

Maestría en
Gestión Industrial
SNIES: 20964



**Universidad
de Ibagué**
Comprometidos con el desarrollo regional

Evaluación de la sostenibilidad de una agrocadena de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional. Caso aplicado a la cadena del aguacate Hass del Tolima

Yorladys Martínez Aroca

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gestión industrial

Ibagué, Julio 2020

Evaluación de la sostenibilidad de una agrocadena de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional. Caso aplicado a la cadena del aguacate Hass del Tolima

Yorladys Martínez Aroca

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN GESTIÓN INDUSTRIAL**

Directores

Dr. Nelson Javier Tovar Perilla

Dra. Helga Patricia Bermeo Aandrade

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gestión industrial

Ibagué, Julio 2020

El presente trabajo de grado va dedicado a Dios, quien como guía estuvo presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer. A mis padres y amigos, que, con apoyo incondicional, amor y confianza permitieron que logre culminar mi posgrado.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad de Ibagué, a mis profesores en especial a la Dra. Helga Patricia Bermeo quien con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hizo que pueda crecer día a día como profesional.

Quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Dr. Nelson Javier Tovar principal colaborador durante todo este proceso, quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo

A mis amigos por sus palabras de ánimo y motivación.

La autora agradece también a la Gobernación del Tolima y a la Universidad del Tolima, por la financiación que de manera indirecta facilitó este estudio, a través de los recursos del SGR asignados al Convenio No. 046-2019 liderado por la Universidad de Ibagué para la ejecución del proyecto “Transferencia tecnológica para la optimización operacional de la agrocadena del aguacate en el Tolima como apoyo a su proceso de internacionalización”, el cual fue ejecutado como parte del Convenio marco No. 2077-2018 liderado por la Universidad del Tolima a través del Proyecto "Desarrollo de ventajas competitivas mediante actividades de I+D+i en ocho cadenas del sector agropecuario del departamento del Tolima”.

Y a todos aquellos que de una u otra forma hicieron parte de este proceso.

Tabla de contenido

Capítulo 1. Planteamiento, justificación y objetivos del estudio	9
1.1 Planteamiento	9
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos	14
Capítulo 2. Marco de referencia	15
2.1 Revisión de literatura.....	15
2.2 Configuración, gestión de cadenas de suministro y gestión de cadenas de suministro sostenible	16
2.2.1 Configuración de cadenas de suministro	16
2.2.2 Gestión de cadenas de suministro.....	17
2.2.3 Gestión de Cadenas de Suministro Sostenible (GCSS).....	19
2.3 Cadenas de suministro de alimentos (CSA)	20
2.4 Herramientas y metodologías para el estudio de cadenas de suministro.....	24
2.4.1 Dinámica de sistemas (SD)	25
Capítulo 3. Aspectos metodológicos.....	28
3.1 Generalidades	28
3.2 Estrategia metodológica	28
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	32
4.1 Caracterización de la operación de la ACAHT	32
4.2 Modelado y simulación de la ACAHT	37
4.3 Análisis de escenarios de futuro para la ACAHT	46
Capítulo 5. Conclusiones, limitaciones y contribuciones	59
5.1 Conclusiones	59
5.2 Limitaciones	60
5.3 Contribuciones	61
Referencias.....	62
Anexos	67

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Volúmenes de aguacate exportado en toneladas desde Colombia 2015-2017	10
Ilustración 2. Participación Pcc de Aguacate (t/año) en 2018	11
Ilustración 3. Árbol del problema para la agrocadena del aguacate Hass del norte del Tolima	12
Ilustración 4. Estructura de una cadena de suministro	17
Ilustración 5. Procesos de administración en una CS	18
Ilustración 6. Gestión de componentes administrativos	19
Ilustración 7. Pilares del desarrollo sostenible	19
Ilustración 8. Modelo general de una cadena de suministro de agroalimentos	21
Ilustración 9. Esquema de metodología dinámica de sistemas	30
Ilustración 10. Asociaciones de Paltolima que producen Aguacate Hass	32
Ilustración 11. Flujo de producto / procesos en la Agrocadena del aguacate en el Tolima	33
Ilustración 12. Flujo de insumos y recursos de la Agrocadena del aguacate en el Tolima	34
Ilustración 13. Proceso de flujo en planta procesadora	36
Ilustración 14. Modelo conceptual de interacción entre eslabones para simular la ACAHT	37
Ilustración 15. Modelo conceptual de la ACAHT	38
Ilustración 16. Modelo de simulación: Eslabón Productor	40
Ilustración 17. Modelo de simulación: Eslabón Centro de acopio	41
Ilustración 18. Modelo de simulación: Eslabón Planta clasificadora	42
Ilustración 19. Modelo de simulación: Medidas de desempeño	43
Ilustración 20. Representación Escenario #1	47
Ilustración 21 Representación Escenario #2	47
Ilustración 22 Representación Escenario #3	47
Ilustración 23 Representación Escenario #4	48
Ilustración 24. Medidas de desempeño entre escenarios a lo largo del tiempo	49
Ilustración 25. Diagramas de barras de error de las Medidas de desempeño	51

Lista de Tablas

Tabla 1. Producción a nivel mundial de aguacate – 2017	9
Tabla 2. Algunos indicadores de medición del desempeño técnico	23
Tabla 3. Tabla resumen de herramientas para estudio de cadenas de suministro	24
Tabla 4. Indicadores de sostenibilidad implementados en CS	26
Tabla 5. Resumen del plan metodológico por cada objetivo propuesto	29
Tabla 6. Costos de producción de aguacate Hass en el Tolima	34
Tabla 7. Evaluación de indicadores para ACAHT sostenible	38
Tabla 8. Interpretación de notación usada en el modelo	39
Tabla 9. Tabla de Emisiones de CO ₂ según el tipo de vehículo	44
Tabla 10. Cálculo del número óptimo de replicas	50
Tabla 11. Prueba de normalidad para Ganancias totales	50

Tabla 12. Prueba de normalidad para Pérdidas de productos.....	50
Tabla 13. Pruebas de Análisis de varianza ANOVA.....	52
Tabla 14. Prueba de homogeneidad de varianzas en las variables de desempeño	52
Tabla 15. Prueba DMS para Consumo de agua.....	53
Tabla 16. Prueba DMS para Generación de empleo	53
Tabla 17. Prueba DMS para Ganancias totales	54
Tabla 18. Prueba DMS para Pérdidas de Aguacate Hass	55
Tabla 19. Prueba Tamhane para Consumo de energía	55
Tabla 20. Prueba T2 - Tamhane para Emisiones de CO ₂	56

Lista de Anexos

Anexo A. Tabla resumen de herramientas para estudio de cadenas de suministro.....	67
Anexo B. Distancias recorridas en el transporte de Aguacate Hass del Tolima.....	69
Anexo C. Variables propias de eslabones del modelo de simulación	Archivo .xlsx
Anexo D. Corridas y Número óptimo de réplicas	Archivo .xlsx
Anexo E. Análisis Descriptivos de las medidas de desempeño.....	70
Anexo F. Modelo de simulación del escenario #1.....	Archivo Vemsin.mdl
Anexo G. Modelo de simulación del escenario #2.....	Archivo Vemsin.mdl
Anexo H. Modelo de simulación del escenario #3.....	Archivo Vemsin.mdl
Anexo I. Modelo de simulación del escenario #4.....	Archivo Vemsin.mdl

Resumen

Uno de los sectores más importantes en Colombia ante el desarrollo social y económico es la agricultura. Sin embargo, este sector afronta diversas problemáticas ante niveles de productividad y seguridad alimentaria, siendo así que las cadenas de suministro agroalimentarias generan un reto ante el interés de modelarlas y más aún cuando se quiere llevar de la mano temas como la sostenibilidad. Por otro lado, dadas las condiciones geográficas del Tolima, se considera que este departamento posee potencial para el sector agrícola, en la medida en que revela altos volúmenes de producción en cereales, frutas y verduras; en la actualidad, la agrocadena del Aguacate Hass tiene especial relevancia para la región dado su potencial exportador. En respuesta a esta realidad, el presente trabajo se orientó a evaluar la sostenibilidad de una agrocadena de suministro de producto en fresco orientada al mercado internacional mediante un modelo de simulación, validando su funcionalidad en la Agrocadena del Aguacate Hass del Tolima (ACAHT) de aquí en adelante).

Considerando lo anterior, este documento se estructura en cinco capítulos. El primero hace referencia a la problemática bajo estudio. El segundo presenta los resultados de la revisión de literatura y el marco de referencia utilizado para el estudio. El tercer capítulo presenta, los fundamentos metodológicos tenidos en cuenta para el desarrollo, verificación y validación del modelo de simulación, incluyendo los instrumentos de consulta aplicados a productores vinculados a la Federación de Productores de Aguacate del Tolima ‘Paltolima’.

El capítulo cuarto presenta en detalle los resultados de la implementación del modelo en la ACAHT conformada por cuatro eslabones: Unidad Productiva Agrícola (UPA), Centros de acopio, Planta clasificadora ‘F&P’ y Comercializadores. Lo anterior, con el fin de simular diferentes escenarios de futuro considerando múltiples variables que presentan cambios a través del tiempo, como: área cultivada, productividad de cultivos, indicadores de calidad y tasa exportadora, entre otros. Finalmente, en el capítulo cinco se consolidan las conclusiones a nivel de la agrocadena y a nivel de los eslabones estudiados, las recomendaciones para futuros análisis y las limitaciones del estudio.

Capítulo 1. Planteamiento, justificación y objetivos del estudio

1.1 Planteamiento

El consumo mundial del aguacate aumenta alrededor de 3% por año, sin embargo, la producción de este fruto no avanza al mismo ritmo. Esta situación genera una oportunidad para países como Colombia, que pueden ocupar espacios perdidos por productores que por problemas de sequía u otros inconvenientes reducen su producción dejando abierta la opción que se desarrollen nuevos mercados (Dinero, 2017). Para tal efecto, Colombia ya está posicionado en el mercado internacional del aguacate; si se tienen en cuenta todas las variedades de aguacate que se producen en el país, Colombia es el cuarto productor mundial de acuerdo con las estadísticas de la FAO, después de México, República Dominicana y Perú (FAOSTAT, 2017), tal como se evidencia en la Tabla 1.

Tabla 1. Producción a nivel mundial de aguacate – 2017

Puesto	País	Producción (t)
1	México	2.021.609
2	República Dominicana	643.443
3	Perú	487.272
4	Colombia	403.184
5	Indonesia	326.284
6	Brasil	209.176
7	Kenya	188.368
8	Estados Unidos	184.714
9	Chile	146.981
10	Otros	1.078.954

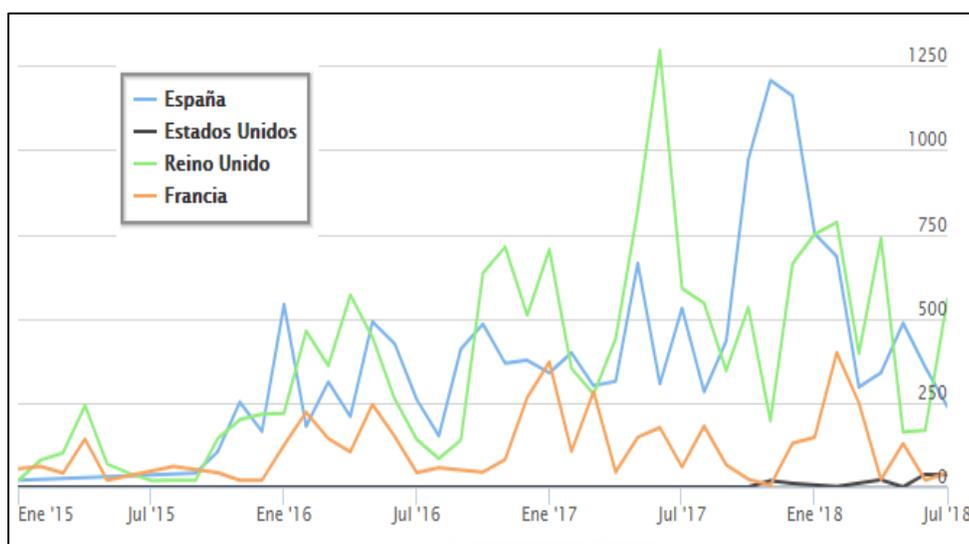
Fuente: (FAOSTAT, 2017)

El aguacate está considerado como uno de los productos que más dinero le genera a México en exportación, dicho producto sobrepasa las ganancias de los hidrocarburos en términos netos; el informe de Torres (2017) sostiene que, mientras el comercio exterior del petróleo y sus derivados le dejó al país un déficit de US\$13.163 millones en 2016, el “oro verde” aportó un

superávit de US\$2.220 millones. En el 2017, la exportación mexicana del fruto fue récord, tanto en ingresos como en volumen, al colocarse 1.022 millones de toneladas en 31 países, entre los cuales los Estados Unidos concentró 77% del total; en ese sentido, en Colombia se ha planteado ampliar la oferta exportable, donde se ha favorecido la idea de exportar aguacate Hass, por cuanto esta variedad contiene más aceite que los aguacates de piel verde, representa una porción personal y su piel gruesa facilita la logística para exportación (Dinero, 2017).

En ese sentido, siendo el aguacate Hass un fruto con alta oportunidad de exportación, Colombia podría llegar en menos de 10 años a ser el segundo productor mundial de aguacate Hass, dadas las condiciones del país y la dinámica de exportación que ha venido manteniendo desde el año 2016, la cual tiene un repunte del 19% al cierre del año 2017 (Figuroa, 2018). En particular, las exportaciones de productos agropecuarios, alimentos y bebidas en 2017 fueron de US\$7.355,6 millones FOB y se incrementaron en un 7,2% (Dinero, 2018). En el año 2017 se exportaron 30.341 toneladas de aguacate Hass desde Colombia con destino a diferentes países del mundo, algunos de ellos se pueden ver en la Ilustración 1, entre los que se destaca la primera exportación al mercado estadounidense en el año 2018. (Colprensa, 2018).

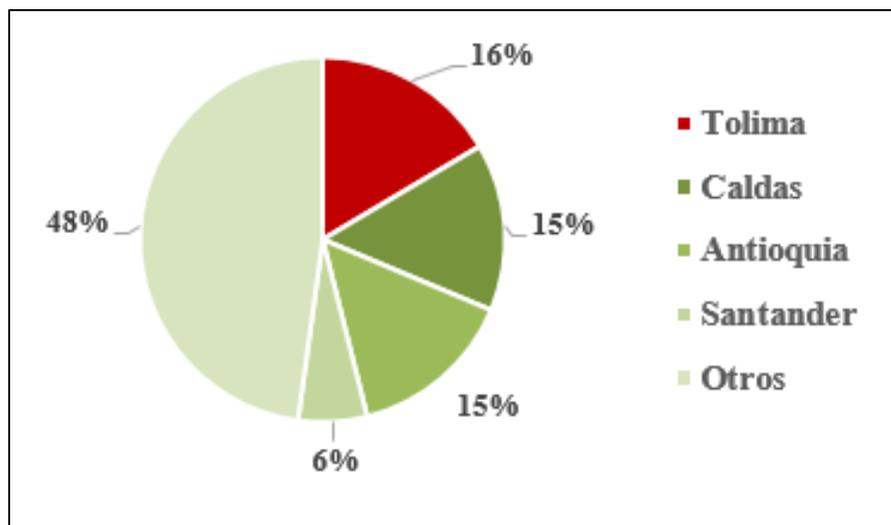
Ilustración 1. Volúmenes de aguacate exportado en toneladas desde Colombia 2015-2017



Fuente: (Ministerio de Agricultura, 2018)

Por otro lado, el área sembrada de aguacate Hass en los principales departamentos productores es de aproximadamente 14.000 hectáreas, ubicadas en el Eje Cafetero, Tolima, Antioquia y Valle del Cauca (ver Ilustración 2). En el año 2018, Tolima fue el departamento con mayor producción de aguacate aproximadamente con un 16,5 % del total nacional.

Ilustración 2. Participación Pcc de Aguacate (t/año) en 2018



Fuente: Creación propia basada en (Ministerio de Agricultura, 2018)

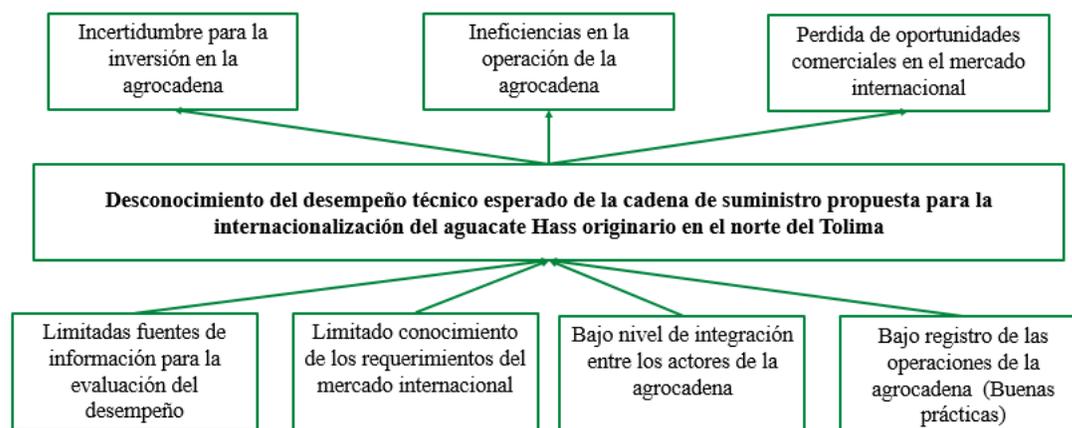
En ese orden de ideas, dadas las proyecciones ante la exportación del aguacate Hass en Colombia, el gobierno departamental del Tolima apostó por el desarrollo de la agrocadena del aguacate y asignó recursos construyendo una planta agroindustrial con propósito exclusivo para el acopio, selección, empaque y comercialización del aguacate Hass en el municipio de Armero-Guayabal, la cual se abastecerá de producto proveniente de 12 diferentes asociaciones del sector agrícola (Gobernación del Tolima, 2016) (El Nuevo Día, 2016).

A pesar que el aguacate Hass presenta un alto potencial de crecimiento, el estudio realizado a esta agrocadena en la Universidad de Ibagué (2017) revela que existen diversos problemas a lo largo de la misma que afectan la productividad y competitividad de este sector ante los procesos de internacionalización. Los principales problemas identificados en la investigación fueron: el transporte de los productos se hace mediante vehículos inadecuados, se presenta ausencia de

tecnologías adaptadas a las condiciones de la región, las condiciones de almacenamiento de los productos en los centros de acopio y fincas son incorrectas, se carece de procesos estandarizados que ofrezcan trazabilidad en la operación logística de la cadena “aguas abajo”, el nivel de cooperación entre los actores de la cadena es bajo, se da poco uso de buenas prácticas agrícolas, entre otras.

A partir de lo anterior, la Ilustración 3 muestra el árbol de problemas de la ACAHT donde se observan los principales problemas y consecuencias de no trabajar por el mejoramiento y fortalecimiento de esta importante agrocadena para el Tolima y que afectaría directamente la idea y propósito de llegar a ser en un futuro, un país líder exportador de aguacate Hass. Esta problemática conlleva a realizar una identificación profunda de los factores a mejorar en la agrocadena y estudios pertinentes que ofrezcan la información adecuada ante tal propósito de internacionalización.

Ilustración 3.Árbol del problema para la agrocadena del aguacate Hass del norte del Tolima



Fuente: Elaboración propia

La problemática presentada pone de manifiesto la necesidad de tener un conocimiento correcto del desempeño técnico de la agrocadena del aguacate Hass del Tolima, y genera las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el modelo de simulación adecuado para evaluar la sostenibilidad de una cadena de suministro de producto fresco?

- ¿Cuál es el desempeño de la ACAHT en cuanto a la sostenibilidad en el proceso de internacionalización?

1.2 Justificación

La presente investigación se justifica desde dos perspectivas: Seguridad alimentaria y la importancia socioeconómica de la ACAHT. Desde el punto de vista de la seguridad alimentaria, en Colombia existen unos altos porcentajes de pérdidas y desperdicios en las cadenas de alimentos (CSA), principalmente desde la poscosecha (FOA, 2012) siendo más notable este desperdicio en aquellas que movilizan productos frescos (CSAF). Según el Departamento Nacional de Planeación – DNP (2016), se reporta que en Colombia las toneladas de pérdida y desperdicio de alimentos están cerca de 9,76 millones de toneladas, equivalentes al 34% del total producido. De esta pérdida total, cerca de 6,1 millones de toneladas corresponden a frutas y verduras, principalmente por el inadecuado manejo de estos productos desde la etapa de poscosecha.

La creciente importancia del sector hortofrutícola para la economía del Tolima es otro punto de relevancia en esta investigación ya que este no solo aporta al PIB regional, sino que hace que el departamento sea reconocido a nivel nacional como una de las zonas con alta cantidad de producción, trayendo consigo oportunidades de nuevos mercados que potencialicen y fortalezcan la región. Sin embargo, para llegar a tomar ventaja de las oportunidades que se puedan presentar, se debe tener conocimiento de los parámetros de funcionamiento óptimo en los eslabones de la agrocadena para potenciar su competitividad. No obstante, dichos conocimientos no se tienen claros en la actualidad, es por ello que se presenta la incertidumbre ante posibles inversiones en la agrocadena e ineficiencias en la operación de la misma.

Finalmente, la gran apuesta regional orientada al mercado internacional que se está dando con la creación de la nueva planta de clasificación del aguacate Hass en el norte del Tolima, busca fortalecer y apoyar a los productores de cerca de 11 municipios en total entre los que se encuentra Alvarado, Anzoátegui, Falan, Fresno, Palocabildo, Herveo y Lérica. Además de crear una estructura de mercadeo que permita posicional a nivel nacional el aguacate Hass. (El Nuevo Día, 2016).

En ese orden de ideas, al realizar esta investigación se tendrá mayor información que apoye la incursión en el mercado internacional, y de esta manera poder obtener mejores resultados ante posibles oportunidades de exportación, aprovechando las mejores condiciones económicas del producto en el mercado internacional puesto que el precio, que está sujeto a la estación del año en que se adquiera, está a más del doble de lo que costaba en 2016 y es el más alto en los últimos 19 años (El Financiero, 2017).

1.3 Objetivos

El objetivo general es evaluar la sostenibilidad de una agrocadena de suministro de producto en fresco orientada al mercado internacional mediante un modelo de simulación y validar su funcionalidad en la agrocadena del aguacate Hass originaria del Tolima. En coherencia con lo anterior, se trabajó para el logro de los siguientes objetivos específicos:

- A. Determinar las características de operación de una cadena de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional.
- B. Evaluar el desempeño técnico de la cadena de suministro del aguacate Hass del Tolima, mediante herramientas de simulación.
- C. Desarrollar escenarios de futuro para el proceso de internacionalización del aguacate Hass del Tolima.
- D. Diseñar acciones de mejora orientadas a los procesos de internacionalización

Capítulo 2. Marco de referencia

2.1 Revisión de literatura

La caracterización de la cadena de suministro en el sector agroalimentario (CSA) ha sido una tarea que ha venido desarrollándose a lo largo del tiempo de acuerdo a los actores que se encuentren involucrados en la misma, por lo cual son un dominio de aplicación importante para la investigación operativa, en particular, el uso de la simulación basada en agentes (SBA) ha aumentado en CSA durante los últimos años.(Utomo, Onggo, & Eldridge, 2018).

Uno de los factores más importantes que influyen en la sostenibilidad de una cadena de suministro de agroalimentos es su diseño de red. Sin embargo, muchos otros factores que pueden resultar en una cadena de suministro no podrían integrarse o medirse por completo mediante problemas de optimización en un solo paso, por tal razón plantea una metodología de solución híbrida de dos etapas: en la primera etapa, se realiza una selección de socios de una cadena de suministro de agroalimentos con varios indicadores de integración; en la segunda etapa, se formula un modelo matemático con múltiples funciones objetivo para optimizar el diseño de la cadena de suministro y generar un Frontera de Pareto para ayudar a los usuarios a tomar decisiones (Allaoui et al., 2018).

En otro contexto la simulación de un modelo es de gran importancia dado que por medio de esta se podría identificar los comportamientos ante diversos cambios en la cadena de suministro. En ese sentido, Morshedzadeh, et al. (2018) indican que los modelos de simulación de eventos discretos (SED) imitan el comportamiento de un sistema de producción, por ejemplo, su cadena de suministro, línea de producción, entre otros. Además, si existen panoramas en los cuales se deben tener en cuenta determinadas características del producto como su ciclo de vida, se abre una puerta ante la implementación de los sistemas de Gestión del ciclo de vida del producto que se han desarrollado para gestionar datos relacionados con el producto y la fabricación.

Otra forma de contribuir ante el mejoramiento y optimización de las CSA se puede evidenciar en las propuestas de modelos que plantean autores como Ahumada, Villalobos, & Mason (2012), con un modelo para la planeación táctica de la operación y distribución de CSA bajo condiciones de incertidumbre encontradas en la industria de productos frescos debido a la variabilidad del clima y

la demanda; el enfoque desarrollado es un modelo de programación estocástico de dos etapas, aplicado a un caso de estudio de productores de productos frescos en México y en una simulación de varios escenarios para probar la solidez de las decisiones de planificación obteniendo como resultado mejoras significativas en las recomendaciones de planificación al utilizar el enfoque estocástico propuesto en comparación con los prestados por modelos deterministas.

Por otro lado Tsolakis et al. (2014) plantean un modelo para analizar el proceso de toma de decisiones en las CSA que tiene en cuenta componentes genéricos del sistema junto con las características únicas de las CSA que los diferencian de las CS convencionales a su vez un el reconocimiento de la jerarquía natural del proceso de toma de decisiones para el diseño y la planificación de los CSA; dicho análisis demostró que la gestión de la CSA es un campo de investigación en rápida evolución centrada en problemas específicos de cada escalón de la cadena de suministro y menos en enfoques metodológicos integrados para la optimización de toda la cadena de suministro.

2.2 Configuración, gestión de cadenas de suministro y gestión de cadenas de suministro sostenible

Una cadena de suministro se define como la red de eslabones que trabaja para gestionar los flujos de materias primas, productos en proceso y productos terminados desde los centros de producción hasta los almacenes, centros de distribución y minoristas, tal como se evidencia en la Ilustración 4 (Demirtaş & Tuzkaya, 2012); (Lambert & Enz, 2017).

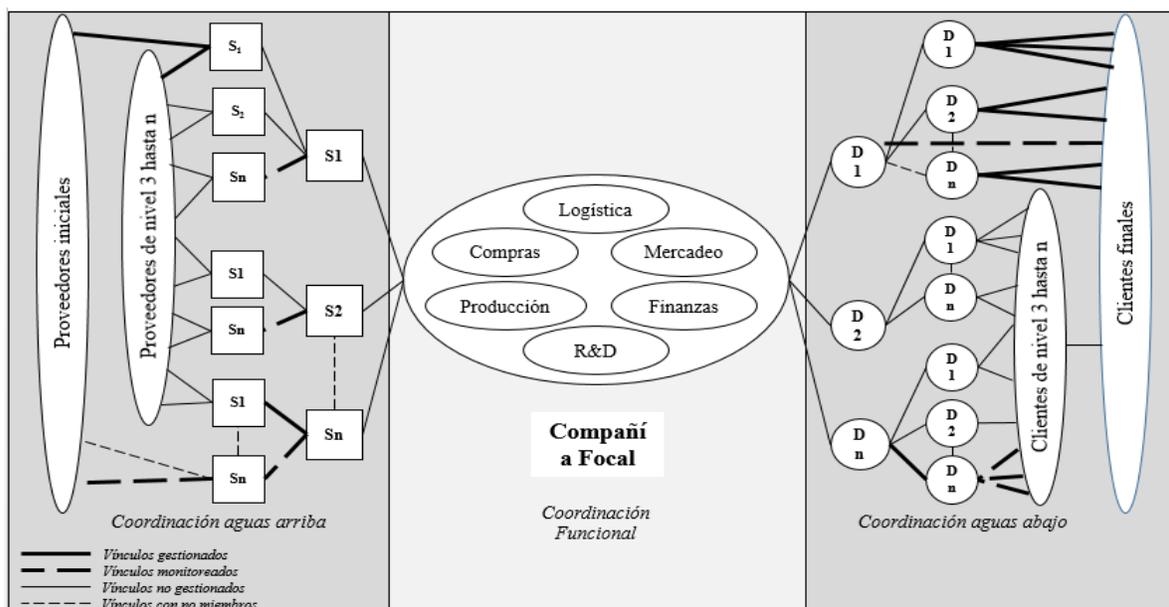
2.2.1 Configuración de cadenas de suministro

En la configuración de cadenas de suministros se tienen 4 aspectos principales: miembros de la cadena de suministro, las dimensiones estructurales de la red, flujos y los diferentes tipos de enlaces de procesos a través de la cadena de suministro.

- Los miembros de una cadena de suministro incluyen a todas las compañías / organizaciones con las que la compañía focal interactúa directa o indirectamente a través de sus proveedores o clientes, desde el punto de origen hasta el punto de consumo.

- Las dimensiones son: la estructura horizontal, la cual hace referencia al número de niveles a lo largo de la cadena de suministro, la estructura vertical se refiere al número de proveedores / clientes representados dentro de un nivel y la posición horizontal de la empresa focal, es decir, la empresa puede ubicarse en o cerca de la fuente de suministro inicial, estar cerca del cliente final o en algún lugar entre estos puntos finales de la cadena de suministro.
- Los flujos que son transversales a toda la cadena de suministro son: flujo de materiales, flujo de información y flujo de finanzas.
- Los tipos de enlaces de procesos de una cadena de suministro son: enlaces de procesos empresariales gestionados, enlaces de procesos empresariales supervisados, enlaces de procesos empresariales no gestionados y enlaces de procesos empresariales no miembros (Lambert & Cooper, 2000).

Ilustración 4. Estructura de una cadena de suministro



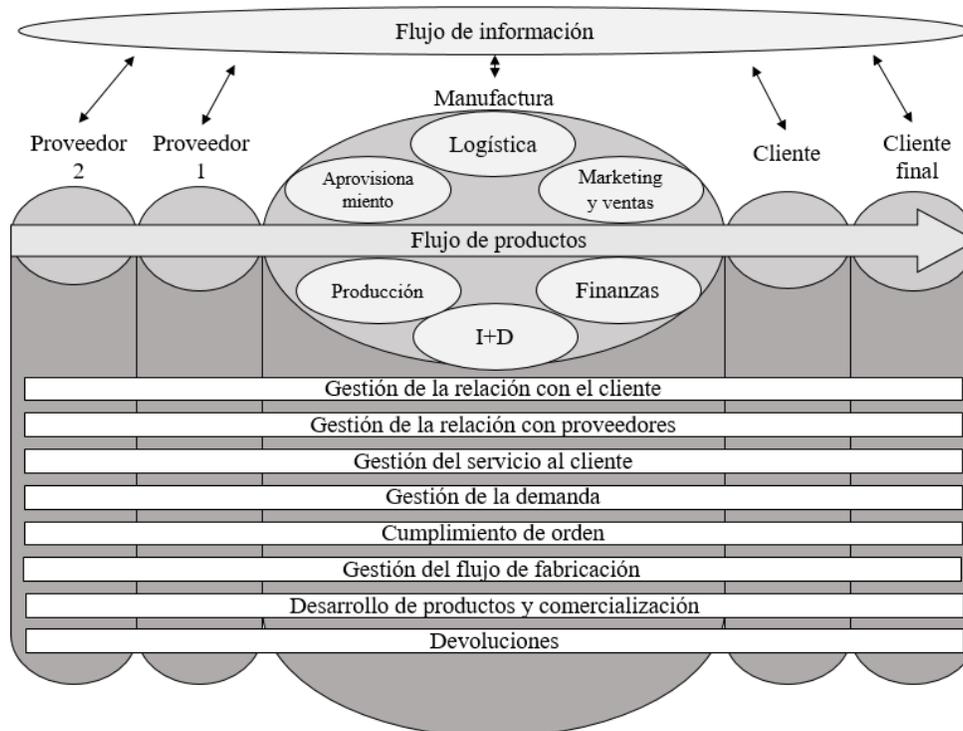
Fuente: (Lambert & Enz, 2017)

2.2.2 Gestión de cadenas de suministro

La gestión de la cadena de suministro (GCS) se puede definir como la administración de las relaciones aguas arriba y aguas abajo con proveedores y clientes con el fin de ofrecer un valor superior al cliente a un menor costo (Christopher, 1992).

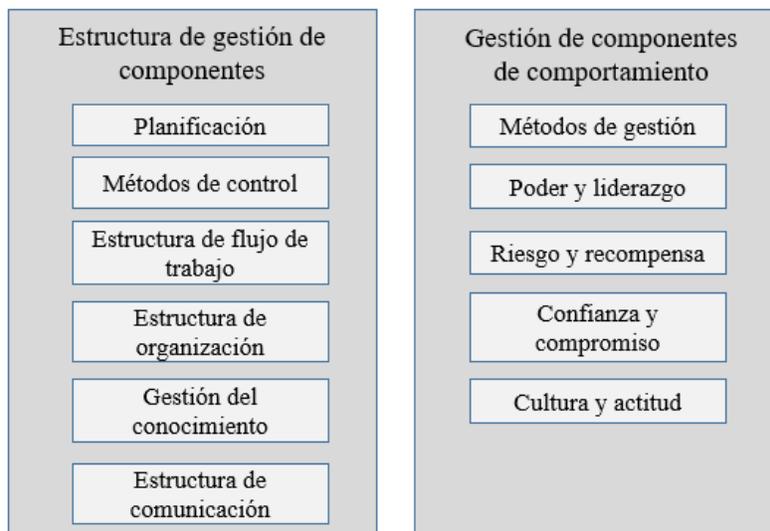
El marco de la gestión de la cadena de suministro consta de tres elementos estrechamente relacionados entre sí: La estructura de red de la cadena de suministro, los procesos de la cadena de suministro, y los componentes de la gestión de la cadena de suministro. *La estructura de red* de la cadena de suministro consta de los miembros de las empresas y los vínculos (relaciones) que hay entre estas empresas (ver Ilustración 4). *Los procesos de negocio* son las actividades que producen una potencia específica de valor para el cliente los cuales son: gestión de la relación con el cliente, gestión del servicio al cliente, gestión de la demanda, cumplimiento de la orden, gestión del flujo de fabricación, adquisiciones, desarrollo de productos y comercialización, y devoluciones ; identificando que se requiere de integración cruzada de procesos de negocios clave dentro de la empresa y en toda la red de empresas para llegar al éxito de SCM (ver Ilustración 5). *Los componentes de administración* son las variables de gestión por el cual los procesos de negocio están integrados y gestionados a través de la cadena de suministro, como se puede ver en la Ilustración 6 (Lambert & Cooper, 2000).

Ilustración 5. Procesos de administración en una CS



Fuente: (D. M. Lambert & Enz, 2000)

Ilustración 6. Gestión de componentes administrativos

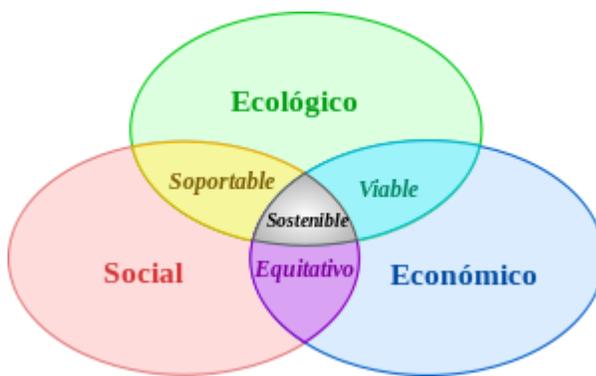


Fuente: (Lambert & Cooper, 2000)

2.2.3 Gestión de Cadenas de Suministro Sostenible (GCSS)

El desarrollo sostenible es definido por la ONU (1987) en la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo como la satisfacción de las necesidades de la generación presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Esta definición ha emergido como el principio rector para el desarrollo mundial a largo plazo y consta de tres pilares, el desarrollo económico, desarrollo social y la protección del medio ambiente (ver Ilustración 7).

Ilustración 7. Pilares del desarrollo sostenible



Fuente: ONU (1987)

Teniendo en cuenta la información anterior y el concepto de Gestión de la Cadena de Suministros, la Gestión de la Cadena de Suministros Sostenible (GCSS) es definida por Seuring & Müller (2008) como la gestión de materiales, información y flujos de capital, así como la cooperación entre las organizaciones a lo largo de la cadena, teniendo en cuenta metas de las tres dimensiones del desarrollo sostenible: ambientales, económicas y sociales, derivadas de los requerimientos de los consumidores y los grupos de interés. Carter & Rogers (2008) consideran que la GCSS se enfoca en metas económicas, ecológicas y sociales a largo plazo, para mejorar el desempeño económico y competitivo de las organizaciones que participan en la cadena.

Siguiendo una visión ambientalista, la GCSS es el conjunto de prácticas de dirección que tienen en cuenta: (i) los impactos medioambientales como los más importantes, (ii) la consideración de todos los niveles de la cadena de valor y (iii) una perspectiva multidisciplinaria que tenga en cuenta todo el ciclo de vida del producto. Este concepto aporta la necesidad de enfrentar las decisiones desde varias disciplinas científicas para poder abordar los problemas ambientales, unidos a los problemas tradicionales de la gestión clásica de las cadenas de suministro e introduce el ciclo de vida del producto en la definición (Gupta & Palsule-Desai, 2011).

En conclusión, tomando como referencia lo manifestado por Feitó (2015), se entiende que la GCSS es la coordinación estratégica que se da dentro y entre las organizaciones, con el fin de gestionar eficientemente sus flujos materiales, financieros y de información, teniendo en cuenta el ciclo de vida del producto, así como los cambios que se consideren oportunos para asegurar la satisfacción de las necesidades sociales a partir de la satisfacción de los intereses individuales de los grupos involucrados con la cadena, siempre y cuando estos cambios sean compatibles con la sostenibilidad y estén en armonía con el resto de los sistemas organizacionales.

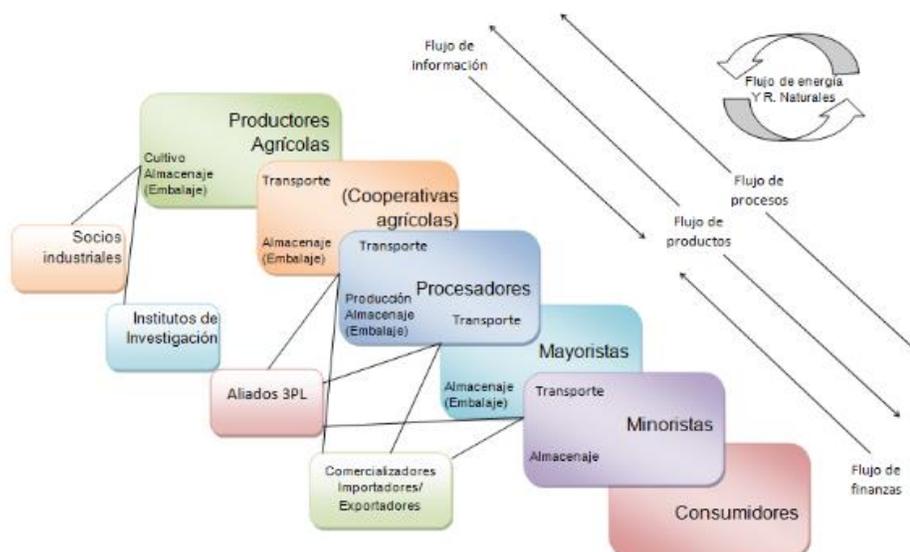
2.3 Cadenas de suministro de alimentos (CSA)

Las CSA son redes de actores y organizaciones, que trabajan conjuntamente en diversos procesos y actividades, con el propósito de satisfacer las demandas de los consumidores finales, sin embargo, tal y como indica la FAO (2018) los sistemas alimentarios (desde la producción hasta la distribución y el consumo) deben garantizar que haya suficientes alimentos nutritivos disponibles para todos, ya sea que vivan en zonas urbanas o rurales y sean hogares pobres. El desafío es hacerlo

minimizando cualquier impacto negativo en el medio ambiente. A consecuencia de ello, las CSA se diferencian de otras cadenas, en las implicaciones que tienen para éstas, factores como: calidad, seguridad, variabilidad, vida útil y precios; son aspectos que por sí mismos, hacen más complejo su manejo, están conformadas por organizaciones/actores responsables de la producción, distribución, procesamiento (si aplica), y comercialización de productos alimenticios, hasta el consumidor final (Ahumada & Villalobos, 2009).

Los eslabones operacionales de la CSA son soportados por servicios logísticos, financieros y técnicos, los cuales a su vez se apoyan en cinco flujos centrales a saber: materiales y productos, finanzas, información, procesos, energía y recursos naturales (ver Ilustración 8). Paralelamente a estas tareas, hay otros actores involucrados a las CSA, de naturaleza pública como suelen ser las instituciones de gobierno y las instituciones de investigación, de naturaleza privada como otras industrias, productores/agricultores, cooperativas agrícolas, intermediarios, procesadores, transportadores, exportadores e importadores, mayoristas, minoristas y consumidores (Tsolakis et al., 2014).

Ilustración 8. Modelo general de una cadena de suministro de agroalimentos



Fuente: (Tsolakis et al., 2014)

Siendo el mercado agroalimentario tan complejo y competitivo requiere una asociación continúa de conocimiento técnico con la gestión con el fin de comprender las preocupaciones crecientes de los consumidores (Farias & Csillag, 2004).

El desempeño de la cadena de suministro es el grado en el cumple con los requerimientos del usuario final relacionados con los indicadores de desempeño en cualquier punto del tiempo y a un bajo costo en toda la cadena; esta medición es importante porque afecta la toma de decisiones a través de la evaluación del comportamiento pasado y a través de la oportunidad de la aplicación del benchmarking. En un sentido más amplio, los datos de medición y desempeño están destinados a asegurar el control de la organización (Thanassoulis, 2001).

Ahora bien, medir el desempeño de las cadenas de suministro agroalimentarias es una labor compleja, porque dichas cadenas son diferentes de otras en algunos aspectos como: perecibilidad, alta producción en el tiempo de producción y estacionalidad. Distinciones importantes son hechas entre productos frescos (frutas y verduras), productos refrigerados (ensaladas, productos lácteos, etc.), productos congelados (pescado, helados, etc.) y no perecederos como azúcar y café (Van der Vorst, 2006).

Se ha estimado que una manera adecuada de medir el desempeño es a través de la definición de indicadores que permitan valorar el desempeño individual y colectivo de la cadena de suministro. En ese sentido cabe resaltar que los indicadores de desempeño cualitativos como la aceptación del producto por el cliente (aspectos cualitativos como sabor, textura, etc.), necesitan ser tomados en cuenta junto con otros indicadores de desempeño no cualitativos (Ortiz & Jiménez, 2017).

Por consiguiente, si se está teniendo en cuenta la visión completa inherente a la definición de sostenibilidad se crean muchas dificultades cuando esta se aplica a sistemas con una complejidad elevada. Por esta razón, los métodos que toman en cuenta los sistemas agrícolas a menudo tienden a concentrarse solo en una o dos dimensiones de sostenibilidad, como la protección ambiental y la sostenibilidad económica, y menos a menudo en temas relacionados con la aceptación social (Peano, Tecco, Dansero, Girgenti, & Sottile, 2015). Tal como lo indica Peano & et. (2015) el uso de indicadores dentro de un marco de evaluación de la sostenibilidad sin duda desempeña un papel

importante y representa un instrumento eficiente para comprender y diseñar alternativas; por ejemplo, para usos de la tierra, técnicas agronómicas y sistemas agrícolas y gestión de la CSA.

En una CSA se sugiere que las áreas que se tomen en cuenta para llevar a cabo la medición del desempeño a nivel técnico económico, obviamente en la medida de lo posible son: eficiencia/costo, capacidad de respuesta al cliente, flexibilidad, calidad del alimento y calidad en el proceso (Ortiz & Jiménez, 2017), de las cuales se definen indicadores importantes para medir el desempeño técnico de la agrocadena (ver Tabla 2).

Tabla 2. Algunos indicadores de medición del desempeño técnico

Indicador	Definición de indicador
Contenedores en puerto	Número de pedidos internacionales / Número de contenedores puestos en puerto
Pedidos internacionales	Total de pedidos / Número de pedidos internacionales
Cantidad producida	Aumento / disminución de la cantidad producida.
Nuevos canales comerciales	Activación de nuevos canales comerciales
Poder de contratación del productor	Aumento / Disminución porcentual del poder de contratación del productor
Porcentaje de entregas a tiempo y correctas	Porcentaje de entregas realizadas OTIF (a tiempo y completas)
Tiempos de recorrido para los diferentes modos de transporte	Tiempo y velocidad promedio de recorrido para los diferentes modos de transporte en los principales corredores
Distribución de la intermodalidad del sistema de transporte nacional	Toneladas de carga movidas a nivel nacional por cada modo de transporte
Alianzas económicas	Asociación con otros socios y distribuidores.
Costo logístico de las empresas	Porcentaje del costo logístico en las empresas generadoras de carga

Fuente: Creación basada en Observatorio Nacional de Logística y (Peano et al., 2015)

2.4 Herramientas y metodologías para el estudio de cadenas de suministro

A partir de la revisión de literatura, se encontró que han sido propuestos diversos modelos, para el mejoramiento de las CSA, los cuales se distinguen por el nivel de alcance, el campo de aplicación y la metodología (Ahumada & Villalobos, 2009). Las palabras claves que se utilizaron para realizar las combinaciones en las bases de datos científicas fueron: ‘Model’, ‘agrifood supply chain’, ‘fresh product’, ‘simulation’, ‘sustainability’, ‘avocado’, ‘intentional trade’ y ‘systems dynamic’.

Tabla 3. Tabla resumen de herramientas para estudio de cadenas de suministro

Artículo de revisión (Identificador: Anexo A)	Alcance			Campo de aplicación				Metodología				
	Estratégico	Táctico	Operativo	Abastecimiento	Producción	Distribución	Inversa	Prog. Ent. Mix	Prog. Lineal	Simulac. ED	Simulac. Agen	Din. Sistemas
AR1		X			X	X		X				
AR2			X		X	X		X				
AR3	X					X						X
AR4	X			X	X	X						X
AR5			X			X	X		X			
AR6	X					X			X	X		
AR7		X			X	X					X	
AR8		X			X	X		X				
AR9			X		X	X		X				
AR10		X			X	X		X				
AR11					X			X				
AR12		X			X	X				X		
AR13		X				X					X	

Fuente: La proponente a partir de revisión de literatura científica

El alcance de los modelos ha sido principalmente a nivel estratégico (largo plazo) y táctico (mediano plazo). Realizando un análisis de la información cabe resaltar que las herramientas utilizadas han sido la Programación lineal, mixta o meta; así como la Programación estocástica, Dinámica de sistemas, Simulación de eventos discretos y Simulación basada en agentes. La aplicación de estos modelos ha tenido lugar para cadenas de productos perecederos y no perecederos (ver Tabla 3).

2.4.1 Dinámica de sistemas (SD)

Es una metodología de modelamiento y simulación para el análisis y toma de decisiones a largo plazo sobre problemas empresariales industriales que se ha implementado también en las CSA, se basa en la realimentación y en los retrasos de la información para entender el comportamiento dinámico de complejos sistemas físicos, biológicos y sociales en donde la idea esencial en SD es que todos los elementos en un sistema interactúan a través de relaciones causales. Estas relaciones son representadas por bucles de realimentación, los cuales controlan las interacciones entre los elementos del sistema y son la causa de su comportamiento (Vásquez, 2017).

Algunas de las principales características que presenta la SD y por las cuales este método de modelamiento es el elegido ante el presente proyecto son (Dangerfield, 2014); (Brailsford, Desai y Viana, 2010):

- El principio fundamental en SD indica que la estructura del sistema determina su comportamiento a lo largo del tiempo. En otras palabras, la manera en que los componentes separados de cualquier sistema se relacionan y afectan entre ellos determina el comportamiento emergente del sistema como una totalidad. El componente básico usado en la construcción de un modelo es el bucle de realimentación.
- El paradigma trabaja con valores agregados (de productos, gente, etc.) y no con entidades individuales. Los objetos almacenados (como un todo) en el mismo nivel se consideran homogéneos e indistinguibles. Se dice que con la técnica de SD se tiene una visión del bosque sin poder identificar cada uno de los árboles, es decir, se representan los objetos o

sus características mediante propiedades promedio. Esto es un resultado directo de la técnica de modelamiento usada, en la que las variables de nivel son acumulaciones de los flujos, lo que no permite identificar los objetos simples fluyendo a través del sistema.

- Hace posible el análisis de cómo las relaciones no lineales de causalidad entre las variables y los parámetros del modelo influyen en el comportamiento del sistema.
- Es una metodología de arriba abajo (top-down), es decir, tiene un enfoque macroscópico del mundo, similar a una síntesis holística de un sistema de elementos que están dinámicamente interconectados. Se considera que tiene un planteamiento más estratégico, en el cual los eventos y las decisiones son percibidos como formas de comportamiento y estructuras del sistema.
- No se ignoran las variables blandas (como moral o reputación), que tienen una influencia causal en el sistema.

En términos de sostenibilidad la tabla 4, muestra los indicadores que se han implementado en estudios de cadenas de suministro en donde se evalúa la sostenibilidad de la misma desde los diferentes pilares.

Tabla 4. Indicadores de sostenibilidad implementados en CS

Autores	Indicador		
	Pilar Económico	Pilar Social	Pilar Ambiental
(Roni et al., 2016)	-Costos de transporte	-Número de puestos de trabajo	Emisiones de CO2
(Zhalechian et al., 2016)	-Desarrollo económico	-Oportunidades de empleo creadas	-Emisiones de CO2 -Consumo de combustible -Desperdicio de combustible
(Bairamzadeh et al., 2016)			-Evaluación de impacto ambiental basado en la evaluación del ciclo de vida (LCA)
(Cambero et al., 2016)	-Valor actual neto (NPV) de la cadena de suministro de biorrefinerías		-Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)
(Miret et al., 2016)	-Costos económicos	-Competencia entre energía y alimentos	Evaluación del ciclo de vida

Autores	Indicador		
	Pilar Económico	Pilar Social	Pilar Ambiental
		-Número total de empleos locales acumulados	
(Mota et al., 2015)	-Costos	-Impacto de las preocupaciones sociales y políticas en el desempeño de la empresa	-Evaluación del ciclo de vida
(Devika et al., 2014)	-Costos	-Oportunidades laborales creadas - Seguridad de los trabajadores	Evaluación de impacto ambiental basado en fabricación, el transporte, la manipulación y eliminación de productos
(Yan et al., 2018)	- PIB de la industria de servicios - Renta disponible - Inversión gubernamental en I + D	-Tasa de desempleo - Cobertura de seguridad de salud	-Consumo total de energía por unidad PIB - Tasa de tratamiento de aguas residuales - Residuos domésticos
(Santibañez-Aguilar et al., 2014)	-Ventas de producto -Costo total	-Número de empleos generados	-Evaluación del ciclo de vida

Fuente: Elaboración propia a partir de revisión de literatura

Capítulo 3. Aspectos metodológicos

3.1 Generalidades

La presente investigación es tipo científica, descriptiva – propositiva, con enfoque deductivo y tiene como diseño metodológico un diseño experimental. La población objeto de estudio es finita y hace referencia a los actores de la ACAHT.

Las fuentes de información que se utilizaron son primarias y secundarias relacionadas con procesos propios de las cadenas de suministro de productos frescos orientadas al mercado internacional, para ello se utilizaron herramientas como: grupos focales, entrevistas y visitas técnicas a representantes claves en la agrocadena. Para el análisis de esta información se hizo uso de modelos de simulación bajo el enfoque de dinámica de sistemas.

3.2 Estrategia metodológica

Para llevar a cabo la presente investigación, se estructuró el desarrollo por medio de 4 etapas metodológicas que son mostradas en la Tabla 5. En primer lugar, realizó la respectiva revisión bibliográfica sobre las cadenas de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional con el fin de lograr la identificación de las principales características que tienen las mismas, para lo cual se emplearon bases de datos como *ScienceDirect*, *Scopus*, *SciELO*, entre otras. En el momento en que se tuvo la determinación de dichas características, posteriormente se procedió a realizar el planteamiento de modelo de la cadena de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional, para ello se hizo nuevamente una revisión bibliográfica la cual tuvo como objetivo la indagación profunda referente a los modelos matemáticos utilizados en agro cadenas ante procesos de internacionalización y los estudios recientes acerca de los mismos para tener bases en la selección y planteamiento del modelo que mejor se adaptara a las variables propias de una agrocadena de productos frescos orientada al mercado internacional.

Esta investigación hace referencia al caso aplicado a la cadena del aguacate Hass originario del Tolima, por consiguiente, la segunda etapa de la investigación se centró específicamente en este

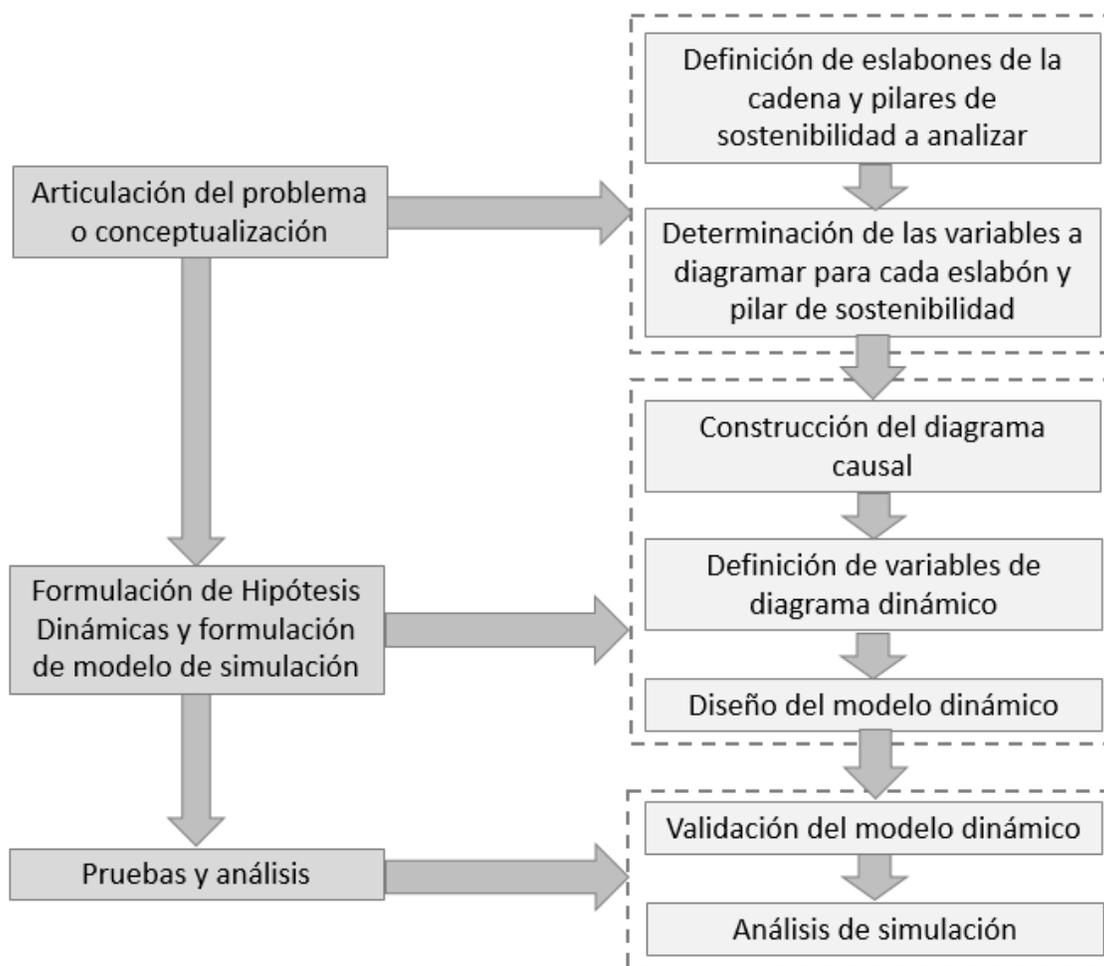
sector agrícola. Para realizar la evaluación del desempeño técnico de la cadena de suministro sostenible del aguacate Hass en el norte del Tolima se hizo trabajo de campo por medio del cual se recolectó la información necesaria para identificar los actores y las variables propias de la cadena. Como se puede inferir, cada una de las etapas anteriores son insumos para el desarrollo de la tercera y cuarta etapa, en las cual se realizó la selección y evaluación de los escenarios de futuro críticos para el proceso de internacionalización por medio de la simulación del modelo de la agrocadena a través del software VENSIM. Posteriormente se seleccionaron los escenarios más factibles para analizar el proceso de internacionalización del aguacate Hass. Por último, pero no menos importante, se estableció un plan de implementación para el mejor escenario analizado.

Tabla 5. Resumen del plan metodológico por cada objetivo propuesto

Objetivos	Acciones centrales	Herramientas de apoyo	Resultados esperados
A. Determinar las características de operación de una cadena de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar literatura científica • Identificar las principales características de operación de una cadena de suministro de producto fresco 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos para el estudio de una CS (Lambert & Enz, 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lista de características de una cadena de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional.
B. Evaluar el desempeño técnico de la cadena de suministro del aguacate Hass en el norte del Tolima, mediante herramientas de simulación	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar los instrumentos de recolección de información • Recolectar información de la ACAHT • Identificar los actores de la ACAHT • Identificar las variables propias de la ACAHT • Identificar las dinámicas de exportación de la fruta 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos de simulación dinámica (Serman, 2000) • Sitios web especializados (Trademap, Agronet, FAO, SIEX-DIAN) 	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentos de recolección de información • Identificación de variables de diseño de la ACAHT • Modelo conceptual de la ACAHT • Dinámica comercial del aguacate Hass para exportación
C. Desarrollar escenarios de futuro para el proceso de internacionalización del aguacate Hass del norte del Tolima	<ul style="list-style-type: none"> • Plantear escenarios futuros con equipo técnico de la ACAHT • Simular los escenarios propuestos para la ACAHT • Evaluar el desempeño de los escenarios propuestos 	<ul style="list-style-type: none"> • Herramienta Matriz DOFA (Luis & Rojas, 2009) • Herramientas de análisis estadístico (Software SPSS) (Perez, 2009) • Fundamentos del diseño de experimentos (Montgomery, 2004) 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de simulación de la ACAHT
D. Diseñar acciones de mejora orientadas a los procesos de internacionalización	<ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar los escenarios convenientes para ACAHT • Diseñar las acciones de mejora 	<ul style="list-style-type: none"> • Herramienta de consulta de expertos (Software Desing Expert, Método Delphi) • Fundamentos de planificación estratégica (Büttner, 2014) 	<ul style="list-style-type: none"> • Características y desempeño esperado del escenario seleccionado • Acciones de mejora orientadas a los procesos de internacionalización

Para el desarrollo del modelo de simulación de la cadena de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional, se utilizó en enfoque de dinámica de sistemas bajo la metodología propuesta por Sterman (2000) la cual está diseñada a partir de los siguientes 3 pasos (ver Ilustración 9).

Ilustración 9. Esquema de metodología dinámica de sistemas



Fuente: Basado en (Sterman, 2000)

1. Articulación del problema o conceptualización hace referencia a la selección del tema e identificación de: ¿cuál es el problema? ¿Cuáles son las variables clave y definiciones que

se deben considerar? ¿Cuál es el horizonte de tiempo del problema? ¿Cuál es la definición dinámica del problema?

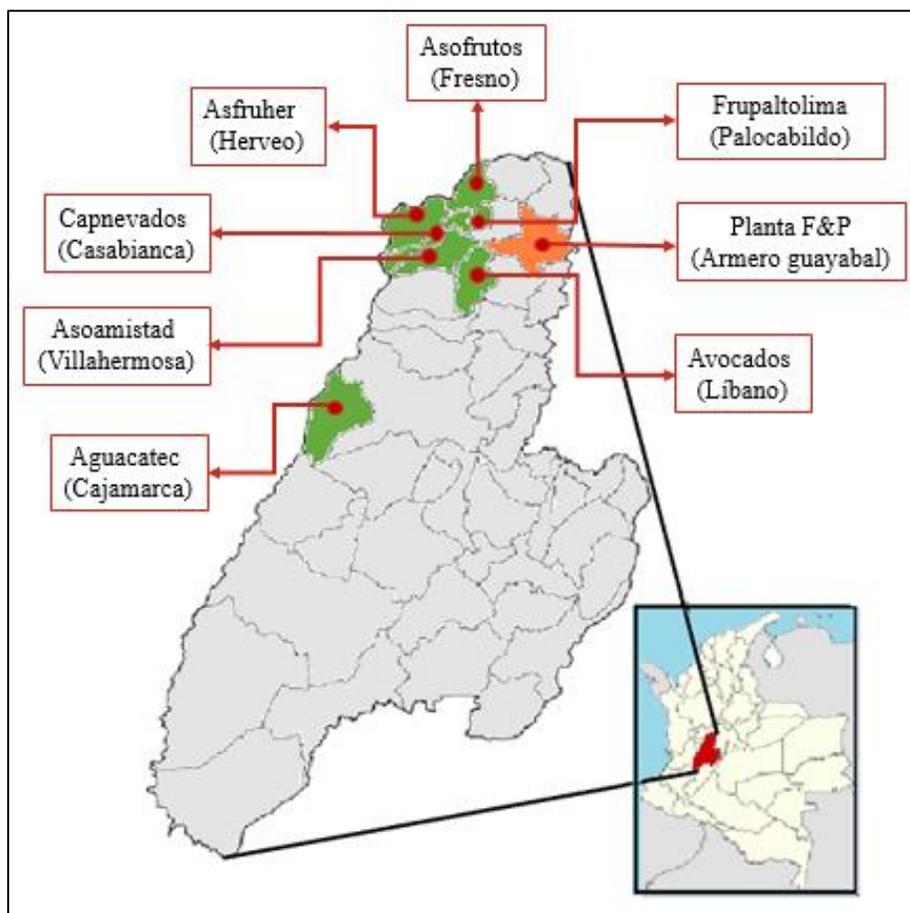
2. Formulación de Hipótesis Dinámicas y Formulación de un modelo de simulación da lugar a la hipótesis inicial, es decir, las teorías actuales del comportamiento problemático, mapas de estructura causal basados en la hipótesis inicial, variables clave y demás información. Formular el modelo de simulación teniendo en cuenta la especificación de la estructura, las reglas de decisión, estimación de parámetros, relación de comportamientos, condición inicial y pruebas de consistencia con el propósito y el límite.
3. Pruebas y análisis hace referencia a que el modelo reproduzca el comportamiento del problema adecuadamente para el propósito planteado, que se comporte de manera real ante condiciones extremas. Especificar escenarios, es decir, ¿qué condiciones ambientales podrían surgir? Diseñar políticas, nuevas reglas de decisión, estrategias, analizar ¿cuán robustas son las recomendaciones políticas ante los diferentes escenarios y dada la incertidumbre?

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización de la operación de la ACAHT

Paltolima es la recientemente creada Federación de Productores de Aguacate del Tolima, conformada por 12 asociaciones de productores localizados en diferentes municipios del norte y centro del departamento del Tolima (Ilustración 10).

Ilustración 10. Asociaciones de Paltolima que producen Aguacate Hass



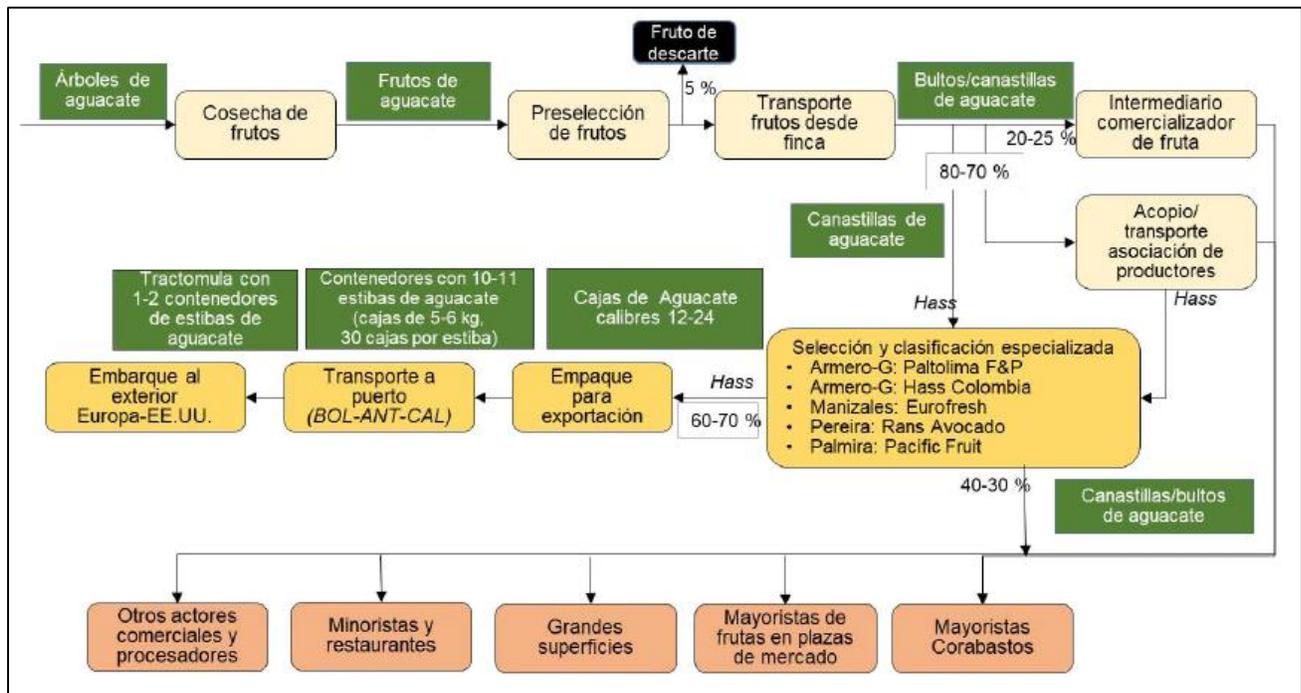
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, las asociaciones de cultivadores que producen aguacate Hass en el Tolima son: “Asofrutos” con 170 asociados, “Asociación La Amistad” con 32 asociados, “Capnevados” con 20

asociados, “Frupaltolima” con 40 asociados, “Aguacatec” con 30 asociados, “Asfruher” con 52 asociados. Por otro lado, la planta clasificadora F&P, que hace parte de la agrocadena de suministro está localizada en Armero guayabal (ver Ilustración 10).

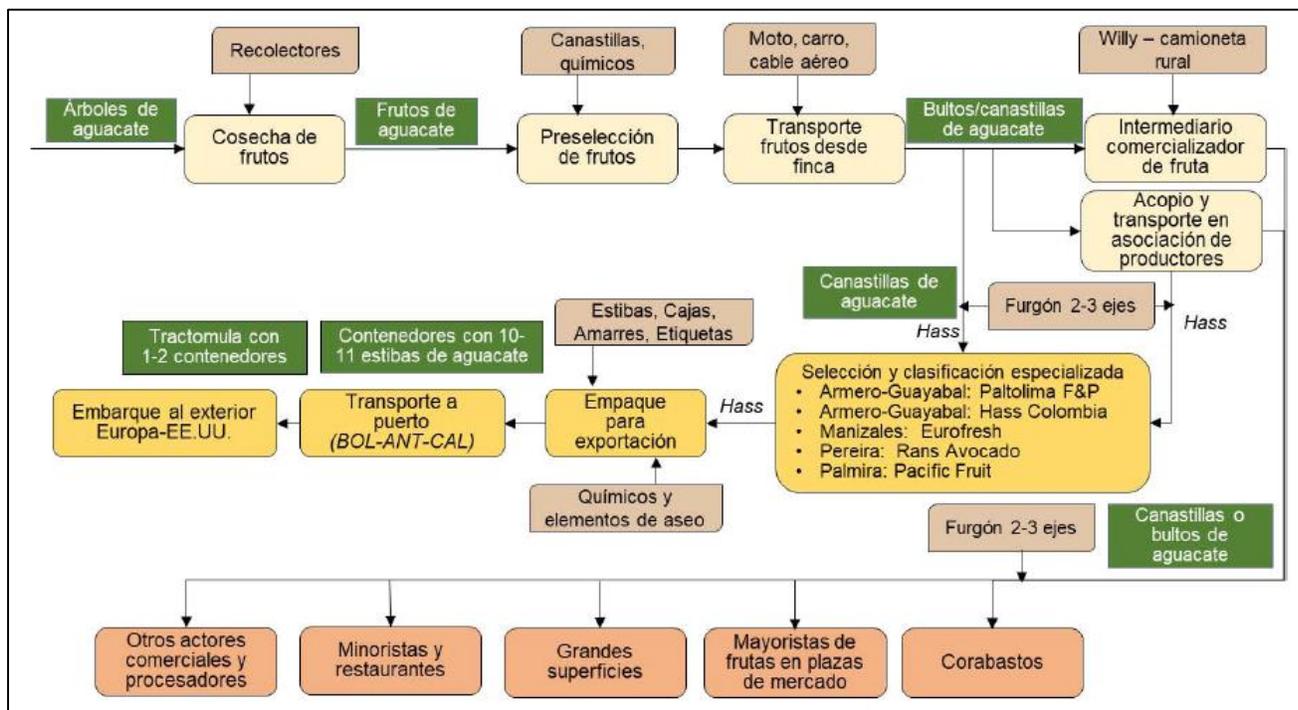
La agrocadena está conformada por cuatro eslabones: unidades productivas agrícolas, centros de acopio, planta clasificadora y comercializadores, en los cuales se identificaron los flujos del producto/ procesos (ver Ilustración 11) y el flujo.

Ilustración 11. Flujo de producto / procesos en la Agrocadena del aguacate en el Tolima



Fuente: (Bermeo & et al. 2020)

Ilustración 12. Flujo de insumos y recursos de la Agrocadena del aguacate en el Tolima



Fuente: (Bermeo & et al. 2020)

Los costos de producción del aguacate Hass en el Tolima cada año aumentan en promedio un 5% hasta el año 7 desde su siembra (Ministerio de agricultura 2018), a partir del cual se estabilizan. Dentro de los costos de producción, se tienen en cuenta la mano de obra, los insumos, equipos y herramientas, así como los costos indirectos de producción; no obstante, cabe resaltar que en la mayoría de cultivos hacen uso del agua lluvia como un sistema de riego natural, razón por la cual no se contabilizan en su totalidad. En la Tabla 6, se muestran los costos de producción mensuales por hectárea cultivada de aguacate Hass en el Tolima, de acuerdo a lo manifestado por el Ministerio de Agricultura (2018), así como a través de las entrevistas realizadas a los agricultores.

Tabla 6. Costos de producción de aguacate Hass en el Tolima

Actividad	(\$/ha)
Mano de obra	3.750.000
Insumos, Equipos y herramientas	13.286.000

Indirectos	2.150.000
Costo Total (\$)	19.186.300
Costo /t (\$/t)	1.918.630

Fuente: Ministerio de agricultura (2018) y Datos reales

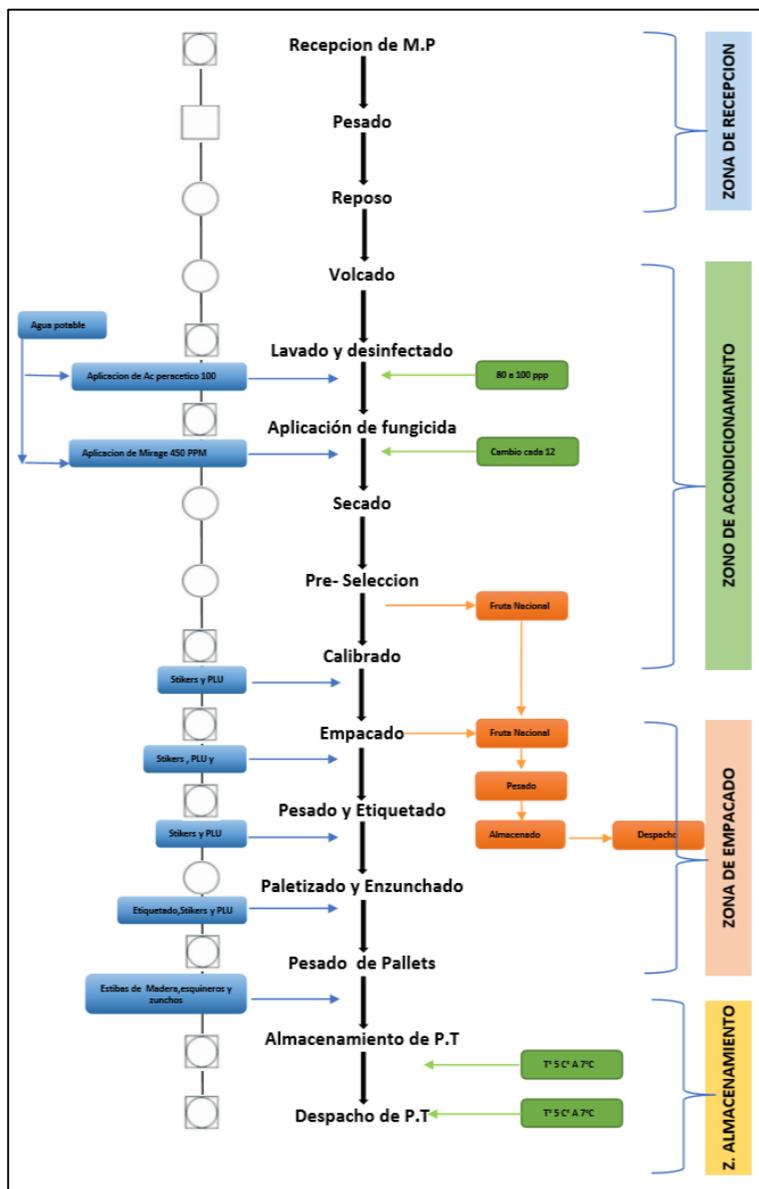
De las asociaciones que producen aguacate Hass, tan solo tres cuentan con un centro de acopio, cada una para su comercialización, siendo el centro de acopio un intermediario entre los productores y los diversos comercializadores.

El aguacate Hass tiene aproximadamente una vida útil de 60 días, lo cual facilita su transporte hacia zonas lejanas. El fruto en la mayoría de casos es transportado en canastillas desde la UPA hasta el centro de acopio, la planta clasificadora u otros clientes; el medio de transporte usado es el camión con capacidad de 10t ; sin embargo, dado el volumen de las canastillas solo se puede transportar máximo 8t de aguacate en cada camión; las distancias que se manejan en cuanto a transporte del producto están relacionadas en (Anexo B), las cuales varían dependiendo del punto de partida al punto de llegada.

La cadena del aguacate Hass del Tolima maneja diferentes tipos de clientes, cabe resaltar que estos no son estables dado las dinámicas cambiantes de precios y garantías ante el vendedor. El producto se vende tanto a nivel local, nacional o internacional, algunos de los clientes nacionales son intermediarios, Corabastos, plazas de mercado o minoristas locales y nacionales y; otros como F&P, Global Hass, Hass Tolima, Natura SAS, Fresteruma, TBT y Frutinsa, las cuales son maquiladoras para la clasificación del fruto con propósito de exportación.

La mayoría de las asociaciones que producen aguacate Hass tienen como cliente la planta clasificadora F&P ubicada en Armero guayabal –Tolima (ver Ilustración 10), la cual es el puente ante la exportación del fruto para la agrocadena de Paltolima. F&P en temporada alta F&P envía 2 o 3 contenedores con aguacate Hass a puerto con propósito de exportación; cabe resaltar que en la actualidad dicha planta recibe aguacate Hass no solo de los productores del departamento del Tolima. El flujo logístico del fruto en la planta se puede ver en la Ilustración 13.

Ilustración 13. Proceso de flujo en planta procesadora



Fuente: Federación Paltolima (2019)

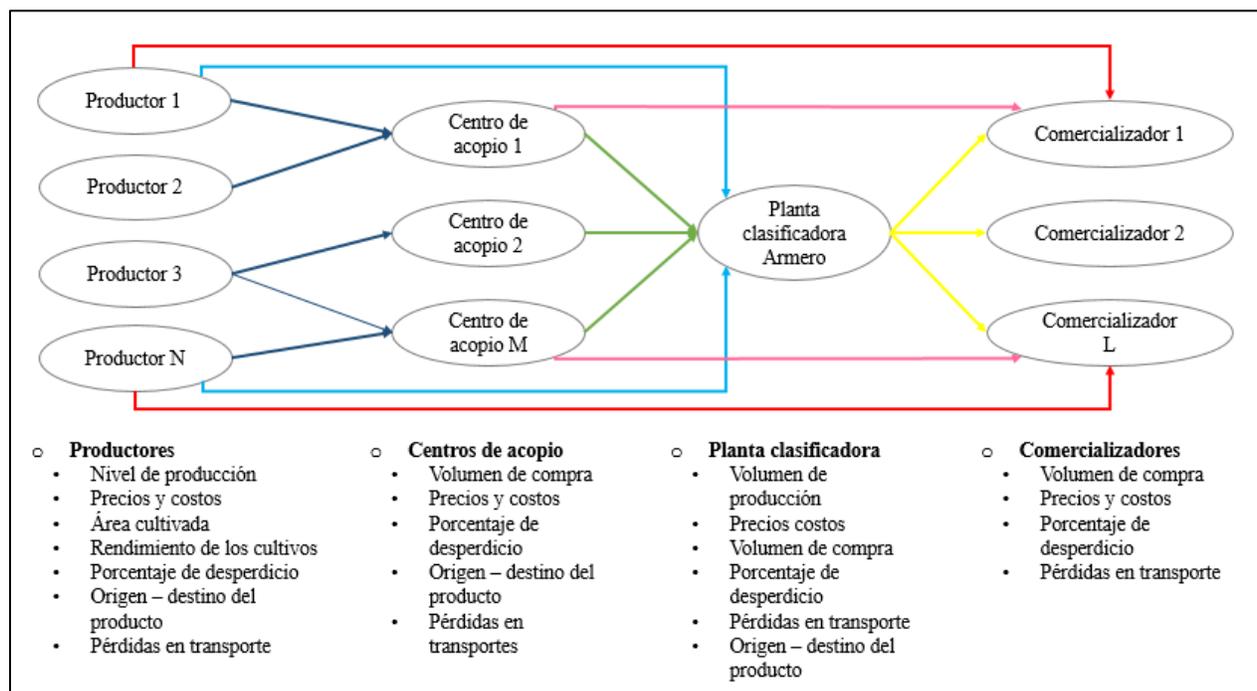
La generación de empleo asociada a la cadena productiva de aguacate Hass, presenta una tendencia al alza año tras año, relacionada con el incremento de los indicadores de producción y exportación, promoviendo la consolidación del sector económico. La relación estimada es de 3 empleos indirectos por cada empleo directo, lo que hace que este sector económico sea relevante para el desarrollo del país (Ministerio de agricultura, 2018).

4.2 Modelado y simulación de la ACAHT

Articulación del problema o conceptualización

Para la construcción del modelo de simulación en primer lugar se realizó una estandarización de los procedimientos por medio de la recopilación de información de los diferentes procesos, materias primas empleadas y tiempos para cada proceso presentes en la ACAHT. El modelo resultante, diseñado bajo el enfoque de dinámica de sistemas, refleja de manera simplificada los eslabones centrales que conforman la Agrocadena: Productores, Centros de acopio, planta Clasificadora F&P y comercializadores nacionales e internacionales; así como las múltiples relaciones y flujos que la caracterizan en su operación, los cuales se ven representados a través de los distintos colores en la Ilustración 14.

Ilustración 14. Modelo conceptual de interacción entre eslabones para simular la ACAHT



El modelo se establece teniendo en cuenta las Medidas de desempeño (indicadores) seleccionadas en la Tabla 7 de los pilares de sostenibilidad basada en la revisión de literatura.

Tabla 7. Evaluación de indicadores para ACAHT sostenible

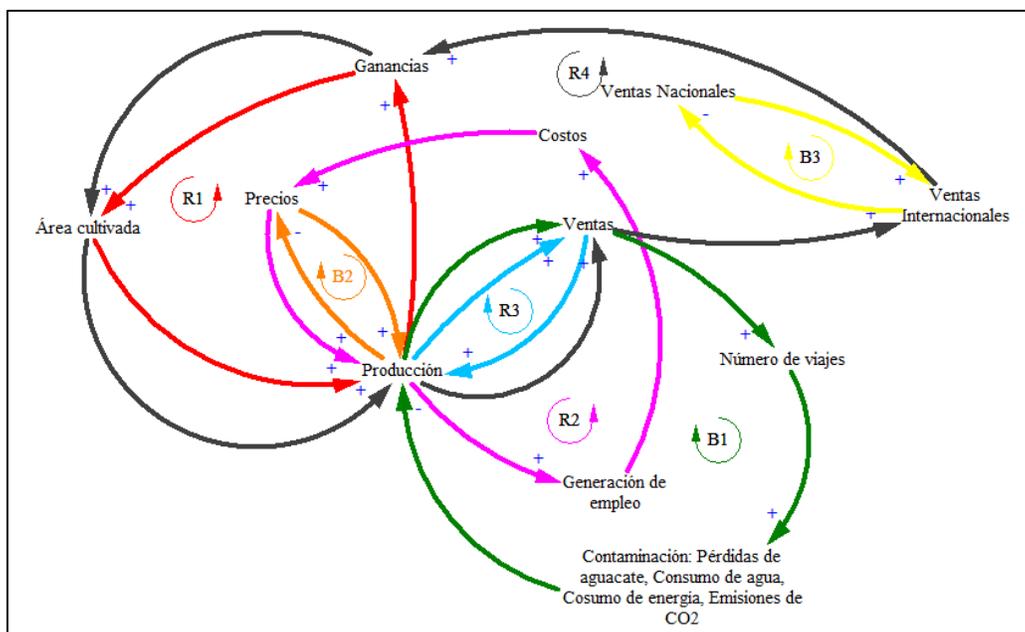
Pilar de sostenibilidad	Indicador
Económico	- Ganancias Totales
Social	- Generación de empleo
Ambiental	- Consumo de agua - Consumo de Energía - Pérdidas de Aguacate Hass - Emisiones de CO2

Fuente: Elaboración propia

Formulación de Hipótesis Dinámicas y formulación de modelo de simulación

Teniendo en cuenta que el proceso general y las variables consideradas en cada uno de los cuatro eslabones de la ACAHT son similares, la Ilustración 15 muestra el Modelo conceptual de la ACAHT el cual expone los ciclos observados de manera agregada de cada eslabón. En la construcción de las hipótesis dinámicas del modelo se consideraron los precios, la producción, ventas, ganancias, costos, generación de empleo, número de viajes transportando producto, ventas a nivel nacional, ventas a nivel internacional, contaminación (Pérdidas de aguacate, Consumo de agua, Consumo de energía, Emisiones de CO2) y área cultivada específicamente para el eslabón de productores.

Ilustración 15. Modelo conceptual de la ACAHT



Elaboración propia en Vensim

El modelo conceptual está conformado por 3 ciclos de realimentación negativa o ciclo de balance (B1, B2, B3) y 4 ciclos de realimentación positiva o ciclo de refuerzo (R1, R2, R3, R4) representados por un color diferente. El ciclo de realimentación B1 se encarga de balancear la producción del aguacate Hass (Por parte de entes gubernamentales) debido a la relación de la contaminación con el número de viajes trasladando el producto debido a las ventas; el ciclo B2 relaciona el precio del aguacate Hass con la producción del aguacate Hass; el ciclo B3 relaciona las ventas nacionales de aguacate Hass con las ventas Internacionales aguacate Hass.

El ciclo de refuerzo R1 representa la relación entre la producción del Aguacate Hass, las ganancias obtenidas y su área cultivada; el ciclo R2 muestra la relación entre la producción de Aguacate Hass, la generación de empleo, sus costos y los precios finales; en el ciclo R3 se relaciona la producción del aguacate Hass con las ventas del mismo y en el ciclo R4 se relacionan las ventas internacionales con las ganancias, área cultivada, producción y ventas.

El modelo fue desarrollado en el software VENSIM®PLE (Versión 8.0.9). Dadas las características que presentan los actores de la cadena y las relaciones que existen entre ellos, el modelo de simulación general está constituido por cinco submodelos. Los cuatro primeros (Ilustraciones 16 a 19) representan la dinámica e interacción que se mantiene entre los diferentes actores de la ACAHT (productores, centros de acopio, planta clasificadora y comercializadores), donde se tuvo en cuenta las variables propias de cada actor (Anexo C). El quinto submodelo (Ver ilustración 20) hace referencia a la recopilación de información de las medidas de desempeño de los diferentes actores que se tuvieron en cuenta para la evaluación de la sostenibilidad de la ACAHT

En cada submodelo se organizaron de manera agregada los diferentes actores vinculados a cada eslabón, teniendo en cuenta la notación de la tabla 8 en la interpretación de las variables:

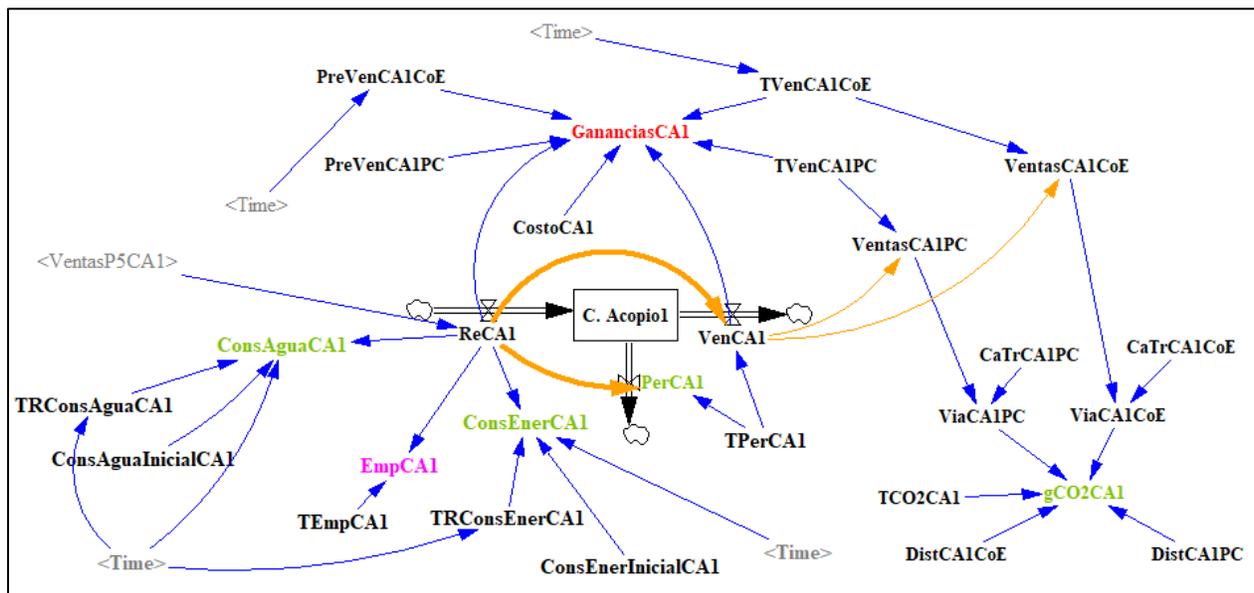
Tabla 8. Interpretación de notación usada en el modelo

Notación	Interpretación	Notación	Interpretación
CA#	Centro de acopio	P#	Productor
CaTr	Capacidad de transporte	PC	Planta clasificadora
Cf	Cliente final	Pcc	Producción
Co	Comercializador nacional	Per	Pérdidas de aguacate
CoE	Comercializador Exportador	Pre	Precio de venta
Com	Compra	R	Retroceso

Submodelo de simulación: Eslabón Centros de acopio

Conformado por dos centros de acopio (Aguactec y Asofrutos), en el submodelo dinámico mostrado en la Ilustración 17 hay dos variables de nivel que representan, Centro de acopio 1 (Aguactec) y Centro de acopio 2 (Asofrutos); 3 variables de tasa para cada centro de acopio, Recepción, Pérdidas de Aguacate hass y Ventas; 6 variables clave alusivas a las variables a analizar en función de la sostenibilidad considerando que ellas se desagregan por cada centro de acopio.

Ilustración 17. Modelo de simulación: Eslabón Centro de acopio

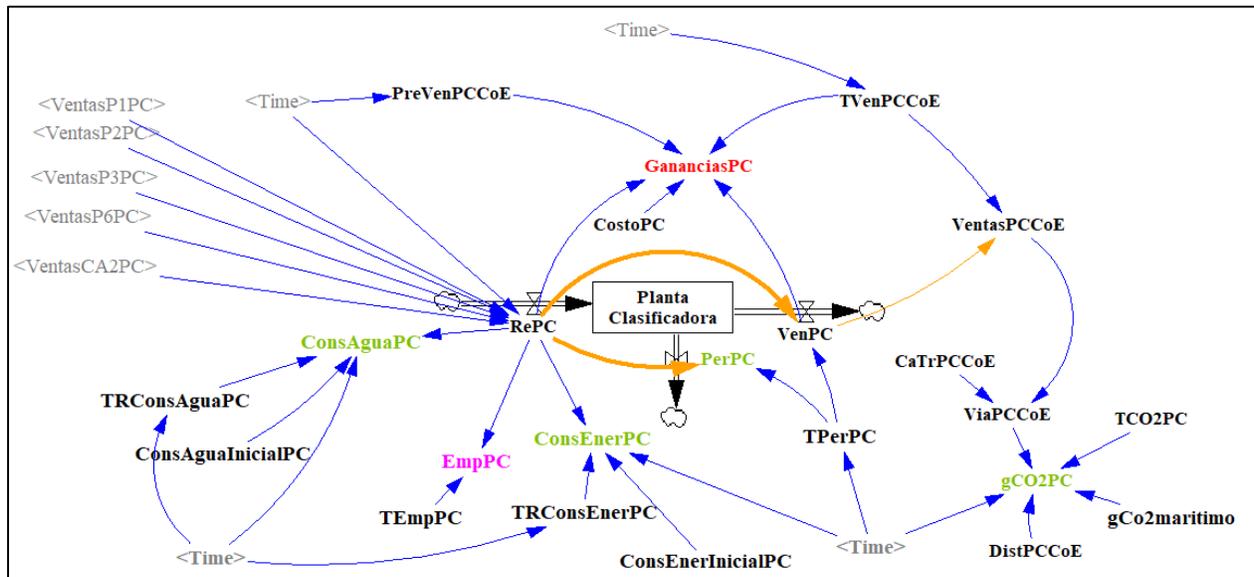


Elaboración propia en Vensim

Submodelo de simulación: Eslabón Planta Clasificadora

Conformado por una planta Clasificadora (F&P), en el submodelo dinámico representado en la Ilustración 18 hay una variable de nivel, Planta Clasificadora; 3 variables de tasa, Recepción, Pérdidas de Aguacate hass y Ventas; 6 clave asociadas con la sostenibilidad así como variables auxiliares que se relacionan entre sí.

Ilustración 18. Modelo de simulación: Eslabón Planta clasificadora

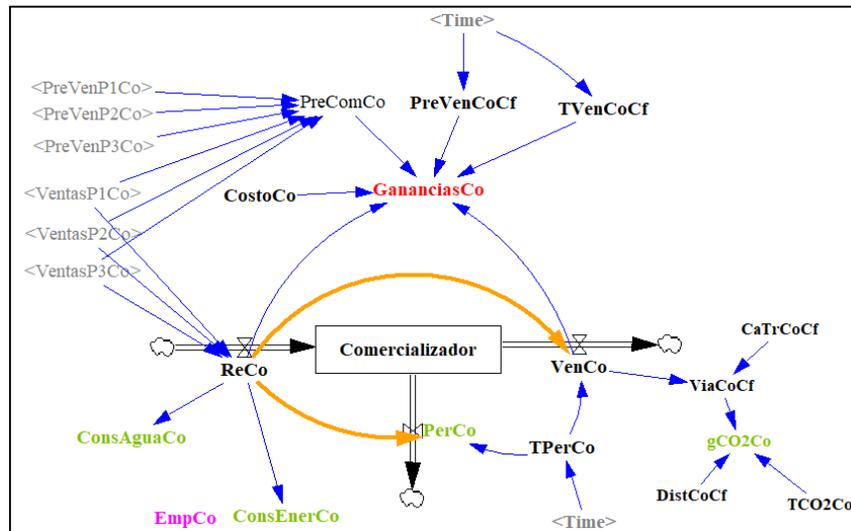


Elaboración propia en Vensim

Submodelo de simulación: Comercializadores

Conformado de manera agregada por los comercializadores a nivel nacional (Supermercados, mayoristas y minoristas) e internacional (Plantas ubicadas fuera del departamento cuyo propósito es la exportación), en el submodelo dinámico mostrado en la Ilustración 19, hay dos variables de nivel que representan a, Comercializador (en el cual se presenta de manera agregada los puntos de vista de los diferentes actores que comercializan en mercados a nivel nacional); así como al Comercializador Exportador (que representa de manera agregada las percepciones de los diferentes actores que comercializan en Plantas ubicadas fuera del departamento cuyo propósito es la exportación); 3 variables de tasa por cada comercializador, Recepción, Pérdidas de Aguacate hass y Ventas; 6 variables clave ante la sostenibilidad que interactúan con las demás variables auxiliares.

Ilustración 19. Modelo de simulación: Eslabón Comercializadores

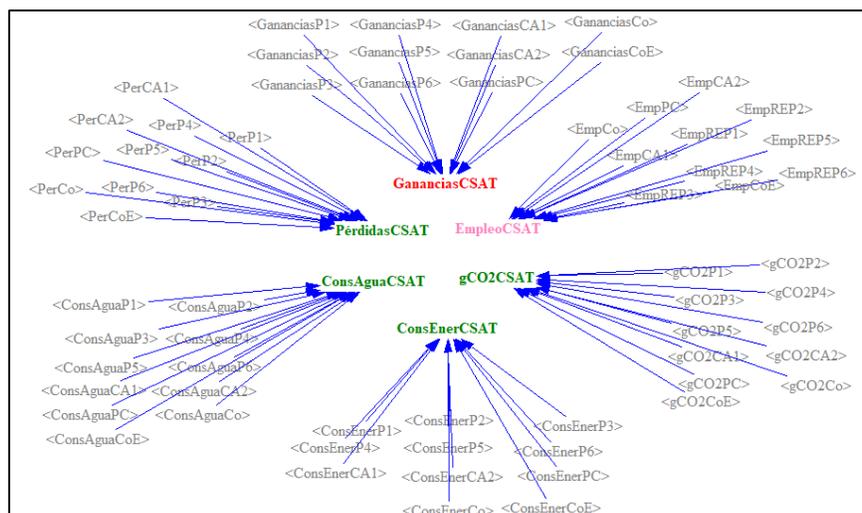


Elaboración propia en Vensim

Submodelo de simulación: Medidas de desempeño

En el submodelo dinámico representado por la Ilustración 19, no hay variables de nivel ni de tasa, hay 6 variables claves específicamente las elegidas para analizar la sostenibilidad de la cadena. Dichas variables están constituidas por las variables de salida de cada uno de los submodelos asociados a cada uno de los actores de la agrocadena.

Ilustración 19. Modelo de simulación: Medidas de desempeño



Elaboración propia en Vensim

Los principales supuestos utilizados para desarrollar el modelo fueron:

- Caso: Agrocadena de aguacate Hass del Tolima (ACAHT)
- Condiciones invariables para el manejo agronómico del cultivo durante el período simulado.
- Unidad de tiempo: meses.
- Tiempo de simulación: 10 años (2020-2029), correspondiente a 120 meses.
- Área cultivada inicial: Datos reales del 2019 en ha.
- Consumo de agua actual: 2.000 litros por kg producido, Agriculturers (2019).
- Tasa de crecimiento de área de cultivo: 10% anual, Calculo basado en estadísticas del Ministerio de agricultura (2018)
- Número de actores: 6 asociaciones de productores, dos centros de acopio, una planta clasificadora, cero agroindustrias y dos comercializadores
- Distancias entre eslabones: Datos reales
- Emisiones de CO₂: 394.98 g/ km recorrido (Ver tabla 9)

Dicho valor se obtiene debido a que el transporte como operación logística está involucrada en las emisiones de CO₂, y el presente estudio dichas emisiones se calculan mediante los Km recorridos de un punto a otro por parte de los vehículos, de acuerdo con la información suministrada por los operadores logísticos de ACAHT, en donde se idéntico que los Vehículos automotores utilizados para el transporte desde las UPA son Camiones rígidos con capacidad máxima de 10t, y desde la plata a puerto son Camiones articulados con capacidad máxima de 34t en el proceso de exportación.

Tabla 9. Tabla de Emisiones de CO₂ según el tipo de vehículo

VEHÍCULO	TIPO		Emisiones en función del tipo de recorrido (g CO ₂ /Km)	
			URBANO	RURAL
Camión diésel	Rígido	≤ 14t	539,70	394,98
		>14t	1103,49	717,04
	Articulado	≤ 34t	1011,06	646,96
		>34t	1506,13	947,43

Fuente: Generalidad de Cataluña (2010)

Validación del modelo

El modelo fue validado mediante el método de “Juicio de expertos “, dado que no existe una base de datos consolidada en las diferentes asociaciones para poder hacer análisis estadístico. La opinión de expertos es útil para verificar la fiabilidad del modelo teniendo claridad que se trata de “una

opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos cualificados en éste, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones” y es aquí donde la tarea del experto se convierte en una labor fundamental para eliminar aspectos irrelevantes, incorporar los que son imprescindibles y/o modificar aquellos que lo requieran (Escobar & Cuervo, 2008).

Para la validación del modelo se seleccionaron como expertos los representantes legales de cada una de las seis asociaciones analizadas y el jefe de producción de la planta F&P. Los criterios para esta selección fueron:

- Los representantes cuentan con la información pertinente de todos sus asociados.
- Los representantes y el jefe de producción tienen conocimiento relacionado con las diferentes interacciones que hay entre y con los demás eslabones de la cadena
- Los representantes tienen en promedio más de dos años como representantes legales de sus asociaciones.
- El jefe de operación de la planta está desempeñando su rol en la planta desde su apertura
- Los representantes cuentan con más de cinco años de experiencia como productores de aguacate en el Tolima

El método utilizado para la validación fue el método Delphi siguiendo tres fases. La primera fase obedeció a la presentación a cada uno de los expertos de las variables y parámetros utilizados como información del modelo y los resultados de salida obtenidos. Para ello, se envió a cada uno de los expertos la información de manera virtual a manera de informe con gráficos que representan las variables de sus asociaciones. Los expertos revisaron detalladamente las variables de entrada y los resultados del modelo de acuerdo al comportamiento que tuvo la agrocadena en el año 2019 y los primeros tres meses simulados del año 2020.

En la segunda fase se realizó la consulta por separado, utilizando video-llamadas en las cuales se realizaron las siguientes preguntas:

- ¿Considera que las variables utilizadas en la construcción del modelo de simulación reflejan la realidad de sus asociados?

- ¿Considera que los resultados que arroja el modelo de simulación reflejan la realidad del comportamiento de sus asociados?

Finalmente, los resultados obtenidos fueron analizados por el nivel de concordancia y de consistencia presente en las opiniones de los expertos. Con el coeficiente de concordancia de Kendall (W) (Kendall, 1995), se comprobaron las siguientes hipótesis:

Ho: $W < 0,75$; no existe concordancia en la respuesta de los expertos

Ha: $W \geq 0,75$; la concordancia existe en las respuestas de los expertos

Como el valor de $W = 1$, se demostró la concordancia en las respuestas de los expertos dado que todos unánimemente concluyeron que tanto las variables como los resultados del modelo reflejan el comportamiento de sus diferentes empresas (Asociaciones y planta F&P).

Posteriormente se aplicó la prueba de hipótesis Chi- cuadrado (χ^2) para corroborar que el juicio de los expertos era consistente. Las hipótesis para comprobación fueron las siguientes hipótesis:

Ho: Los expertos no son consistentes en sus respuestas

Ha: Los expertos son consistentes en sus respuestas

Como resultado de la aplicación de test Chi- cuadrado, se obtuvo un $\chi^2_{calculado} = 7$ y $\chi^2_{tabulado} = 3,841$, que valorados con un nivel de significancia del 5% sugieren el rechazo de la Ho, de manera que se acepta que los expertos fueron consistentes en las respuestas dadas durante la consulta virtual. Todo lo anterior confirma que, a opinión de los expertos consultados, el modelo de simulación es válido para replicar el comportamiento de la ACAHT, bajo los parámetros y supuestos establecidos.

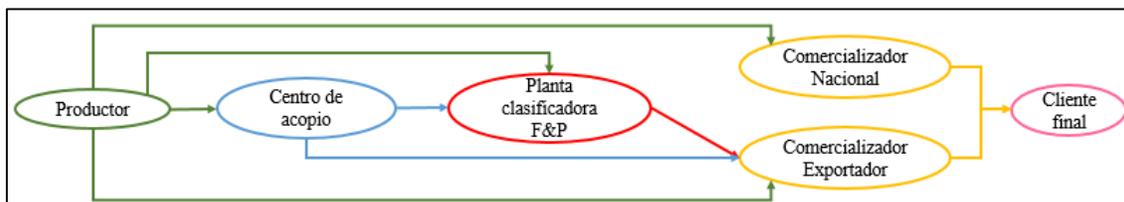
4.3 Análisis de escenarios de futuro para la ACAHT

Para el análisis de la situación futura de la agrocadena, a un horizonte de 10 años, se desarrollaron cuatro diferentes escenarios, los cuales fueron concertados en reuniones con el equipo técnico del proyecto Macro y actores de la ACAHT, plasmando así los intereses propios desde la misma.

Dichos escenarios dan cuenta de las diversas relaciones que se podrían mantener o no entre los eslabones teniendo en cuenta el flujo físico del Aguacate Hass. Con ánimo de identificar los escenarios se muestran a continuación sus representaciones:

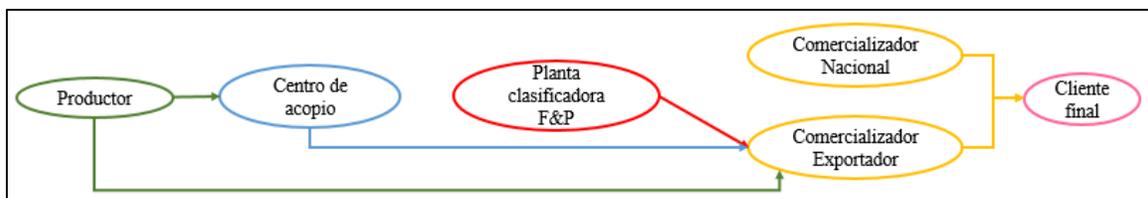
- Escenario #1: ACAHT actual, sin modificaciones (sistema real)

Ilustración 20. Representación Escenario #1



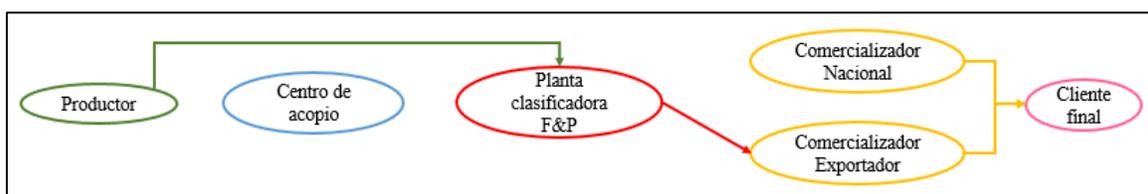
- Escenario #2: ACAHT donde el 100% del aguacate Hass no pasa por la planta F&P. El fruto es vendido directamente a los comercializadores que mejor pago ofrezcan a las asociaciones.

Ilustración 21 Representación Escenario #2



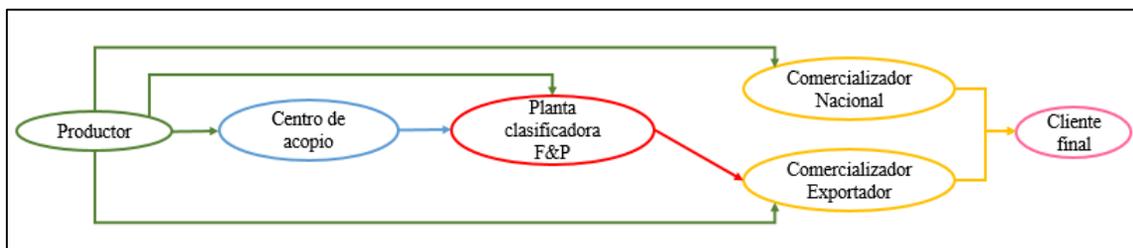
- Escenario #3: ACAHT donde el 100% del aguacate Hass de las asociaciones pasa por la planta F&P y todo el aguacate que llega a la planta es exportado.

Ilustración 22 Representación Escenario #3



- Escenario #4: Para las asociaciones que tienen un centro de acopio: El 100% del aguacate Hass primero pasa por el centro de acopio y luego a la planta F&P para ser exportado.

Ilustración 23 Representación Escenario #4



En cuanto al análisis de escenarios de futuro para la ACAHT se realizaron dos tipos de análisis, el primero para analizar el comportamiento a lo largo del tiempo de cada una de las medidas de desempeño y el segundo para evaluar los valores promedios de cada de las medidas de desempeño entre escenarios.

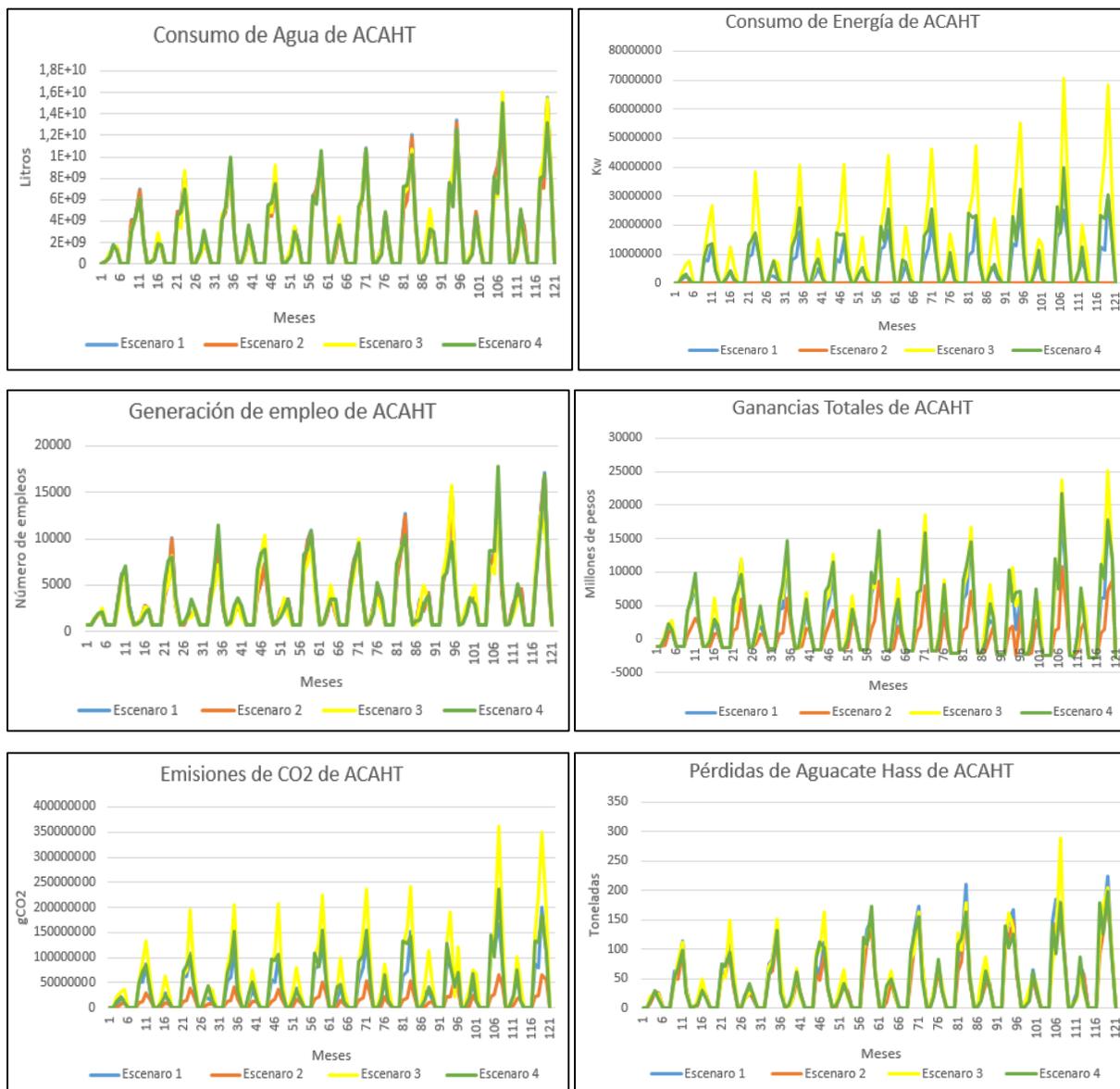
A partir de la Ilustración 24 se realizó el primer análisis, el cual muestra que, pese a que en los diferentes escenarios la producción no fuera alterada, dependiendo de la configuración que se genere en la cadena, es decir los diferentes escenarios, si se afectan las medidas de desempeño a lo largo del tiempo.

Durante los 10 años simulados se puede observar que hay diferencia notoria al comparar los escenarios, por ejemplo, en el caso del consumo de Energía, Emisiones de CO₂ y Ganancias totales de ACAHT se evidencia que el escenario #2 obtiene los valores más bajos a lo largo del tiempo, contrario al escenario #3 en donde los valores son los más altos y es precisamente por la alta participación de la Planta F&P que se tiene en este escenario; lo mismo sucede a menor escala con el consumo de agua y pérdidas de aguacate Hass teniendo el escenario #3 algunos picos de valores altos a lo largo del tiempo.

Respecto al consumo del agua y las pérdidas del aguacate Hass se observa que el escenario que tiene los valores más bajos es el escenario #2. En cuanto a la generación de empleo se observan algunos picos concluyendo que el escenario #3 es el que estaría tomando los valores más altos a través del tiempo.

Adicional, se puede observar que hay una pequeña tendencia en los últimos 4-5 años en los valores de los datos, ya que empiezan a tomar un rango más alto en los valores que los años anteriores.

Ilustración 24. Medidas de desempeño entre escenarios a lo largo del tiempo



Para el segundo análisis, se identificó el número óptimo de réplicas suficientes para analizar el modelo desarrollado. El cálculo del número óptimo de réplicas para cada uno de los escenarios se hizo con los resultados obtenidos de las corridas del modelo utilizando la variable ganancias totales (Ver anexo D), y aplicando las ecuaciones expuestas en Banks (2010), para tal propósito, los resultados son resumidos en la Tabla 10.

Tabla 10. Cálculo del número óptimo de réplicas

	Escenario #1	Escenario #2	Escenario #3	Escenario #4
Replicas iniciales	5	5	5	5
DS	11,5E+07	59,9E+06	15,1E+07	13,9E+07
Error	23,2E+07	46,3E+06	32,9E+07	30,4E+07
Réplicas finales	4	8	4	4

Con los resultados de las réplicas del modelo de simulación en cada medida de rendimiento (Consumo de agua, Consumo de energía, Generación de empleos, Ganancias totales, Emisiones de CO₂, Pérdidas de Aguacate Hass), se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para demostrar la normalidad de los datos. En todos los casos analizados a nivel de variables y de escenarios, se encontró que se cumple la condición de normalidad (p-valor (test K-S) > 0,05). En la Tabla 11 se resume el análisis para la medida de desempeño Ganancias totales en todos los escenarios propuestos y en la Tabla 12 se resume el análisis para la medida de desempeño Pérdidas de producto.

Tabla 11. Prueba de normalidad para Ganancias totales

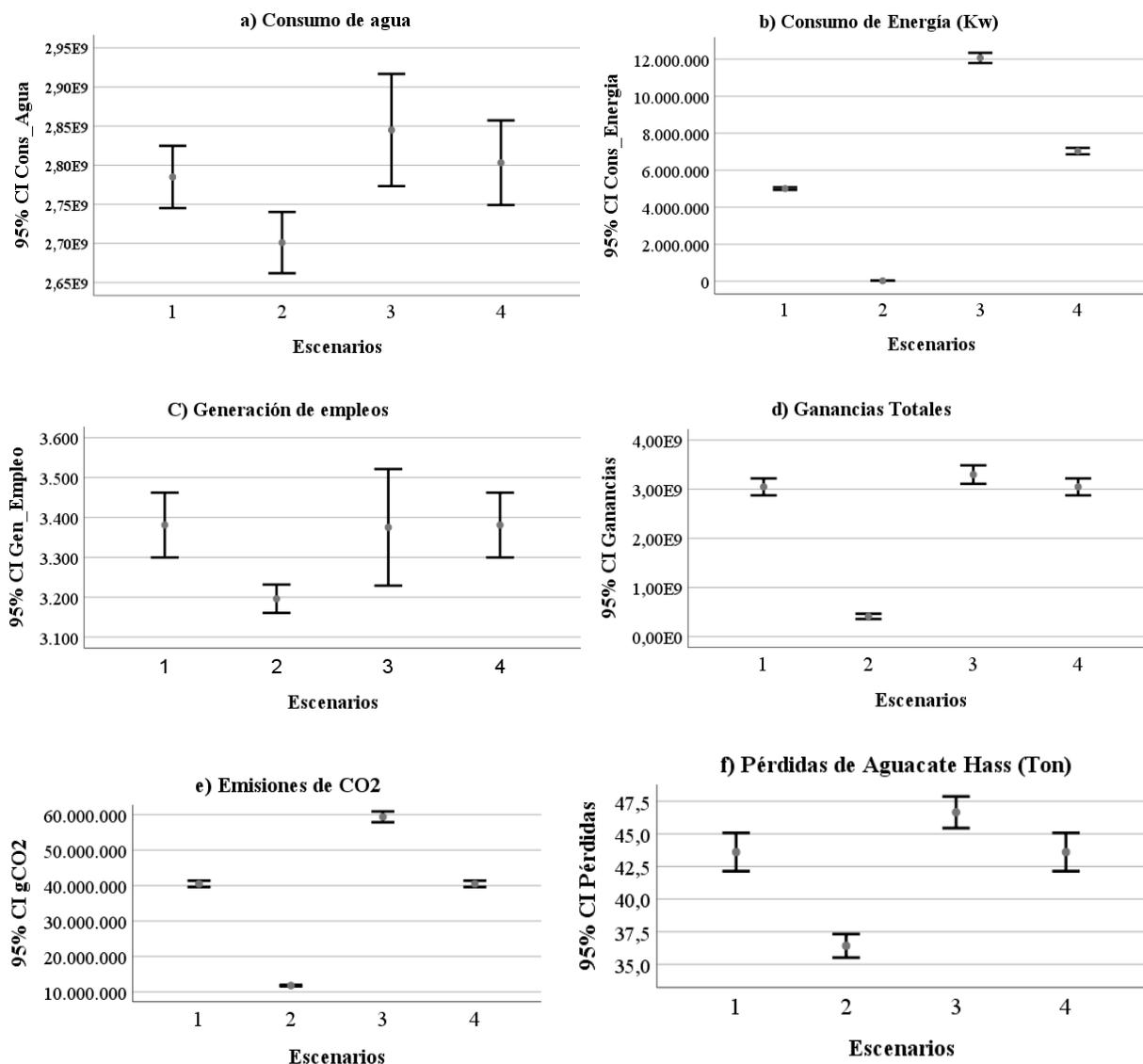
Escenarios	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
#1	,207	5	,200*	,933	5	,616
#2	,173	8	,200*	,931	8	,529
#3	,221	5	,200*	,876	5	,292
#4	,207	5	,200*	,933	5	,616

Tabla 12. Prueba de normalidad para Pérdidas de productos

Escenarios	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
#1	,209	5	,200*	,930	5	,597
#2	,130	8	,200*	,969	8	,893
#3	,203	5	,200*	,976	5	,912
#4	,209	5	,200*	,930	5	,597

Posteriormente se realizó un análisis descriptivo (ver Anexo E) de las diferentes medidas de desempeño complementado con los diagramas de barras de error en los que se representan los valores promedios de las medidas de desempeño entre escenarios (ver Ilustración 25).

Ilustración 25. Diagramas de barras de error de las Medidas de desempeño



Por consiguiente, se infiere que existen diferencias en todas las medidas de desempeño entre algunos de los escenarios analizados, particularmente, el Escenario #2 es el que posee mayor dispersión con respecto a los demás como en el caso del Consumo de energía, Ganancias totales y Pérdidas de producto, sin embargo, es el que menos ganancias genera dado su valor promedio.

Los escenarios #1, #3 y #4 a pesar de no presentar una dispersión tan grande como la del Escenario #2, siguen teniendo diferencia entre ellos respecto el Consumo de energía, pero cabe resaltar que el escenario #3 sería en que más energía generaría ya que presenta un valor promedio que sobrepasa

los demás, por otro lado, el Escenario #1 y #4 no presentan gran dispersión respecto al Consumo de agua y Ganancias totales, y respecto a la generación de empleo el escenario #3 es el de mayor dispersión en los datos pero su valor promedio es el más alto.

Para corroborar la anterior inferencia se realizó la prueba de Análisis de varianza (ANOVA) (ver tabla 13), donde se muestra que para todas las medidas de desempeño el valor de significancia es menor al 5%, por tal motivo se concluye que existe diferencia significativa entre las medias de las diferentes medidas de desempeño en al menos un par de modelos analizados.

Tabla 13. Pruebas de Análisis de varianza ANOVA

Medidas de desempeño	Suma de cuadrados entre grupos	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Consumo de Agua	72,6 E+09*	3	24,2 E+09*	11,38	0,00
Consumo de Energía	46,7 E+07*	3	15,5 E+07*	10.250,54	0,00
Generación de Empleo	0,2	3	0,05	10,79	0,00
Ganancias Totales	38,7 E+12*	3	12,9 E+12*	889,34	0,00
Emisiones de CO ₂	75,8 E+08*	3	25,2 E+08*	4.538,32	0,00
Pérdidas de Aguacate	0,0*	3	0,0*	104,34	0,00

* Valores en millones

Para determinar el mejor escenario en cada medida de desempeño analizada se realizaron comparaciones múltiples, previa comprobación de la homogeneidad de varianzas (ver Tabla 14).

Tabla 14. Prueba de homogeneidad de varianzas en las variables de desempeño

Medidas de desempeño	Medida de base	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Consumo de Agua	Se basa en la media	,737	3	19	,543
Consumo de Energía	Se basa en la media	11,750	3	19	,000
Generación de Empleo	Se basa en la media	3,004	3	19	,056
Ganancias Totales*	Se basa en la media	1,278	3	19	,310
Emisiones de CO ₂	Se basa en la media	11,807	3	19	,000
Pérdidas de Aguacate	Se basa en la media	,129	3	19	,942

Para determinar qué escenario genera mejores resultados de mejora se evaluó la diferencia de medias de las medidas de desempeño simuladas. (Tabla 15 a 20). Para las variables Consumo de agua, Generación de empleo, Ganancias totales y Pérdidas de Aguacate, se concluyó que hay homogeneidad entre las varianzas ($p > 0,05$), por lo que se aplicó la prueba de comparaciones

múltiples de diferencia mínima significativa (DMS); mientras que para las medidas de desempeño Consumo de energía y Emisiones de CO₂, en tanto no hay homogeneidad entre las varianzas ($p < 0,05$) se aplicó la prueba T2 - Tamhane.

Tabla 15. Prueba DMS para Consumo de agua

Comparaciones múltiples						
(I) Escenarios	(J) Escenarios	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
#1	#2	83950734,02*	26,2 E+06	,00	28,9E+06	13,8E+07
	#3	-60042833,80	29,1 E+06	,05	-12,1E+07	10,1E+05
	#4	-18227524,40	29,1 E+06	,54	-79,2E+06	42,8E+06
#2	#1	-83950734,02*	26,2 E+06	,00	-13,8E+07	-28,9E+06
	#3	-143993567,82*	26,2 E+06	,00	-19,9E+07	-88,9E+06
	#4	-102178258,42*	26,2 E+06	,00	-15,7E+07	-47,1E+06
#3	#1	60042833,80	29,1 E+06	,05	-10,1E+05	12,1E+07
	#2	143993567,82*	26,2 E+06	,00	88,9E+06	19,9E+07
	#4	41815309,40	29,1 E+06	,16	-19,2E+06	10,2E+07
#4	#1	18227524,40	29,1 E+06	,54	-42,8E+06	79,2E+06
	#2	102178258,42*	26,2 E+06	,00	47,1E+06	15,7E+07
	#3	-41815309,40	29,1 E+06	,16	-10,2E+07	19,2E+06

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

A partir de la Tabla 15 se puede observar que dadas las diferencia significativas ($p < 0,05$) que presenta el escenario #2 frente a los demás, este sería el mejor escenario en términos de menor consumo de agua de la ACAHT ya que generaría un 3% menos de consumo que el escenario #1 siendo este último el segundo mejor escenario relacionado con el consumo de agua.

Tabla 16. Prueba DMS para Generación de empleo

(I) Escenarios	(J) Escenarios	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
#1	#2	184,81*	41,85	,00	97,20	272,41
	#3	5,88	46,43	,90	-91,30	103,07
	#4	,00	46,43	1,00	-97,18	97,18
#2	#1	-184,81*	41,85	,00	-272,41	-97,20
	#3	-178,92*	41,85	,00	-266,53	-91,32

	#4	-184,81*	41,85	,00	-272,41	-97,20
#3	#1	-5,88	46,43	,90	-103,07	91,30
	#2	178,92*	41,85	,00	91,32	266,53
	#4	-5,88	46,43	,90	-103,07	91,30
#4	#1	,00	46,43	1,00	-97,18	97,18
	#2	184,81*	41,85	,00	97,20	272,41
	#3	5,88	46,43	,90	-91,30	103,07

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

El análisis realizado en la Tabla 16 da lugar a interpretar que dadas las diferencias negativas significativas ($p < 0,05$) del escenario #2 frente a los demás, este es el escenario que menos favorece la ACAHT en términos de generación de empleo, sin embargo, al implementar el escenario #1 o #4 aportarían un 5% más de empleos.

Tabla 17. Prueba DMS para Ganancias totales

(I) Escenarios	(J) Escenarios	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
#1	#2	2635573204,22*	68,7E+06	,00	24,9E+08	27,7E+08
	#3	-249176459,20*	76,2E+06	,00	-40,8E+07	-89,6E+06
	#4	,00	76,2E+06	1,00	-15,9E+07	15,9E+07
#2	#1	-2635573204,22*	68,7E+06	,00	-27,7E+08	-24,9E+08
	#3	-2884749663,42*	68,7E+06	,00	-30,2E+08	-27,4E+08
	#4	-2635573204,22*	68,7E+06	,00	-27,7E+08	-24,9E+08
#3	#1	249176459,20*	76,2E+06	,00	89,6E+06	40,8E+07
	#2	2884749663,42*	68,7E+06	,00	27,4E+08	30,2E+08
	#4	249176459,20*	76,2E+06	,00	89,6E+06	40,8E+07
#4	#1	,00	76,2E+06	1,00	-15,9E+07	15,9E+07
	#2	2635573204,22*	68,7E+06	,00	24,9E+07	27,7E+08
	#3	-249176459,20*	76,2E+06	,00	-40,8E+07	-89,6E+06

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

En la Tabla 17 se puede observar que dadas las diferencias significativas ($p < 0,05$) que presenta el escenario #3 frente a los demás escenarios, este sería el mejor escenario en términos mayores

ganancias para la ACAHT ya que generaría un 8% más de ganancias que el escenario #4 siendo este último el segundo mejor escenario relacionado con ganancias de la agrocadena.

Tabla 18. Prueba DMS para Pérdidas de Aguacate Hass

(I) Escenarios	(J) Escenarios	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
#1	#2	7,18*	,62	,00	5,86	8,50
	#3	-3,04*	,69	,00	-4,51	-1,58
	#4	,00	,69	1,00	-1,46	1,46
#2	#1	-7,18*	,62	,00	-8,50	-5,86
	#3	-10,23*	,62	,00	-11,55	-8,91
	#4	-7,18*	,62	,00	-8,50	-5,86
#3	#1	3,04*	,69	,00	1,58	4,51
	#2	10,23*	,62	,00	8,91	11,55
	#4	3,04*	,69	,00	1,58	4,51
#4	#1	,00	,69	1,00	-1,46	1,46
	#2	7,18*	,62	,00	5,86	8,50
	#3	-3,04*	,69	,00	-4,51	-1,58

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Con referencia a las pérdidas de aguacate Hass de la ACAHT la Tabla 18 muestra que dadas las diferencias significativas negativas ($p < 0,05$) que presenta el escenario #2 frente a los demás, el mejor escenario que genera menos pérdidas de aguacate Hass es el escenario #2 con un 20% menos de pérdidas que el siguiente mejor escenario, es decir, el escenario #4.

Tabla 19. Prueba Tamhane para Consumo de energía

(I) Escenarios	(J) Escenarios	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
#1	#2	4985491,81*	26,2E+03	,00	48,5E+05	51,1E+05
	#3	-7061842,23*	10,2E+04	,00	-75,1E+05	-66,0E+05
	#4	-2025876,69*	67,5E+03	,00	-22,9E+05	-17,5E+05
#2	#1	-4985491,81*	26,2E+03	,00	-51,1E+06	-48,5E+05
	#3	-12047334,05*	99,3E+03	,00	-12,5E+06	-11,5E+06
	#4	-7011368,50*	62,2E+03	,00	-73,1E+05	-67,1E+05

#3	#1	7061842,23*	10,2E+04	,00	66,0E+05	75,1E+05
	#2	12047334,05*	99,3E+03	,00	11,5E+06	12,5E+06
	#4	5035965,54*	11,7E+04	,00	46,0E+05	54,6E+05
#4	#1	2025876,69*	67,5E+03	,00	17,5E+05	22,9E+05
	#2	7011368,50*	62,2E+03	,00	67,1E+05	73,1E+05
	#3	-5035965,54*	11,7E+04	,00	-54,6E+05	-46,0E+05

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

A partir de la Tabla 19 se puede observar que dadas las diferencias significativas ($p < 0,05$) que presenta el escenario #2 frente a los demás, este sería el mejor escenario en términos de menor consumo de Energía de la ACAHT ya que generaría más de un 100% menos de consumo que el escenario #1 siendo este último el segundo mejor escenario relacionado con el consumo de energía.

Tabla 20. Prueba T2 - Tamhane para Emisiones de CO_2

(I) Escenarios	(J) Escenarios	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
#1	#2	28712032,80*	33,2E+04	,00	27,2E+06	30,1E+06
	#3	-18882234,22*	63,6 E+04	,00	-21,2 E+06	-16,5E+06
	#4	,00	45,5 E+04	1,00	-15,7E+05	15,7E+05
#2	#1	-28712032,80*	33,2 E+04	,00	-30,1E+06	-27,2E+06
	#3	-47594267,02*	55,5 E+04	,00	-50,1E+06	-44,9E+06
	#4	-28712032,80*	33,2 E+04	,00	-30,1E+06	-27,2E+06
#3	#1	18882234,22*	63,6 E+04	,00	16,5E+06	21,2E+06
	#2	47594267,02*	55,5 E+04	,00	44,9E+06	50,1E+06
	#4	18882234,22*	63,6 E+04	,00	16,5E+06	21,2E+06
#4	#1	,00	45,5 E+04	1,00	-15,7E+05	15,7E+05
	#2	28712032,80*	33,2 E+04	,00	27,2E+06	30,1E+06
	#3	-18882234,22*	63,6 E+04	,00	-21,2E+06	-16,5E+06

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

El análisis realizado en la Tabla 20 da lugar a interpretar que dadas las diferencias negativas significativas ($p < 0,05$) del escenario #2 frente a los demás, este es el escenario que más favorece la ACAHT en términos de emisiones de CO_2 sobrepasando el 100% menos de emisiones que el

siguiente mejor escenario, es decir el #4, sin embargo, cabe resaltar que estos resultados se dan ya que el escenario #2 no presenta la participación de la planta F&P.

Los resultados e interpretaciones consolidados de las comparaciones múltiples al interior de las variables de desempeño estimadas con el modelo propuesto (Tablas de la 15 a la 20), sugieren que el Escenario #2 presenta diferencias significativas ($p < 0,05$) frente a los otros tres escenarios en lo que corresponde a menor consumo de agua y energía, menos emisiones de CO₂ y menos pérdida de fruta, pero a su vez, es el Escenario#2 el que potencialmente podría generar al cabo de una década a futuro, una menor tasa de empleo y de ganancias económicas. En el ámbito económico, el Escenario #3 es el que más ganancias genera y en la parte social el escenario #4 es el que más oportunidades de empleo podría arrojar frente a los otros tres escenarios ($p < 0,05$) evaluados.

Teniendo en cuenta las observaciones dadas anteriormente, se considera que la mejor alternativa o escenario a implementar en la ACAHT es el #4, el cual corresponde a que el aguacate Hass pase por los centros de acopio si los hay y luego a la planta clasificadora F&P. Si bien es cierto que este escenario genera un mayor impacto ambiental genera mayor utilidad para los actores de cada uno de los eslabones de la ACAHT, del mismo modo hay una mayor generación de empleo con lo cual se potencia el aspecto económico y social.

En términos de comparaciones con otros países productores de aguacate Hass, Colombia cuenta con dos ventajas ante la exportación a mercado europeo, siendo esta una de las grandes zonas importadoras de esta fruta en la actualizada. La primera, en términos de una menor huella de carbono (medida por las emisiones de CO₂), en tanto los tiempos de tránsito de la fruta para transporte internacional son menores que los tiempos que requiere la fruta proveniente de dos de sus principales competidores en América Latina: Perú y Chile. La segunda es términos de una menor huella hídrica azul (medida por el consumo para regadío de agua proveniente de las fuentes hídricas cercanas como ríos o pozos), en tanto los cultivos de aguacate Hass en el Tolima principalmente usan el agua lluvia (agua tipo verde) para suplir las necesidades de riego, tomando provecho de que están localizados en un país con una de las mayores tasas de precipitaciones a nivel mundial, según estudios de la FAO (Banco Mundial, 2014); sus contrapartes en América Latina como México, Perú y Chile no gozan de la misma ventaja, debido a la geolocalización de las zonas de

cultivo de aguacate y los patrones de bajo nivel de lluvia, requieren tener sistemas de riego mayoritariamente de Agua tipo azul (extraída de una cuenca como fuente hídricas).

Analizando los resultados con una mirada a futuro en términos de sostenibilidad, se prevee que:

- a) Dado el crecimiento de los cultivos del Aguacate Hass en el Tolima y Colombia, muchos predios estarán en plena producción, con el riesgo de aumentar la oferta y con ello motivar una competencia de precios.
- b) Países tradicionalmente no productores se vuelvan exportadores y logren ventajas logísticas por la cercanía a grandes consumidores (ejemplo España)
- c) El aumento de predios traiga consigo el agotamiento de recursos hídricos en las zonas de cultivo, y con ello una potencial desventaja competitiva frente a otros cultivos menos intensivos en huella hídrica.
- d) El crecimiento del mercado mundial se afecte o regule por el aumento de la normativa mundial que se deriva de los objetivos del desarrollo (ODS) enfocados en áreas como la producción y el consumo responsable, las acciones por el clima y la reducción de la desigualdad (PNUD, 2020).

Capítulo 5. Conclusiones, limitaciones y contribuciones

5.1 Conclusiones

Una vez concluido este estudio es posible en primera instancia concluir que la operación logística de la agrocadena del aguacate Hass del Tolima actualmente parte desde los productores, siguiendo en algunos casos, al centro de acopio ubicado en el municipio de origen y en otros casos, a la planta F&P o comercializadores directamente (nacionales u otras clasificadoras con propósito de exportación). La decisión del productor de llevar o no el producto a cierto actor de la cadena, depende de las garantías que éstos ofrecen en tiempos de respuesta y precios de compra. Actualmente el aguacate Hass del Tolima no incluye la transformación agroindustrial, lo que se produce en la zona se comercializa mayoritariamente para consumo en fresco a nivel internacional y aquel producto que resulta no conforme para exportación (por criterios de tamaño, sanidad o madurez) se destina al consumo nacional.

Dadas las características y complejidad de la ACAHT, la simulación por medio de Dinámica de Sistemas ofreció herramientas útiles para la construcción del modelo a partir de submodelos, lo que facilitó el análisis de los flujos que la caracterizan.

Teniendo en cuenta los tres puntos de vista de definidos para sostenibilidad de una agrocadena a futuro, los escenarios de futuro más convenientes pueden variar. Desde el punto de vista económico, la mejor alternativa que se identifica es el Escenario#3 (100% del aguacate Hass pase por la planta F&P) ya que genera mayores ganancias con un promedio de \$3.295.518.116,80 de utilidades para toda la ACAHT. Este mismo escenario favorece un mejor desempeño social, por la potencial generación de nuevos empleos en la región dada su dinámica de exportación, que a 10 años se estiman en aproximadamente 3.376 empleos a lo largo de toda la Agrocadena. En cuanto al aspecto ambiental, el mejor escenario de los cuatro considerados es el Escenario#2 (100% del aguacate Hass directamente al comercializador), es decir no hacer uso de la planta F&P en Armero-Guayabal, en tanto se obtendrían índices más bajos de consumo de agua, consumo de energía,

emisiones de CO₂ y pérdidas de producto, imputables a los actores de la ACAHT localizados dentro del Tolima.

El modelo de simulación desarrollado permite determinar las interacciones que tienen los eslabones de una cadena de suministro de producto en fresco y así mejorar su desempeño en función del comportamiento a largo plazo de ámbitos económicos, sociales y ambientales. En el caso de la ACAHT, el análisis indica que el mejor escenario ante la evaluación de la sostenibilidad de ACAHT es el escenario#4, ya que los centros de acopio y la planta clasificadora son dos eslabones muy importantes de la agrocadena, en tanto los primeros permiten consolidar la carga de producto y generan economías por la disminución de costos de transporte y los impactos ambientales, mientras que la planta ofrece la posibilidad de que el producto llegue al comercio exterior generando impacto económico entre los productores de la cadena e incrementando el número de empleos en la región.

Por todo lo anterior, son varias las acciones de mejora que se recomiendan para ACAHT. La primera es que se incremente la participación de la planta F&P en la comercialización internacional del aguacate tolimense, generando nuevos acuerdos con los productores de la región, para que éstos puedan tener mejores garantías ante pagos y se aporte a la balanza comercial y la competitividad del Tolima frente a las otras regiones con las que compite por conquistar el mercado internacional de aguacate Hass. Otro caso es referente al gran consumo de agua que se da en la planta F&P para cubrir necesidades del personal, por tal motivo se debe empezar a controlar el consumo por medio de estrategias teniendo en cuenta el balance entre las operaciones directas con el fruto como las indirectas.

5.2 Limitaciones

La limitación más significativa que se presentó en el desarrollo de este estudio, fue que algunas variables utilizadas para desarrollar el modelo de simulación no cuentan con la información desagregada ni sistemática de información clave como: porcentaje de pérdidas del producto, consumo de agua y manejo logístico. Para superar estas limitaciones, se hizo uso de la distribución de probabilidad uniforme, teniendo en cuenta que los valores de los parámetros se calcularon con base en los valores mínimos y máximos indicados por expertos conocedores del sector.

5.3 Contribuciones

La divulgación de los resultados de la investigación tuvo lugar con los siguientes productos:

- Martínez, Y & Tovar, N. (Agosto 2019). Modelación de la agrocadena del Aguacate Hass en el Tolima (Estructura y lazos de interacción). I Congreso internacional de ciencia y tecnología en el trópico: Aguacate Hass y Cacao. Congreso llevado a cabo en la Universidad del Tolima, Tolima- Colombia
- Martínez, Y & Tovar, N. (Agosto 2019). Modelo de simulación dinámica para una agrocadena de suministro caso: agrocadena del aguacate del Tolima. VI congreso internacional industria, organizaciones y logística. Congreso llevado a cabo en la Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla, Cartagena-Colombia.
- Martínez, Y., & Tovar, N. (2019). Evaluación de la sostenibilidad de una agrocadena de suministro de producto fresco orientada al mercado internacional. Caso aplicado a la cadena del Aguacate Hass en el norte del Tolima. *Indagare*, 7.
- Artículo sometido:
Sustainability assessment of an export oriented agricultural supply chain in Colombia, based on dynamic simulation
Revista: DYNA Q3

Referencias

- Agriculturers. (2019). Los cinco cultivos que más agua consumen en el mundo. Retrieved September 26, 2019, from <https://agriculturers.com/los-5-cultivos-que-mas-agua-consumen-en-el-mundo/>
- Ahumada, O., & Villalobos, J. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>
- Ahumada, O., & Villalobos, R. (2011a). A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce. *Annals of Operations Research*, 190(1), 339–358. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0614-4>
- Ahumada, O., & Villalobos, R. (2011b). Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products. *International Journal of Production Economics*, 133(2), 677–687. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2011.05.015>
- Ahumada, O., Villalobos, R., & Mason, N. (2012). Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty. *Agricultural Systems*, 112, 17–26.
- Akkerman, R., Farahani, P., & Grunow, M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR Spectrum*, 32, 863–904. <https://doi.org/10.1007/s00291-010-0223-2>
- Allaoui, H., Guo, Y., Choudhary, A., & Bloemhof, J. (2018). Sustainable agro-food supply chain design using two-stage hybrid multi-objective decision-making approach. *Computers and Operations Research*, 89, 369–384. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.10.012>
- Bairamzadeh, S., Pishvae, M., Saidi, M. (2016). Multiobjective robust possibilistic Programming approach to sustainable bioethanol supply chain design under multiple uncertainties. *Ind. Eng. Chem. Res.* 55, 237-256. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02875>
- Banco Mundial . (2014). Obtenido de Datos Banco Mundial Org : <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.PRCP.MM?view=map>
- Banks, J., Carson, J., Nelson, B. L., & Nicol, D. (2010). Discrete-event system simulation. Prentice Hall (Quinta). <https://doi.org/10.2307/1268124>
- Bermeo-Andrade, H, Tovar, N., Meisel, A., Arenas, O., Sánchez, M., González-Bañales, D., Beltrán, R. (2020). *Transferencia tecnológica para la agrocadena del aguacate en el Tolima como apoyo a su proceso de internacionalización*. Ibagué: Ediciones Unibague. ISBN: 978-958-754-343-8
- Brailsford, S., Desai, S., y Viana, J. (2010). Towards the Holy Grail: Combining System Dynamics and Discrete-Event Simulation in Healthcare. *Winter Simulation Conference*. Baltimore
- Broekmeulen, R. (1998). Operations Management of Distribution Centers for Vegetables and Fruits. *International Transactions in Operational Research*, 5(6), 501–508. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.1998.tb00132.x>
- Bütüner, H. (2014). A New Methodology on Strategic Planning. *CBU International Conference Proceedings*, 2, 27. <https://doi.org/10.12955/cbup.v2.443>
- Cambero, C., Sowlati, T., Pavel, M. (2016). Economic and life cycle environmental optimization of forest-

- based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. *Chem. Eng. Res. Des.* 107, 18-235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.040>
- Carter, C., & Rogers, D. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360–387. <https://doi.org/10.1108/09600030810882816>
- Christopher, M. (1992). *Logistics & supply chain management. Logistics and Supply Chain Management: Creating Value-adding Networks.* <https://doi.org/10.1007/s12146-007-0019-8>
- Colprensa. (2018, March 17). Colombia podrá exportar aguacate Hass hacia Japón en los próximos meses. *El País*. Retrieved from <https://www.elpais.com.co/economia/colombia-podra-exportar-aguacate-hass-hacia-japon-en-los-proximos-meses.html>
- Dangerfield, B. (2014). Systems thinking and system dynamics: A primer. *Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making*, 26-51. Reino Unido: John Wiley & Sons.
- Devika, K., Jafarian, A., Nourbakhsh, V.(2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: a comparison of metaheuristics hybridization techniques. *Eur. J. Oper. Res.* 235, 594-615. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.032>.
- Dinero. (2017, March 30). Aguacate exportación y mercado en Colombia. *Dinero*. Retrieved from <https://www.dinero.com/edicion-impresa/informe-especial/articulo/aguacate-exportacion-y-mercado-en-colombia/243434>
- Dinero. (2018, May 2). Exportaciones cerraron el 2017 con un repunte de 19%. *Dinero*. Retrieved from <https://www.dinero.com/economia/articulo/exportaciones-de-colombia-2017-dane/255032>
- DNP. (2016). Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia. Retrieved October 11, 2018, from www.dnp.gov.co
- El Financiero. (2017, April 29). Por las nubes, precio del aguacate en EU. *El Financiero*. Retrieved from <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/por-las-nubes-precio-del-aguacate>
- El Nuevo Día. (2016, May 3). Planta de acopio de aguacate en Armero Guayabal estaría lista en diciembre. *El Nuevo Día*. Retrieved from <http://www.elnuevodia.com.co/nuevodia/tolima/regional/286653-planta-de-acopio-de-aguacate-en-armero-guayabal-estaria-lista-en-diciembre>
- Escobar, J., & Cuervo, A. (2008). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. En *Avances en Medición*, 6, pp. 27-36. Disponible en http://www.humanas.unal.edu.co/psicometria/files/7113/8574/5708/Articulo3_Juicio_de_expertos_27-36.pdf
- Faccio, M., Ferrari, E., Persona, A., & Vecchiato, P. (2013). Lean distribution principles to food logistics: a product category approach. *International Journal of Operational Research*, 16(2), 214. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2013.051784>
- FAO. (2018). Suministro y distribución de alimentos (Plataforma de Acciones en Alimentación Urbana). Retrieved October 12, 2018, from <http://www.fao.org/urban-food-actions/areas-of-work/food-supply-and-distribution/es/>
- FAOSTAT. (2017). Estadísticas. Retrieved October 11, 2018, from <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Farias, S., & Csillag, J. (2004). Performance measurement systems: consideration of an agrifood supply

- chain in Brazil. *Production and Operations Management Conference*.
- Feitó, M. (2015). *Modelo multiobjetivo para el rediseño de cadenas de suministro sostenibles de reciclaje, bajo condiciones de incertidumbre. Aplicación a la recuperación de plásticos en Cuba*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Figuerola, H. (2018). Colombia podría ser el segundo productor mundial de aguacate Hass. *El Universal*. Retrieved from <http://www.eluniversal.com.co/economica/colombia-podria-ser-el-segundo-productor-mundial-de-aguacate-hass-279989>
- FOA, Gustavsson, J., Cederberg, C., & Sonesson, U. (2012). *Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención*. Roma. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i2697s.pdf>
- Georgiadis, P., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2005). A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. *Journal of Food Engineering*, 70(3), 351–364. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.030>
- Generalidad de Cataluña.(2010). Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). (2011). Oficina del cambio climático de Cataluña.. recuperado de <http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>
- Gobernación del Tolima. (2016). El Tolima en paz con el aguacate hass. Retrieved from <https://www.tolima.gov.co/>
- Gupta, S., & Palsule-Desai, O. (2011). Sustainable supply chain management: Review and research opportunities. *IIMB Management Review*, 23(4), 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2011.09.002>
- Kendall, M. (1955). *Métodos de correlación de rango*. Nueva York, EEUU: Hafner Publishing Co.
- Kopanos, G., Puigjaner, L., & Georgiadis, M. (2012). Simultaneous production and logistics operations planning in semicontinuous food industries. *Omega*, 40(5), 634–650. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2011.12.002>
- Kumar, S., & Nigmatullin, A. (2011). A system dynamics analysis of food supply chains - Case study with non-perishable products. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(10), 2151–2168. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.06.006>
- Lambert, D., & Cooper, M. (2000). Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65–83. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(99\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00113-3)
- Lambert, D., & Enz, M. (2017). Issues in Supply Chain Management: Progress and potential. *Industrial Marketing Management*, 62, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.12.002>
- Luis, J., & Rojas, R. (2009). *Procedimiento para la elaboración de un análisis FODA como una herramienta de planeación estratégica en las empresas*. Retrieved from <https://www.uv.mx/iiesca/files/2012/12/herramienta2009-2.pdf>
- Ministerio de Agricultura. (2018). Aguacate. Retrieved Marzo, 2019, from <https://www.finagro.com.co/información-sectorial/aguacate>
- Ministerio de Agricultura. (2018). Estadísticas Inicio. Retrieved September 26, 2018, from <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>
- Miret, C., Chazara, P., Montastruc, L., Negny, S., Domenech, S. (2016). Design of bioethanol green supply chain: comparison between first and second generation biomass concerning economic, environmental

- and social criteria. *Comput. Chem. Eng.* 85, 16-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.10.008>
- Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda). Retrieved from <https://es.slideshare.net/carlosacosta851210/libro-analisis-y-diseo-de-experimentos-de-montgomery>
- Morshedzadeh, I., Oscarsson, J., Ng, A., Aslam, T., & Frantzen, M. (2018). ScienceDirect Multi-level management of discrete event simulation models in a product lifecycle management framework. *Procedia Manufacturing*, 00(May), 16–18. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.059>
- Mota, B., Gomes, M., Carvalho, A., Barbosa, A. (2015). Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *J. Clean. Prod.* 105, 14-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052>.
- Neungmatcha, W., Sethanan, K., Gen, M., & Theerakulpisut, S. (2013). Adaptive genetic algorithm for solving sugarcane loading stations with multi-facility services problem. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 85–99. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2013.07.016>
- ONU. (1987). Desarrollo sostenible. Retrieved February 13, 2019, from <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>
- Ortiz, A., & Jiménez, Z. (2017). Mercados y negocios. *Mercados y Negocios*, 1(36), 45–74. Retrieved from <http://revistascientificas.udg.mx/index.php/MYN/article/view/6646>
- Peano, C., Tecco, N., Dansero, E., Girgenti, V., & Sottile, F. (2015). Evaluating the sustainability in complex agri-food systems: The SAEMETH framework. *Sustainability (Switzerland)*, 7(6), 6721–6741. <https://doi.org/10.3390/su7066721>
- Perez, C. (2009). *Técnicas de análisis de datos con SPSS*.
- PNUD (2020). *Objetivos del Desarrollo Sostenible*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Rong, A., Akkerman, R., & Grunow, M. (2011). An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 421–429. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2009.11.026>
- Roni, M., Eksioğlu, S., Cafferty, K., Jacobson, J (2016). A multi-objective, huband-spoke model to design and manage biofuel supply chains. *Ann. Oper. Res.* 249, 1-30. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-015-2102-3>
- Santibañez, J., González, J., Ponce, J., Serna, M., El, M (2014). Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *J. Clean. Prod.* 65, 270-294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>
- Sterman, J. (2000). *Dinámica empresarial: sistemas de pensamiento y modelado para un mundo complejo*. McGraw Hill. ISBN 0-07-231135-5
- Thanassoulis, E. (2001). *Introduction to the Theory and Application of Data Envelopment Analysis*. (Massachusetts: Kluwer Academic Publish, Ed.). Boston, MA: Springer US.

<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1407-7>

- Torres, Y. (2017). Aguacates ya dejan más dinero a México que los hidrocarburos. *El Financiero*. Retrieved from <http://www.elfinanciero.com.mx/economia/aguacates-ya-dejan-mas-que-los-hidrocarburos>
- Tsolakis, N., Keramydas, C., Toka, A., Aidonis, D., & Iakovou, E. (2014). Agrifood supply chain management: A comprehensive hierarchical decision-making framework and a critical taxonomy. *Biosystems Engineering*, 120, 47–64. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.10.014>
- Universidad de Ibagué. (2017). *Logística par la integración de valor en la Cadena Hortifrutícola del Tolima*. (Universidad de Ibagué, Ed.). Ibagué: Universidad de Ibagué. Retrieved from https://issuu.com/dir_investigaciones_unibague/docs/sistematizacion_conv._1032_ene2018
- Utomo, D., Onggo, B., & Eldridge, S. (2018). Applications of agent-based modelling and simulation in the agri-food supply chains. *European Journal of Operational Research*, 269(3), 794–805. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.041>
- Van der Vorst, J. (2006). Performance measurement in agrifood supply-chain networks. *Logistics and Operations Research Group*, 14–24e.
- Van Der Vorst, J., Beulens, A., Wit, W., & Beek, P. (1998). *Supply Chain Management in Food Chains: Improving Performance by Reducing Uncertainty*. *International Transactions in Operational Research* (Vol. 5). John Wiley & Sons, Ltd (10.1111). <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.1998.tb00131.x>
- Vásquez, A., & Sandoval, E. (2017). Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes. *Ingeniería Industrial*, (35), 27-52.
- Tan, Y., Jiao, L., Shuai, C., & Shen, L. (2018). A system dynamics model for simulating urban sustainability performance: A China case study. *Journal of cleaner production*, 199, 1107-1115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.154>
- Zhalechian, M., Tavakkoli, R., Zahiri, B., Mohammadi, M (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 89, 182-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011>.
- Zhao, X., & Lv, Q. (2011). Optimal Design of Agri-Food Chain Network: An Improved Particle Swarm Optimization Approach. In *2011 International Conference on Management and Service Science* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2011.5998308>

Anexos

Anexo A. Tabla resumen de herramientas para estudio de cadenas de suministro

Artículo de revisión	Título	Autor	Enfoque
AR1	A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce	(Ahumada & Villalobos, 2011a)	En el artículo se presenta un <u>modelo de planificación táctica integrada para la producción y distribución de productos frescos</u> . El artículo presenta un modelo de programación entera mixta.
AR2	Adaptive genetic algorithm for solving sugarcane loading stations with multi-facility services problem	(Neungmatcha, Sethanan, Gen, & Theerakulpisut, 2013)	Este artículo presenta una herramienta computacional para la planificación operativa de las estaciones de carga de caña de azúcar. Para resolver el problema se <u>desarrolló un modelo de programación entera mixta</u> que puede manejar problemas a pequeña escala (menos de 300 campos de caña de azúcar o nodos) y un sistema integral de apoyo a las decisiones para los problemas a gran escala apoyado con un sistema de información geográfica basado en un algoritmo genético adaptativo.
AR3	A system dynamics analysis of food supply chains – Case study with non-perishable products	(Kumar & Nigmatullin, 2011)	En el artículo se examina el desempeño de una cadena de suministro de alimentos de productos no perecederos en un entorno monopolístico. El modelo también proporciona <u>una herramienta para generar múltiples situaciones de negocios</u> para la planificación estratégica efectiva y toma de decisiones empresariales.
AR4	A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains	(Georgiadis, Vlachos, & Iakovou, 2005)	En el artículo se adopta la metodología de dinámica de sistemas como una <u>herramienta de modelado y análisis para el análisis estratégico de las cadenas de suministro de alimentos</u> . Se presenta la metodología para el modelado estratégico de las cadenas de suministro de uno o varios escalones.
AR5	Lean distribution principles to food logistics: A product category approach	(Faccio, Ferrari, Persona, & Vecchiato, 2013)	En este artículo los autores integran los principios de la filosofía lean (filosofía pull, maximización del valor, eliminación de residuos, entre otros) en un enfoque innovador administración de cadena de suministro basado en un modelo <u>de programación lineal que se centra en una categoría de productos a lo largo del tiempo</u> .
AR6	Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges	(Akkerman, Farahani, & Grunow, 2010)	En este trabajo, se revisa <u>la aplicación de la gestión cuantitativa de operaciones en la gestión de la distribución de alimentos</u> , y su relación con los desafíos que enfrenta la industria.
AR7	Supply Chain Management in Food Chains: Improving Performance by Reducing Uncertainty	(Van Der Vorst, Beulens, Wit, & Beek, 1998)	En este artículo se muestra <u>el impacto de la administración de la cadena de suministro sobre los indicadores de desempeño logístico</u> de cadenas de suministro de alimentos, principalmente mediante la disminución de la incertidumbre dentro de la cadena.

Artículo de revisión	Título	Autor	Enfoque
AR8	An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain	(Rong, Akkerman, & Grunow, 2011)	En este artículo se desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta utilizada para la planificación de la producción y distribución que integra la calidad de los alimentos en el <u>proceso de toma de decisiones de una cadena de suministro de alimentos</u> .
AR9	Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products	(Ahumada & Villalobos, 2011b)	El artículo presenta un modelo operacional que genera decisiones de planificación a corto plazo para la industria de productos frescos. <u>El modelo ayuda al productor para maximizar sus ingresos por la toma de decisiones de producción y distribución durante la temporada de cosecha.</u>
AR10	Optimal design of agri-food chain network: An improved particle swarm optimization approach	(Zhao & Lv, 2011)	El artículo muestra el desarrollo de un modelo de programación entera mixta (MIP) para la ubicación de instalaciones y la selección de la capacidad de producción, así como la elección del modo de transporte para el diseño de la cadena de suministro agro alimentaria. Debido a la complejidad del problema de diseño (multinivel y multi-producto), <u>se propuso un enfoque de optimización por enjambre de partículas</u> (PSO – particle swarm optimization).
AR11	Simultaneous production and logistics operations planning in semicontinuous food industries	(Kopanos, Puigjaner, & Georgiadis, 2012)	El artículo presenta <u>un modelo de programación entera mixta con tiempos discretos/continuos</u> para la planeación de las operaciones de producción y logística basados en la definición de familias de productos y se evalúa su eficiencia mediante la aplicación en dos casos de estudio de la industria láctea griega.
AR12	Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty	(Ahumada et al., 2012)	El artículo presenta un modelo de planificación táctica estocástico para la producción y distribución de productos agrícolas frescos. <u>El modelo incorpora las incertidumbres encontradas en la industria de productos frescos debido a la variabilidad en el tiempo y la demanda.</u> El enfoque de modelado seleccionado es un programa estocástico de dos etapas en el que las decisiones en una primera etapa están diseñados para cumplir los resultados inciertos en una segunda etapa.
AR13	Operations management of distribution centers for vegetables and fruits	(Broekmeulen, 1998)	El artículo presenta un modelo de decisión táctica que mejora la efectividad de las operaciones de un centro de distribución de frutas y verduras. El modelo permite generar un plan de asignación basado en datos históricos, el cuál es usado para el almacenamiento de los productos. El efecto del plan de asignación propuesto para diferentes políticas fue examinado mediante la aplicación de un <u>modelo de simulación de las operaciones del centro de distribución.</u>

Anexo B. Distancias recorridas en el transporte de Aguacate Hass del Tolima

Punto de Partida	Punto de llegada	Distancia en Km
UPA Villahermosa: Asoamistad	Armero Guayabal: Planta F&P	110
UPA Villahermosa: Asoamistad	Comercializador (Clasificadora diferente a F&P)	302
UPA Villahermosa: Asoamistad	Comercializador Nacional	45
UPA Herveo: Asfruher	Armero Guayabal: Planta F&P	130
UPA Herveo: Asfruher	Comercializador Nacional	280
UPA Herveo: Asfruher	Comercializador (Clasificadora diferente a F&P)	311
UPA Casabianca: Capnevados	Armero Guayabal: Planta F&P	56
UPA Casabianca: Capnevados	Comercializador Nacional	248
UPA Casabianca: Capnevados	Comercializador (Clasificadora diferente a F&P)	400
UPA Palocabildo: Frupaltolima	Armero Guayabal: Planta F&P	170
UPA Palocabildo: Frupaltolima	Comercializador (Clasificadora diferente a F&P)	56
UPA Cajamarca: Aguacatec	Centro de Acopio Cajamarca	11
Centro de Acopio Cajamarca	Armero Guayabal: Planta F&P	135
Centro de Acopio Cajamarca	Comercializador (Clasificadora diferente a F&P)	157
UPA Fresno: Asofrutos	Centro de acopio Fresno	12
UPA Fresno: Asofrutos	Armero Guayabal: Planta F&P	87,7
UPA Fresno: Asofrutos	Comercializador (Clasificadora diferente a F&P)	200
Centro de acopio Fresno	Armero Guayabal: Planta F&P	80,7
Centro de acopio Fresno	Comercializador (Clasificadora diferente a F&P)	350

Anexo E. Análisis Descriptivos de las medidas de desempeño

	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error	95% del intervalo de confianza para la		Mínimo	Máximo	
					media				
					Límite inferior	Límite superior			
Cons_Agua (Litros)	1,00	5	2784939690,4000	32102560,98541	14356701,72304	2745079096,1743	2824800284,6257	2,73E+9	2,82E+9
	2,00	8	2700988956,3750	46833033,14624	16557977,66062	2661835560,8414	2740142351,9086	2,63E+9	2,77E+9
	3,00	5	2844982524,2000	57778772,21232	25839452,46465	2773240702,8835	2916724345,5165	2,78E+9	2,92E+9
	4,00	5	2803167214,8000	43575132,50610	19487391,68244	2749061541,5502	2857272888,0498	2,74E+9	2,85E+9
	Total	23	2772754730,3478	71693218,66417	14949069,48162	2741752257,7597	2803757202,9360	2,63E+9	2,92E+9
Cons_Energia (Kilowatt)	1,00	5	5006877,8356	58623,81564	26217,36737	4934086,7543	5079668,9169	4,91E+6	5,06E+6
	2,00	8	21386,0165	1498,45008	529,78211	20133,2809	22638,7521	19326,72	23321,44
	3,00	5	12068720,0720	222204,36603	99372,81347	11792816,9105	12344623,2335	1,18E+7	1,23E+7
	4,00	5	7032754,5264	139197,10498	62250,83780	6859918,4925	7205590,5603	6,86E+6	7,17E+6
	Total	23	5248384,7957	4610547,52333	961365,61531	3254634,5377	7242135,0537	19326,72	1,23E+7
Gen Empleo (Número de empleos)	1,00	5	3380,9502	65,48429	29,28546	3299,6407	3462,2596	3318,71	3485,17
	2,00	8	3196,1376	42,50146	15,02654	3160,6055	3231,6697	3108,64	3233,28
	3,00	5	3375,0671	117,75839	52,66315	3228,8507	3521,2834	3218,86	3516,78
	4,00	5	3380,9502	65,48429	29,28546	3299,6407	3462,2596	3318,71	3485,17
	Total	23	3315,3886	112,20425	23,39620	3266,8678	3363,9094	3108,64	3516,78
Ganancias (Pesos)	1,00	5	3046341657,6000	139244640,51704	62272096,33973	2873446600,5272	3219236714,6728	2,85E+9	3,18E+9
	2,00	8	410768453,3750	64809549,82463	22913636,08332	356586313,8002	464950592,9498	3,19E+8	4,90E+8
	3,00	5	3295518116,8000	151301559,60155	67664114,47416	3107652417,3707	3483383816,2293	3,05E+9	3,42E+9
	4,00	5	3046341657,6000	139244640,51704	62272096,33973	2873446600,5272	3219236714,6728	2,85E+9	3,18E+9
	Total	23	2183789338,5652	1332198747,08827	277782641,15668	1607703400,3392	2759875276,7913	3,19E+8	3,42E+9
gCO2 (Gramos)	1,00	5	40485593,5900	719973,54860	321981,95933	39591628,3550	41379558,8250	3,97E+7	4,11E+7
	2,00	8	11773560,7875	238788,14408	84424,35797	11573928,9032	11973192,6718	1,14E+7	1,21E+7
	3,00	5	59367827,8140	1228293,44947	549309,52987	57842700,0586	60892955,5694	5,80E+7	6,10E+7
	4,00	5	40485593,5900	719973,54860	321981,95933	39591628,3550	41379558,8250	3,97E+7	4,11E+7
	Total	23	34603633,0987	18577331,93303	3873641,48276	26570192,3529	42637073,8445	1,14E+7	6,10E+7
Pérdidas (Toneladas)	1,00	5	43,6052	1,18210	,52865	42,1374	45,0730	41,78	44,77
	2,00	8	36,4198	1,08215	,38260	35,5151	37,3245	34,90	38,17
	3,00	5	46,6537	,97541	,43622	45,4426	47,8648	45,24	47,86
	4,00	5	43,6052	1,18210	,52865	42,1374	45,0730	41,78	44,77
	Total	23	41,7687	4,29116	,89477	39,9130	43,6243	34,90	47,86

