la demanda potencial total anual de los clientes finales, esto es 67586 toneladas de fruta. Al satisfacer esta demanda se generaron 7405084 toneladas de CO₂ y se perdieron en todo el proceso de distribución 2099 toneladas de aguacate, es decir, un 14.5% del total del producto entregado.

Compensaciones entre los objetivos para el escenario 1 variando de emisiones de CO₂

La **Tabla 21** muestra las compensaciones entre estos tres objetivos enfrentados mediante método ϵ – restricciones, dejando el objetivo de maximización de la utilidad fijo y variando el porcentaje de emisiones de CO₂ generadas.

Tabla 21. Soluciones de frontera de Pareto para escenario 2, variando el porcentaje de emisiones de CO₂

	Porcentaje de disminución de emisiones de CO ₂ generadas	Utilidad	Emisiones de CO ₂	Pérdidas de producto
1	7405084	49260025340	7405084	2099
2	5% (≤ 7034829)	49217811600	7034829	2099
3	10% (≤ 6664575)	49114954580	6664575	2099
4	15% (≤ 6294321)	48974251260	6294321	2099
5	20% (≤ 5924067)	48831355260	5924067	2099
6	25% (≤ 5553813)	48676233130	5553813	2099
7	30% (≤ 5183558)	48498206290	5183558	2099
8	35% (≤ 4813304)	48284135060	4813304	2099
9	40% (≤ 4443050)	48035869530	4443050	2099
10	45% (≤ 4072796)	47774819660	4072796	2099
11	50% (≤ 3702542)	47207682950	3702542	2037
12	55% (≤ 3332287)	45584701840	3332287	2140
13	60% (≤ 2962033)	43323788190	2962033	2113
14	65% (≤ 2591779)	40552717000	2591779	2490
15	70% (≤ 2221525)	36117107610	2221525	1932
16	75% (≤ 1851271)	31267562170	1851271	1474
17	80% (≤ 1481016)	26224440550	1481016	1269
18	85% (≤ 1110762)	20619825540	1110762	1257

19	90% (≤ 740508)	14574118080	740508	998
20	95% (≤ 370254)	7951733798	370254	625
21	100% (≤ 0)	0	0	0

Este espacio de soluciones igual que en el escenario 1 fue muy dinámico, la solución óptima de la primera corrida mostró que en los dos primeros tramos se usó siempre la tecnología de atmosfera controlada, sin embargo, en busca de reducir la huella ambiental a partir de la solución número 12 se empieza a incluir el transporte sin refrigeración en el primer tramo, combinándolo con el transporte con atmosfera controlada. Del mismo modo, estas soluciones optimas son mostradas gráficamente en las **Figura 12** y **Figura 13** respectivamente.

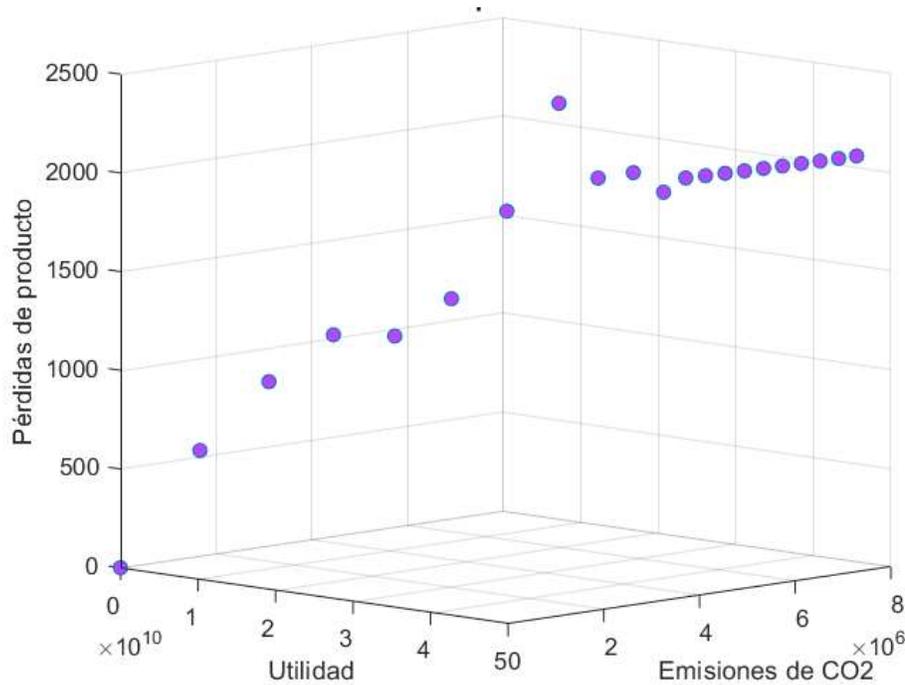


Figura 12. Frontera de Pareto 3D, escenario 2, variando el porcentaje emisiones de CO₂

La **Figura 12** nos muestra el comportamiento de los tres objetivos en un espacio tridimensional, su crecimiento, decaimiento, mientras que la **Figura 13** nos permite observar comportamiento directo entre el objetivo de utilidades y el de las emisiones de CO₂ generadas.

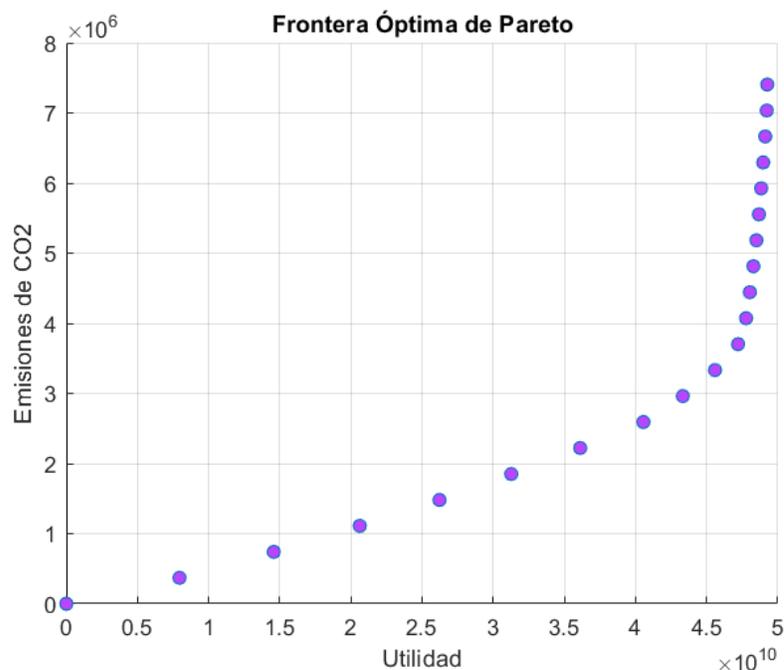


Figura 13. Frontera de Pareto 2D, escenario 2, variando el porcentaje emisiones CO₂

Podemos ver en la **Figura 13** el conjunto de soluciones no dominadas al enfrentar las utilidades a las emisiones de CO₂ generadas. Es visible que estos dos objetivos tienen el mismo comportamiento que tuvieron en el escenario 1, por lo que a medida que las utilidades aumentan las emisiones de CO₂ también aumentan, es decir que al buscar una mayor utilidad en el escenario 2 también obtendremos una mayor generación de emisiones de CO₂. De este modo, podría ser más sostenible el proceso de distribución si se sacrifica un porcentaje de utilidades para disminuir la huella ambiental, haciendo la decisión más sostenible. Por ejemplo, una solución sostenible para este escenario sería la solución número 11 de la **Tabla 21**, en la cual al sacrificar solo un 4.2% de las utilidades nos permite disminuir en un 50% la huella ambiental generada en el proceso de distribución.

Compensaciones entre los objetivos para el escenario 2 variando el producto perdido

La **Tabla 22** nos muestra las compensaciones obtenidas al fijar el objetivo de maximización de la utilidad y variar el porcentaje de producto perdido en el escenario 2, con lo que se obtuvo el siguiente frente de Pareto:

Tabla 22. Soluciones de frontera de Pareto para escenario 2, variando el porcentaje de producto perdido

#	Porcentaje de disminución de producto perdido	Utilidad	Emisiones de CO ₂	Pérdidas de producto
1	2099.547025	49260025340	7405084	2099
2	5% (≤ 1994)	48966159910	7255412	1994
3	10% (≤ 1889)	48628706060	7192121	1889

4	15% (≤ 1784)	48291252210	7128831	1784
5	20% (≤ 1679)	47953798360	7065540	1679
6	25% (≤ 1574)	47616344510	7002250	1574
7	30% (≤ 1469)	47278890660	6938959	1469
8	35% (≤ 1364)	46941436810	6875669	1364
9	40% (≤ 1259)	46603982970	6812378	1259
10	45% (≤ 1154)	46266529120	6749088	1154
11	50% (≤ 1049)	45928716220	6695947	1049
12	55% (≤ 944)	45589706140	6676651	944
13	60% (≤ 839)	45247908520	6641587	839
14	65% (≤ 734)	42065400660	6373259	734
15	70% (≤ 629)	36101063970	5721387	629
16	75% (≤ 524)	30129927030	4695246	524
17	80% (≤ 419)	24149145640	3795987	419
18	85% (≤ 314)	18161406000	2802748	314
19	90% (≤ 209)	12152441140	1851572	209
20	95% (≤ 104)	6137393923	912450	104
21	100% (≤ 0)	0	0	0

Con la variación del producto perdido del escenario 2, mostrado en la **Tabla 22** pudimos ver que el espacio de frontera eficiente siempre buscó reducir cantidad de producto perdido, por lo que en el primer eslabón siempre se usó transporte terrestre con atmosfera controlado el cual generó menor porcentaje de producto perdido en el proceso de transporte.

Por su parte en las **Figura 14** y **Figura 15** observamos el comportamiento grafico de las soluciones de la frontera eficiente de Pareto. La **Figura 14** muestra el comportamiento de los tres objetivos en un espacio tridimensional, mientras que la **Figura 15** nos da una visión en dos dimensiones del comportamiento directo que experimentan las utilidades con respecto al porcentaje de producto perdido.

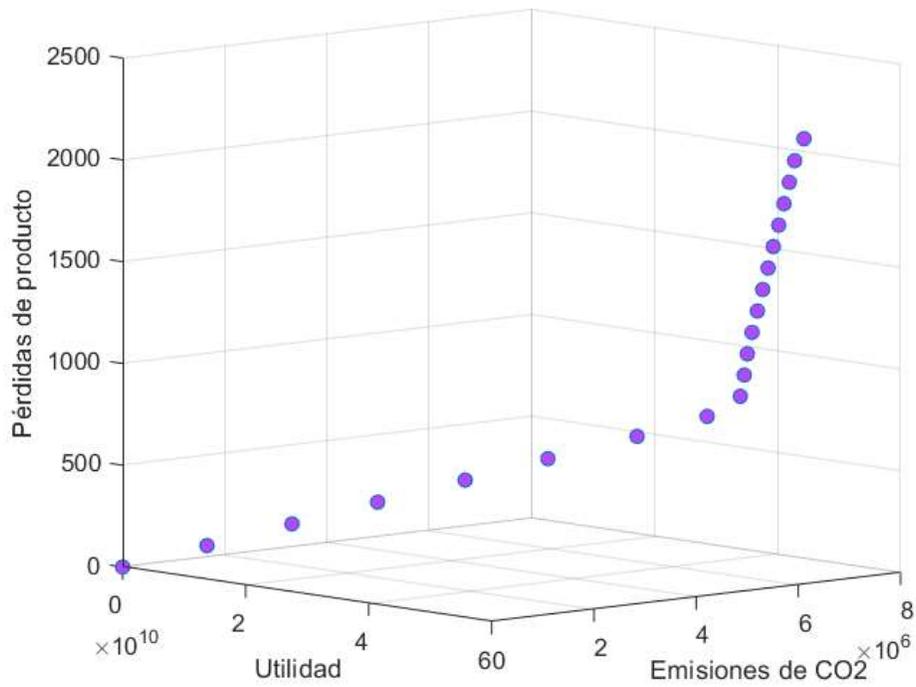


Figura 14. Frontera de Pareto 3D, escenario 2, variando el porcentaje de producto perdido

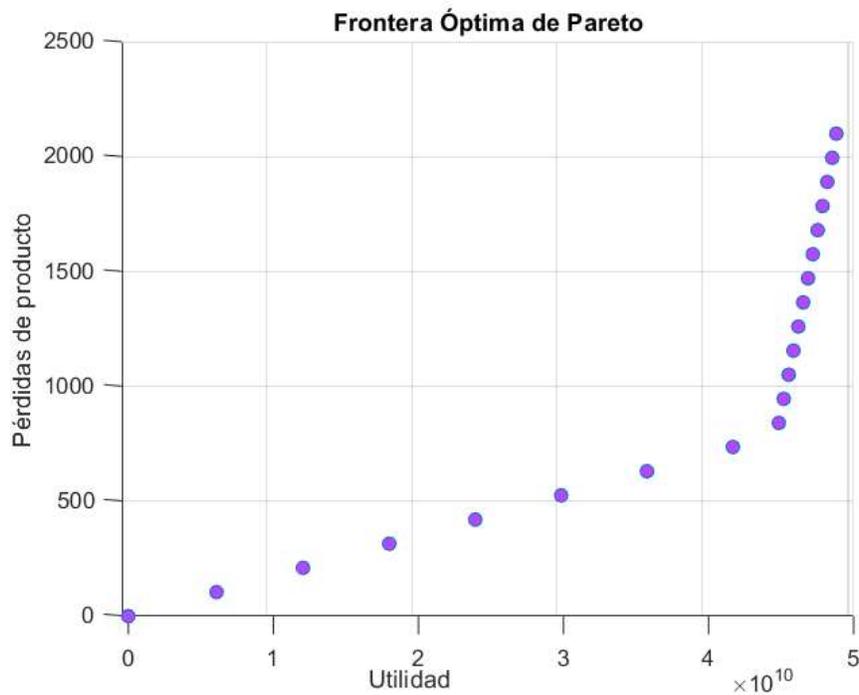


Figura 15. Frontera de Pareto 2D, escenario 2, variando el porcentaje de producto perdido

Observamos en la **Figura 15** el conjunto de soluciones no dominadas al enfrentar las utilidades a los porcentajes de producto perdido. Esta gráfica nos indica el comportamiento de estos dos objetivos al ser enfrentados y nos da una buena visión para la toma de decisiones. Vemos que la relación entre los

dos objetivos es directa, es decir que si aumentamos utilidades también aumenta el producto perdido, pero a partir de la corrida 13 hacia atrás notamos que en el aumento de las utilidades realmente es mínimo, por lo que podríamos considerar que esta solución es una buena alternativa para la toma de decisiones, en este punto, la disminución en las utilidades es del 8.14% mientras que la disminución en el producto perdido es de un 60%.

3. Análisis del escenario 3: Con modo ferroviario, con modo fluvial y con atmosfera controlada

Este tercer y último escenario, es nuestro ideal de operación de la cadena de suministros, es el que mostrará la aplicabilidad o no de la intermodalidad en la distribución del aguacate Hass de exportación en Colombia. Este análisis se realizó utilizando como escenario de experimentación aquel que tiene atmosfera controlada y transporte multimodal.

Para el escenario 3 se obtuvo que la solución óptima maximizando el primer objetivo mediante el método ϵ – restricciones fue la mostrada en la **Tabla 23**. En este segundo escenario el punto óptimo para la maximización de utilidades indicó un total de utilidades equivalentes a \$ \$50334929970 para el primer objetivo de maximizar utilidades, 2556337 toneladas de CO₂ emitidas y finalmente un total de 2276 toneladas de aguacate perdidas.

Tabla 23. Solución óptima en escenario 3

Funciones Objetivo	
Utilidad	\$50334929970
Emisiones generadas	2556337 toneladas de CO ₂
Pérdidas de producto	2276 toneladas de aguacate

En este último escenario además de que hay diversidad en las tecnologías de conservación, se agrega diversidad en los modos de transporte en el tercer tramo de la cadena de suministro, ahora se incluyen dos puntos de intercambio intermodal claves en la región estudiada y además se abre la posibilidad de agregar dos modos de transporte en este tramo como lo son el transporte ferroviario y el transporte fluvial.

En los primeros dos escenarios solo era posible el transporte terrestre por lo que todos los productos iban de manera directa desde las plantas de procesamiento hasta los puertos marítimos mediante este modo de transporte. En este tercer escenario existen dos puntos centrales que cambian la perspectiva de los modos de transporte, ofreciendo otras opciones que posibilitan un cambio en el comportamiento de los objetivos analizados.

A diferencia del escenario anterior (escenario 2) en el cual era necesario sacrificar la sostenibilidad ambiental en favor de tener mayores utilidades y menores pérdidas. Esta nueva alternativa ofrece mayores beneficios. Primero que nada, permite aumentar en un 2.2% las utilidades sin sacrificar las emisiones: las emisiones caen drásticamente, disminuyen un 65.5% ya que la mayoría del transporte interno, es decir desde los puntos intermodales a los puertos marítimos se realiza con los modos de transporte ferroviario y fluvial los cuales se caracterizan por generar menos emisiones ambientales que el modo de transporte terrestre. Por su parte las pérdidas del producto se sacrifican en un 8.4%,

en comparación con el escenario que solamente utilizaba atmosfera controlada esto se debe a que para maximizar las utilidades se eligen usar la refrigeración como tecnología de conservación y no la atmosfera controlada en algunos tramos.

Para esta solución la demanda satisfecha fue de 14463 toneladas de aguacate para un año, repartidos para cliente final como se muestra en la **Tabla 24**, fue totalmente igual que la demanda atendida en el escenario 2.

Tabla 24. Demanda atendida con solución óptima en escenario 3

Cliente final	Demanda satisfecha	Demanda potencial
Países Bajos	9326 toneladas	43745 toneladas
Estados Unidos	743 toneladas	3129 toneladas
Reino Unido	1906 toneladas	8897 toneladas
España	2139 toneladas	10023 toneladas
Bélgica	349 toneladas	1792 toneladas

Para maximizar las utilidades se atendió un 21.4% de la demanda potencial total anual de los clientes finales, esto es 67586 toneladas de fruta. Al satisfacer esta demanda se generaron 2556337 toneladas de CO₂ y se perdieron en todo el proceso de distribución 2276 toneladas de aguacate, es decir, un 15.8% del total del producto entregado.

Compensaciones entre los objetivos para el escenario 1 variando de emisiones de CO₂

Las compensaciones de los tres objetivos estudiados en este último escenario se muestran en la **Tabla 25**, estos se lograron dejando objetivo de maximización de la utilidad fijo y variando el porcentaje de emisiones de CO₂ generadas.

Tabla 25. Soluciones de frontera de Pareto para escenario 3, variando el porcentaje de emisiones de CO₂

	Porcentaje de disminución de emisiones de CO₂ generadas	Utilidad	Emisiones de CO₂	Pérdidas de producto
1	2556337	50334929970	2556337	2276
2	5% (≤ 2428520)	50312545920	2428520	2292
3	10% (≤ 2300703)	50237615520	2300703	2320
4	15% (≤ 2172886)	50142854160	2172886	2349
5	20% (≤ 2045069)	49935154280	2045069	2376
6	25% (≤ 1917252)	49638542760	1917252	2362
7	30% (≤ 1789435)	49311129060	1789435	2368
8	35% (≤ 1661619)	48847614750	1661619	2436
9	40% (≤ 1533802)	48245972130	1533802	2531
10	45% (≤ 1405985)	47159792930	1405985	2861
11	50% (≤ 1278168)	45370382970	1278168	2915

12	55% (≤ 1150351)	43256670270	1150351	2883
13	60% (≤ 1022534)	40580019750	1022534	3040
14	65% (≤ 894717)	37441711340	894717	2162
15	70% (≤ 766901)	34133866630	766901	1966
16	75% (≤ 639084)	30825661430	639084	1889
17	80% (≤ 511267)	27426507480	511267	1729
18	85% (≤ 383450)	23415735480	383450	1475
19	90% (≤ 255633)	18258452970	255633	1224
20	95% (≤ 127816)	11997558130	127816	811
21	100% (≤ 0)	0	0	0

Este espacio de soluciones igual que en los escenarios 1 y 2 fue muy dinámico, la solución óptima de la primera corrida mostró que en los dos primeros tramos se usó siempre la tecnología de atmosfera controlada, sin embargo, en busca de reducir la huella ambiental a partir de la solución número 12 se empieza a incluir el transporte sin refrigeración en el primer tramo, combinándolo con el transporte con atmosfera controlada.

Del mismo modo, estas soluciones eficientes son mostradas gráficamente en las **Figura 16** y **Figura 17** respectivamente.

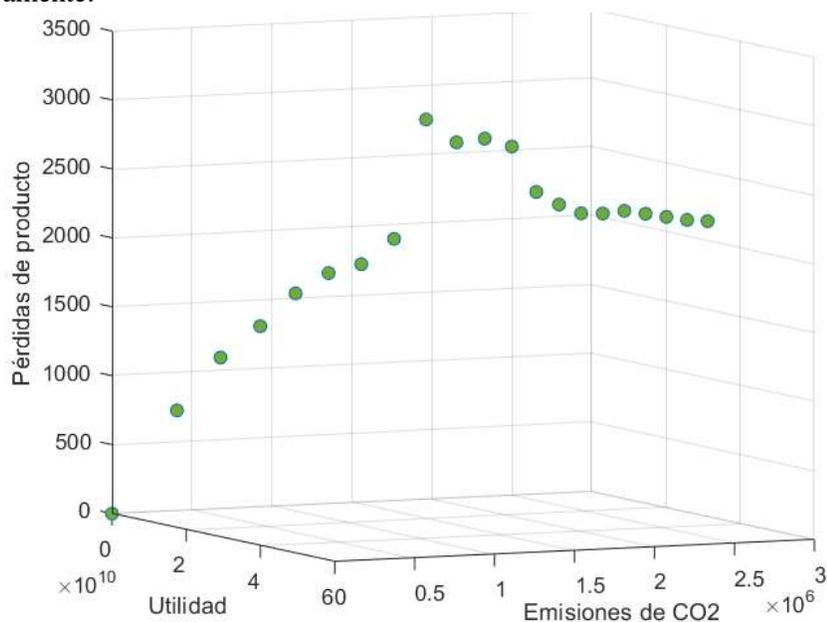


Figura 16. Frontera de Pareto 3D, escenario 3, variando el porcentaje emisiones de CO₂

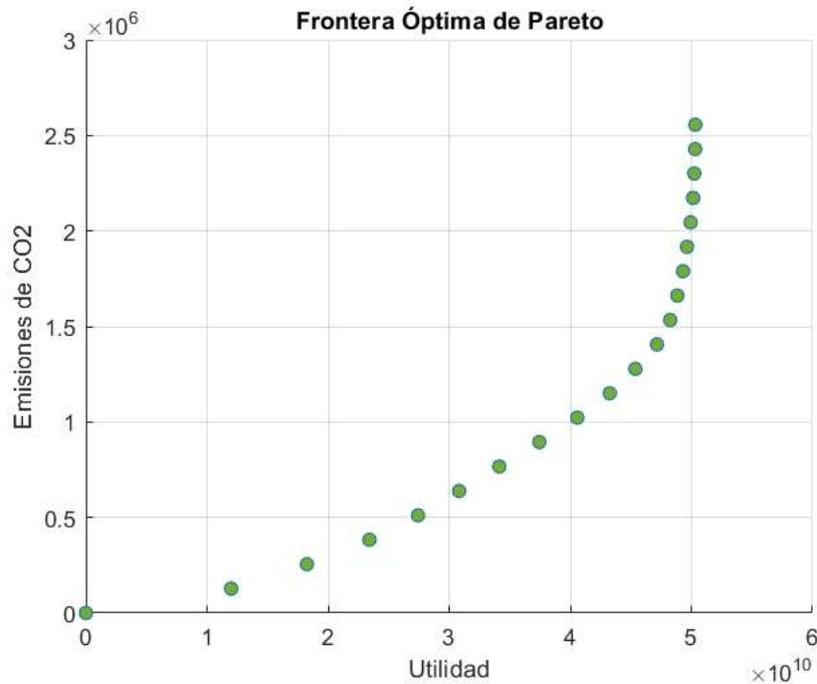


Figura 17. Frontera de Pareto 2D, escenario 3, variando el porcentaje emisiones de CO₂

En la **Figura 17** se ven el conjunto de soluciones no dominadas al enfrentar las utilidades a las emisiones de CO₂. En esta gráfica vemos que la relación entre los dos objetivos es directa, es decir que si aumentamos utilidades también aumenta las emisiones de CO₂, este aspecto fue común en los tres escenarios. Si analizamos **Figura 17** y la **Tabla 25**, nos daremos cuenta que hasta la corrida número 10 el aumento de las utilidades realmente es mínimo, por lo que podríamos considerar que esta solución es una solución con un buen compromiso para la toma de decisiones, en este punto, la disminución en las utilidades es del 6.3% mientras que la disminución en las emisiones de CO₂ es de un 45%.

Compensaciones entre los objetivos para el escenario 3 variando el porcentaje de producto perdido

La **Tabla 26** muestra las compensaciones obtenidas al fijar el objetivo de maximización de la utilidad y variar el porcentaje de producto perdido en el escenario 3, con lo que se obtuvo el siguiente frente de Pareto:

Tabla 26. Soluciones de frontera de Pareto para escenario 3, variando el porcentaje de producto perdido

#	Porcentaje de disminución de producto perdido	Utilidad	Emisiones de CO ₂	Pérdidas de producto
1	2276.17234	50334929970	2556337	2276
2	5% (≤ 2162)	50065914430	3954026	2162
3	10% (≤ 2048)	49698384970	3933107	2048

4	15% (≤ 1934)	49330058060	3900250	1934
5	20% (≤ 1820)	48959778330	3843470	1820
6	25% (≤ 1707)	48588980490	3784676	1707
7	30% (≤ 1593)	48218182650	3725881	1593
8	35% (≤ 1479)	47847380150	3667096	1479
9	40% (≤ 1365)	47476511560	3608442	1365
10	45% (≤ 1251)	47105642970	3549788	1251
11	50% (≤ 1138)	46734774390	3491134	1138
12	55% (≤ 1024)	46363293980	3440894	1024
13	60% (≤ 910)	45986378240	3408983	910
14	65% (≤ 796)	45172306680	6282707	796
15	70% (≤ 682)	39114749010	6208027	682
16	75% (≤ 569)	32641549610	5126869	569
17	80% (≤ 455)	29959656700	4133120	455
18	85% (≤ 341)	19675080820	3048441	341
19	90% (≤ 227)	13163936320	2010654	227
20	95% (≤ 113)	6643782232	990721	113
	100% (≤ 0)	0	0	0

La **Figura 18** muestra el comportamiento de los tres objetivos en un espacio tridimensional, su crecimiento, decaimiento, mientras que la **Figura 19** nos permite observar comportamiento directo entre el objetivo de utilidades y el del porcentaje del producto perdido.

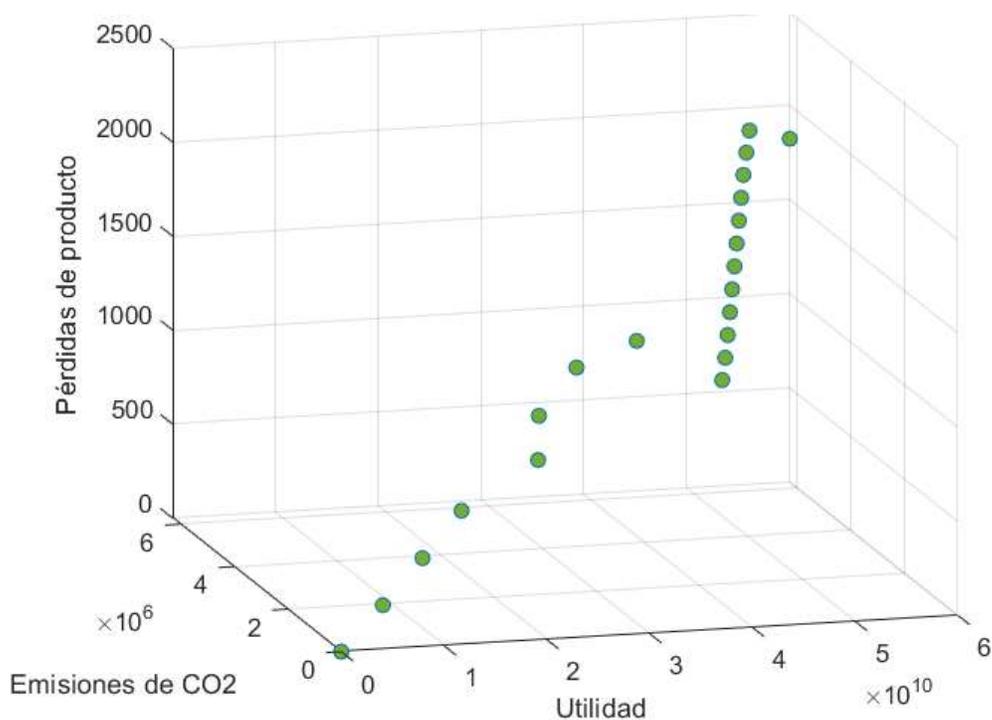


Figura 18. Frontera de Pareto 3D, escenario 3, variando el porcentaje de producto perdido

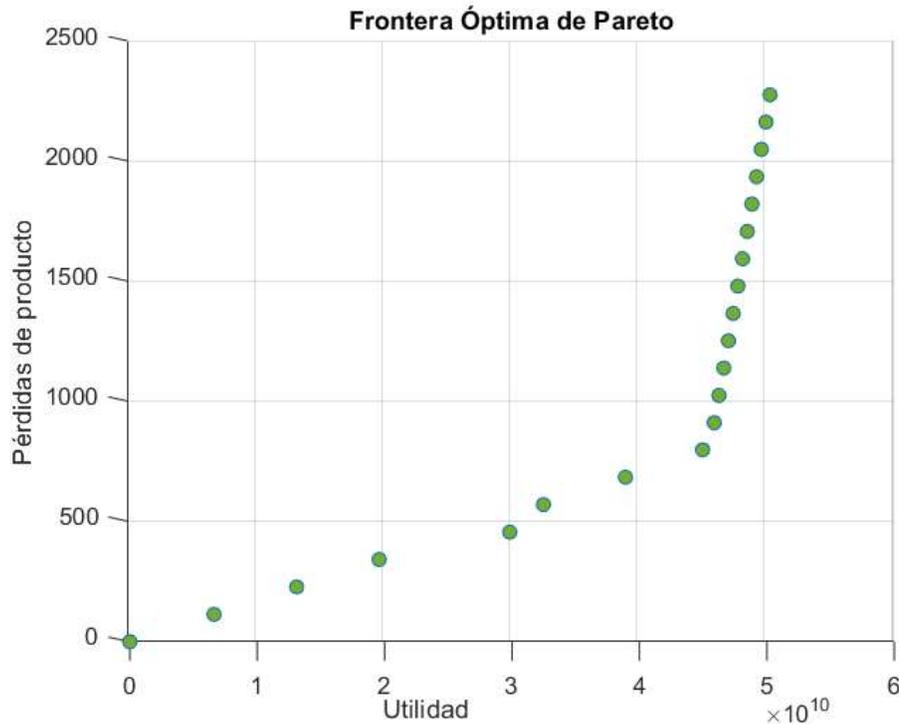


Figura 19. Frontera de Pareto 2D, escenario 3, variando el porcentaje de producto perdido

La **Figura 19** ofrece el conjunto de soluciones no dominadas al enfrentar las utilidades a los porcentajes de producto perdido. Se observa que la relación entre los dos objetivos es directa igual que con la huella ambiental y los demás escenarios, es decir que si aumentamos utilidades también aumenta el producto perdido, pero a partir de la corrida 14 de la **Tabla 26** hacia atrás notamos que en el aumento de las utilidades realmente es mínimo, por lo que podríamos considerar que esta solución es un buen compromiso entre las funciones objetivo para la toma de decisiones, en este punto, la disminución en las utilidades es del 10.25% mientras que la disminución en el producto perdido es de un 65%.

7. Conclusiones y recomendaciones

La distribución de frutas y vegetales es un tema logístico en el cual intervienen muchas variables, lo que lo convierte en muy complejo y retador. Las organizaciones encargadas de estas actividades logísticas diariamente se enfrentan a la decisión de elegir qué objetivo deben sacrificar a cambio de ganar otro. Esto sería visto como un intercambio, entendiendo que se pierde un beneficio y se gana otro.

Tomando como centro la distribución del aguacate Hass de exportación en Colombia esta investigación logró caracterizar la cadena de suministros de esta fruta, la cual posteriormente fue modelada mediante un modelo de optimización multiobjetivo como herramienta de análisis.

En este trabajo se estudiaron algunas de las variables que podrían mejorar en términos logísticos los objetivos comunes buscados durante el proceso de planeación de la distribución del aguacate Hass de exportación en Colombia. Nos enfocamos en los objetivos de la maximización de utilidades, la

minimización de las emisiones de CO₂ y la minimización del porcentaje de producto perdido durante el proceso.

Se estudiaron tres escenarios distintos que permiten al tomador de decisiones evaluar cual sería el mejor costo-beneficio a escoger, se buscó tener una comprensión total de las ventajas y desventajas de cada opción, para finalmente escoger en cada situación conflictiva cual sería una buena solución de compromiso en la cual se debía perder, a cambio de ganar otra cualidad.

De igual manera fue posible conocer como los modos de transporte, las tecnologías de conservación y la intermodalidad intervienen dentro del proceso de distribución del aguacate Hass. Se determinó que existe relación directa entre los tres objetivos evaluados y puestos en conflicto y se encontraron puntos óptimos de compensación que permitían un buen porcentaje de logro para los objetivos.

Con el desarrollo de este modelo se comprobó como el transporte intermodal presenta una solución a los problemas logísticos y operacionales presentados en la cadena de suministros del aguacate Hass en el país, este hecho había sido evidenciado el pasado mes de enero de 2020, cuando más de 20 toneladas de aguacates Hass en un contenedor refrigerado viajaron, desde La Dorada, Colombia, hasta su puerto de embarque que lo llevaría hasta su destino en Róterdam, Países Bajos, a bordo de un tren, constituyendo un hecho histórico para el país sudamericano. Con este modelo se verificó como el modo ferroviario puede marcar la diferencia, reduciendo el costo del transporte, y la huella de CO₂.

El desarrollo de este trabajo resulta ser una herramienta útil para los tomadores de decisiones dentro de las empresas. Esta investigación brinda un punto de comparación y de análisis en el aspecto logístico dentro de las organizaciones, lo que permite mejoras significativas en el funcionamiento organizacional logístico o la generación de diagnósticos que sirven como puntos de partidas para efectuar planes de mejora internos.

Sería importante estudiar otros escenarios y conocer el comportamiento de estos objetivos en trabajos futuros, haciendo variaciones en los parámetros utilizados considerando por ejemplo la aleatoriedad del producto perdido o la producción de aguacate en cada lugar y periodo. Además, se podría ampliar el alcance del modelo de planeación para que incluya las etapas previas a la cosecha en las que hay un impacto ambiental fuerte en el uso del agua e incluir la variabilidad asociada a la producción.

Referencias

- Abbassi, A., Elhilali, A., & Boukachour, J. (2018). *Modelling and solving a bi-objective intermodal transport problem of agricultural products*. 9, 439–460. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.12.001>
- Albrecht, W., & Steinrücke, M. (2017). Coordinating continuous-time distribution and sales planning of perishable goods with quality grades. *International Journal of Production Research*, 7543(October), 1–20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1384584>
- Almada-Lobo, B., Amorim, P., Almeder, C., & Meyr, H. (2013). *Managing perishability in production-distribution planning: a discussion and review*. 389–413. <https://doi.org/10.1007/s10696-011-9122-3>
- ANALDEX, A. N. de C. E. (2019). *Informe de exportaciones de fruta enero – mayo 2019*.
- Arias Bustos, C., & Moors, E. H. M. (2018). Reducing post-harvest food losses through innovative collaboration: Insights from the Colombian and Mexican avocado supply chains. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.187>
- Asociación Nacional de Comercio Exterior (ANALDEX). (2022). *Informe exportaciones de aguacate Hass septiembre 2022*. 4–9.
- Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F. (2015). Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization. *Journal of Food Engineering*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.014>
- Bower, J. P., Cutting, J. G. M., & Truter, a B. (1989). Modified atmosphere storage and transport of avocados what does it mean? *South African Avocado Growers' Association Yearbook*, 12(September), 17–20.
- Buelvas, M. P., Nisperuza, P. A., Hernandez, H. E., & Lopez, J. M. (2018). Vehicle routing problem for the minimization of perishable food damage considering road conditions. *Logistics Research (2018)*, 76, 1–18. https://doi.org/10.23773/2018_2
- Burek, J., & Nutter, D. (2018). Life cycle assessment of grocery, perishable, and general merchandise multi-facility distribution center networks. *Energy & Buildings*, 174, 388–401. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.021>
- Cañón, M., Ramírez, A., Gutiérrez-Franco, E., & López-Ospina, H. (2014). *Modelo de Optimización aplicado a la agro-industria Colombiana: Plan logístico integrado para la exportación de feijoa fresca*. 21(1), 17–31.
- Cartisano, A. G., & Rusoo, F. (2002). *Analytical models for Ro-Ro and Lo-Lo terminals in a multipurpose port*.
- Castilla Acevedo, A., & Hernandez Diaz, H. H. (2009). *Caracterización de la cadena productiva del aguacate en el departamento de Bolívar 2008, mediante un modelo de simulación de redes*. Universidad de Cartagena.
- Céline, M., Valérie, G., Karine, G., Sandrine, C., Nathalie, G., Stéphane, G., & Sébastien, G. (2020). Consumer behaviour in the prediction of postharvest losses reduction for fresh strawberries packed in modified atmosphere packaging. *Postharvest Biology and Technology*, 163(July 2019), 111119. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111119>
- Colicchia, C., Creazza, A., & Dallari, F. (2017). Lean and green supply chain management through intermodal transport: insights from the fast moving consumer goods industry. *Production*

- Planning & Control*, 28(4), 319–332. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1282642>
- Crainic, T. G. (2002). *Cooperative Parallel Tabu Search for Capacitated*. 601–627.
- Darestani, S. A., & Hemmati, M. (2019). Robust optimization of a bi-objective closed-loop supply chain network for perishable goods considering queue system. *Computers & Industrial Engineering*, 136(February), 277–292. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.018>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia*.
- Dhall, R. K., Sharma, S. R., & Mahajan, B. V. C. (2012). Effect of shrink wrap packaging for maintaining quality of cucumber during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 49(4), 495–499. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0284-5>
- Duque-Escobar, G. (2014). *¿Cuál es el mejor sistema de transporte para Colombia?*
- Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4), 1472–1483. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.05.009>
- El Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario - FINAGRO. (2018). Marco de referencia agroeconómico: Aguacate Hass. *El Desarrollo y La Integración de América Latina*, 61–68. <https://doi.org/10.2307/j.ctv3596xdt.6>
- El Heraldo, periódico. (2019). *Primera Operación Logística Multimodal en Colombia para Exportación de Aguacate HASS*.
- El Universal, P. (2019). *Transporte multimodal activa exportaciones de aguacate Hass*.
- Esmizadeh, Y., & Bashiri, M. (2019). Applying hierarchical hub location problem on perishable good distribution systems. *Joint International Symposium on The Social Impacts of Developments in Information, Manufacturing and Service Systems, April*, 260–269.
- FEDESARROLLO, C. de I. E. y S. (2015). *Plan maestro de transporte intermodal (PMIT) 2015-2035: 2015–2035*.
- FINAGRO, F. para el F. del S. A. (2020). *El momento del Agro*.
- Firoozi, Z., & Ariafar, S. (2016). A supply chain network design model for random- lifetime products. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1015(November), 1–11. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1237384>
- García Cáceres, R. G., & López Ramírez, C. A. (2020). Caracterización de la cadena de abastecimiento de la carne bovina en Colombia. *Ingeniería y Desarrollo*, 38.
- Garzón, A. E. (2020). Oportunidad de exportación de aguacate Hass a Francia. *Revista Colombiana de Ciencias Administrativas*, 2(1), 78–102.
- Ge-feng, J., Guang-bin, C., Yi-jun, L., & Wen-guo, A. (2008). *Study on the Location of the Rail / Road Intermodal Terminals under Fuzzy*. 1–5.
- Ghiani, G., Laporte, G., & Musmanno, R. (2004). *Introducción to Logistics Systems Planning and Control*.
- González-Estudillo, J. C., González-Campos, J. B., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2017). Optimal Planning for Sustainable Production of Avocado in Mexico. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1(2), 109–120. <https://doi.org/10.1007/s41660-017-0008-z>
- Grabara, J., Kolcun, M., & Kot, S. (2014). *The role of information systems in transport logistics*. 2(2), 1–8.
- Haimes, Y. (1971). On a bicriterion formation of the problems of integrated system identification and

- system optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-1*(3), 296–297. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1971.4308298>
- Hao, C., & Yue, Y. (2016). *Optimization on Combination of Transport Routes and Modes on Dynamic Programming for a Container Multimodal Transport System*. 137, 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.272>
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2022). *Plan de trabajo para la exportación de fruto de palto (Persea americana) var. "Hass."* 1–12. <https://www.ica.gov.co/getattachment/cc919a9a-54bd-4159-abd2-77e293669920/Aguacate-Palto-Hass.aspx>
- Ivo de Carvalho, M., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2022). A roadmap for sustainability performance assessment in the context of Agri-Food Supply Chain. *Sustainable Production and Consumption*, 34, 565–585. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.001>
- Jaržemskiene, I. (2010). *The evolution of intermodal transport research and its development issues. December 2014*, 37–41. <https://doi.org/10.1080/16484142.2007.9638145>
- Jiménez Giraldo, M. A., & Ospitia Gonzales, C. L. (2020). *Plan De Exportación De Aguacate Hass De Colombia a Estados Unidos De La Empresa Imporfenix Con Base En Parámetros De Sostenibilidad Ambiental*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Jin Choi, H., Seuk Bae, Y., Soo Lee, J., Hea Park, M., & Gang Kim, J. (2016). Effects of Carbon Dioxide Treatment and Modified Atmosphere Packaging on the Quality of Long Distance Transporting “Maehyang” Strawberry. *Agricultural Sciences*, 07(12), 813–821. <https://doi.org/10.4236/as.2016.712074>
- Johannes, M., & Eeden, J. Van. (2022). *The Carbon Footprint of Fruit Storage : A Case Study of the Energy and Emission Intensity of Cold Stores*. 1–22.
- Kader, A. A. (2005). Increasing food availability by reducing postharvest losses of fresh produce. *Acta Horticulturae*, 682, 2169–2176. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.682.296>
- Kande, S., Prins, C., Belgacem, L., & Redon, B. (2014). Iterated Local Search with neighborhood space reduction for two-echelon distribution network for perishable products. *Symposium on Computational Intelligence in Production and Logistics Systems (CIPLS). IEEE.*, 67–74.
- Kande, S., Prins, C., Belgacem, L., & Redon, B. (2015). Local Search Based Metaheuristics for Two-Echelon Distribution Network with Perishable Products. *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems. Springer, Cham.*, 2, 212–231. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27680-9>
- Kargwal, R., Garg, M., Singh, V., Garg, R., & Kumar, N. (2020). Principles of modified atmosphere packaging for shelf life extension of fruits and vegetables: An overview of storage conditions. *International Journal of Chemical Studies*, 8(3), 2245–2252. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i3af.9545>
- Kelleher, G., El-Rhalibi, A., & Arshad, F. (2003). *Scheduling for intermodal transport*. <https://doi.org/10.1108/09576050310499354>
- Leinbach, T., & Capineri, C. (2007). *Globalized Freight Transport: Intermodality, E-Commerce, Logistics and Sustainability*.
- Lelen, P., & Wasiak, M. (2016). *Optimization of Multimodal Transport Technologies Selection for Packed Non-climacteric Vegetables and Fruits Pawel*.
- Li, L., Yao, F., & Niu, B. (2013). DEABC Algorithm for Perishable Goods. *International Conference on Intelligent Computing. Springer, Berlin, Heidelberg.*, 624–632.

- Lin, X., Negenborn, R. R., Duinkerken, M. B., & Lodewijks, G. (2017). Quality-Aware Modeling and Optimal Scheduling for Perishable Good Distribution Networks: The Case of Banana Logistics. *International Conference on Computational Logistics.*, 483–497.
- Lin, X., Negenborn, R. R., & Lodewijks, G. (2016). Quality-aware Quality-aware Quality-aware Perishable Goods Goods in in Synchronodal in in Synchronodal. *IFAC-PapersOnLine*, 49(16), 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.025>
- Lin, Y., Yeh, C., & Huang, C. (2016). Reliability assessment of a multistate freight network for perishable merchandise with multiple suppliers and buyers. *International Journal of Systems Science*, 7721(April). <https://doi.org/10.1080/00207721.2016.1157222>
- Liu, J., Lundqvist, J., Weinberg, J., & Gustafsson, J. (2013). Food losses and waste in china and their implication for water and land. *Environmental Science and Technology*, 47(18), 10137–10144. <https://doi.org/10.1021/es401426b>
- Macharis, C., & Bontekoning, Y. M. (2004). *Opportunities for OR in intermodal freight transport research : A review*. 153, 400–416. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00161-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00161-9)
- Malavasi, G., Quattrini, A., & Ricci, S. (2006). *Effect of the distribution of the arrivals and of the intermodal unit sizes on the transit time through freight terminals*. 88, 905–914. <https://doi.org/10.2495/CR060881>
- Manouchehri, F., Shahandeh, A., & Kadivar, M. (2020). Production routing in perishable and quality degradable supply chains. *Heliyon*, 6(February), e03376. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03376>
- Márquez Díaz, L. G. (2011). Estimating marginal external costs for road, rail and river transport in Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 31(1), 56–64. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v31n1.20525>
- Mesquita-Cunha, M., Figueira, J. R., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2023). New ϵ -constraint methods for multi-objective integer linear programming: A Pareto front representation approach. *European Journal of Operational Research*, 306(1), 286–307. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.07.044>
- Minagricultura, M. de A. (2018). *Cadena de Aguacate: Indicadores e instrumentos*.
- Minagricultura, M. de A. (2020). *Cadena productiva Aguacate*.
- MINAGRICULTURA, M. de A. (2018). *Cadena de Aduacate: Indicadores e instrumentos*.
- Ministerio de Cultura y Desarrollo Rural. (2021). *Cadena productiva Aguacate*. 1.
- Ministerio de Transporte de Colombia (MinTransporteCo). (2021). *Gobierno nacional desarrolla políticas para la consolidación del transporte intermodal*. <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/10073/gobierno-nacional-desarrolla-politicas-para-la-consolidacion-del-transporte-intermodal/>
- Montoya, C., Arias, F., & Velásquez, O. (2018). Dinámica del mercado mundial de aguacate. *Dinámica Mundial | Revista Virtual*, 22–35.
- Moyano-fuentes, J., & Agamez-Arias, A. (2017). Intermodal transport in freight distribution : a literature review Intermodal transport in freight distribution : a literature review. *Transport Reviews*, 0(0), 1–26. <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1297868>
- Mutlu, A., Kayikci, Y., & Catay, B. (2017). *Planning Multimodal Freight Transport Operations: A Lieterture Review*. July, 9–12.
- Namesny, A., Conesa, C., Hormaza, I., & Lobo, G. (2020). *Cultivo, poscosecha y procesado del Aguacate*.

- Nijkamp, P. (2010). *Transportation Planning and Technology Globalization , international transport and the global environment : A research and policy challenge TRANSPORT AND THE GLOBAL ENVIRONMENT : A RESEARCH AND POLICY CHALLENGE. October 2014*, 37–41. <https://doi.org/10.1080/03081060309912>
- Nope Zambrano, D. P. (2020). La importancia del transporte multimodal en Colombia. *Universidad Militar Nueva Granada*, 1–23.
- Opara, U. L., & Pathare, P. B. (2014). Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce-A review. *Postharvest Biology and Technology*, 91, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.009>
- Orjuela-Castro, J. A., Sepulveda-García, D. A., & Ospina-Contreras, I. D. (2016). *Effects of Using Multimodal Transport over the Logistics Performance of the Food Chain of Uchuva*.
- Pal, A., & Kant, K. (2019). Internet of Perishable Logistics : Building Smart Fresh Food Supply Chain Networks. *IEEE Access*, 7, 17675–17695. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2894126>
- Parra Ramirez, D., & Serrano Scarpetta, S. (2017). *Guía de exportación de aguacate Hass para pequeños y medianos productores en Colombia*.
- Perez-Mesa, J. C., García-Barranco, M. C., Piedra-Muñoz, L., & Gldeano-Gómez, E. (2019). *Transport as a limiting factor for the growth of Spanish agri-food exports Juan. October*. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2019.100756>
- PortalFrutícola. (2016). *Frutales Las Lajas invierte US\$ 2,5 millones en nuevas y mejoradas instalaciones para la industria del aguacate en Colombia*. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/10/04/frutales-las-lajas-invierte-us-25-millones-en-nuevas-y-mejoradas-instalaciones-para-la-industria-del-aguacate-en-colombia/>
- ProColombia, E. T. I. M. P. (2018). *El aguacate hass, segundo fruto más exportado de Colombia*.
- ProColombia, E. T. I. M. P. (2020). *Colombia apuesta por un aguacate hass cada vez más sostenible*.
- Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER). (2017). *Logística de exportación mercado de China*.
- Rabbani, M., Ramezankhani, M., Farrokhi-Asl, H., & Farshbaf-Geranmayeh. (2015). Vehicle Routing With Time Windows and Customer Selection for Perishable Goods. *International Journals of Supply and Operations Management*, 2(2), 700–719.
- Rossi, T., Pozzi, R., Pirovano, G., Cigolini, R., & Pero, M. (2021). A new logistics model for increasing economic sustainability of perishable food supply chains through intermodal transportation. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 24(4), 346–363. <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1758047>
- SAC, S. de A. de C. (2020). *Revista Nacional de Agricultura*.
- Scalia, G. La, Aiello, G., Micale, R., & Enea, M. (2012). Coverage analysis of RFID indoor localization system for refrigerated warehouses based on 2D-ray tracing. *International Journal of RF Technologies*, 3, 85–99. <https://doi.org/10.3233/RFT-2012-018>
- Sittipod, S., Swasdee, D., Singh, S. P., & Singh, J. (2009). Effect of Truck Vibration during Shipments in Thailand. *Journal of Applied Packaging Research*, 3(1), 27–38.
- Soto-Silva, W. E., Nadal-Roig, E., González-Araya, M. C., & Pla-aragones, L. M. (2015). *Operational research models applied to the fresh fruit supply chain*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.046>
- Statista. (2018). *Emission factors for transporting food worldwide as of 2018, by selected modes of*

- transport. <https://www.statista.com/statistics/1253773/food-freight-transport-emission-factors-by-mode/>
- TecnóAlimen. (2019). *Westfalia Fruit Colombia inaugura en Antioquia la mayor planta de proceso de aguacate Hass para la exportación*. <https://www.tecnalimen.com/noticias/20190125/westfalia-fruit-colombia-mayor-planta-proceso-aguacate-hass-exportacion>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2019). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales*. https://maxifinca.com/wp-content/uploads/2019/04/Datos_Aguacate-Hass_Maxifinca_Espanol.pdf
- United States Agency International Development (USAID)-funded Cold Chain Bangladesh Alliance, & (CCBA). (2016). *Cost-benefit and effectiveness of refrigerated trucks for transportation and marketing of fresh produce*.
- Vilakazi, T., & Paelo, A. (2017). *Competition in road transportation of perishable goods between Malawi, South Africa, Zambia, and Zimbabwe* (Issue March).
- Wang, J., Karakoc, D. B., & Konar, M. (2022). The carbon footprint of cold chain food flows in the United States. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(2), 021002. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac676d>
- Wlamyr, P., Perez, D., Vladimir, M., & Junior, A. (2022). *Logistics As An Added Value In Colombia*. 18(4), 1034–1043.
- Yadav, V. S., Singh, A. R., Gunasekaran, A., Raut, R. D., & Narkhede, B. E. (2022). A systematic literature review of the agro-food supply chain: Challenges, network design, and performance measurement perspectives. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 685–704. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.019>
- Yakavenka, V., Mallidis, I., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2019). Development of a multi - objective model for the design of sustainable supply chains : the case of perishable food products. *Annals of Operations Research*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03434-5>
- Yamada, T., Frazila Russ, B., Castro, J., & Taniguchi, E. (2009). *Designing Multimodal Freight Transport Networks: A Heuristic Approach and Applications*. 43(2), 129–143. <https://doi.org/10.1287/trsc.1080.0250>
- Zanjarini, Reza; Rezapour, S. K. L. (2011). *Logistics Operations and Management*.
- ZonaLógica. (2020). *La primera operación multimodal de exportación en Colombia es con aguacate hass*. <https://zonalogistica.com/la-primera-operacion-multimodal-de-exportacion-en-colombia-es-con-aguacate-hass/>