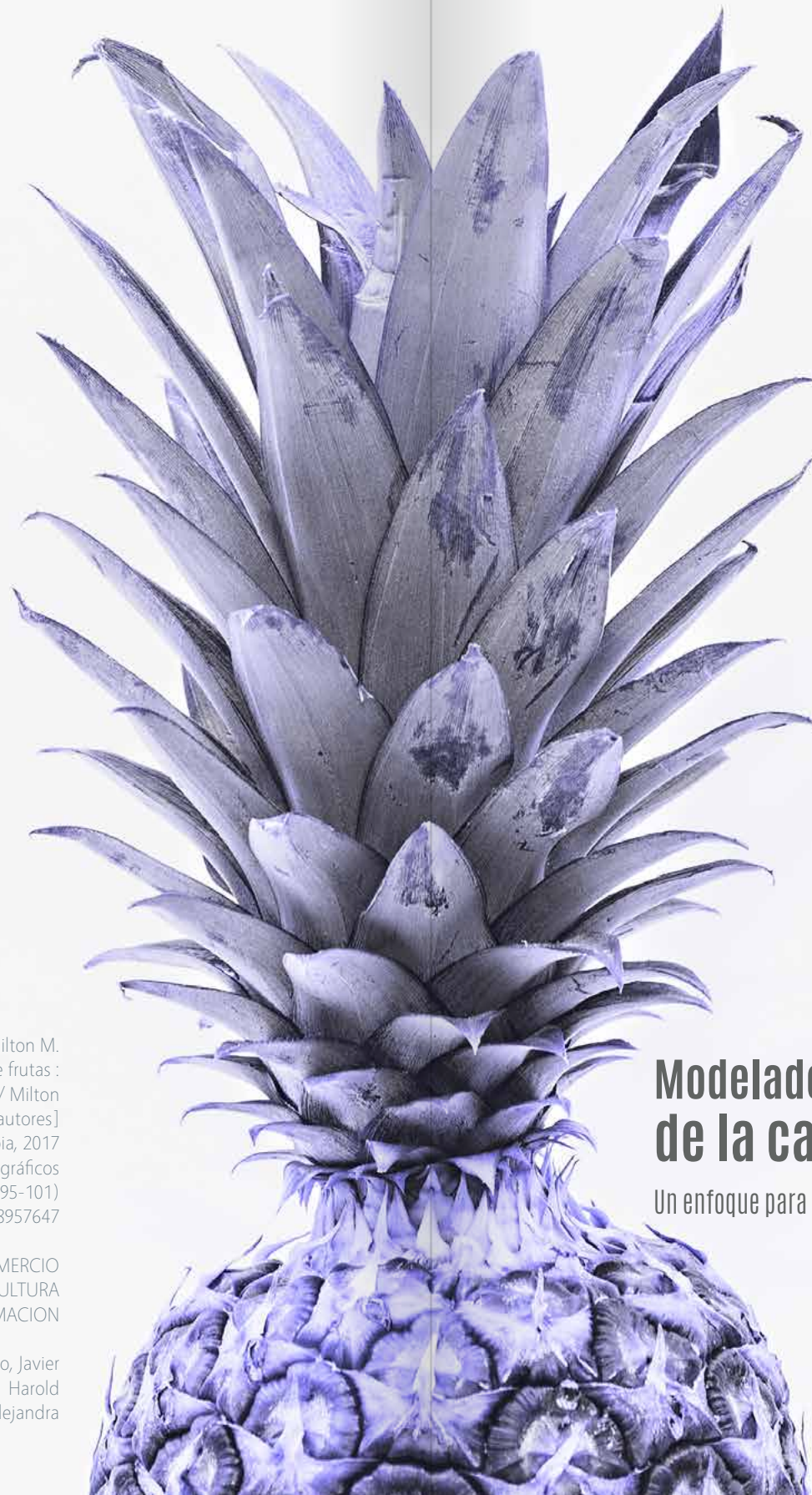


Milton M. Herrera-Ramírez
Javier Orjuela-Castro
Harold Sandoval-Cruz
María Alejandra Martínez-Vargas

**Modelado dinámico y estratégico de
la cadena agroindustrial de**

FRU TAS

Un enfoque para la gestión de tecnología



Herrera Ramírez, Milton M.
Modelado dinámico y estratégico de la cadena Agroindustrial de frutas :
un enfoque para la gestión De tecnología [Recurso electrónico] / Milton
M. Herrera Ramírez... [y otros autores]
Bogotá : Universidad Piloto de Colombia, 2017
102 páginas : ilustraciones; gráficos
Incluye referencias bibliográficas (Páginas 95-101)
ISBN : 9789588957647

1. FRUTAS – COMERCIO
2. FRUTICULTURA
3. TECNOLOGÍA DE LA INFORMACION

- I. Orjuela Castro, Javier
- II. Sandoval Cruz, Harold
- III. Martínez Vargas, María Alejandra

Modelado dinámico y estratégico de la cadena agroindustrial de frutas

Un enfoque para la gestión de tecnología

Milton M. Herrera-Ramírez
Javier Orjuela-Castro
Harold Sandoval-Cruz
María Alejandra Martínez-Vargas



Universidad Piloto de Colombia

Presidente

José María Cifuentes Páez

Rectora

Ángela Gabriela Bernal Medina

Director de Publicaciones y Comunicación Gráfica

Rodrigo Lobo-Guerrero Sarmiento

Director de Investigaciones

Mauricio Hernández Tascón

Coordinador General de Publicaciones

Diego Ramírez Bernal

Decano del Programa de Ingeniería de Mercados

Enrique Muñoz Borrero

© Modelado dinámico y estratégico de la cadena agroindustrial de frutas Un enfoque para la gestión de tecnología

Autores

Milton M. Herrera-Ramírez

Javier Orjuela-Castro

Harold Sandoval-Cruz

María Alejandra Martínez-Vargas

ISBN 978-958-8957-64-7

Primera edición - 2017

Bogotá, Colombia

Corrección de estilo

Andrés Abril

Diseño y diagramación

Daniela Martínez Díaz

Departamento de Publicaciones y Comunicación Gráfica de la

Universidad Piloto de Colombia

Fotografía portada

<http://unsplash.com/search/photos/fruit?photo=WxkzWvC2KCY>

Fotografías Internas tomadas de:

<https://unsplash.com>

La obra literaria publicada expresa exclusivamente la opinión de sus respectivos autores, de manera que no representan el pensamiento de la Universidad Piloto de Colombia. Cada uno de los autores, suscribió con la Universidad una autorización o contrato de cesión de derechos y una carta de originalidad sobre su aporte, por tanto, los autores asumen la responsabilidad sobre el contenido de esta publicación.



Esta obra se realizó gracias al aporte del Fondo de Ciencia y Tecnología de Colciencias, la Dirección de Investigaciones y el Programa de Ingeniería de Mercados de la Universidad Piloto de Colombia en el marco del proyecto "Caracterización de la gestión de tecnología en la cadena de suministro bajo un enfoque de dinámica de sistemas". Los autores reconocen el aporte invaluable de los pares evaluadores de la obra.

Un agradecimiento especial al Doctor Enrique Muñoz, Decano del Programa de Ingeniería de Mercados, y a Mauricio Hernández Ph.D. Arq., Director de Investigaciones de la Universidad Piloto de Colombia, que con su apoyo ha permitido la difusión de los resultados de investigación del semillero SISTEMA y del Grupo de Investigación Innovación y Gestión IG.





AUTORES

[MILTON M.] HERRERA-RAMÍREZ

Magister en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia). Ingeniero de Producción. Candidato a Doctor en Model Based Public Planning, Design Policy and Management, Universidad de Palermo (Italia) y Universidad Jorge Tadeo Lozano (Bogotá, Colombia). Docente de tiempo completo del Programa de Ingeniería de Mercados. Autor de varios artículos sobre logística y cadenas de suministro. Líder del Grupo de Investigación Innovación y Gestión (IG). Bogotá, Colombia.
milton-herrera@upc.edu.co

[JAVIER] ORJUELA-CASTRO

Magister en Estadística e Investigación de Operaciones. Especialista en Ingeniería de Producción. Ingeniero Industrial e Ingeniero de Alimentos. Candidato a Doctor en Ingeniería Industrial y Organizaciones, Universidad Nacional de Colombia. Estudiante Asociado al Grupo SEPRO. Docente de Ingeniería Industrial en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia). Líder e Investigador del grupo GICALyT.
jorjuela@udistrital.edu.co

[HAROLD] SANDOVAL-CRUZ

Especialista en Psicología del Consumidor. Ingeniero de Mercados de la Universidad Piloto de Colombia. Joven Investigador del Grupo de Investigación Innovación y Gestión IG. Docente del Programa de Ingeniería de Mercados. Bogotá, Colombia.
hsandoval44@upc.edu.co

[MARÍA ALEJANDRA] MARTÍNEZ-VARGAS

Ingeniera de Mercados de la Universidad Piloto de Colombia. Líder del Semillero SISTEMA. Bogotá, Colombia.
mmartinez58@upc.edu.co



CONTENIDO

| | | | |
|-----------|---|--|--|
| 16 | Prólogo | | |
| 19 | Introducción | | |
| 23 | Capítulo 1. Dinámica industrial y de mercado de la cadena agroindustrial de frutas | | |
| 24 | 1.1. Dinámica del mercado internacional del procesamiento de frutas | | |
| 26 | 1.1.1. Capacidades productivas de oferta y demanda | | |
| 27 | 1.2. Dinámica del mercado nacional de procesamiento de frutas | | |
| 30 | 1.3. Dinámica del desarrollo tecnológico en la cadena agroindustrial frutícola | | |
| 31 | 1.4. Procesos de manufactura en la cadena agroindustrial frutícola | | |
| 37 | Capítulo 2. Modelado de simulación desde el enfoque de dinámica de sistemas | | |
| 38 | 2.1. Modelado de la cadena agroindustrial y dinámica de sistemas | | |
| 40 | 2.2. Metodología de modelamiento con dinámica de sistemas | | |
| 43 | 2.3. Estrategia de modelamiento desarrollada | | |
| 44 | 2.3.1. Diseño y análisis de diagrama causal | | |
| 45 | 2.3.2. Análisis de la estructura de simulación | | |
| 49 | 2.3.3. Diseño del mapa de sectores de simulación | | |
| 50 | 2.3.4. Construcción del diagrama de simulación | | |
| 54 | 2.3.5. Validación de los modelos de dinámica de sistemas | | |
| 57 | Capítulo 3. Planeación de tecnología de trazabilidad en la cadena agroindustrial de frutas | | |
| 58 | 3.1. Hipótesis dinámica | | |
| 59 | 3.2. Modelo simulado | | |
| 61 | 3.3. Modelamiento matemático | | |
| 63 | 3.4. Análisis dimensional | | |
| 64 | 3.5. Resultados del modelo de simulación | | |
| 69 | Capítulo 4. Modelamiento de la tecnología de empaque en la cadena agroindustrial de frutas | | |
| 70 | 4.1. Hipótesis dinámica | | |
| 71 | 4.2. Modelo simulado | | |
| 74 | 4.3. Modelamiento matemático | | |
| 75 | 4.4. Resultados del modelo de simulación | | |
| 79 | Capítulo 5. Otros métodos de modelamiento para la gestión estratégica de tecnología | | |
| 83 | Suplemento. Aplicación de técnicas para la selección de tecnología de manipulación de materiales | | |
| 84 | Heurísticas | | |
| 87 | Simulación por eventos | | |
| 92 | Programación dinámica | | |
| 95 | Referencias | | |

A photograph of a sliced orange and several blueberries on a white surface. The orange is cut into a wedge shape, showing its segments. There are about eight blueberries scattered around the orange. The background is a plain, light-colored surface.

PRÓLOGO

En este texto, los autores buscan presentar de una manera práctica y funcional las contribuciones de la aplicación de la metodología de Dinámica de Sistemas en los diferentes componentes de la cadena productiva de frutas, y la forma en que se comportan e influyen las variables cuantitativas. Se consideran las acciones y los comportamientos de la cadena productiva como un sistema que articula cada una de estas variables de forma sistémica a partir del principio de causalidad desde las leyes matemáticas. Tales leyes permiten, a su vez, determinar y predecir los comportamientos futuros de las variables y de esta forma determinar tendencias en el desarrollo de la cadena en sus diferentes eslabones.

Esta forma de analizar las relaciones complejas de comportamiento de los componentes de la cadena, como son los procesos productivos, las condiciones logísticas, la relación entre los actores de ésta y las políticas públicas (relacionadas con las tecnologías que se generan para dar resultados de sostenibilidad y eficiencia en los sistemas que de allí se derivan), han permitido validar el uso de los diagramas causales entre estas variables y sus efectos. Esto da como resultado la elaboración de modelos que representan las relaciones estructurales existentes entre los factores analizados y, por esa vía, la generación de propuestas estratégicas para mejorar las condiciones de mercado de la cadena productiva de frutas.

Los autores abordan su propuesta desde diferentes enfoques para modelar la planeación de la tecnología, identificando en primer lugar los tipos de tecnologías que se pueden aplicar en la cadena productiva de frutas. Esta tecnología permitiría mejorar eficiente y eficazmente las condiciones de todas las actividades logísticas que surgen del desarrollo de la cadena.

Finalmente, a través de un práctico modelo de simulación, los autores le presentan al lector la forma en que realizan la modelación de un sistema de logística, así como el comportamiento generado por las diferentes variables tecnológicas que hacen parte de este proceso: tecnologías de almacenamiento, trazabilidad y sistemas de transformación.

Este documento y su investigación invitan al lector a conocer lo interesante, práctico y aplicable que resulta este sistema de modelamiento para validar desde diferentes perspectivas los escenarios de comportamiento que pueden tener otros enfoques disciplinares y sectores reales del mercado.

Celina Forero Almanza MSc.

Investigadora Grupo de Investigación Innovación y Gestión-IG



INTRODUCCIÓN

La globalización de los mercados ha generado una dinámica de competitividad y productividad en las organizaciones. En el caso de Colombia, la cadena agroindustrial de frutas juega un papel importante y diferenciador frente a otras economías a nivel mundial. La diversificación de frutas y verduras en Colombia marca una diferencia relevante en términos de seguridad alimentaria. Adicionalmente, y puesto que las políticas económicas de la globalización han permitido la integración de los mercados, es de suma importancia realizar un análisis enfocado en identificar las ventajas competitivas en la cadena agroindustrial de frutas con el fin de plantear estrategias encaminadas a mejorar la productividad y competitividad del mercado colombiano (Orjuela Castro, Castañeda Calderón y Calderón, 2008). Por lo tanto, una visión sistémica de los actores y sus relaciones contribuye notablemente en el diseño de políticas de integración y estrategia que permiten el mejor desempeño de las cadenas agroindustriales y las operaciones logísticas (Becerra, González, Herrera y Romero, 2016).

La gestión en la red logística se ha abordado desde diferentes enfoques orientados a la administración y coordinación apropiada de los recursos en la cadena de suministro (Brandenburg, Govindan, Sarkis y Seuring, 2014). Uno de los enfoques cuantitativos incluye la simulación con dinámica de sistemas. La dinámica de sistemas permite la construcción y análisis de modelos que representen el sistema que es objeto de estudio a partir de las relaciones identificadas entre variables y actores. Por tanto, la dinámica de sistemas es una técnica de simulación empleada para analizar y modelar el comportamiento temporal en entornos complejos (Davis y Bingham, 2007; Georgiadis y Besiou, 2008; Sterman, 2000). Este enfoque sistémico permite hacer un análisis cuantitativo de las variables que influyen en la gestión de la cadena agroindustrial así como identificar las variables que afectan la productividad y eficiencia de un proceso industrial (Forrester, 1961). Adicionalmente, los modelos de simulación permiten diseñar escenarios para la evaluación de políticas agroindustriales, energéticas, ambientales y sociales que afectan las dinámicas industriales de la cadena. Es así que la dinámica de sistemas permite la comprensión de los problemas desde una óptica de sistema (un conjunto de elementos que se relacionan entre sí de manera tal que un cambio en uno de ellos modifica al conjunto). Este enfoque permite obtener una visión clara y realista a partir de la cual se pueden analizar las relaciones entre los elementos que configuran la estructura que provoca el comportamiento que se desea estudiar, entender y en ocasiones modificar.

Por otra parte, las tecnologías de la información y comunicaciones han sido aplicadas en diferentes operaciones logísticas para contribuir en el crecimiento y desarrollo de una organización. En este sentido, el crecimiento tecnológico permite aumentar la productividad, competitividad y sostenibilidad de la cadena agroindustrial frutícola. Sin embargo, la planeación de tecnologías de apoyo en las operaciones logísticas requiere de políticas adecuadas que permitan la implementación a bajo costo y el análisis sistémico de los efectos e impactos entre los actores. Por lo tanto, el modelamiento a través de la simulación con dinámica de sistemas permite analizar el comportamiento de la gestión de tecnología en la cadena agroindustrial, así como los flujos de información y material entre los actores.

El texto presenta los resultados de la investigación realizada por el Grupo de Investigación Innovación y Gestión (IG) de la Universidad Piloto de Colombia, apoyado por el semillero de Sistemas de Modelamiento en Mercadeo (SISTEMO) y con la colaboración del Grupo de Investigación GICALYT de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. El grupo de investigadores se ha enfocado principalmente en el análisis y evaluación del sector de frutas de la Región Andina en Colombia debido a la importancia que esta tiene para la economía nacional y regional. El trabajo aborda entonces la gestión de tecnología en la cadena agroindustrial para la toma de decisiones desde un enfoque cuantitativo que se basa en el modelamiento a partir de la dinámica de sistemas. En este sentido, el texto presenta el modelamiento cuantitativo para la gestión de tecnologías que apoyan la logística en la cadena agroindustrial de frutas en Colombia para la zona Andina.

En el primer capítulo del texto, se presenta el contexto internacional y nacional de la cadena agroindustrial de frutas enfocada en la dinámica industrial. Este contexto permite entender la relevancia de la gestión de tecnología en la industria de la cadena de suministro. El segundo capítulo muestra la metodología de simulación con el enfoque de dinámica de sistemas empleada para abordar la gestión de tecnología de la cadena agroindustrial frutícola. En este capítulo se presenta un enfoque novedoso para diseñar la estructura de simulación para una cadena agroindustrial, así como la evaluación de las relaciones causales de las variables. El tercer capítulo propone un modelo de simulación con dinámica de sistemas que contempla la planeación estratégica de tecnología de trazabilidad como caso de estudio.



CADENA AGROINDUSTRIAL DE FRUTAS

CAP. 1

Dinámica industrial y de mercado de la cadena agroindustrial de frutas

La investigación está enfocada en el análisis del comportamiento de la dinámica industrial y de mercado de la cadena agroindustrial frutícola en la Región Andina colombiana. En este sentido, se analizaron estudios en las bases de datos de la FAO, la Corporación Colombiana Internacional-CCI, el Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología, el BID, la Cámara de Comercio, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, así como estudios previos de investigación de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de los cuales se extrajeron los datos de mayor relevancia en lo que respecta a la dinámica del mercado frutícola y agroindustrial. Posteriormente, se estudiaron los métodos, flujos y tecnologías asociadas con las operaciones logísticas de la cadena agroindustrial. Como resultado, se diseñaron las estructuras de modelo de simulación bajo la metodología de dinámica de sistemas. Esta estructura del modelo de simulación permite evaluar la gestión de tecnología de la cadena agroindustrial frutícola. Adicionalmente, el diseño de escenarios de simulación apoya la planeación estratégica de tecnología, la cual contribuye a disminuir la incertidumbre de la dinámica del mercado tecnológico.

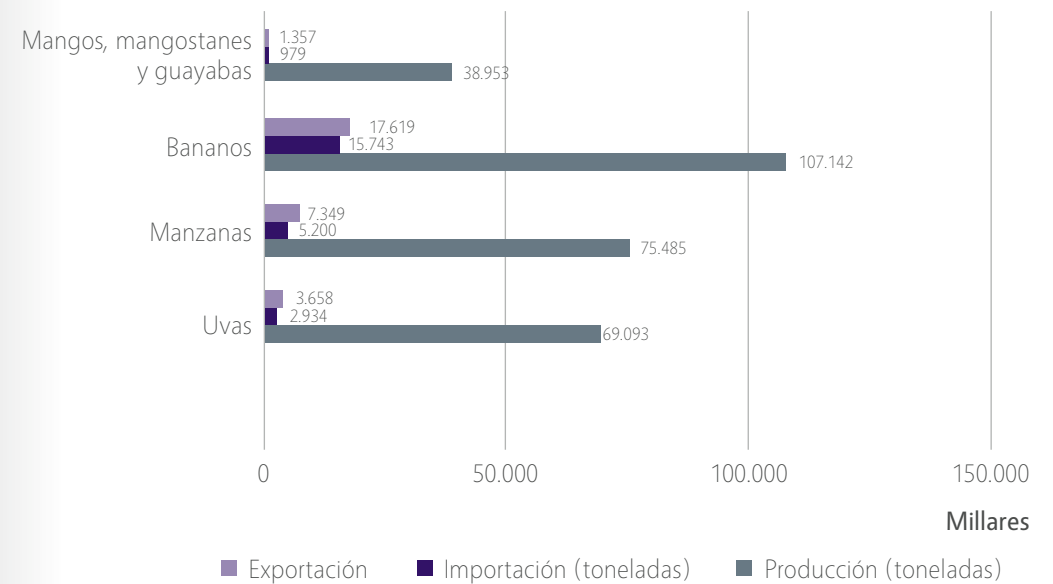
1.1. Dinámica del mercado internacional del procesamiento de frutas

El contenido de este acápite brinda un acercamiento al contexto internacional con el propósito de identificar las tendencias tecnológicas, la dinámica del mercado y las capacidades productivas de diferentes países en lo que se refiere a la cadena agroindustrial frutícola. Los elementos fundamentales del análisis del contexto internacional de la cadena agroindustrial se analizaron a partir de tres aspectos: a) análisis de la dinámica del comercio mundial de frutas procesadas; b) tendencias mundiales en el desarrollo tecnológico en la cadena agroindustrial frutícola; y c) capacidades productivas de oferta y demanda de los países a nivel internacional.

La dinámica del comercio mundial de frutas procesadas se encuentra determinada por el consumo por habitante de los diferentes productos que se generan en el proceso de transformación de frutas frescas (jugos, néctar, pulpas, entre otros). En el 2016, Latinoamérica presentó el mayor consumo de jugos procesados de frutas y se proyecta un aumento significativo hasta el período 2024 (FAO, 2016). En el caso de Colombia, el consumo de jugos procesados de fruta representa una participación del 7% a nivel mundial, que se traduce en un consumo por persona de cinco litros por semana. Esto puede deberse a que en Colombia la producción de jugos se realiza principalmente de forma doméstica y existe una gran participación de los refrescos y gaseosas (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2008). Por otra parte, se evidencia que la mayor concentración del comercio mundial de frutas frescas (no procesadas) se encuentra en la Unión Europea, que representa el 50%, en comparación con Estados Unidos, que ocupa el segundo puesto con el 30,6% de participación (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2011). En este sentido, las frutas tropicales de mayor representación

a nivel mundial son el aguacate, el mango, la piña y la papaya (FAO, 2016). El mango presenta un comportamiento en la producción de 38 953 166 toneladas, pero los niveles de importación y exportación a nivel mundial son bajos en comparación con el banano, la manzana y las uvas, tal como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Balanza comercial mundial de frutas de mayor producción (toneladas) año 2014.



Fuente: calculada a partir de FAOSTAT (2016).

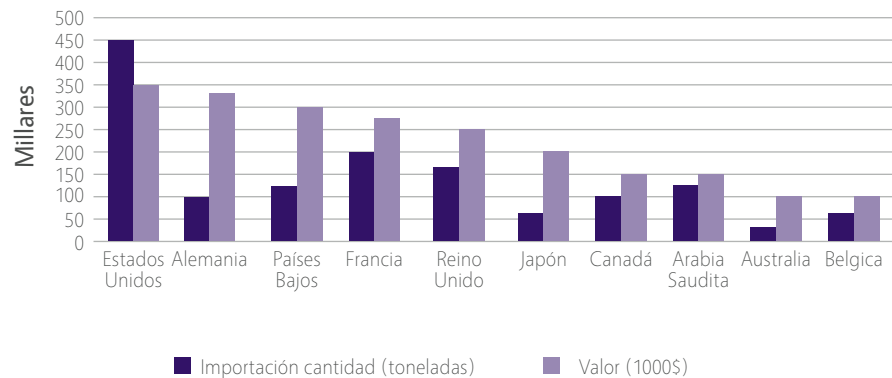
Entre el año 2004 y 2015, América Latina presenta un comportamiento estable en la producción de frutas tales como uvas, pera y kiwi, y de frutas tropicales como la piña y la papaya. También América Latina se destaca en la producción de cítricos, los cuales representan el 35% de la producción mundial (FAO, 2016).

Sin embargo, de acuerdo con la dinámica del mercado, el año 2015 exhibió un decrecimiento de la economía mundial debido a la crisis de la Unión Europea y la lenta recuperación de la economía estadounidense, lo cual repercutió inevitablemente en la economía de los países de Latinoamérica. Por tal motivo, y ante la recesión vivida desde el segundo semestre del 2009 (FAO, 2016), el crecimiento de la cadena agroindustrial frutícola y del sector agroindustrial a nivel mundial fue muy lento para el año 2015. Este comportamiento de la demanda del sector agroindustrial evidencia una necesidad de análisis de la dinámica industrial enfocada en la gestión de tecnología de apoyo a operaciones logísticas.

1.1.1. Capacidades productivas de oferta y demanda

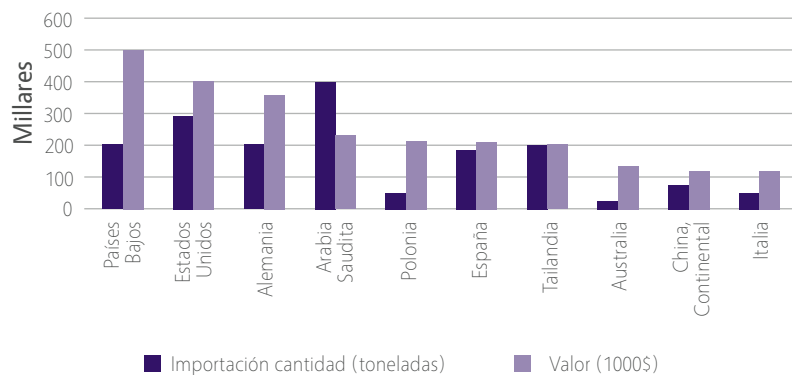
Las capacidades productivas implican un análisis de los comportamientos de la demanda agroindustrial y la oferta de frutas. En estos términos se pueden identificar los países que realizan la mayor cantidad de importaciones y exportaciones a nivel mundial de jugos de fruta, con lo cual se deducen las capacidades productivas y de consumo. En la Figura 2 y 3 se puede observar que para el período de 2013 se exporta e importa una gran cantidad de toneladas de jugos de fruta al año. Sin embargo, es mayor la cantidad de jugos importados de otros países como Chile, Brasil y Colombia, que por su diversidad y producción de frutas abastece el mercado norteamericano. Igualmente, se resalta el crecimiento de las exportaciones de jugos de fruta de Arabia Saudita para el período de 2013 (Figura 3).

Figura 2. Cantidades de Jugos de frutas importados de los principales países en el año 2013.



Fuente: adaptada de FAOSTAT (2016).

Figura 3. Cantidades de Jugos de frutas exportados de los principales países en el año 2013.



Fuente: adaptada de FAOSTAT (2016).

Debido a los acuerdos comerciales internacionales, Colombia enfrenta nuevos retos en la producción de jugos procesados. De esta manera, el análisis de competidores y precios es un aspecto necesario en la dinámica industrial de la cadena frutícola de Colombia. Estudios previos han identificado competidores potenciales y capacidades productivas en México, Estados Unidos y Brasil (Cámara de Comercio de Bogotá, 2010). Por lo tanto, un análisis de capacidades productivas en el procesamiento de frutas que contemple una visión sistémica resulta necesario.

1.2. Dinámica del mercado nacional de procesamiento de frutas

La dinámica del mercado nacional de la cadena agroindustrial tiene un comportamiento que afecta de forma directa los mercados internacionales en términos de exportaciones e importaciones. En este sentido, las subpartidas arancelarias son tomadas como variable de análisis para determinar el comportamiento del procesamiento de frutas en Colombia, como se muestra en la Tabla 1. En el caso de la subpartida 200980, esta representa el 45% del valor total de las exportaciones nacionales en la actividad comercial de procesamiento de hortalizas y frutas. Ciertamente, el procesamiento de frutas en el contexto de las exportaciones en Colombia tiene una gran importancia. Otras subpartidas de exportación nacional de procesados de hortalizas y frutas se enmarcan en los productos congelados y la mezcla de jugos.

Tabla 1. Exportación nacional de jugos según partida arancelaria

| Subpartida | Descripción |
|------------|--------------------------------------|
| 200911 | Congelado |
| 200980 | Jugo de cualquier otra fruta o fruto |
| 200990 | Mezclas de jugos |

Fuente: Proexport (2012).

La Figura 4 presenta el comportamiento de las importaciones y exportaciones colombianas de jugos de fruta procesados. Allí se evidencia un incremento de la cantidad de importaciones desde el año 2008, pasando de 1464 a 3336 miles de toneladas en el período 2011 y un decremento en las exportaciones desde el año de 1991 hasta el 2002. En el período de 2004 hay una recuperación importante que supera la cantidad de jugos importados, la cual nuevamente decae, pero mantiene un valor superior a las importaciones, para finalmente decaer en el año 2011. Por tanto, esto muestra una capacidad productiva y de exportación importante en Colombia que debe ser

objeto de análisis y mejoramiento continuo desde la fuente de los procesos que se generan al interior de las cadenas productivas de este sector.

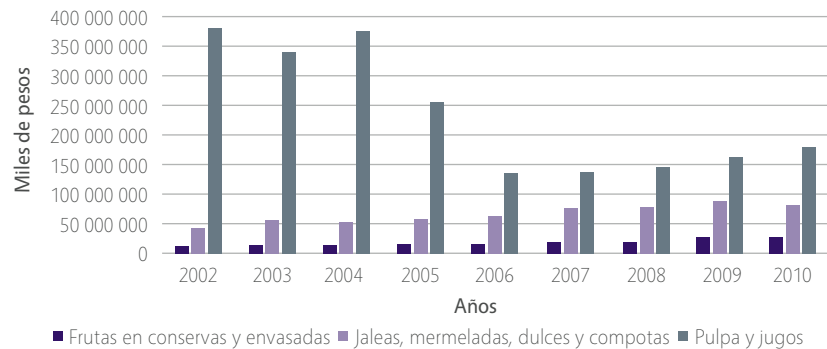
Figura 4. Importaciones y exportaciones de Colombia de jugos de fruta procesados. Período 2000-2011.



Fuente: tomada de FAOSTAT (2016).

Por otro lado, la fabricación de otros productos de fruta procesada tales como las pulpas y los jugos representan la mayor participación en la producción. Sin embargo, el ingreso de los productos frutícolas procesados disminuyó alrededor del 50% desde el año 2002 hasta el 2010. En contraste, las jaleas, mermeladas, dulces y compotas aumentaron paulatinamente en este mismo período. A pesar de que las frutas en conserva y envasados muestran un crecimiento del 50%, estas no han logrado igualar la producción de pulpas y jugos (Figura 5). Esta situación se debe al incremento de las importaciones y la diversificación de productos en esta categoría.

Figura 5. Producción obtenida de productos frutícolas procesados.



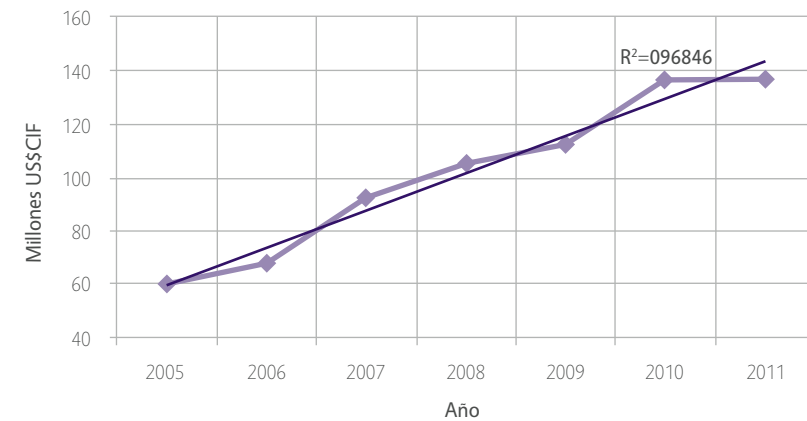
Fuente: adaptada de Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2011).

En el eslabón de producción o cultivo de frutas frescas el comportamiento del valor transado (USD \$FOB) de las importaciones muestra un aumento significativo, como se ilustra en la Figura 6. Sin embargo, las exportaciones sufren un decremento a partir del 2009 debido a la recesión mundial de Estados Unidos y Europa. Esta disminución corresponde a un 16,6% en dicho período, pasando de USD \$824 millones a USD \$687 millones en términos de la exportación de fruta fresca de Colombia (Canal y Castañeda, 2012).

Adicionalmente, el decrecimiento en las exportaciones se puede atribuir a los cambios climáticos, los cuales influyen en la producción nacional de fruta. Los cultivos frutícolas en Colombia se caracterizan por presentar una estacionalidad en las cosechas sujeta a la variación de los factores climáticos, especialmente al régimen de lluvias del país que aprovechan los cultivadores para utilizarlo como fuente de riego de los diferentes cultivos (Herrera y Echavarría V., 2012).

En el caso de las importaciones, se destacan las manzanas, las peras y las uvas, que representan el 87,7% de las importaciones en Colombia por un valor de USD \$137 millones (Canal y Castañeda, 2012). El procesamiento de frutas se ha visto afectado por la baja producción de frutas en Colombia, lo que ha causado un aumento en las importaciones para suplir la demanda del sector manufacturero de la cadena.

Figura 6. Importaciones de frutas en fresco



Fuente: tomada de Canal y Castañeda (2012).

Finalmente, se destaca que las frutas ocupan el tercer grupo de importación en el país. Esto debido a una alta demanda de frutas frescas y procesadas registrada en las centrales de abastecimiento y la agroindustria en el país. Una de las frutas que ingresan con mayor medida a las principales centrales de abastecimiento en el país es el mango de azúcar (Canal y Castañeda, 2012).

En resumen, debido a la dinámica comercial en el contexto nacional e internacional se ha generado la necesidad de una reconversión tecnológica en el aspecto industrial y logístico (Herrera y Orjuela, 2014). Por consiguiente, el análisis de los procesos de manufactura en la cadena frutícola es determinante para incrementar las capacidades productivas y competitivas en el eslabón de manufactura de frutas. A continuación, se realiza dicho análisis con el fin de comprender la dinámica productiva en el eslabón de manufactura en la cadena frutícola.

1.3. Dinámica del desarrollo tecnológico en la cadena agroindustrial frutícola

La evolución tecnológica ha generado nuevas dinámicas de tipo comercial e industrial que han traído consigo efectos particulares en la economía mundial. Es así como los países en desarrollo han planteado diferentes estrategias para reducir la brecha tecnológica respecto a los países desarrollados. De acuerdo a la inversión en actividades de ciencia, tecnología e innovación de diferentes países, Colombia registra un mínimo aumento de inversión como porcentaje del PIB en los periodos de 2011 a 2015, tal como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Inversión en Actividades de ciencia, tecnología e innovación como porcentaje del PIB

| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Porcentajes de inversión en Colombia (%) | 0,479 | 0,537 | 0,614 | 0,638 | 0,627 |

Fuente: OCyT (2015).

En cuanto a la tendencia en las tecnologías que se emplean en la cadena agroindustrial hortofrutícola se pueden distinguir las siguientes de acuerdo al objeto que persigan las compañías Canal y Castañeda, 2012; Herrera y Orjuela, 2014):

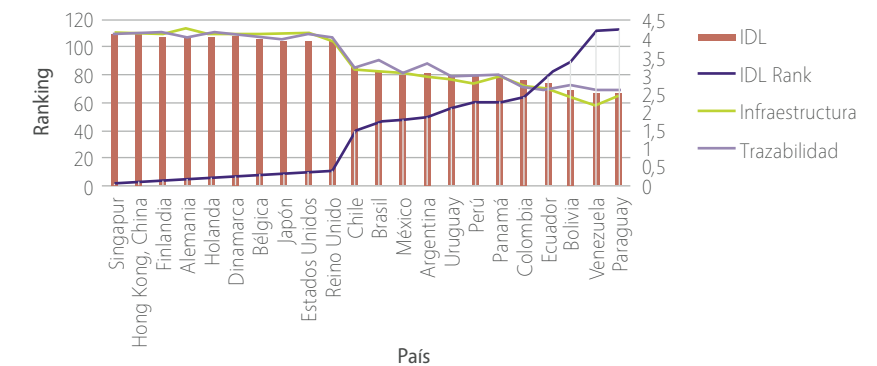
- Tecnologías de conservación asociadas a la seguridad alimentaria.
- Tecnologías de conservación de energía asociadas al ahorro energético.
- Tecnologías que contribuyen al área medio ambiental.
- Tecnologías de producción.
- Tecnologías informáticas.
- Sistemas de calidad.
- Procesamiento por medios físicos.

Si bien se identifican algunas de las tecnologías de la cadena agroindustrial a nivel mundial, las tendencias se encuentran enfocadas en cuatro aspectos fundamentales:

- Seguridad alimentaria orientada a mejorar las prácticas de clase mundial.
- Desarrollo de la biotecnología.
- Desarrollo de mercados orientados al consumo de productos orgánicos.
- Desarrollo de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) que permiten la expansión del mercado y la gestión de los procesos.

La Figura 7 presenta la relación del índice de desempeño logístico en términos de tecnología de trazabilidad, así como la relación con la infraestructura logística de cada país. El índice de desempeño de tecnologías de trazabilidad evidencia en promedio una calificación de cuatro puntos en el caso de lugares como Singapur, Hong Kong, Finlandia, Alemania y Holanda. Igualmente, la medida de la infraestructura exhibe una calificación en promedio de 4,1 puntos como indicador de desempeño logístico. Por consiguiente, en la medida que disminuyen los índices de desempeño logístico en tecnologías de trazabilidad e infraestructura el ranking de los países en términos de logística será menor (Figura 7). En este sentido, países tales como Chile, Brasil, México, Argentina, Uruguay, Perú, Panamá y Colombia presentan en promedio un índice de desempeño en términos de tecnología de trazabilidad de 2,7 puntos.

Figura 7. Índice de Desempeño Logístico en las dimensiones de Trazabilidad e Infraestructura para diferentes países año 2012



Fuente: tomada de Herrera (2014).

1.4. Procesos de manufactura en la cadena agroindustrial frutícola

Para comprender el enfoque de la cadena agroindustrial frutícola, la investigación parte de las definiciones propuestas por Canal y Castañeda (2012) y Orjuela et al. (2008).

Ya estudios previos han propuesto varias acepciones del término “cadena”, sin embargo, la definición base para abordar la investigación es el siguiente: es un conjunto de cadenas productivas que integra las actividades de aprovisionamiento, gestión de inventarios y almacenes, distribución y servicio al cliente en términos de logística en la cadena de abastecimiento frutícola. Dentro de este conjunto de cadenas productivas, los eslabones de manufactura realizan actividades de alistamiento y almacenamiento que requieren de tecnologías apropiadas para el control de calidad y trazabilidad de los procesos.

Para efectos de la investigación, los diferentes aspectos que determinan el diagnóstico y gestión de la tecnología se encuentran enmarcados en el eslabón de la manufactura (cadena agroindustrial) frutícola, según la estructura que se presenta en la Figura 8. Igualmente, el objeto de estudio del presente trabajo de investigación se concentra en el sector industrial, en el que se encuentra presente el eslabón de transformación. De allí se derivan una serie de actividades relacionadas con la gestión tecnológica y planeación de tecnologías de procesamiento.

Figura 8. Estructura de la Cadena agroindustrial frutícola



Fuente: tomada de Herrera (2014).

La cadena agroindustrial se puede conceptualizar como el conjunto de procesos de transformación de materias primas generadas desde las actividades agrícolas y forestales (Orjuela Castro et al., 2008). De acuerdo a este concepto, en el presente trabajo de investigación se concibe la cadena agroindustrial como el conjunto de procesos de transformación que contempla una serie de actividades de gestión, control y tecnología en el procesamiento de materias primas provenientes de la agricultura y la floricultura. La clasificación de las cadenas agroindustriales se ilustra en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de cadenas agroindustriales

| Cadenas agroalimentarias | Cadenas no alimentarias |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Cadena leche y carne | 1. Cadena textil |
| 2. Cadena oleaginosas | 2. Cadena de cueros |
| 3. Cadena de cereales | 3. Cadena de maderas, papel y cartón |
| 4. Cadena de frutales y hortalizas | 4. Cadena tabacalera |
| 5. Cadena pesquera | 5. Cadena de flores |
| 6. Cadena de tubérculos y similares | |
| 7. Cadena de chocolates y confites | |
| 8. Cadena azucarera y dulcera | |
| 9. Cadena de bebidas no alcohólicas | |

Fuente: Canal y Castañeda (2012).

En la manufactura de bebidas a base de frutas se encuentran los jugos, néctares y refrescos, entre otros productos que se distinguen por el nivel de concentración de la fruta contenida. En Colombia, el mercado de la producción de bebidas se encuentra dividido en compañías de procesamiento doméstico y grandes compañías que procesan altos volúmenes de frutas. Las tecnologías de procesamiento de frutas pueden ser diversas y están relacionadas con el producto final obtenido. Tales procesos tecnológicos incluyen la conservación de frutas y hortalizas, la deshidratación de frutas y hortalizas, la elaboración de jugos y pulpas, la congelación de frutas y el sulfatado y confinado de frutas. Así pues, el procesamiento de la fruta exige una serie de tecnologías que permiten la obtención de diversos productos, los cuales requieren, a su vez, de tecnologías de trazabilidad de apoyo en los procesos. En la Tabla 4 se presenta un inventario de procesos y tecnologías del sector hortofrutícola de Bogotá y Cundinamarca a partir del estudio propuesto por la Cámara de Comercio de Bogotá (2006). Este estudio presenta las tendencias de tecnología requerida en el procesamiento de frutas frescas, sin embargo, no identifica las estrategias de planeación tecnológica de la cadena agroindustrial frutícola. Adicionalmente, el estudio exhibe la falta de tecnologías de trazabilidad tomadas en cuenta en la cadena agroindustrial frutícola.

Tabla 4. Inventario de procesos y tecnologías del sector hortofrutícola de Bogotá – Cundinamarca

| Procesos | Subproceso | Tecnología |
|---------------|---------------------------|---|
| Procesamiento | Fresco-empaque y embalaje | Empaques que dan poca estabilidad al producto. Mínima utilización de empaques biodegradables. |

| | | |
|------------------|----------------------------------|--|
| Procesamiento | Procesos fríos | Mínima aplicación de tecnología IQF. |
| | Procesos calientes | Aplicaciones tecnológicas orientadas al desarrollo de productos precocidos. |
| | Métodos físicos | Aplicación de tecnologías de mínimo procesamiento del producto. |
| | Métodos combinados-biotecnología | Falta difusión del uso de la biotecnología en diversos procesos de transformación de los procesados hortofrutícolas. |
| Distribución | Distribución | Escasa utilización de herramientas informáticas. |
| Comercialización | Comercialización | Canales tradicionales mayoristas y minoristas. |
| | Mercadeo | Escasa utilización de herramientas informáticas. |
| | Imagen corporativa | Escasa utilización de estrategias comerciales. |

Fuente: Cámara de Comercio de Bogotá (2006).

La cadena agroindustrial frutícola implica tecnologías de control de calidad para el procesamiento. Estas tecnologías contemplan los siguientes aspectos:

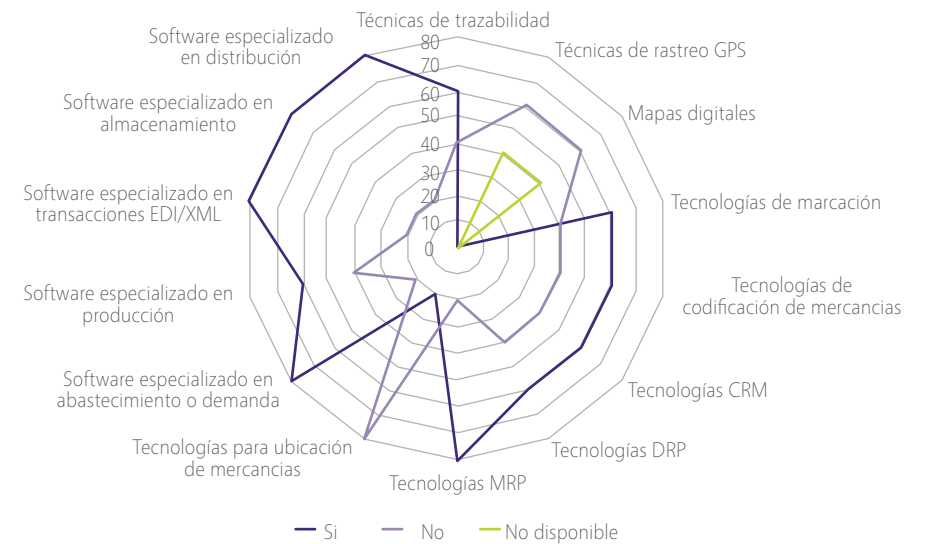
- Tecnologías de información y trazabilidad: códigos de barras, lectores y sistemas RFID e internet, bases de datos con normatividad en diferentes países y sistemas de registro de trazabilidad a través de la cadena productiva.
- Tecnologías de control de calidad: sistemas de control en línea (puntos críticos y HACCP), sensores, métodos analíticos de migración de monómeros procedentes de películas de plástico a alimentos, biosensores para la detección de plaguicidas, procedimientos de medida de aromas (sensores) y sensores fotoeléctricos para detección de niveles de dióxido de carbono en los envases y los almacenes.
- Tecnologías de envases: envases basados en zeolita para eliminar etileno y conservar productos, envases activos con actividad bacteriostática, sensores tiempo temperatura en el envase (determina vida útil) y envases de asepsia mejorados.

Debido a la expansión de los mercados internacionales y la diversificación de productos de las compañías manufactureras, el gobierno de Colombia debería

contemplar políticas adecuadas para la gestión de la tecnología en la cadena agroindustrial de frutas. Sin embargo, los acuerdos en materia de agroindustria son insuficientes en términos de inversión y desarrollo tecnológico.

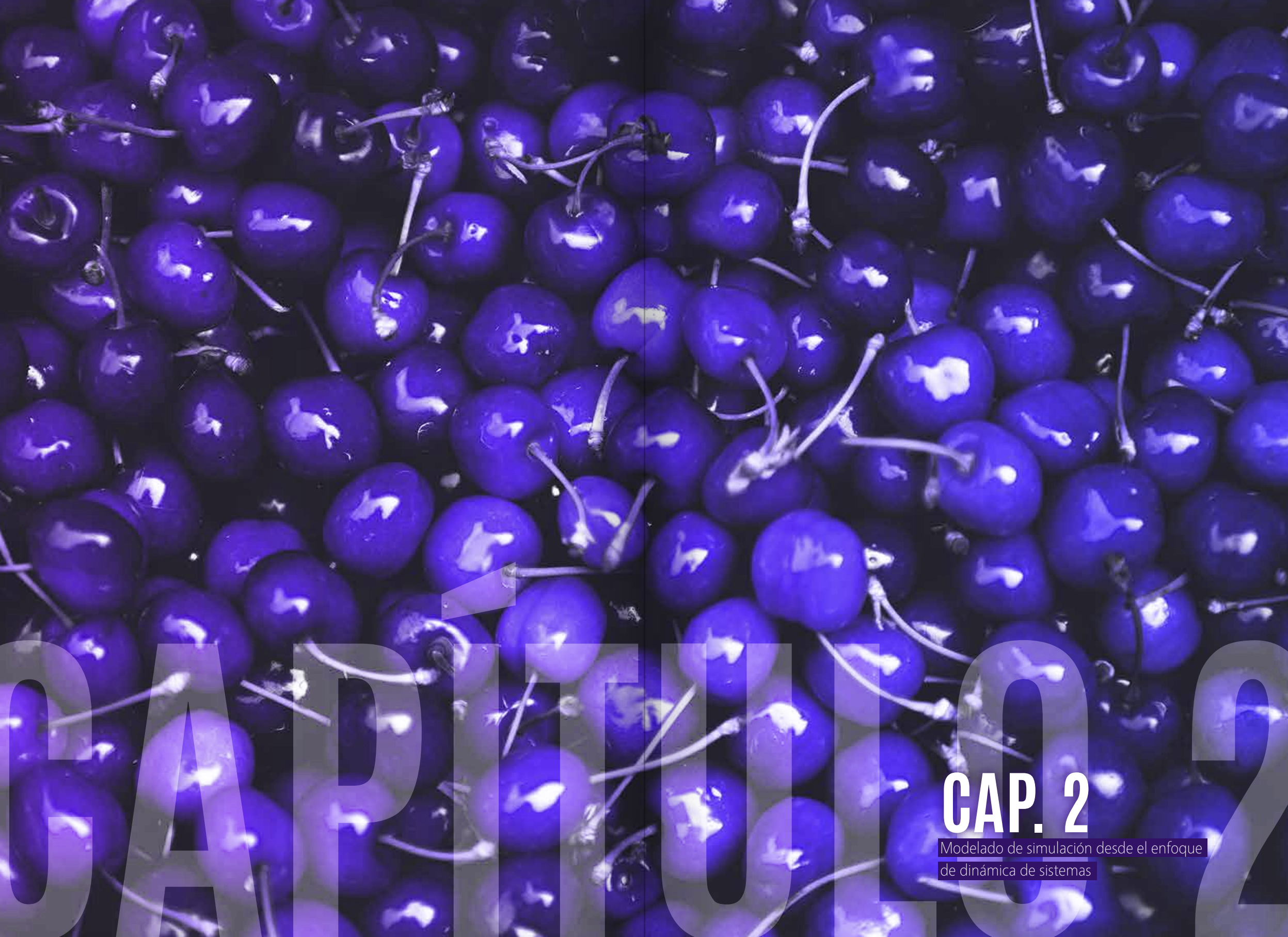
La dinámica de tecnologías de información empleadas en la manufactura en Colombia se presenta en la Figura 9. De acuerdo al gráfico, el 60% de las tecnologías de información utilizadas son las tecnologías de trazabilidad, las tecnologías de marcación, las tecnologías de codificación de productos, las tecnologías de gestión de relación de clientes (CRM) y las tecnologías de apoyo a la planeación de recursos de distribución (DRP). Por otra parte, las tecnologías relacionadas con aplicaciones de MRP (Planeación de Requerimiento de Materiales), software especializado en transacciones EDI/XML, almacenamiento y distribución cubren el 80% de participación de tecnologías empleadas en la manufactura.

Figura 9. Tecnologías de información empleadas en manufactura en Colombia.



Fuente: adaptada de Cámara de Comercio de Bogotá (2006).

De acuerdo al Plan Frutícola Nacional para Colombia (PFN) se identifican cinco frutas que presentan la mayor demanda en el mercado industrial del procesamiento de frutas frescas. De estas frutas se destacan el mango y la guanábana, que representan la mayor cantidad demandada en toneladas al año (Canal y Castañeda, 2012; Herrera y Orjuela, 2014; Lasprilla, 2011). En este sentido, los procesos de manufactura en Colombia requieren de tecnologías de procesamiento, control de calidad y seguimiento de productos adecuados para alcanzar las metas propuestas en el PFN.



CAPÍTULO 2

CAP. 2

Modelado de simulación desde el enfoque
de dinámica de sistemas

2.1. Modelado de la cadena agroindustrial y dinámica de sistemas

En el contexto histórico, la evolución del pensamiento mecanicista al sistémico genera nuevas formas de abordar los problemas industriales. Si bien es cierto que las corrientes mecanicistas permitieron un desarrollo importante de la ciencia, la técnica y la tecnología, gracias al enfoque sistémico, basado en la teoría general de sistemas, se estableció una nueva manera de concebir la realidad. Esto permitió dar respuesta a incógnitas que mostraba el paradigma mecanicista y solucionar algunos problemas que este no satisfacía de algún modo.

Desde 1950, Jay Forrester, estudió algunas formas para analizar las cadenas de abastecimiento. De esta manera, Forrester aplicó sus estudios a problemas estratégicos y de negocio en 1961. A partir de allí, la dinámica de sistemas ha sido aplicada a problemas estratégicos en las cadenas de abastecimiento. Por tanto, la dinámica de sistemas se convirtió, a nivel mundial, en un paradigma, un lenguaje y una metodología de estudio de sistemas complejos no lineales con la ayuda del computador (Forrester, 1961). A pesar de que muchos estudios sobre la cadena de abastecimiento han sido abordados con varios enfoques (Ansari y Kant, 2017), la dinámica de sistemas ha permitido entender la dinámica de los flujos de información y las relaciones entre los actores de la cadena de abastecimiento (Herrera y Orjuela Castro, 2014). Esta metodología de simulación fue desarrollada para modelar comportamientos y relaciones complejas que se producen en un sistema (Davis y Bingham, 2007; Sterman, 2000). En esa medida, el modelado con dinámica de sistemas puede estar dirigido a interpretar fenómenos y analizar la dinámica compleja de un sistema social y organizacional en un horizonte de tiempo (Bianchi, Cosenz, y Marinković, 2015).

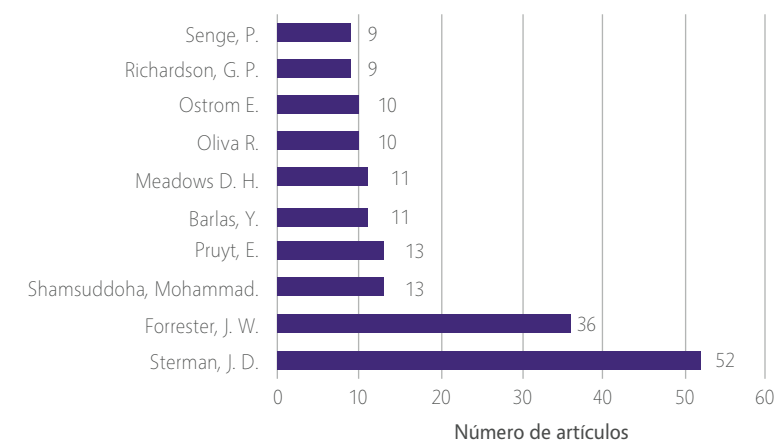
En general, el enfoque sistémico está presente en la aplicación de la teoría general de sistemas en varias disciplinas. Abarca una amplia variedad de métodos, herramientas y principios, todos orientados a examinar la interrelación de las fuerzas que forman parte de un proceso común (Vargas y Herrera, 2015). El comportamiento de un sistema depende de la estructura de la cadena de abastecimiento y las relaciones entre las partes interesadas (Asif, Bianchi, Rashid y Nicolescu, 2012). Por lo tanto, un enfoque de simulación sistémico permite entender mejor el comportamiento dinámico de la tecnología, así como los cambios en el mercado tecnológico.

Estudios previos sobre la gestión de la cadena de abastecimiento y la tecnología se han enfocado en presentar los efectos de la integración de los actores a través de las tecnologías de la información y comunicaciones (Flynn, Huo y Zhao, 2010; Gunasekaran y Ngai, 2004; Petersen, Handfield y Ragatz, 2005; Ruiz, Caicedo, y Orjuela, 2015). En este sentido, la gestión de tecnología en la cadena de abastecimiento es un tema importante, debido principalmente a los efectos de integración que causa entre sus actores.

En el caso de la gestión de la cadena de abastecimiento sostenible, varios estudios se han interesado en abordar las alternativas de planeación (Mele, Guillén-Gosálbez, Jiménez, y Bandoni, 2009), los efectos de los mercados verdes (Brindley y Oxborrow, 2014; Liu, Kasturiratne y Moizer, 2012), los efectos de las políticas gubernamentales (Vermeulen y Kok, 2012; Zhang, Li, Zhou, Hou y Qiu, 2014), el diseño de redes logísticas (Chaabane, Ramudhin y Paquet, 2012; Eskandarpour, Dejax, Miemczyk y Péton, 2015), las capacidades colaborativas (Becerra et al., 2016; Van Hoof y Thiel, 2014) y la asimetría entre las operaciones logísticas de transporte y almacenamiento (Orjuela-Castro, Herrera-Ramírez y Adarme-Jaimes, 2017; Orjuela, Herrera y Casilimas, 2015). Las redes logísticas implican comportamientos complejos debido a las múltiples relaciones entre los actores. Esta perspectiva implica dificultades de control de la estructura de múltiples cadenas agroindustriales (Frostenson y Prekert, 2015). Actualmente, el modelamiento dinámico ha permitido mejorar el proceso de toma de decisiones en sistemas complejos. En este sentido, un modelado holístico de la cadena agroindustrial contribuye a mejorar la planeación de tecnología.

El incremento de publicaciones que abordan la gestión de la cadena agroindustrial ha permitido entender las medidas de rendimiento y sus impactos en la logística. En la Figura 10 se muestran autores reconocidos en la metodología de simulación con dinámica de sistemas. A partir de los estudios en rendimiento de la cadena de abastecimiento se han podido diseñar guías y políticas de gestión en inventarios, recursos humanos, capital y tecnología.

Figura 10. Autores relevantes en cadenas de abastecimiento y dinámica de sistemas entre 2011 y 2015.

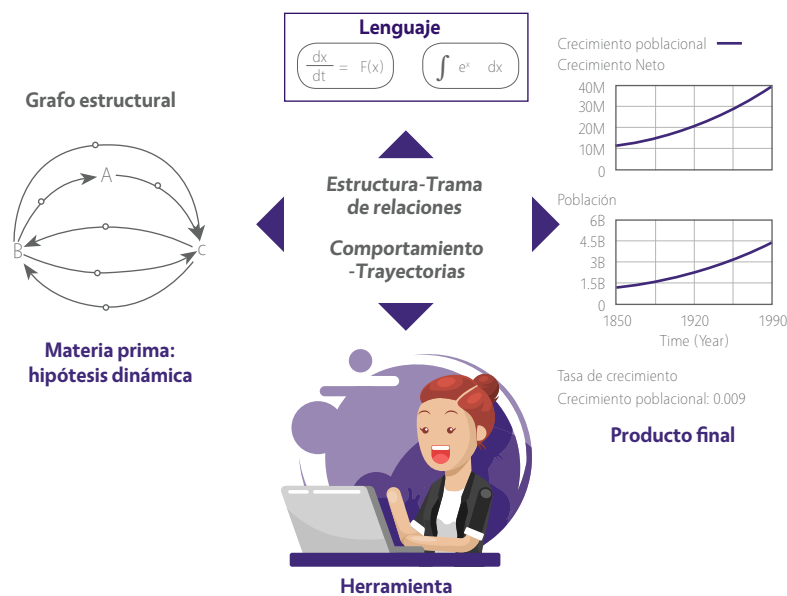


Fuente: elaboración propia a partir de *International Conference of the System Dynamics Society*.

2.2. Metodología de modelamiento con dinámica de sistemas

La simulación a partir de la dinámica de sistemas implica el desarrollo de etapas metodológicas. Siendo así, varios estudios han definido dichas etapas (Davis y Bingham, 2007; Forrester, 1961; Oliva, 2003; Sterman, 2000). Una simplificación de la metodología propuesta por algunos autores se presenta en la Figura 11. La metodología se puede simplificar a partir de cuatro aspectos fundamentales: modelo conceptual, modelo informático, modelamiento matemático y análisis de resultados.

Figura 11. Metodología simplificada de simulación con dinámica de sistemas.



Fuente: elaboración propia.

El modelo conceptual está soportado por un diagrama causal que representa las relaciones entre las variables del sistema (ver Figura 12). Este modelo conceptual se denomina hipótesis dinámica. La hipótesis dinámica permite entender las relaciones entre las variables y el problema que comprende el modelo de simulación (Herrera y Orjuela Castro, 2014). Así pues, un diagrama causal representa la hipótesis dinámica. El diagrama causal se caracteriza por la representación de estructuras de realimentación denominadas bucles cerrados. Las estructuras de realimentación en la representación causal de un sistema se clasifican como:

1. Refuerzo (bucle positivo): cuando por efecto de una acción el valor en la respuesta aumenta. Se suele denotar con la letra R.

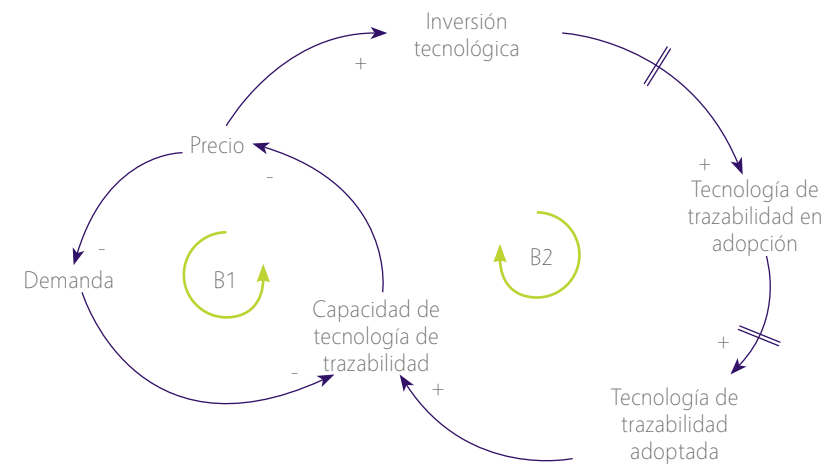
2. Compensación (bucle negativo): cuando por efecto de una acción el valor en la respuesta disminuye. Se suele denotar con la letra B.

Por esta vía, los tipos de respuesta que se presentan con los bucles en un sistema simulado pueden ser:

3. Inestabilidad: cuando la salida o respuesta del sistema es oscilante.
4. Imprecisión: cuando la salida o respuesta del sistema tiene una diferencia con la respuesta deseable.

En el caso de la Figura 12, la hipótesis dinámica presenta el efecto de la dinámica del mercado tecnológico sobre la inversión de nueva tecnología en trazabilidad. El precio afecta la demanda, y esta a su vez impacta en la capacidad de tecnología de trazabilidad, generando un efecto de balance (B1). Como resultado, el precio afecta la inversión en la nueva tecnología que se desarrolla y adopta, de tal manera que aumenta la capacidad en tecnología de trazabilidad —representada por un efecto de balance (B2).

Figura 12. Hipótesis dinámica del efecto de dinámica del mercado tecnológico sobre la inversión de tecnología en trazabilidad.



Fuente: elaboración propia.

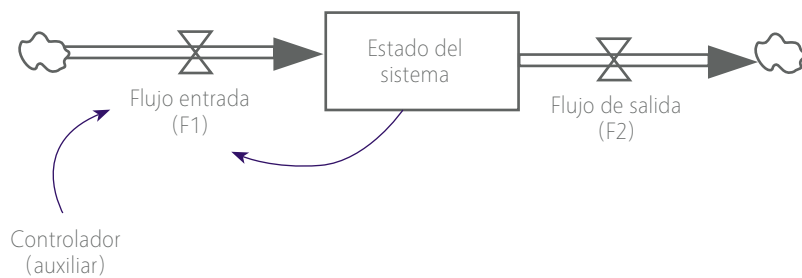
En el caso del modelo informático, la construcción y el diseño del sistema implica determinar las variables de análisis, tales como variables de estado, auxiliares y variables de flujo (Figura 13). La representación del sistema en un programa

informático de simulación se denomina diagrama de stock y flujos. Las variables que conforman este diagrama pueden ser caracterizadas de la siguiente manera:

- Variable de flujo: determina cambios en los estados del sistema.
- Variable de estado: resultados de la acumulación del sistema.
- Variables auxiliares: valores controladores que determinan los cambios en los flujos del sistema.

La construcción de un modelo de simulación con dinámica de sistemas requiere de una validación estructural, dimensional y de comportamiento. Estas validaciones permiten que el sistema simulado tenga una consistencia con la realidad. A ese respecto se recomienda revisar los conceptos propuestos por Oliva (2003), Qudrat-Ullah y Seong (2010) y Sterman (1984).

Figura 13. Diagrama de stock y flujos utilizado para la simulación con dinámica de sistemas



Fuente: elaboración propia.

El modelo matemático se fundamenta en la razón de cambio que se representa en el sistema. Generalmente, las ecuaciones de modelamiento son como la que se presenta en la Ecuación 1:

$$\frac{dy}{dx} = F_1 - F_2 \quad (1)$$

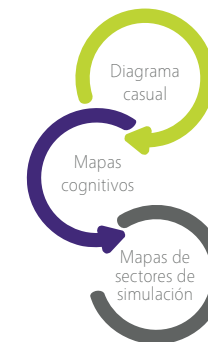
Los resultados finales de la simulación se analizan a través de las gráficas de comportamiento del sistema. Adicionalmente, el diseño de escenarios de simulación permite proponer políticas para el mejoramiento del sistema. En este aspecto, el diseño de políticas implica la construcción de modelos robustos que expliquen los comportamientos del sistema para la toma de decisiones.

2.3. Estrategia de modelamiento desarrollada

Esta sección presenta la estrategia de modelamiento desarrollada en la investigación. La estrategia contempla nuevas técnicas de análisis del modelo conceptual elaborado para la cadena agroindustrial frutícola. Asimismo, contempla los siguientes aspectos: diseño y análisis de diagrama causal, análisis de la estructura de simulación, diseño de mapa de sectores de simulación, construcción de diagrama de simulación y método de validación.

La estrategia de construcción del modelo de simulación para la cadena agroindustrial frutícola tiene en cuenta los siguientes aspectos: diagrama causal, mapa cognitivo y mapa de sectores de simulación. Estos aspectos fueron desarrollados para el modelo conceptual que soporta la simulación y el análisis de su estructura. La estrategia de construcción del modelo simulado se puede observar en la Figura 14, en la que el diagrama causal se construye y analiza a través de los mapas cognitivos. En este sentido, el mapa cognitivo permite entender mejor la estructura de simulación y los efectos causales entre las variables de la cadena agroindustrial frutícola. Es decir, los mapas cognitivos toman los efectos de las variables del diagrama causal para crear una estructura de simulación que representa las causas y los efectos. A partir del análisis de los mapas cognitivos del diagrama causal se diseña el modelo de simulación. Posteriormente, el modelo de simulación es validado a través de métodos estadísticos. Como resultado de la validación, el modelo de simulación es empleado para construir escenarios para el análisis de políticas en gestión tecnológica de la cadena agroindustrial frutícola. A continuación, se presenta cada aspecto de construcción del modelo de simulación para la planeación de tecnología en la cadena agroindustrial.

Figura 14. Estrategia de construcción del modelo simulado

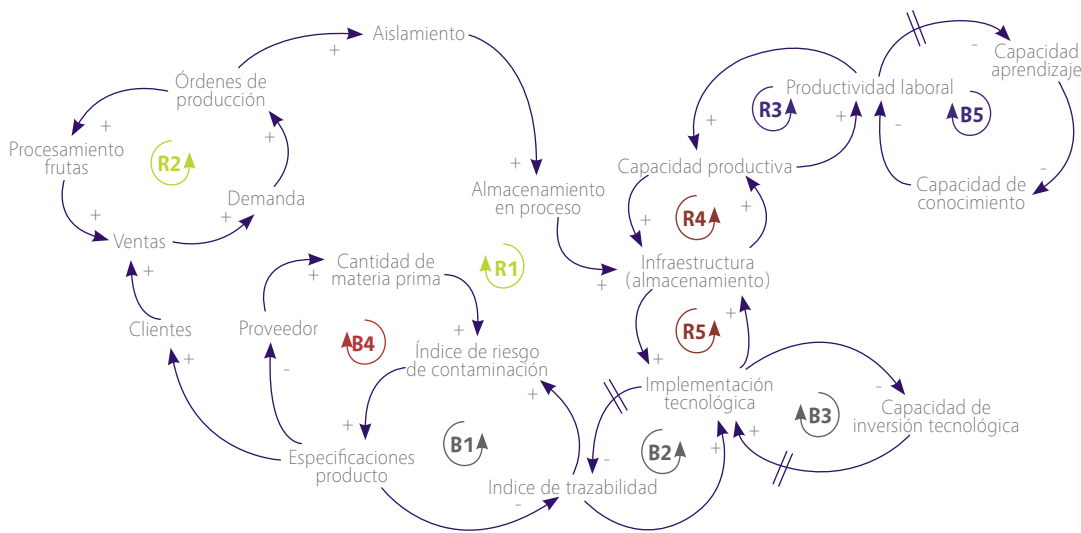


Fuente: Herrera (2014).

2.3.1. Diseño y análisis de diagrama causal

Para el diseño del modelo simulado se comienza con la construcción del diagrama causal a partir de expertos y de la caracterización del proceso de producción y la tecnología empleada. El diagrama causal que se propuso considera las variables que interactúan en un proceso agroindustrial frutícola planteadas por Herrera y Orjuela Castro (2014), tal como se ilustra en la Figura 15.

Figura 15. Diagrama causal propuesto para la cadena agroindustrial frutícola



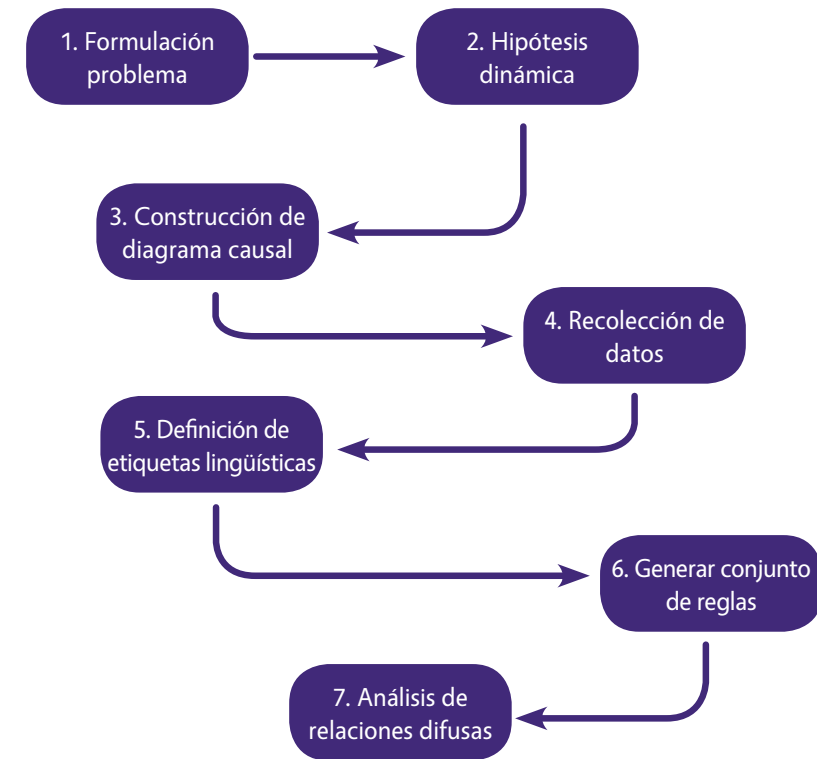
Fuente: Herrera y Orjuela Castro (2014)

La relación de efectos a lo largo de la cadena agroindustrial frutícola que se consideran en la investigación basados en el causal propuesto por Herrera y Orjuela (2014) se presentan a continuación:

- Efecto de adopción de tecnología de trazabilidad.
- Efecto de inventarios de producto terminado, materia prima y calidad.
- Efecto de flujo de producción, almacenamiento y demanda.

De acuerdo a la metodología propuesta por Pankaj, Seth y Sushil (1994), se realizó un análisis cualitativo de los bucles de realimentación del diagrama causal con el propósito de analizar la incertidumbre en las variables seleccionadas. La metodología de análisis se propone en la Figura 16.

Figura 16. Metodología de análisis cualitativo de bucles del diagrama causal



Fuente: modificado a partir de Pankaj, Seth y Sushil (1994).

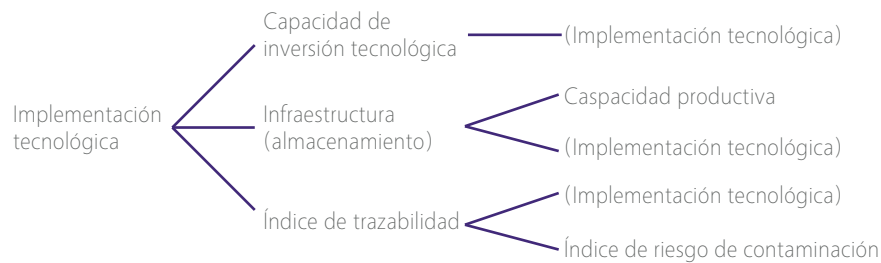
2.3.2. Análisis de la estructura de simulación

Los mapas cognitivos son estructuras que representan las causas y las consecuencias entre conceptos y variables. El diseño de mapas cognitivos se realizó con base en las relaciones causales de las variables y el álgebra de causalidad propuesta por Campuzano, Mula y Peidro (2010). A través de la elaboración de un árbol causal se identificaron las variables compartidas entre los efectos causales, las relaciones

entre los efectos y los sectores de simulación a emplear. El propósito del diseño es determinar los sectores de simulación y el efecto dominante que ejercen en el sistema de simulación.

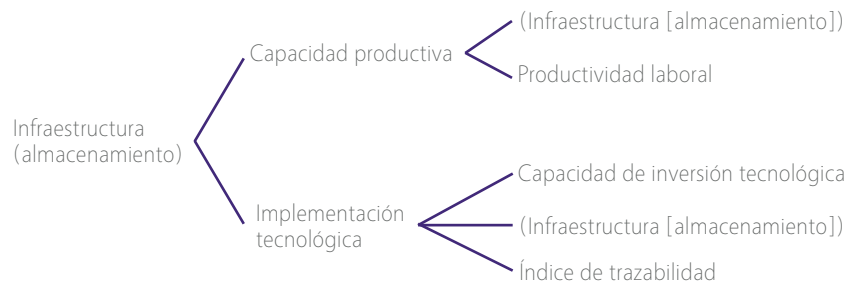
La Figura 17 muestra la relación entre las variables “implementación de tecnología” e “infraestructura”. Esta relación representa el efecto de implementación de tecnología de trazabilidad y la capacidad productiva. En este sentido, la adopción tecnológica de trazabilidad impacta la capacidad productiva asociada a los efectos de inversión tecnológica. La Figura 18 presenta el árbol causal para la infraestructura. Este presenta la relación de realimentación que conforma el bucle cerrado del diagrama causal entre infraestructura y adopción de tecnología.

Figura 17. Árbol causal de la variable implementación tecnológica



Fuente: elaboración propia.

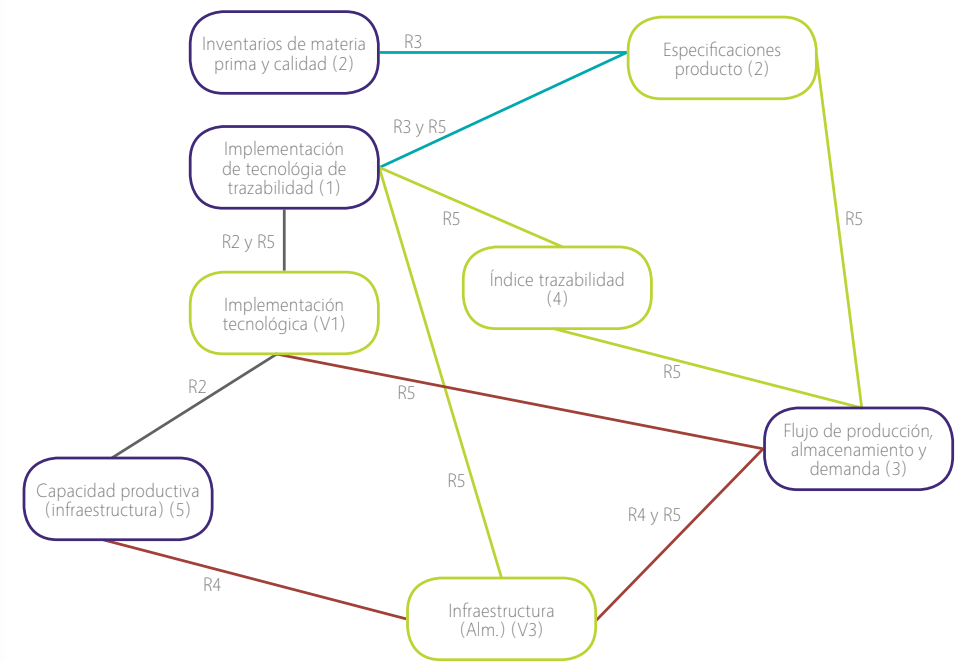
Figura 18. Árbol causal de la variable infraestructura



Fuente: elaboración propia.

Los efectos combinados que relacionan un mayor número de variables son: el efecto de implementación de tecnología de trazabilidad (1) y el flujo de producción, almacenamiento y demanda (3), en el que convergen las variables de infraestructura tecnológica, implementación de tecnología, índice de trazabilidad, índice de contaminación y especificaciones producto (ver Figura 19). Esta situación evidencia las relaciones con mayor fuerza asociadas a la adopción de tecnología de trazabilidad. Con la construcción del grafo de relaciones se propone un análisis a través de matrices de incidencia. Estas matrices de incidencia permiten identificar cuantitativamente la fuerza de relación entre las variables del diagrama causal.

Figura 19. Diagrama de relación de efectos y variables relacionales del sistema



Fuente: elaboración propia.

Las combinaciones de los efectos de estudio (1, 2, 3 y 4) y las variables (V1, V2 y V3) que los relacionan (R1, R2, R3, R4 y R5) se pueden observar en la Figura 19. Este diagrama de relaciones muestra que las variables con mayor número de combinaciones presentan una mayor atracción o relación sistémica entre ellas. En este caso,

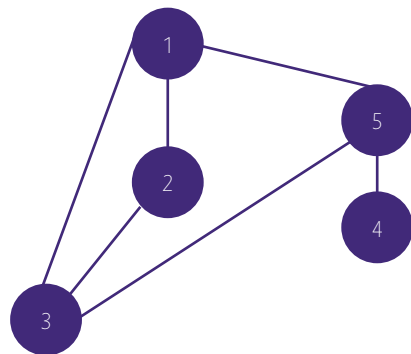
el efecto de implementación de tecnología (1) tiene mayor relación y dominio en el sistema a modelar.

Con el propósito de realizar un análisis en el diagrama de relaciones, se diseña una matriz de incidencia que se presenta en la Ecuación 2. Cada columna en la matriz de incidencia corresponde a un efecto y sus relaciones. El valor de uno denota la relación con otro efecto, de lo contrario se presenta un valor cero. El vector de estado representa la presencia de cada efecto. En la Ecuación 2 el resultado de la matriz de incidencia y el vector de estado exhibe la mayor relación de la implementación de tecnología con un valor de tres. En contraste, el efecto del inventario de la materia prima y capacidad productiva muestran una relación con valor de dos. Esto se debe a la relación estrecha entre la capacidad productiva y la materia prima empleada en el proceso. El efecto de calidad relacionado con el índice de trazabilidad tiene un efecto con valor de uno debido a su relación con la adopción de tecnología de trazabilidad.

$$[1 \ 1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [3 \ 2 \ 2 \ 1] \quad (2)$$

En conclusión, los efectos con mayor relación según la estructura de análisis de relación de variables y efectos son el efecto de implementación de tecnología (1), el flujo de producción, almacenamiento y demanda (3) y la capacidad productiva (infraestructura) (4), como se ilustra en la Figura 20.

Figura 20. Grafo de relaciones de efectos del sistema modelado



- (1) Implementación de tecnología de trazabilidad
- (2) Inventarios de materia prima y calidad
- (3) Flujos de producción, almacenamiento y demanda
- (4) Recurso humano
- (5) Capacidad productiva (infraestructura)

Fuente: elaboración propia.

A través de los mapas cognitivos se analizó la estructura de relaciones de los efectos y su incidencia entre las variables con el propósito de entender mejor la estructura del modelo desarrollado. A continuación, se presenta el diseño del mapa de los sectores de simulación, el cual permite mostrar la estructura y relación con los efectos y variables de estudio del sistema.

2.3.3. Diseño del mapa de sectores de simulación

El mapa de sectores de simulación tiene como objetivo mostrar la estructura general del modelo simulado. Este presenta una correlación con los efectos y las variables de estudio. La estructura del mapa de sectores de simulación comprende dos aspectos importantes generados a partir de los efectos del modelo a simular: cadena agroindustrial y gestión de tecnología. Estos a su vez se encuentran estructurados en cinco sectores que describen el comportamiento del sistema de simulación en la cadena agroindustrial. La estructura del mapa de sectores de simulación se presenta en la Figura 21.

Figura 21. Estructura de sectores del modelo simulado



Fuente: elaboración propia.

La convergencia de los efectos en los sectores de simulación diseñados se presenta en el flujo de información, es decir que los efectos que se estudian en los sectores adyacentes tienen interrelación a través de la información apoyada en la tecnología, tal y como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Estructura de sectores del modelo simulado



Fuente: elaboración propia.

La convergencia en los efectos estudiados y la estructura de sectores de simulación son necesarias en el diseño del modelo para validar la estructura de simulación que se utiliza.

2.3.4. Construcción del diagrama de simulación

La estructura de simulación para la cadena agroindustrial implica la agregación de unidades. Debido a los cambios de estado entre los actores de la cadena agroindustrial frutícola, la agregación de las unidades en la estructura es fundamental, así como el diseño a través del diagrama de stock y flujos. Es decir, el intercambio en el flujo de material a lo largo de la cadena agroindustrial sufre transformaciones: de kilogramos de fruta fresca a litros de jugo, por ejemplo.

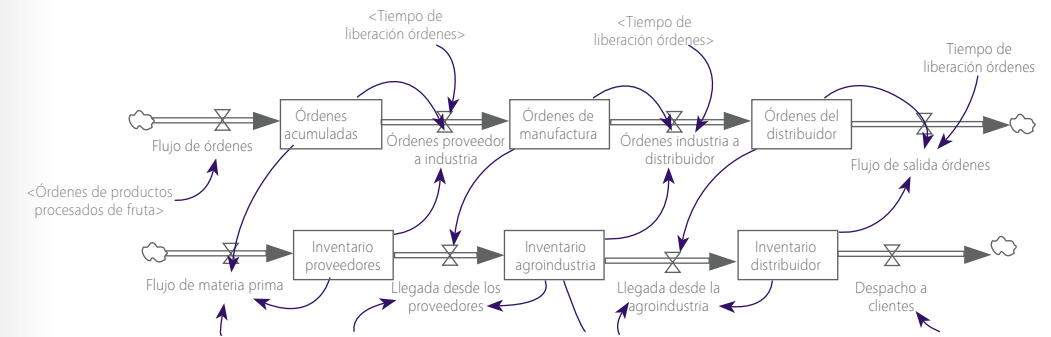
El uso de diversas variables y la estructura no armónica podría generar comportamientos de caos en el sistema analizado (Sterman, 1984). En este sentido, el desarrollo de un modelo de simulación a través de la dinámica de sistemas permite dar respuesta y validez a determinada situación de comportamiento complejo. El presente texto propone una estructura de modelado en cadenas, el cual es adecuado en la representación de los flujos de material e información en la cadena agroindustrial frutícola (Georgiadis, Vlachos y Iakovou, 2005; Orjuela-Castro et al., 2017; Sterman, 2000). En la Figura 23 se presenta la estructura de modelamiento del diagrama de stock y flujos para la cadena agroindustrial frutícola. Esta estructura muestra el flujo de

información representado en los flujos de órdenes asociadas a los cambios de estado para cada actor de la cadena agroindustrial. Por otra parte, la estructura muestra el flujo de material asociado con los inventarios a lo largo de la cadena agroindustrial de frutas.

La estructura de modelado también presenta importantes controladores del desempeño de la gestión de la cadena agroindustrial. En este sentido, la demanda de productos procesados de fruta jalona el sistema de abastecimiento a lo largo de la cadena, así como el tiempo de liberación de órdenes. Este último representa uno de los retardos del sistema de abastecimiento de la cadena agroindustrial frutícola. Esta variable auxiliar es un componente importante en el modelado de la simulación con dinámica de sistemas.

Otro aspecto importante está relacionado con los ciclos de realimentación entre las órdenes y los flujos de material, así como con los inventarios con los flujos de órdenes representados por los conectores (flechas).

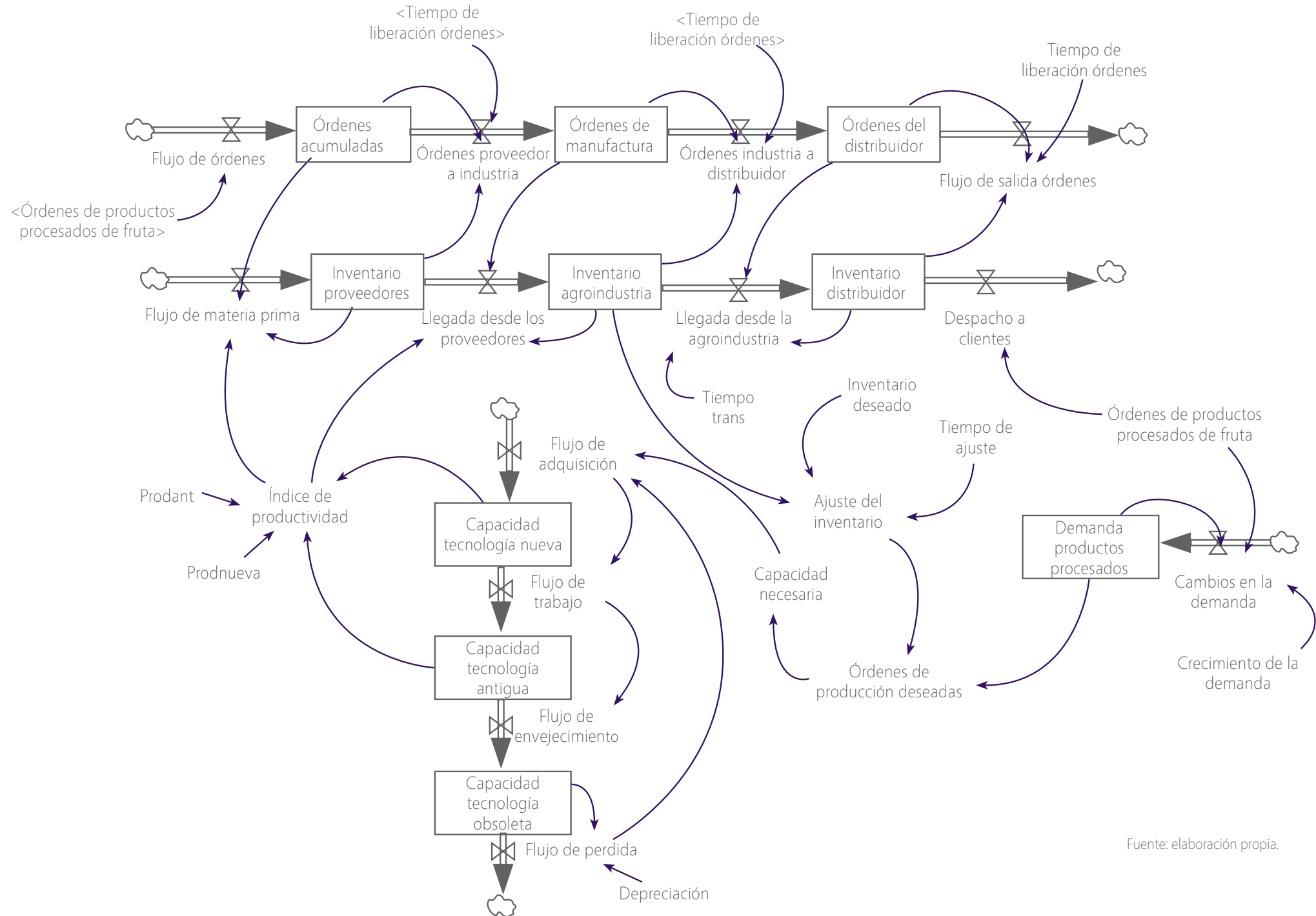
Figura 23. Estructura de modelado para la cadena agroindustrial de frutas: flujo de información y material



Fuente: elaboración propia.

La Figura 24 presenta la estructura de modelado para la cadena agroindustrial de frutas que contempla los flujos de cambios tecnológicos y la heurística para calcular la capacidad necesaria. La heurística determina la capacidad necesaria a través del inventario ajustado y la demanda de productos procesados de fruta. En este sentido, la capacidad necesaria permite activar el flujo de adquisición de tecnología de producción.

Figura 24. Estructura de modelado para la cadena agroindustrial de frutas: flujo de tecnología y heurística de capacidad necesaria



Fuente: elaboración propia.

2.3.5. Validación de los modelos de dinámica de sistemas

La validación del modelo de simulación se realiza a través de medidas estadísticas que representan la fiabilidad de aquel. En este sentido, las técnicas estadísticas de validación empleadas en el modelo son las propuestas por Sterman (1984) y Oliva (2003). La Tabla 5 presenta la validación de los datos históricos en comparación con los resultados de simulación para un período de un año. Los indicadores obtenidos muestran un error del 3% (MAPE) y un porcentaje de confianza del modelo de simulación del 96%. Estos datos indican la confiabilidad del modelo empleado para evaluar la dinámica de la tecnología en la cadena agroindustrial de frutas.

Tabla 5. Validación del modelo de simulación

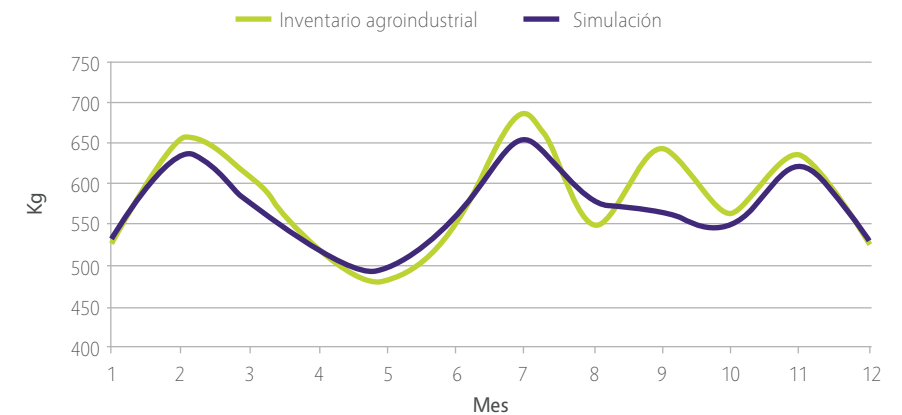
| Mes | Inventario agroindustria (Kg) | Simulación | Error acumulado | Error absoluto | Error porcentual | Error cuadrático |
|------------------|-------------------------------|------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|
| 1 | 523 | 530 | -7 | 7 | 0,013384321 | 49 |
| 2 | 653 | 635 | 18 | 18 | 0,027565084 | 324 |
| 3 | 607 | 583 | 24 | 24 | 0,039538715 | 576 |
| 4 | 519 | 520 | -1 | 1 | 0,001926782 | 1 |
| 5 | 484 | 495 | -11 | 11 | 0,022727273 | 121 |
| 6 | 546 | 562 | -16 | 16 | 0,029304029 | 256 |
| 7 | 689 | 654 | 35 | 35 | 0,050798258 | 1225 |
| 8 | 548 | 585 | -37 | 37 | 0,067518248 | 1369 |
| 9 | 646 | 567 | 79 | 79 | 0,122291022 | 6241 |
| 10 | 566 | 552 | 14 | 14 | 0,024734982 | 196 |
| 11 | 635 | 620 | 15 | 15 | 0,023622047 | 225 |
| 12 | 528 | 530 | -2 | 2 | 0,003787879 | 4 |
| Promedio | 578,66 | 569,41 | 111 | 259 | 0,427198641 | 10587 |
| Desv Stan | 65,06 | 48,51 | | | | |

| | |
|------------------|-------------|
| MAPE | 0,035599887 |
| R^2 | 0,820289217 |
| Confianza | 96% |

Fuente: elaboración propia.

La Figura 25 presenta los comportamientos de simulación en comparación con los datos históricos de los inventarios de la agroindustria en el caso del mango. Los comportamientos presentan pocas diferencias que permitan determinar la confianza en el modelo desarrollado. En el siguiente capítulo se presenta un caso aplicado en la planeación de tecnología de trazabilidad en la cadena agroindustrial.

Figura 25. Comportamientos de la validación del modelo de simulación



Fuente: elaboración propia.



GAPITULO 3

CAP. 3

Planeación de tecnología de trazabilidad
en la cadena agroindustrial de frutas

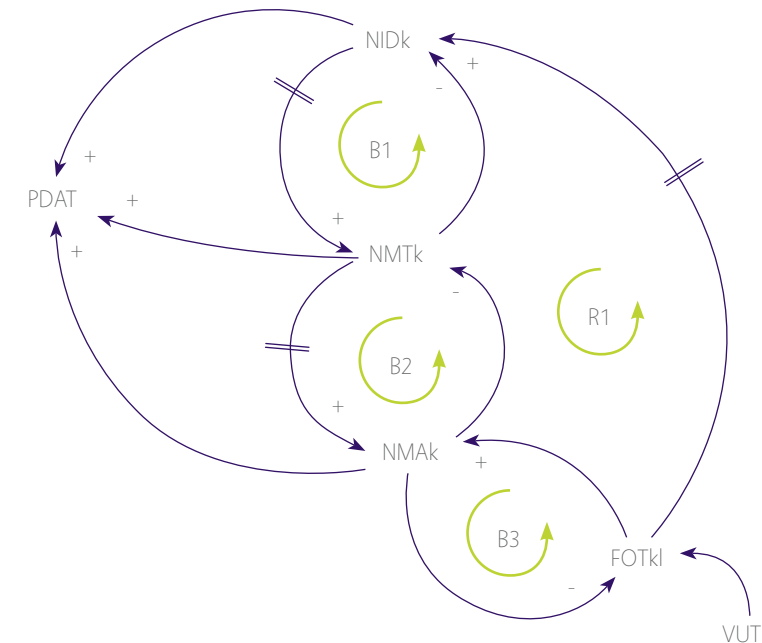
La cadena agroindustrial frutícola implica múltiples relaciones entre los actores caracterizadas por un alto grado de complejidad. La simulación con dinámica de sistemas permite modelar este tipo de relaciones. En este sentido, el uso de la simulación para experimentar diferentes procesos ha favorecido en la reducción de los costos de inversión para la adopción de tecnologías de trazabilidad (Chen, 2011; De Marco, Cagliano, Nervo, y Rafele, 2012). Sin embargo, los efectos del comportamiento dinámico de la adopción tecnológica utilizada para la trazabilidad sobre el desempeño de la cadena agroindustrial de frutas no han sido suficientemente estudiados. Este capítulo presenta el modelamiento de planeación de tecnología de trazabilidad RFID y código de barras con la metodología de dinámica de sistemas. Estas tecnologías representan el mayor uso en la industria en la actualidad. El modelo propuesto se soporta en la estructura de análisis expuesta en el capítulo anterior.

3.1. Hipótesis dinámica

El crecimiento de las organizaciones conlleva cambios en los procesos, los cuales requieren de un análisis del impacto en la calidad de los productos procesados de las frutas. La expansión de los mercados y las necesidades tecnológicas asociadas a las especificaciones de los productos requieren de inversiones que contemplen la inclusión de tecnología.

La Figura 26 representa la hipótesis dinámica del comportamiento de la tecnología de trazabilidad y su efecto sobre la política de adopción tecnológica. El nivel de desarrollo tecnológico (NIDk) determina la nueva tecnología de trazabilidad que se adoptará, por lo tanto, afecta el nivel de tecnología de trazabilidad actual (NMTk) que posee la cadena agroindustrial de frutas, formando así un bucle de balance (B1). El efecto de la obsolescencia tecnológica afecta el nivel de la tecnología actual. Como consecuencia, la tecnología actual en el mercado se convierte a largo plazo en tecnología obsoleta (NMAk), representada en el bucle de balance (B2). La obsolescencia tecnológica está asociada al flujo de obsolescencia (FOTkI), es decir a la vida útil de la tecnología (VUT) empleada, como se presenta en el bucle de balance (B3). El bucle de refuerzo (R1) representa la necesidad de nueva tecnología a causa de la tasa de obsolescencia. Este efecto muestra el impacto de las demoras en la dinámica del mercado tecnológico de la cadena agroindustrial frutícola. Los estados de la tecnología de trazabilidad en la cadena agroindustrial de frutas (NIDk, NMTk y NMAk) afectan la política de adopción e inversión de tecnología PDAT (Figura 26).

Figura 26. Hipótesis dinámica de gestión de tecnología de trazabilidad en cadenas agroindustriales frutícolas



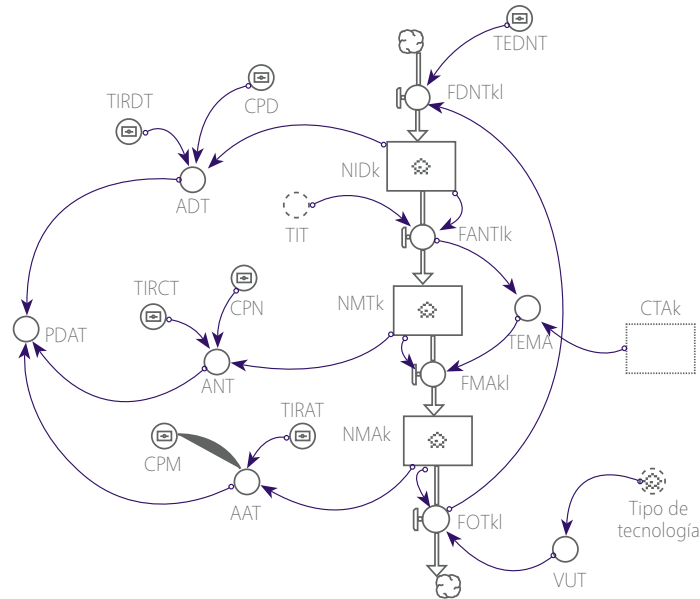
Fuente: elaboración propia.

Por tanto, mediante el diseño de un modelo de simulación con dinámica de sistemas se pueden determinar los comportamientos de diferentes estados tecnológicos en la cadena agroindustrial con el fin de entender mejor la política de adopción e inversión tecnológica que afecta a las organizaciones en términos de la logística. En este sentido, el siguiente subcapítulo presenta un modelo de simulación del comportamiento de los diferentes niveles tecnológicos de la cadena agroindustrial.

3.2. Modelo simulado

La Figura 27 presenta el diagrama de stock y flujos que representa los cambios de estado de las tecnologías en la cadena agroindustrial de frutas. Este diagrama abarca las políticas de decisión para la inversión y adopción de tecnología. El modelo de simulación contempla la estructura desarrollada en la hipótesis dinámica. Es decir, los niveles (stocks) representan la dinámica de cambios tecnológicos. Estos niveles están asociados a la política de adopción e inversión.

Figura 27. Diagrama de stock y flujos para la simulación de la dinámica del mercado de tecnología de trazabilidad



Fuente: elaboración propia.

Los cambios de tecnología de trazabilidad traen consigo flujos que permiten la variación entre los estados. Estos flujos en el modelo son: flujo de desarrollo de nueva tecnología (FDNTk), flujo de adopción de nueva tecnología (FANTk), flujo de mantenimiento de tecnología (FMAk) y flujo de obsolescencia de tecnología (FOTk). En este sentido, los flujos estarán asociados a tiempos que regulan el cambio tecnológico: tiempo empleado en el desarrollo de nueva tecnología (TEDNT), tiempo de implementación de tecnología (TIT) y vida útil de la tecnología (VUT).

Por otra parte, los niveles del comportamiento generan las diferentes alternativas de selección tecnológica: adopción de nueva tecnología (ANT), desarrollo de tecnología (ADT) y adaptación de tecnología (AAT). Estas alternativas son evaluadas de acuerdo al comportamiento de los estados tecnológicos, el costo de cada alternativa (CPD, CPN y CPM) y la tasa interna de retorno (TIRCT, TIRDT y TIRAT). Por tanto, la política de adopción e inversión (PDAT) estará dada por la Ecuación 3. Esta ecuación determina el mayor valor de beneficio económico entre las tres alternativas:

$$PDAT = \text{MAX}(ANT, ADT, AAT) \quad (3)$$

A continuación, se presenta el modelamiento matemático extendido que se utilizó en el modelo de simulación.

3.3. Modelamiento matemático

El modelamiento matemático del sistema de simulación con dinámica de sistemas comprende las variables de nivel, de flujo y auxiliares. Este modelamiento se realizó a partir de datos suministrados por una compañía dedicada al procesamiento de fruta. Las ecuaciones que se describen en la Tabla 6 corresponden a las variables de flujo, de estado y auxiliares.

Tabla 6. Relación de ecuaciones matemáticas empleadas en el modelo de simulación

$$NIDk(t) = NIDk(t - dt) + (FDNTk - FANTk) * dt$$

$$INIT NIDk = 10$$

INFLOWS:

$$FDNTk = \text{DELAY3}(FOTk, TEDNT)$$

OUTFLOWS:

$$FANTk = NIDk/TIT$$

$$NMAk(t) = NMAk(t - dt) + (FMAk - FOTk) * dt$$

$$INIT NMAk = 50$$

INFLOWS:

$$FMAk = NMTk/TEMA$$

OUTFLOWS:

$$FOTk = NMAk/VUT$$

$$NMTk(t) = NMTk(t - dt) + (FANTk - FMAk) * dt$$

$$INIT NMTk = 40$$

INFLOWS:

$$FANTk = NIDk/TIT$$

OUTFLOWS:

$$FMAk = NMTk/TEMA$$

$$VPNDk(t) = VPNDk(t - dt) + (FVPNDk - FIDk) * dt$$

$$INIT VPNDk = 100$$

INFLOWS:

$$FVPNDk = NPV(CITDk/TID, TOD)$$

OUTFLOWS:

$$FIDk = VPNDk/TID$$

$$VPNSk(t) = VPNSk(t - dt) + (FVPNSkI - FISIk) * dt$$

$$INIT VPNSk = 500$$

INFLOWS:

$$FVPNSkI = NPV(CITSk/TIS,TOS)$$

OUTFLOWS:

$$FISIk = VPNSk/TIS$$

$$VPNTk(t) = VPNTk(t - dt) + (FVPNTkI - FITIk) * dt$$

$$INIT VPNTk = 200$$

INFLOWS:

$$FVPNTkI = NPV(CITTk/TIPT,TOT)$$

OUTFLOWS:

$$FITIk = VPNTk/TIPT$$

$$AAT = NPV(NMAk*CPM,TIRAT)$$

$$ADT = NPV(NIDk*CPD, TIRDT)$$

$$ANT = NPV(NMTk*CPN,TIRCT)$$

$$CPD = 30$$

$$CPM = 35$$

$$CPN = 20$$

$$DED = IF VCD=96 THEN 0.192 ELSE IF VCD=32 THEN 0.064 ELSE IF VCD=56 THEN 0.112 ELSE IF 0<VCD<1 THEN PRHP ELSE VCD$$

$$PDAT = MAX(AAT,ADT,ANT)$$

$$PDST = FORCST(PIFI,PSIFI,PSIFM)$$

$$PIFI = IF MAX(VPNDk,VPNSk,VPNTk)=VPNSk THEN 1 ELSE IF MAX(VPNDk, VPNSk, VPNTk)=VPNTk THEN 2 ELSE IF MAX(VPNDk,VPNSk, VPNTk)=VPNDk THEN 3 ELSE 0$$

$$PSIFI = IF MIN(CFIDk,CFISK,CFITk)=CFISK THEN 1 ELSE IF MIN(CFIDk,CFISK,CFITk)=CFITk THEN 2 ELSE IF MIN(CFIDk,CFISK,CFITk)=CFIDk THEN 3 ELSE 0$$

$$PSIFM = IF MIN(CFMDk,CFMSk,CFMTk)=CFMSk THEN 1 ELSE IF MIN(CFMDk,CFMSk,CFMTk) = CFMTk THEN 2 ELSE IF MIN(CFMDk,CFMSk,CFMTk)=CFMDk THEN 3 ELSE 0$$

$$RRH = IF Type_of__Technology=1 THEN 0 ELSE IF Type_of__Technology=2 THEN 5 ELSE IF Type_of__Technology=3 THEN 3 ELSE IF Type_of__Technology=4 THEN 8 ELSE 0$$

$$TEDNT = 48$$

$$TEMA = CTak/FANTIk$$

$$TID = 2$$

$$TIPT = 9$$

$$TIRAT = 0.09$$

$$TIRCT = 0.008$$

$$TIRDT = 0.08$$

$$TIS = 2$$

$$TIT = IF Type_of__Technology=1 THEN 4 ELSE IF Type_of__Technology=2 THEN 3 ELSE IF Type_of__Technology=3 THEN 3 ELSE IF Type_of__Technology=4 THEN 2 ELSE 0$$

$$TOD = 0.04$$

$$TOS = 0.05$$

$$TOT = 0.05$$

$$TTDMP = 1$$

$$TTDPD = 1$$

$$TTDPT = 0.7$$

$$Type_of_Technology = 3$$

$$VCD = IF Type_of__Technology=1 THEN 96 ELSE IF Type_of__Technology=2 THEN 32 ELSE IF Type_of__Technology=3 THEN 56 ELSE IF Type_of__Technology=4 THEN PRHP ELSE 0$$

$$VUT = IF Type_of__Technology=1 THEN 10 ELSE IF Type_of__Technology=2 THEN 8 ELSE IF Type_of__Technology=3 THEN 5 ELSE IF Type_of__Technology=4 THEN 0 ELSE 0$$

Fuente: elaboración propia.

3.4. Análisis dimensional

El análisis dimensional permite comprobar que el modelo matemático es consistente con las unidades de medida del caso real. También, permite contrastar el diseño del modelo en el aspecto matemático y computacional. En la Tabla 7 se

presentan las variables de estado (nivel) y de flujo (tasas) utilizadas en el modelo junto con las respectivas unidades de medida y nomenclatura de modelamiento.

Tabla 7. Verificación dimensional de las unidades del modelo de simulación

| Variables | Descripción | Unidad de medida |
|-----------|---|------------------------------|
| NIDk | Nivel del comportamiento de nueva tecnología | Unidad tecnológica |
| NMTk | Nivel de comportamiento de la tecnología del mercado actual | |
| NMAk | Nivel de comportamiento de mantenimiento y adopción de tecnología | |
| FDNTk | Flujo de desarrollo de nueva tecnología de trazabilidad | Unidades tecnológicas/semana |
| FANTk | Flujo de adopción de nueva tecnología | |
| FMAk | Flujo de mantenimiento de tecnología de trazabilidad | |
| FOTk | Flujo de obsolescencia de tecnología de trazabilidad | |

Fuente: elaboración propia.

La validación dimensional en el modelo de simulación se comprueba a través de la verificación de la consistencia entre las unidades de medida de las variables de nivel y las tasas (variables de flujo) de entrada y salida. Las variables de flujo se caracterizan por estar evaluadas en función del tiempo (funciones derivadas), y se relacionan con los niveles (acumuladores) en unidades apropiadas para el procedimiento matemático (integración) de la función de entrada y salida.

En el siguiente subcapítulo se presentan los resultados de la política de adopción e inversión de acuerdo a los comportamientos de los cambios en los estados de la tecnología de trazabilidad.

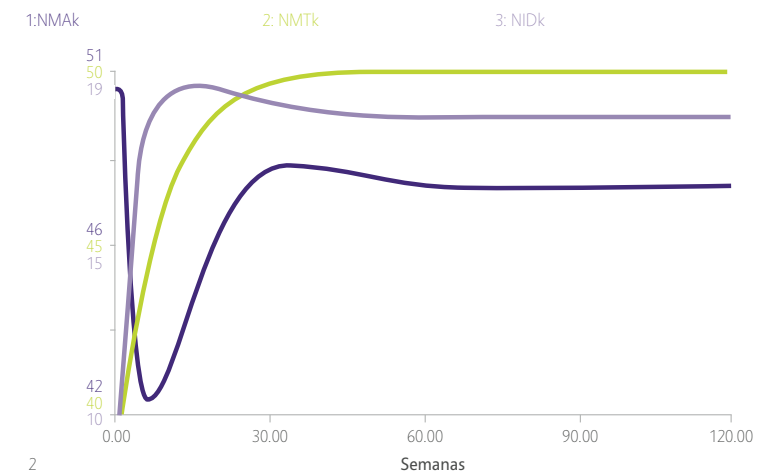
3.5. Resultados del modelo de simulación

En la Figura 28 se presentan los resultados de acuerdo a las políticas de tecnología seleccionadas. La Figura 28a presenta los resultados de los comportamientos en cada estado para la tecnología de trazabilidad del código de barras. Los resultados presentan un crecimiento mayor para las tecnologías actuales del mercado, así como para las que pasan a un estado de adopción o mantenimiento. Un menor crecimiento se presenta para el desarrollo o investigación en la tecnología de trazabilidad de código de barras. Estos resultados confirman la elección y tendencia de selección actual de los códigos de barras, en particular para la agroindustria de las frutas. Sin embargo, en la medida que transcurren los años, la tecnología RFID (identificación por radiofrecuencia) podría

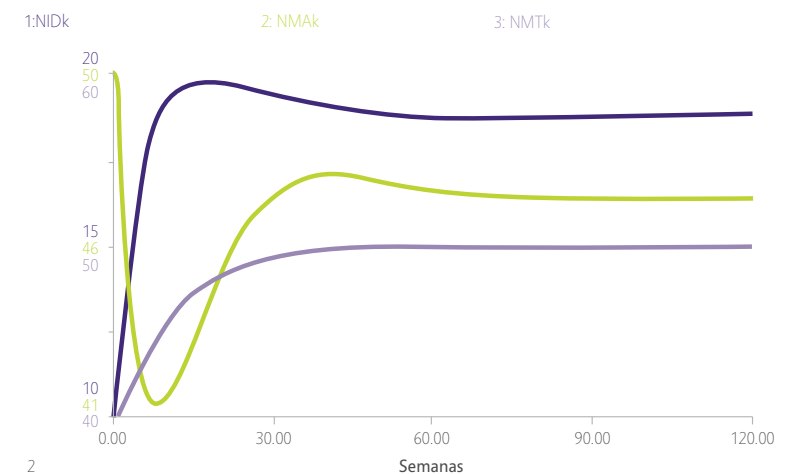
tener mayor adopción en la cadena agroindustrial. En este sentido, varios estudios han demostrado los impactos de la adopción de RFID (De Marco et al., 2012). En el caso de la tecnología RFID, los comportamientos de los estados tecnológicos muestran una tendencia de aumento significativa de adopción en el mercado actual de la cadena agroindustrial (Figura 28b). Sin embargo, se evidencia un bajo crecimiento de la disposición al desarrollo o investigación en esta tecnología de trazabilidad.

Figura 28. Resultados del comportamiento de los estados de tecnologías de trazabilidad.

(a) Comportamiento de los cambios de estado de la tecnología de trazabilidad con código de barras



(b) Comportamiento de los cambios de estado de la tecnología de trazabilidad con RFID



Fuente: elaboración propia.

El desempeño de la tecnología de trazabilidad se trazó teniendo en cuenta la relación del inventario en cada uno de los eslabones de la cadena agroindustrial y el tiempo de trazabilidad empleado por la tecnología. Esta relación es propuesta por Herrera (2014). La Tabla 8 presenta los resultados de desempeño de la tecnología a lo largo de la cadena agroindustrial. En el caso de la tecnología de trazabilidad RFID, el rendimiento es mayor para los eslabones. En contraste, los códigos de barras, aunque presentan un rendimiento más bajo que la tecnología RFID, no manifiestan una diferencia significativa en la medida de rendimiento. Sin embargo, en el eslabón de distribución, la diferencia de desempeño entre la tecnología RFID y el código de barras es más significativo. Esto se debe a que, en el eslabón de distribución, y particularmente en las operaciones logísticas de transporte y almacenamiento, hay una mayor aceptación y aplicación de la tecnología RFID. Estos resultados evidencian la necesidad de un diseño de políticas de adopción de tecnología RFID que permitan recuperar las inversiones y disminuir en el tiempo los costos de mantenimiento y obsolescencia de los equipos tecnológicos empleados en las operaciones de trazabilidad.

Tabla 8. Resultados de desempeño de tecnología por actores de la cadena agroindustrial de frutas

| Eslabones | Desempeño tecnología de trazabilidad (%) | |
|----------------|--|------|
| | Código de barras | RFID |
| Proveedores | 47 | 49 |
| Agroindustria | 25 | 28 |
| Distribuidores | 40 | 45 |

Fuente: elaboración propia.

La política de adopción de tecnología debe contemplar los retornos de la inversión y el análisis de los cambios de estado de la tecnología empleada en operaciones logísticas. La Tabla 9 presenta los resultados de la adopción de tecnología de acuerdo al retorno de inversión que genera la alternativa tecnológica. A ese respecto, los resultados indican que la mejor alternativa se encuentra en la compra de tecnología. Aunque la tecnología RFID presenta mejores desempeños, la adopción de códigos de barra muestra un mejor retorno de la inversión. Esto se debe al bajo costo de la tecnología de código de barras en comparación con la tecnología RFID, así como a las demoras asociadas en la adopción tecnológica. En este sentido, estudios previos sobre la adopción de tecnología de trazabilidad RFID coinciden en identificar el impacto del tiempo en los proyectos de implementación (Chen, 2011).

Tabla 9. Resultados de política de adopción tecnológica: alternativas de selección de tecnología

| Alternativa tecnológica | Retorno de la alternativa tecnológica (\$USD) | |
|--------------------------|---|----------------------|
| | Código de barras | RFID |
| Compra | 124418 | 123985 |
| Desarrollo | 7034 | 7237 |
| Adaptación | 20316 | 20074 |
| Mejor alternativa | Compra de tecnología | Compra de tecnología |

Fuente: elaboración propia.

Como resultado del análisis de los cambios tecnológicos, la cadena agroindustrial frutícola debería adoptar políticas de gestión tecnológica que permitan la coordinación entre los eslabones de la cadena. Igualmente, futuros trabajos pueden orientarse hacia el análisis de la red de la cadena de abastecimiento (*supply chain network*), contribuyendo así a una mejor configuración y diseño de la red. De hecho, ya otros estudios han mostrado la importancia del diseño y configuración de la red de la cadena de abastecimiento (Cheng, Chen y Chen, 2014).



GAFTUO

CAP. 4

Modelamiento de la tecnología de embalaje
en la cadena agroindustrial de frutas

La dinámica del mercado en la cadena agroindustrial de frutas requiere de un análisis de la tecnología de embalaje utilizada por cada actor de la cadena. El modelamiento con dinámica de sistemas permite entender los comportamientos asincrónicos de los inventarios causados por los tiempos de empaque y embalaje en la cadena de abastecimientos. El modelo desarrollado en este capítulo fue modificado a partir del estudio previo llevado a cabo por Orjuela-Castro et al. (2017).

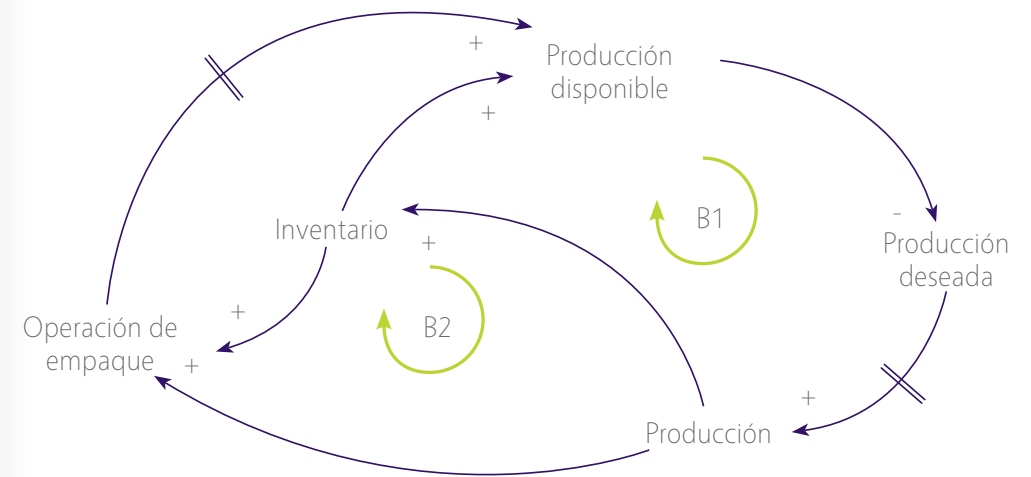
Un aspecto importante en la cadena agroindustrial de las frutas está asociado con las diferentes tecnologías de empaque y embalaje empleadas. Esto se debe a los cambios de estado en el procesamiento y transporte de frutas. Por tanto, el tiempo empleado en el empaque y embalaje a lo largo de la cadena agroindustrial de frutas genera un impacto en los inventarios de los actores.

4.1. Hipótesis dinámica

La hipótesis dinámica para este caso se presenta en la Figura 29. La producción disponible afecta la producción deseada, la cual implica un retraso en la tasa de producción asociada al inventario de los actores de la cadena. Es así como se genera el bucle (B1). En el caso del bucle de refuerzo (B2), la tasa de producción y los inventarios afectan las operaciones de alistamiento que implican diferentes tipos de tecnologías de empaque. Por tanto, el tiempo empleado en las operaciones de empaque y embalaje afectará la producción disponible, conformando así el bucle de balance (B2).

Los efectos del tiempo de empaque y embalaje sobre la producción disponible afectan los inventarios de los actores de la cadena. Este efecto produce diferencias en los inventarios, que a su vez afectan la demanda. En este sentido, la estructura del modelo simulado se presenta en el siguiente subcapítulo. Esta estructura se basa en la propuesta presentada en el capítulo 3 y en estudios previos de asimetría en la cadena agroindustrial (Orjuela-Castro et al., 2017).

Figura 29. Hipótesis dinámica de los efectos de la tecnología de empaque en la producción disponible de la cadena



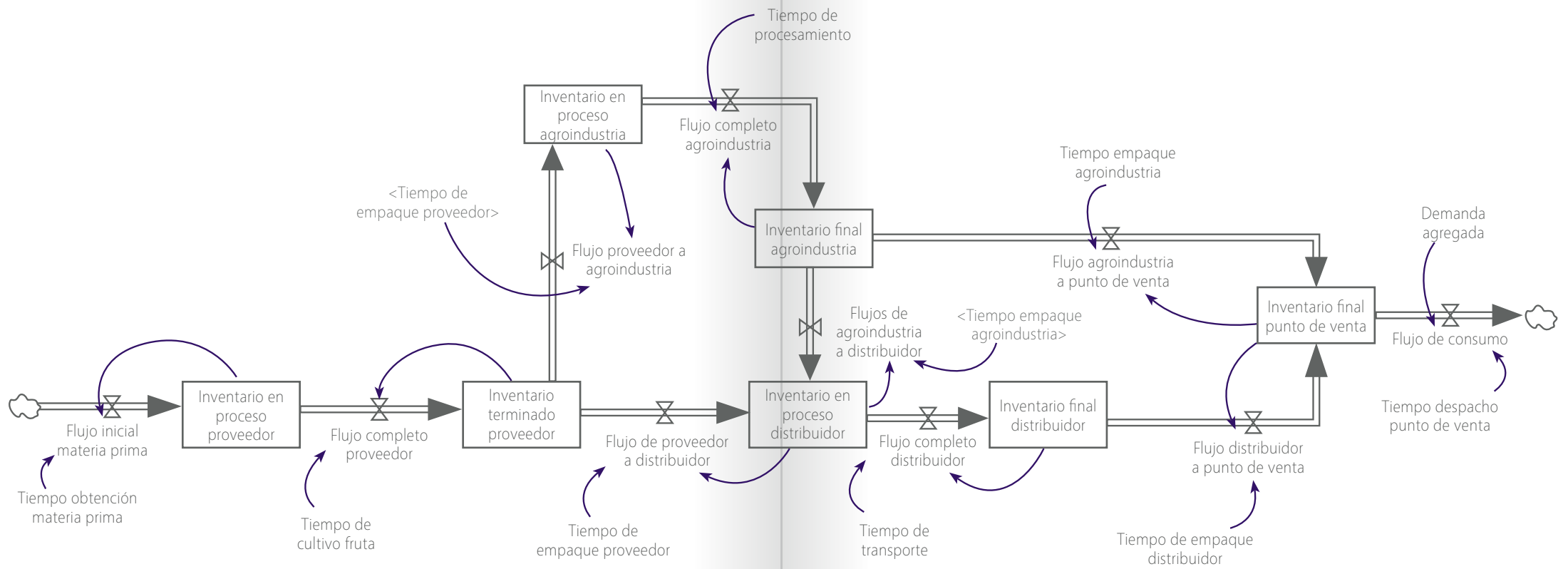
Fuente: elaboración propia.

4.2. Modelo simulado

La estructura del modelo simulado se presenta en la Figura 30. El modelo contempla el cambio de estado de los inventarios del proveedor, la agroindustria, el distribuidor y el punto de venta. Los niveles en esta estructura están regulados por el tiempo de procesamiento y alistamiento entre cada actor de la cadena. Por tanto, el modelo de simulación contempla la diferencia de los tiempos que regulan el inventario.

Aunque la estructura de simulación propuesta está compuesta por cada actor de la cadena que explica los efectos de las actividades de transporte e inventarios, de acuerdo a la configuración de la cadena productiva del mango, futuros estudios pueden estar orientados al análisis de la complejidad asociada a la ampliación de la cadena agroindustrial representada en el modelamiento de una *supply chain network*.

Figura 30. Diagrama de stock y flujos para la simulación de tecnologías de empaque



Fuente: elaboración propia.

4.3. Modelamiento matemático

El modelamiento matemático empleado en los inventarios y la demanda se muestra en la Tabla 10. Esta relación de ecuaciones presenta las funciones características utilizadas para el modelamiento a través de la dinámica de sistemas. Igualmente, presenta las unidades asociadas a cada variable del sistema simulado. La demanda agregada de la cadena agroindustrial de fruta, para el caso del mango, presenta la dinámica de órdenes de pedido realizadas en el periodo de 2016 a 2030.

Tabla 10. Relación de ecuaciones matemáticas empleadas en los inventarios y demanda del modelo de simulación

(01) Demanda agregada=

STEP(50,2016)+STEP(50,2018)+STEP(80,2020)+STEP(90,2022)+STEP(100,2024)+STEP(120,2028)+STEP(150,2030) Units: Tn

(02) Inventario en proceso agroindustria=

INTEG (Flujo proveedor a agroindustria-Flujo completo agroindustria, 190) Units: Tn

(03) Inventario en proceso distribuidor=

INTEG (Flujo de agroindustria a distribuidor + Flujo de proveedor a distribuidor-Flujo completo distribuidor,190) Units: Tn

(04) Inventario en proceso proveedor=

INTEG (Flujo inicial materia prima-Flujo completo proveedor, 150) Units: Tn

(05) Inventario final agroindustria=

INTEG (Flujo completo agroindustria-Flujo agroindustria a punto de venta-Flujo de agroindustria a distribuidor, 195) Units: Tn

(06) Inventario final distribuidor=

INTEG (Flujo completo distribuidor-Flujo distribuidor a punto de venta, 200) Units: Tn

(07) Inventario final punto de venta=

INTEG (Flujo agroindustria a punto de venta+Flujo distribuidor a punto de venta - Flujo de consumo, 250) Units: Tn

(08) Inventario terminado proveedor=

INTEG (Flujo completo proveedor-Flujo de proveedor a distribuidor-Flujo proveedor a agroindustria, 180) Units: Tn

Fuente: elaboración propia.

El modelamiento de los flujos que controlan el comportamiento del sistema analizado se presenta en la Tabla 11. Las ecuaciones muestran el efecto de retardo en el flujo que permite modelar el tiempo empleado en el empaque y alistamiento entre los niveles de los actores de la cadena. En esta medida, los flujos principales son los puntos intermedios entre los actores: flujo agroindustria a punto de venta, proveedor a distribuidor y agroindustria a distribuidor.

Tabla 11. Relación de ecuaciones matemáticas de los flujos relacionados con la tecnología de empaque de la cadena

(01) Flujo agroindustria a punto de venta=

DELAY3(Inventario final punto de venta, Tiempo empaque agroindustria)

(02) Flujo de agroindustria a distribuidor=

DELAY3(Inventario en proceso distribuidor, Tiempo empaque agroindustria)
Units: Tn/Year

(03) Flujo de proveedor a distribuidor=

DELAY3(Inventario en proceso distribuidor, Tiempo de empaque proveedor)
Units: Tn/Year

(14) Flujo distribuidor a punto de venta=

DELAY3(Inventario final punto de venta, Tiempo de empaque distribuidor)
Units: Tn/Year

(05) Flujo proveedor a agroindustria=

DELAY3(Inventario en proceso agroindustria, Tiempo de empaque proveedor)
Units: Tn/Year

Fuente: elaboración propia.

En el siguiente subcapítulo se presentan los resultados de simulación en términos del tiempo empleado por cada tecnología de empaque que cada actor de la cadena utiliza.

4.4. Resultados del modelo de simulación

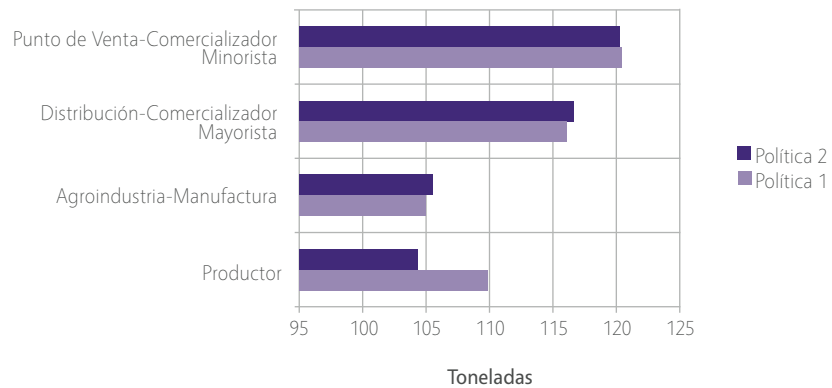
Los resultados de simulación contemplan cuatro tecnologías de embalaje: cajas corrugadas, de madera, canastillas plásticas y bultos. Se simulan los tiempos empleados para dos políticas con diferentes configuraciones tecnológicas del embalaje. En el caso de la primera política, se considera un menor tiempo de embalaje

y transporte. Para la segunda política, se presenta el caso contrario: mayor tiempo de embalaje y transporte.

En el primer caso, la configuración de la tecnología de embalaje corresponde a cajas de madera para el proveedor y agroindustria y cajas corrugadas para el distribuidor y el punto de venta. En el segundo caso, la configuración para cada actor de la cadena es: bultos, canastilla plástica, cajas corrugadas y de madera respectivamente.

El tiempo empleado para embalaje y transporte en la primera opción simulada es de 2,53 horas en promedio, y en la segunda de 3,61. La Figura 31 presenta los resultados de simulación obtenidos por cada política evaluada. A pesar de que en la primera política el tiempo de embalaje con la configuración evaluada es menor, el comportamiento de los inventarios es asíncrono. En este sentido, existe una diferencia significativa entre el productor y la agroindustria en términos del inventario. En el caso de la segunda política, la diferencia significativa se encuentra entre la agroindustria y el distribuidor. Estas diferencias son causadas por los tiempos de alistamiento asociados a las diferentes tecnologías de embalaje por actor.

Figura 31. Comportamiento de cambios de tecnología de embalaje entre actores de la cadena agroindustrial.



Fuente: elaboración propia.

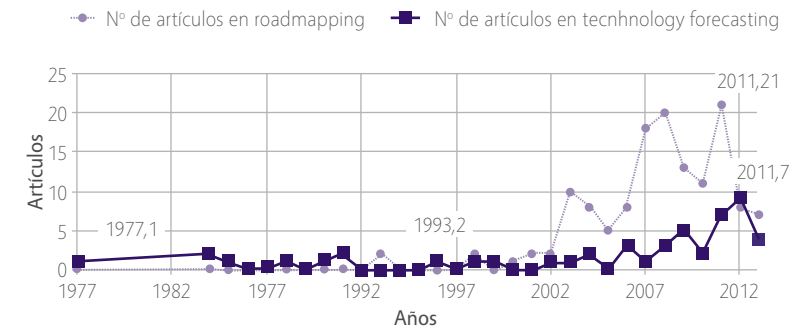
Los resultados de simulación a través de dinámica de sistemas permiten tener una visión del comportamiento de diferentes tecnologías adoptadas en la cadena agroindustrial de frutas. Por tanto, la simulación se convierte en una técnica ade-

cuada para el diseño de estrategias de evaluación de políticas relacionadas con la adopción, implementación y planeación de tecnología. En el siguiente capítulo se presenta una revisión de algunas técnicas de planeación de tecnología que contribuyen en la gestión de tecnología de las organizaciones.



CAP. 5

Otros métodos de modelamiento para la gestión estratégica de tecnología

Figura 32. Tendencia histórica de publicaciones en las técnicas de planeación *roadmapping* y *technology forecasting*. Período 1977-2013

Fuente: Herrera (2014).

El *roadmapping* se refiere a la ruta tecnológica que se desea planear con el fin de tomar decisiones en la industria de una forma sistémica. Esta es una técnica que permite a las compañías planear el crecimiento y el desarrollo tecnológico con un mayor grado de competitividad, pues desarrolla un conocimiento más amplio del entorno (“vigilancia del ambiente”) e indicadores de eficiencia individual; estos últimos relacionados con la productividad de una compañía.

Estudios previos en planeación tecnológica que utilizan *roadmapping* han abordado temas en energía (Daim, Amer y Brenden, 2012), integración de productos y servicios (Geum, Lee, Kang y Park, 2011; Geum, Lee, y Park, 2014; Lee, Geum, Lee y Park, 2012) y componentes electrónicos (Waldron et al., 2013). La primera aplicación de esta técnica se registró hace dos décadas en Motorola. Sin embargo, la diferencia en cada una de las aplicaciones radica en las variaciones metodológicas y las estrategias propuestas. En este sentido, varios estudios realizan un análisis de patentes para identificar la dinámica del mercado tecnológico, así como la proyección de tecnologías emergentes. Por otro lado, la técnica *technology forecasting* tiene como objetivo realizar la proyección de futuros tecnológicos. Algunos de los estudios con esta técnica emplean el análisis de patentes como instrumento para realizar la predicción de futuros.

Por esta vía, la vigilancia tecnológica ha sido también una de las herramientas de planeación de tecnología de mayor uso en los últimos años. El propósito esencial de la vigilancia tecnológica es la de permitir la toma de decisiones adecuadas respecto a los avances tecnológicos y científicos. Las diversas técnicas de vigilancia tecnológica desarrolladas propenden por el análisis de la información y la generación del conocimiento utilizando las bases de datos.

Los avances tecnológicos han contribuido al desarrollo social, cultural y económico. Sin embargo, también han generado problemas de obsolescencia o disminución en la vida económica de tecnologías o procedimientos, sobre todo por la forma de planeación a la hora de reemplazar la tecnología. En la planeación de tecnología se han utilizado herramientas como el *forecasting* tecnológico, el *roadmapping* y la inteligencia tecnológica.

Los primeros artículos de *technology forecasting* datan de 1977 y solo hasta 1984 se retoma nuevamente la temática en cuanto a publicaciones se refiere. La aplicación de la técnica ha crecido de forma moderada con respecto a la aplicación de *roadmapping*, que en el 2011 llegó a superar en un 66% el número de publicaciones registradas (Caetano y Amaral, 2011; Herrera, 2014). La Figura 32 presenta la dinámica de publicaciones entre las técnicas de planeación de mapa tecnológico (*roadmapping*) y proyección tecnológica (*forecasting*). La dinámica de publicaciones muestra un aumento significativo del mapa tecnológico en los últimos años.



SUPLEMENTO

SUPLEMENTO

Aplicación de técnicas para la selección de
tecnología de manipulación de materiales

Heurísticas

Las heurísticas y metaheurísticas han sido técnicas empleadas para la selección de diferentes tecnologías (Ghaderi, Pishvaei y Moini, 2016). En este sentido, de acuerdo a las tecnologías de manipulación empleadas en la cadena agroindustrial frutícola, el texto presenta una aplicación de selección de tecnología de manipulación de materiales basada en un método heurístico. Las etapas de la heurística propuesta se presentan a continuación.

1. Cálculo de la capacidad del equipo:

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Volumen máximo de carga del equipo}}{\text{Volumen del artículo}}$$

2. Cálculo de la capacidad de carga: comparar la capacidad del equipo con las unidades a transportar y determinar el número de viajes a realizar.
3. Calcular el costo total de transporte: este se determina a partir de las siguientes expresiones matemáticas:

$$CR = CCDS * CVS$$

$$CE = CCDP * CVP$$

$$CT = CR + CE$$

Donde:

CR: Costo de recepción

CCDS: Costo de cargue y descargue por semana

CVS: Costo de viaje por semana

CE: Costo de embarque

CCDP: Costo de cargue y descargue por pedido

CVP: Costo de viaje por pedido

CT: Costo total

4. Determinar el equipo para la manipulación de materiales con menor costo.

Un ejemplo, basado en datos empíricos, ilustra los pasos de la heurística propuesta. A continuación, se presenta esta aplicación:

Un almacén recibe diferentes artículos tipo A, B y C de sus proveedores una vez por semana. La información sobre las características de los materiales se puede

observar en la Tabla 12. La organización ha pensado comprar equipos para la manipulación de estos artículos. Los tamaños y los costos de estos equipos se ven reflejados en la Tabla 13. Los costos de cargue y descargue tienen incluido el costo del operario y el viaje de retorno para recoger nuevamente la carga unitaria. Por consiguiente, se debe determinar el equipo de menor costo para la operación de manipulación de los artículos.

Tabla 12. Características de los materiales

| Artículo | Volumen (pulgadas) | Distancia de la recepción (pies) | Distancia al andén de embarques (pies) | Unidades recibidas por día | Unidades embarcadas por día |
|----------|--------------------|----------------------------------|--|----------------------------|-----------------------------|
| A | 12 x 6 x 6 | 525 | 125 | 118 | 590 |
| B | 48 x 36 x 24 | 225 | 375 | 165 | 825 |
| C | 24 x 24 x 24 | 400 | 200 | 121 | 605 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Especificación de los equipos

| Equipos | Volumen máximo (pulg ³) | Costo de carga Y descarga / viaje (USD\$) | Costo por pie (ft) (USD\$) |
|---------------------------|-------------------------------------|---|----------------------------|
| Tractor con cuatro carros | 4 (60 x 27 x 72) | 1,20 | 0,010 |
| Montacargas | 48 x 48 x 48 | 0,05 | 0,007 |
| Carro manual | 60 x 27 x 72 | 0,40 | 0,005 |

Fuente: elaboración propia.

Para la solución se deben tener en cuenta los pasos antes descritos, los cuales se solucionarán para el artículo A. Para el restante de artículos el cálculo se conserva igual.

1. Cálculo de la capacidad del equipo: este se obtiene de la capacidad en volumen del equipo dividido en la unidad de carga a manipular. En el caso del tractor se obtiene los siguiente:

$$\text{Capacidad tractor} = 4 \left(\frac{60}{12} * \frac{27}{6} * \frac{72}{6} \right) = 960 \text{ unidades por viaje}$$

Es indispensable tener en cuenta que cuando el resultado de las fracciones es un decimal, este se debe truncar con el ánimo de manipular unidades

enteras. Un ejemplo de ello es que, si el resultado de una fracción es 2.5, no se podrán transportar dos unidades y media, en este caso se deben transportar dos unidades.

Para el caso del montacargas:

$$\text{Capacidad montacargas} = \left(\frac{48}{12} * \frac{48}{6} * \frac{48}{6} \right) = 256 \text{ unidades por estiba}$$

Y finalmente, el carro manual:

$$\text{Capacidad carro manual} = \left(\frac{60}{12} * \frac{27}{6} * \frac{27}{6} \right) = 240 \text{ unidades por viaje}$$

2. Cálculo capacidad de carga: comparar la capacidad del equipo con las unidades a transportar y determinar el número de viajes a realizar, como se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Capacidad de carga y número de viajes

| Equipo | Capacidad de carga | Unidades recibidas por día | Unidades embarcadas por día | Número de viajes recibidos | Número de viajes embarcados |
|--------------|--------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Tractor | 960 | 118 | 590 | 1 | 1 |
| Montacargas | 256 | 118 | 590 | 1 | 3 |
| Carro manual | 240 | 118 | 590 | 1 | 3 |

Fuente: elaboración propia.

3. Calcular el costo total de transporte:

En el caso del tractor se calcula el costo total de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{CCDS} &= (5 \text{ días}) * (\text{costo de carga y descarga por viaje}) * (1 \text{ viaje por día}) \\ \text{CVS} &= (5 \text{ días}) * (\text{costo por pie}) * (\text{pies por viaje}) * (1 \text{ viaje por día}) \\ \text{CR} &= (5 \text{ días}) * (0.20 \text{ por viaje}) + (5 \text{ días}) * (0.01 \text{ por pie}) * (525 \text{ pies}) = \$32.25 \\ \text{CCDP} &= (\text{costo de carga y descarga por viaje}) * (1 \text{ viaje}) \\ \text{CVP} &= (\text{costo por pie}) * (\text{pies por viaje}) * (1 \text{ viaje}) \\ \text{CE} &= (1.20 \text{ por viaje}) + (0.01 \text{ por pie}) * (125 \text{ pies}) = \$2.45 \\ \text{CT} &= 32.25 + 2.45 = \$34.70 \end{aligned}$$

Para el montacargas se realizan los siguientes cálculos:

$$\begin{aligned} \text{CR} &= (5 \text{ días}) * (0.05 \text{ por viaje}) + (5 \text{ días}) * (0.007 \text{ por pie}) * (525 \text{ pies}) = \$18.63 \\ \text{CE} &= (3 \text{ viajes}) * (0.05 \text{ por viaje}) + (3 \text{ viajes}) * (0.007 \text{ por pie}) * (125 \text{ pies}) = \$2.78 \\ \text{CT} &= 18.63 + 2.78 = \$21.41 \end{aligned}$$

Y para el carro manual:

$$\begin{aligned} \text{CR} &= (5 \text{ días}) * (0.40 \text{ por viaje}) + (5 \text{ días}) * (0.005 \text{ por pie}) * (525 \text{ pies}) = \$15.13 \\ \text{CE} &= (3 \text{ viajes}) * (0.05 \text{ por viaje}) + (3 \text{ viajes}) * (0.005 \text{ por pie}) * (125 \text{ pies}) = \$2.02 \\ \text{CT} &= 15.13 + 2.02 = \$17.15 \end{aligned}$$

4. Determinar el equipo para la manipulación de materiales con menor costo.

Para ello se calculan los artículos restantes de forma similar y se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Costo total en la selección de equipos

| Equipo | Artículo | | | Costo total |
|--------------|----------|-----------|--------|-------------|
| | A | B | C | |
| Tractor | 34.70 | 583.05 | 239.20 | 856.95 |
| Montacargas | 21.40 | 1779.16 | 338.20 | 2138.77 |
| Carro manual | 17.15 | No viable | 203.60 | No viable |

Fuente: elaboración propia.

Por consiguiente, el equipo a seleccionar es el tractor que representa el menor costo total.

Simulación por eventos

Una de las técnicas de mayor uso para la solución de problemas logísticos e industriales que requieren la toma de decisiones es la simulación discreta o por eventos. En el caso de la selección de tecnologías, se presenta a continuación una aplicación realizada utilizando la simulación Montecarlo.

Logística UMNG quiere evaluar la posibilidad de adquirir tecnología de manipulación para el almacenamiento de materiales. Para ello tiene en cuenta las siguientes tecnologías: apiladores, carretilla retráctil con horquillas fijas, montacargas y transelevadores. La compañía almacena varios productos unitarizados en palés los cuales llegan a la tecnología de manipulación cada 6 minutos. El número de palés recibidos muestra la siguiente distribución discreta:

| Número de palés recibidos | Probabilidad |
|---------------------------|--------------|
| 2 | 0,1 |
| 6 | 0,2 |
| 8 | 0,3 |
| 14 | 0,2 |
| 10 | 0,2 |

| Apiladores | | Carretilla retráctil | | Montacargas | | Transelevador | |
|-------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------|--|
| Packing y picking (min) | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Packing y picking (min) | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Packing y picking (min) | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Packing y picking (min) | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) |
| 21 | 50 | 21 | 50 | 21 | 50 | 21 | 50 |
| 92 | 68 | 70 | 63 | 94 | 63 | 94 | 63 |
| 93 | 95 | 93 | 95 | 93 | 95 | 93 | 95 |
| 30 | 49 | 10 | 49 | 97 | 49 | 50 | 50 |
| 20 | 78 | 20 | 68 | 20 | 68 | 20 | 68 |
| 23 | 11 | 23 | 30 | 23 | 11 | 23 | 11 |
| 28 | 90 | 28 | 40 | 28 | 40 | 30 | 40 |
| 20 | 93 | 30 | 50 | 75 | 93 | 78 | 20 |
| 95 | 61 | 90 | 61 | 95 | 61 | 95 | 61 |
| 14 | 48 | 14 | 48 | 14 | 48 | 14 | 48 |

La distribución de los tiempos de las operaciones de *picking* y *packing* y el tiempo de almacenamiento empleado por cada palé se presenta a continuación.

| Montacargas | | | | Transelevadores | | | |
|-------------------------|--------------|--|--------------|-------------------------|--------------|--|--------------|
| Packing y picking (min) | Probabilidad | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Probabilidad | Packing y picking (min) | Probabilidad | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | probabilidad |
| 1 | 0,10 | 5 | 0,10 | 1 | 0,05 | 4 | 0,20 |
| 2 | 0,20 | 6 | 0,20 | 4 | 0,15 | 3 | 0,25 |
| 3 | 0,40 | 7 | 0,30 | 3 | 0,25 | 5 | 0,30 |
| 4 | 0,20 | 8 | 0,25 | 2 | 0,45 | 6 | 0,15 |
| 5 | 0,10 | 9 | 0,15 | 5 | 0,10 | 7 | 0,10 |

Suponga que cada palé requiere el mismo tiempo de *picking* y *packing*, es decir es independiente de los palés por lote. Simule la llegada de diez lotes para las cuatro tecnologías de manipulación propuestas. Use los siguientes números aleatorios, para la llegada de los palés al almacén:

(60, 90, 96, 83, 30, 48, 21, 39, 99, 28).

En el caso de las tecnologías, los tiempos de *picking* y *packing*, como el tiempo de almacenamiento por palés se presenta en la siguiente tabla:

| Apiladores | | | | Carretilla retráctil | | | |
|-------------------------|--------------|--|--------------|-------------------------|--------------|--|--------------|
| Packing y picking (min) | Probabilidad | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Probabilidad | Packing y picking (min) | Probabilidad | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Probabilidad |
| 1 | 0,10 | 5 | 0,10 | 1 | 0,05 | 3 | 0,20 |
| 2 | 0,20 | 6 | 0,20 | 3 | 0,15 | 4 | 0,25 |
| 4 | 0,40 | 7 | 0,30 | 2 | 0,25 | 5 | 0,30 |
| 3 | 0,20 | 9 | 0,25 | 4 | 0,45 | 6 | 0,15 |
| 5 | 0,10 | 8 | 0,15 | 5 | 0,10 | 7 | 0,10 |

¿Cuál de las cuatro tecnologías de manipulación recomendaría, si el objetivo fuese identificar la que menor tiempo de almacenamiento consume en la operación?

La solución para el problema planteado con simulación Montecarlo se presenta a continuación:

- a) El cálculo inicial se realiza para el número de palés recibidos y presenta los siguientes resultados:

| Número de lote | Número aleatorio | Número de palés recibidos |
|----------------|------------------|---------------------------|
| 1 | 60 | 14 |
| 2 | 90 | 10 |
| 3 | 96 | 10 |
| 4 | 83 | 10 |
| 5 | 30 | 8 |
| 6 | 48 | 8 |
| 7 | 21 | 6 |
| 8 | 39 | 8 |
| 9 | 99 | 10 |
| 10 | 28 | 6 |

b) Los tiempos para cada tecnología son:

| Apiladores | | | | | |
|----------------|------------------|-------------------------|------------------|--|------------------------|
| Hora de inicio | Número aleatorio | Packing y picking (min) | Número aleatorio | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Tiempo acumulado (min) |
| 0,00 | 21 | 2,00 | 50 | 7 | 3,63 |
| 6,00 | 92 | 5,00 | 68 | 9 | 12,50 |
| 12,50 | 93 | 5,00 | 95 | 8 | 18,83 |
| 18,83 | 30 | 4,00 | 49 | 7 | 24,00 |
| 24,83 | 20 | 2,00 | 78 | 9 | 28,03 |
| 30,83 | 23 | 2,00 | 11 | 6 | 33,63 |
| 36,83 | 28 | 2,00 | 90 | 8 | 39,63 |
| 42,83 | 20 | 2,00 | 93 | 8 | 45,90 |
| 48,83 | 95 | 5,00 | 61 | 9 | 55,33 |
| 55,33 | 14 | 2,00 | 48 | 7 | 58,03 |

| Carretilla retráctil | | | | | |
|----------------------|------------------|-------------------------|------------------|--|------------------------|
| Hora de inicio | Número aleatorio | Packing y picking (min) | Número aleatorio | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Tiempo acumulado (min) |
| 0,00 | 21 | 2,00 | 50 | 5 | 3,17 |
| 6,00 | 70 | 4,00 | 63 | 5 | 10,83 |
| 12,00 | 93 | 5,00 | 95 | 7 | 18,17 |
| 18,17 | 10 | 3,00 | 49 | 5 | 22,00 |
| 24,17 | 20 | 2,00 | 68 | 5 | 26,83 |
| 30,17 | 23 | 2,00 | 30 | 4 | 32,70 |
| 36,17 | 28 | 2,00 | 40 | 4 | 38,57 |
| 42,17 | 30 | 2,00 | 50 | 5 | 44,83 |
| 48,17 | 90 | 5,00 | 61 | 5 | 54,00 |
| 54,17 | 14 | 3,00 | 48 | 5 | 57,67 |

| Montacargas | | | | | |
|----------------|------------------|-------------------------|------------------|--|------------------------|
| Hora de inicio | Número aleatorio | Packing y picking (min) | Número aleatorio | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Tiempo acumulado (min) |
| 0,00 | 21 | 2,00 | 50 | 7 | 3,63 |
| 6,00 | 94 | 5,00 | 63 | 8 | 12,33 |
| 12,33 | 93 | 5,00 | 95 | 9 | 18,83 |
| 18,83 | 97 | 5,00 | 49 | 7 | 25,00 |
| 25,00 | 20 | 2,00 | 68 | 8 | 28,07 |
| 31,00 | 23 | 2,00 | 11 | 6 | 33,80 |
| 37,00 | 28 | 2,00 | 40 | 7 | 39,70 |
| 43,00 | 75 | 4,00 | 93 | 9 | 48,20 |
| 49,00 | 95 | 5,00 | 61 | 8 | 55,33 |
| 55,33 | 14 | 2,00 | 48 | 7 | 58,03 |

| Transelevador | | | | | |
|----------------|------------------|-------------------------|------------------|--|------------------------|
| Hora de inicio | Número aleatorio | Packing y picking (min) | Número aleatorio | Tiempo de almacenamiento por palés (seg) | Tiempo acumulado (min) |
| 0,00 | 21 | 3,00 | 50 | 5 | 4,17 |
| 6,00 | 94 | 5,00 | 63 | 5 | 11,83 |
| 12,00 | 93 | 5,00 | 95 | 7 | 18,17 |
| 18,17 | 50 | 2,00 | 50 | 5 | 21,00 |
| 24,17 | 20 | 3,00 | 68 | 5 | 27,83 |
| 30,17 | 23 | 3,00 | 11 | 4 | 33,70 |
| 36,17 | 30 | 3,00 | 40 | 3 | 39,47 |
| 42,17 | 78 | 2,00 | 20 | 3 | 44,57 |
| 48,17 | 95 | 5,00 | 61 | 5 | 54,00 |
| 54,17 | 14 | 4,00 | 48 | 5 | 58,67 |

c) Por consiguiente, la solución tecnológica de acuerdo a los tiempos es:

| | |
|--|-------|
| Tiempo tecnología apiladores | 58,03 |
| Tiempo tecnología carretilla | 57,67 |
| Tiempo tecnología montacargas | 58,03 |
| Tiempo tecnología transelevador | 58,67 |

La tecnología a seleccionar de acuerdo con la simulación realizada es la carretilla, que presenta el menor tiempo. Sin embargo, se puede mejorar el análisis del modelo si se agrega otra variable incontrolable que relacione el costo de la inversión a realizar.

Programación dinámica

Uno de los métodos utilizados para la selección de tecnología en logística es la programación dinámica. Este método es empleado cuando se requiere dar soluciones a un problema con etapas sucesivas. El procedimiento de solución que se emplea consiste en dividir el problema en etapas y realizar un análisis de recursividad. Se presenta el siguiente ejemplo resuelto con programación dinámica.

Una compañía desea invertir en tecnologías de fabricación para el producto líder del mercado. El proveedor le ofrece tres tipos de tecnologías: A, B y C. La inversión máxima para la compra de tecnologías de la compañía es de USD\$10 millones. El proveedor ofrece cada tecnología a adquirir a un costo de uno, dos y dos millones de dólares respectivamente. Si se sabe que al comprar la tecnología A se aumenta la utilidad de la compañía en USD\$20 por tecnología implementada, en USD\$50 si se implementa la tecnología B y en USD\$60 si se implementa la C, ¿cuántas unidades tecnológicas debe adquirir la compañía para maximizar la utilidad?

A continuación, se plantea la función objetivo y la restricción asociada a la inversión planteada:

Max F(x): $20X_1 + 50X_2 + 60X_3$
 s.a. $X_1 + 2X_2 + 2X_3 \leq 10$

La primera etapa es:

1. $F_1(S) = \text{Max} [20X_1]$

| | | | | | | | | | | | | |
|----|---|----|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| S1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | F1 |
| 0 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 1 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 2 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 3 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 4 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 5 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 6 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 7 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 8 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 9 | 0 | | | | | | | | | | | 0 |
| 10 | 0 | 20 | | | | | | | | | | 20 |

La segunda etapa es:

2. $F_2(S) = \text{Max} [50X_2 + F_1(10-2X_2)]$

| | | | | | | | |
|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| S2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | F2 |
| 10 | 10 | 58 | 106 | 154 | 202 | 250 | 250 |

Y la última etapa del modelo es:

3. $F_3(S) = \text{Max} [60X_3 + F_2(10-2X_3)]$

| | | | | | | | |
|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| S3 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | F3 |
| 10 | 10 | 68 | 126 | 184 | 242 | 300 | 300 |

Por tanto, la cantidad máxima de tecnologías de procesamiento en las cuales se debe invertir son cinco, que corresponden al tipo C de acuerdo a la siguiente solución:

$X_3 = 5; X_2 = 0$ y $X_1 = 0$

Igualmente, el número de unidades tecnológicas adquiridas no sobrepasa el límite de inversión de la compañía, obteniendo así una utilidad de USD\$300.



REFERENCIAS

- Ansari, Z. N. y Kant, R. (2017). A state-of-art literature review reflecting 15 years of focus on sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 142(Part 4), 2524-2543. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.023>
- Asif, F. M., Bianchi, C., Rashid, A. y Nicolescu, C. M. (2012). Performance analysis of the closed loop supply chain. *Journal of Remanufacturing*, 2(1), 4. <http://doi.org/10.1186/2210-4690-2-4>
- Becerra, M., González, E. C., Herrera, M. M. y Romero, O. R. (2016). Collaborative Planning Capacities in Distribution Centers. En L. Zhang, X. Song, & Y. Wu (Eds.), *Theory, methodology, tools and applications for modeling and simulation of complex systems: 16th Asia Simulation Conference and SCS Autumn Simulation Multi-Conference, AsiaSim/SCS AutumnSim 2016, Beijing, China, October 8-11, 2016, Proceedings, Part I* (pp. 622-632). Singapur: Springer. http://doi.org/10.1007/978-981-10-2663-8_64
- Bianchi, C., Cosenz, F. y Marinković, M. (2015). Designing dynamic performance management systems to foster SME competitiveness according to a sustainable development perspective: empirical evidences from a case-study. *International Journal of Business Performance Management*, 16(1), 84-108. <http://doi.org/10.1504/IJBPM.2015.066042>
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J. y Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299-312. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>
- Brindley, C. y Oxborrow, L. (2014). Aligning the sustainable supply chain to green marketing needs: A case study. *Industrial Marketing Management*, 43(1), 45-55. <http://doi.org/10.1016/j.indmarman.2013.08.003>
- Caetano, M. y Amaral, D. C. (2011). Roadmapping for technology push and partnership: A contribution for open innovation environments. *Technovation*, 31(7), 320-335. <http://doi.org/10.1016/j.technovation.2011.01.005>

- Cámara de Comercio de Bogotá. (2006). *Balance tecnológico cadena productiva desarrollo de software en Bogotá y Cundinamarca*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2010). *Reporte de monitoreo sectorial Sector Alimentos preparados en México*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá.
- Campuzano, F., Mula, J. y Peidro, D. (2010). Fuzzy estimations and system dynamics for improving supply chains. *Fuzzy Sets and Systems*, 161(11), 1530-1542. <http://doi.org/10.1016/j.fss.2009.12.002>
- Canal, J. L. y Castañeda, I. J. (2012). *Caracterización de la logística de la cadena de abastecimiento agroindustrial frutícola en Colombia* (Tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Chaabane, A., Ramudhin, A. y Paquet, M. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 37-49. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.025>
- Chen, Y. (2011). Understanding technology adoption through system dynamics approach: A case study of RFID technology. *Proceedings from 2011 9th IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing* (pp. 366-371). Melbourne: IEEE Computer Society y CPS. <http://doi.org/10.1109/EUC.2011.75>
- Cheng, C.-Y., Chen, T.-L. y Chen, Y.-Y. (2014). An analysis of the structural complexity of supply chain networks. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9-10), 2328-2344. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2013.10.016>
- Daim, T. U., Amer, M. y Brenden, R. (2012). Technology Roadmapping for wind energy: Case of the Pacific Northwest. *Journal of Cleaner Production*, 20(1), 27-37. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.025>
- Davis, J. P., Eisenhardt, K. y Bingham, C. B. (2007). Developing theory through simulation methods. *Academy of Management Review*, 32(2), 480-499.
- De Marco, A., Cagliano, A. C., Nervo, M. L. y Rafele, C. (2012). Using System Dynamics to assess the impact of RFID technology on retail operations. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 333-344. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.08.009>
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J. y Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11-32. <http://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>

- FAO. (2016). *Medium-term prospects for raw materials, horticulture and tropical products*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAOSTAT. (2016). *Database of country indicators*. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/en/#country/44>
- Flynn, B. B., Huo, B. y Zhao, X. (2010). The impact of supply chain integration on performance: A contingency and configuration approach. *Journal of Operations Management*, 28(1), 58-71. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2009.06.001>
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. Cambridge, Massachussets: M.I.T. Press.
- Frostenson, M. y Prenkert, F. (2015). Sustainable supply chain management when focal firms are complex: A network perspective. *Journal of Cleaner Production*, 107, 85-94. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.034>
- Georgiadis, P. y Besiou, M. (2008). Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A System Dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1665-1678. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.019>
- Georgiadis, P., Vlachos, D. y 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. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.030>
- Geum, Y., Lee, S., Kang, D. y Park, Y. (2011). Technology roadmapping for technology-based product-service integration: A case study. *Journal of Engineering and Technology Management - JET-M*, 28(3), 128-146. <http://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2011.03.002>
- Geum, Y., Lee, S. y Park, Y. (2014). Combining technology roadmap and system dynamics simulation to support scenario-planning: A case of car-sharing service. *Computers & Industrial Engineering*, 71, 37-49. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2014.02.007>
- Ghaderi, H., Pishvaei, M. S. y Moini, A. (2016). Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis. *Industrial Crops and Products*, 94, 972-1000. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.027>
- Gunasekaran, A. y Ngai, E. W. T. (2004). Information systems in supply chain integration and management. *European Journal of Operational Research*, 159(2), 269-295. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.08.016>
- Herrera, M. M. (2014). *Modelo para la implementación de tecnología de trazabilidad RFID en la cadena de suministro frutícola en las operaciones de picking*

- bajo un enfoque integral y dinámico difuso* (Tesis de maestría). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Herrera, M. M. y Echavarría V, C. (2012). Caracterización y distribución celular del proceso de producción de forraje hidropónico. *Revista Tecnura*, 13(25), 163-173.
- Herrera, M. M. y Orjuela Castro, J. A. (2014). Perspectiva de trazabilidad en la cadena de suministros de frutas: un enfoque desde la dinámica de sistemas. *Ingeniería*, 19(2), 63-84.
- Lasprilla, D. M. (2011). Estado actual de fruticultura colombiana y perspectivas para su desarrollo. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33 (número especial), 199-205. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452011000500023>
- Lee, S., Geum, Y., Lee, H. y Park, Y. (2012). Dynamic and multidimensional measurement of product-service system (PSS) sustainability: A triple bottom line (TBL)-based system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 32, 173-182. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.032>
- Liu, S., Kasturiratne, D. y Moizer, J. (2012). A hub-and-spoke model for multi-dimensional integration of green marketing and sustainable supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 41(4), 581-588. <http://doi.org/10.1016/j.indmarman.2012.04.005>
- Mele, F. D., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L. y Bandoni, A. (2009). Optimal planning of the sustainable supply chain for sugar and bioethanol production. *Computer Aided Chemical Engineering*, 27, 597-602. [http://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70320-7](http://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70320-7)
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2008). *Boletín mensual: abastecimiento de alimentos en los principales mercados*, 2(9).
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2001). *Perspectivas Agropecuarias. Primer Semestre de 2011*. Recuperado de <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/6201/1/PERSPECTIVASPRIMERSEMESTRE2011.pdf>
- OCyT. (2015). *Indicadores de ciencia y tecnología, Colombia 2015*. Bogotá: Observatorio Colombiano de Ciencia y Tecnología. <http://doi.org/ISSN: 2323-072X>
- Oliva, R. (2003). Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. *European Journal of Operational Research*, 151(3), 552-568. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00622-7](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00622-7)

- Orjuela-Castro, J., Herrera-Ramirez, M. y Adarme-Jaimes, W. (2017). Warehousing and transportation logistics of mango in Colombia : A system dynamics model. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 26(44), 71-85. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.19053/01211129>
- Orjuela, J., Herrera, M. M. y Casilimas, W. (2015). Impact analysis of transport capacity and food safety in Bogota. *2015 Workshop on Engineering Application. International Congress of Engineering (WEA)* (pp. 7-13). Bogotá: IEEE. <http://doi.org/10.1109/WEA.2015.7370138>
- Orjuela Castro, J. A., Castañeda Calderón, C. A. y Calderón, M. E. (2008). Análisis de la cadena de valor en las estructuras productivas de uchuva y tomate de árbol en la provincia de Sumapaz y el Distrito Capital. *Ingeniería*, 13(2), 4-12.
- Pankaj, Seth, K. y Sushil. (1994). A fuzzy set theoretic approach to qualitative analysis of causal loops in system dynamics. *European Journal of Operational Research*, 78(3), 380-393.
- Petersen, K. J., Handfield, R. B. y Ragatz, G. L. (2005). Supplier integration into new product development: Coordinating product, process and supply chain design. *Journal of Operations Management*, 23(3-4), 371-388. <http://doi.org/10.1016/j.jom.2004.07.009>
- Proexport. (2012). *Abecé del TLC: Colombia-Estados Unidos*. Recuperado de http://tlc-eeuu.procolombia.co/sites/default/files/cartilla_eeuu_agosto15.pdf
- Qudrat-Ullah, H. y Seong, B. S. (2010). How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model. *Energy Policy*, 38(5), 2216-2224. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.12.009>
- Ruiz Moreno, A. F., Caicedo Otavo, A. L. y Orjuela Castro, J. A. (2015). Integración externa en las cadenas de suministro agroindustriales : Una revisión al estado del arte. *Ingeniería*, 20(2), 9-30.
- Sterman, J. D. (1984). Appropriate summary statistics for evaluating the historical fit of system dynamics models. *Dynamica*, 10 (Part II), 51-66.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston: Irwin y McGraw-Hill.
- Van Hoof, B. y Thiell, M. (2014). Collaboration capacity for sustainable supply chain management: Small and medium-sized enterprises in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 67, 239-248. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.030>

- Vargas Caleño, J. y Herrera, M. M. (2015). Comparación de técnicas de modelamiento para el control de procesos : un enfoque de aprendizaje con dinámica de sistemas. *Inventum*, 18, 37-48.
- Vermeulen, W. J. V y Kok, M. T. J. (2012). Government interventions in sustainable supply chain governance: Experience in Dutch front-running cases. *Ecological Economics*, 83, 183-196. <http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.04.006>
- Waldron, F., Foley, R., Slowey, J., Alderman, A. N., Narveson, B. C. y Ó Mathúna, S. C. (2013). Technology roadmapping for power supply in package (PSiP) and power supply on chip (PwrSoC). *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(9), 4137-4145. <http://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2227821>
- Zhang, H., Li, L., Zhou, P., Hou, J. y Qiu, Y. (2014). Subsidy modes, waste cooking oil and biofuel: Policy effectiveness and sustainable supply chains in China. *Energy Policy*, 65, 270-274. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.009>

