Conceptualización y desarrollo de un modelo administrativo basado en la teoría de la complejidad para la renovación vehicular

William Enrique León Nieto

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Económicas
Maestría en Administración de Empresas
Bogotá, D.C.
2019

Conceptualización y desarrollo de un modelo administrativo basado en la teoría de la complejidad para la renovación vehicular

William Enrique León Nieto

Trabajo final presentado como requisito para optar por el título de:

Magíster en Administración

Perfil: Investigación

Director

Julio Mario Rodríguez Devis

Codirector

Luis Alejandro Rodríguez

Línea de investigación: Gestión de operaciones

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Económicas
Maestría en Administración de Empresas
Bogotá, D.C.
2019

Agradecimientos

A mi esposa Sandra y mis dos hijos, Manuela y Gerónimo, quienes aceptaron que seguir estudiando de manera formal era un deseo irrefrenable en mi interior y me apoyaron con todo su amor y comprensión.

A mis progenitores, Ismael y Beatriz, quienes me dieron la formación que me impulsa a seguir adelante en la búsqueda del conocimiento y el amor a la humanidad.

A mi *Alma Mater*, la Universidad Nacional de Colombia. Mi deuda a este bastión de conocimiento y solidaridad en nuestro país.

A mi Director, Julio Mario Rodríguez Devis, y a mi Codirector de Tesis, Luis Alejandro Rodríguez. Cada uno de ellos, con su exigencia, paciencia y comprensión, permitieron que este proyecto se adelantara de la mejor manera posible, a pesar de todos los obstáculos.

A mi hermano Diego, quien ha estado presente, motivándome con sus logros y su ejemplo académico.

A mi gran amigo Miguel Eduardo, quien me ha retado a tener la disciplina de plasmar mis pensamientos por escrito, a sospechar de todo y de todos de manera crítica, profunda, argumentada y respetuosa, y a la búsqueda de la libertad humana como bien supremo.

A mis compañeros de estudio en esta Maestría, Iván, Paola, Gustavo, Ricardo y a todos aquellos con los que compartí en este proceso por ser parte de ese esfuerzo que emprendimos en búsqueda de mejores horizontes.

A mi mentor y compañero en Navistar Inc., Manuel Barrios por apoyar de múltiples formas la culminación de esta Maestría.

A Marthica, por sus oraciones continuas por el bienestar de mi familia y la culminación de esta Maestría.

A Martha Díaz, quien con su sapiencia y consejo me enseñó que no soy perfecto y que la búsqueda de la perfección no debe ser una obsesión, que está permitido fallar, ser un humano normal y disfrutar de la vida.

Resumen

Se busca un enfoque alternativo a los que hasta el momento se han intentado para la renovación del parque automotor de transporte de carga por carretera en Colombia, puesto que los tradicionales han resultado poco exitosos a nivel general. El marco es la investigación de operaciones, con una visión desde las ciencias de la complejidad y las herramientas que dentro de esta área se utilizan para modelar sistemas complejos.

La dinámica de sistemas es un acercamiento novedoso en Colombia para abordar al interior de empresas de transporte y sirve como punto de partida para proyectar una política pública que dinamice la renovación del parque automotor de transporte de carga pesada. La investigación es deductiva, cualitativa, documental, exploratoria y el investigador forma parte del sector del transporte.

El modelo planteado no se ha usado para este fenómeno en Colombia, por lo que el planteamiento es innovador dentro de esta industria. Hacia el futuro se propone socializar y precisar el modelo con el fin de convertirlo en un mecanismo operacional para empresas organizadas del sector del transporte. Cabe señalar que continuar con esta investigación permitirá mejorar las variables internas y las externalidades asociadas al transporte. También, desde el punto de vista formativo, empezar a estudiar el transporte y sus efectos en la sociedad utilizando la dinámica de sistemas preparará a los propietarios, gerentes y administradores de flotas para tener una visión holística de su propia actividad empresarial.

Palabras clave: *ciencias de la complejidad, transporte, dinámica de sistemas, renovación de flotas.*

Abstract

An alternative approach is sought to those that until now have been tried for the renovation of the automotive park of road freight transport in Colombia, since the traditional ones have been unsuccessful at a general level. The framework is operations research with a view from the complexity sciences and the tools that within this area are used to model Complex Systems.

System dynamics is a new approach in Colombia to address within transport companies and serves as a starting point for projecting a public policy that stimulates the renewal of the automotive fleet of heavy cargo transport. The research is deductive, qualitative, documentary and exploratory, with the researcher as part of the transport sector.

The proposed model has not been used for this phenomenon in Colombia, so the approach is innovative within this industry. Towards the future, it is proposed that the model be further socialized and precise, to turn in an operational mechanism with organized companies in the transport sector. To continue with this research allows to improve the internal variables and the externalities associated with the transport. Also, from the formative point of view, start studying transport and its effects on society using system dynamics will prepare owners, managers and fleet managers to have a holistic view of their own business activity.

Key words: *Complexity sciences, transport, system dynamics, fleet renewal*

Contenido

Introducción 1

1 Presentación de la investigación 4

1.1 Antigüedad del parque automotor y modelos de renovación 4

1.2 Problemática 10

1.3 Problema de investigación 15

1.4 Pregunta de investigación 15

1.5 Objetivos 15

1.5.1 Objetivo general 15

1.5.2 Objetivos específicos 15

1.6 Metodología de la investigación 16

1.7 Alcance de la investigación 22

2 Contexto de la investigación 23

2.1 Estado del parque automotor para transporte de carga por carretera en Colombia 23

2.2 Estructura de mercado 24

2.2.1 Propiedad de la infraestructura 25

2.2.2 Estructura empresarial 27

2.2.3 Actores relevantes en la prestación del servicio de transporte por carretera 30

2.2.4 Papel del Estado en la regulación de la actividad de las empresas 31

2.3 Costos del transporte de carga por carretera 34

2.3.1 Costos del productor 34

2.3.2 Costos del usuario 38

2.3.3 Costos externos 38

2.3.4 Costos de operación del equipo móvil 39

2.4 Función de producción 39

2.5 La demanda de transporte 42

2.6 Fijación de precios, regulación y beneficios del productor 51
3 Marco teórico para la renovación de flotas 54
3.1 Alcance 54
3.2 Algunos modelos relevantes para administración y renovación de flotas 55
3.2.1 Modelo de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y costo del ciclo de vida 55
3.2.2 Modelos estocásticos para la administración de flotas 55
3.2.3 Modelo de dinámica de sistemas 56
3.2.4 Modelo basado en el costo total de propiedad 56
3.2.5 Modelo basado en valor condicional en riesgo 57
3.2.6 VOC-HDM-4 57
3.3 Ciencias de la complejidad 58
3.3.1 Posición epistemológica de partida. 60
3.3.1.1 Complejidad según el Instituto Santa Fe 63
3.3.1.2 Complejidad según Humberto Maturana 64
3.3.1.2.1 Autopoiesis y el sistema de transporte de carga por carretera 67
3.3.1.3 Complejidad según Carlos Maldonado 68
3.3.1.4 Complejidad según Julio Mario Rodríguez Devis 70
3.3.1.5 Complejidad según Pablo Razeto, evolución de las ciencias de la complejidad y tres hitos en su desarrollo 71
3.3.1.5.1 Conceptualización de sistema complejo 75
3.3.1.5.2 Teoría del caos 77
3.3.1.5.3 Geometría fractal 78
3.4 Teoría de los sistemas y dinámica de sistemas 83
3.4.1 Teoría general de los sistemas 84
3.4.2 Dinámica de sistemas 86
3.4.3 Dinámica de sistemas y gestión de operaciones 93
3.4.4 Dinámica de sistemas y operaciones de mantenimiento 97

3.4.5 Dinámica de sistemas y operaciones de mantenimiento en flotas vehiculares 99
3.4.6 Dinámica de sistemas y renovación de camiones 102
4 Variables consideradas para el desarrollo de un modelo administrativo para la renovación de flotas 104
4.1 Costos de adquisición y financiamiento 106
4.2 Depreciación – Valor residual o de recuperación 106
4.3 Costos de operación 107
4.4 Costos de mantenimiento 107
4.5 Tiempo muerto (tiempo unidad inmovilizada) 109
4.6 Envejecimiento u obsolescencia 110
4.7 Costos de inventario 110
4.8 Costo psicológico 111
4.9 Lucro cesante 111
4.10 Ergonomía y salud ocupacional 112
4.11 Externalidades del modo carretero 115
4.11.1 Emisiones de contaminantes atmosféricos 116
4.11.2 Congestión en los principales corredores de carga 116
4.11.3 Accidentalidad vial 117
5 Modelo de renovación de flotas 119
5.1 Modelo nuclear 120
5.1.1 ¿Qué es lo más importante para una empresa de transporte? 120
5.1.2 El reemplazo de equipo 121
5.1.3 Análisis del costo de vida del vehículo 124
5.1.3.1 Fuentes de información para el análisis de ciclo de vida 124
5.1.4 Determinación del momento de reemplazo 125
5.2 Modelo basado en dinámica de sistemas para la renovación de camiones 127
5.2.1 Modelo mental para la renovación de equipos 127

6 Conclusiones, hallazgos, recomendaciones, aportes y futuras líneas de investigación ... 129

6.1 Conclusiones y hallazgos 129

6.1.1 Caracterizar los conceptos, identificar las características y estructurar las variables de los cuatro modelos clásicos y más relevantes que puedan ser usados para la renovación de flotas de carga en Colombia desde la teoría de la complejidad..... 129

6.1.2 Identificar los factores a través de los cuales se evaluarán las variables del modelo desarrollado a partir de los modelos disponibles más relevantes que puedan ser usados para la renovación de flotas de carga en Colombia..... 131

6.1.3 Establecer cuál es el modelo que bajo las condiciones colombianas puede usarse para la renovación de flotas de carga en Colombia 132

6.2 Recomendaciones 133

6.3 Aportes de la investigación 134

6.4 Futuras líneas de investigación 135

7 Referencias..... 136

Lista de tablas

Tabla 1. *Ecuaciones de búsqueda en Scopus para detección de modelos de renovación de activos. Búsquedas realizadas en mayo de 2018* 8
Tabla 2. *Resumen analítico de quince artículos con modelos para la renovación de equipos (parte 1)* 9
Tabla 3. *Resumen analítico de quince artículos con modelos para la renovación de equipos (parte 2)* 10
Tabla 4. *Resumen de búsqueda sistemática en la base de datos Scopus. Fecha de búsquedas: mayo de 2019* 19
Tabla 5. *Búsqueda sistemática en Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. Fecha de búsquedas: junio de 2019* 20
Tabla 6. *Artículos revisados para construcción conceptual de la complejidad y las variables de un modelo de renovación. Fecha de búsquedas: mayo de 2019* 20
Tabla 7. *Peso bruto de vehículos* 24
Tabla 8. *Infraestructura de transporte - modo carretero* 26
Tabla 9. *Propiedad por tipo de sociedad comercial de una muestra de tractocamiones del 2010-2018 en Colombia* 30
Tabla 10. *ICTC. Ponderación e índices total nacional y por grupos de costos (2009–2019)* 36
Tabla 11. *Ejemplos de indicadores técnicos y económicos utilizados en el transporte de carga por carretera* 41
Tabla 12. *Participación de carga y viajes por sector* 44
Tabla 13. *Escuela y autores en ciencias de la complejidad que soportaron la postura epistemológica de la investigación* 60
Tabla 14. *Resumen de búsqueda de escuela y autores en los cuales se fundamentó la aproximación a la complejidad* 62
Tabla 15. *Cuatro variaciones del problema de reemplazo* 103
Tabla 16. *Variables consideradas y que podrían usarse en el desarrollo de un modelo administrativo de flotas basado en la dinámica de sistemas* 105
Tabla 17. *Matriz de modelos dentro de las ciencias de la complejidad, variables y agentes a considerar en un modelo de renovación del parque automotor* 130
Tabla 18. *Variables consideradas y que podrían usarse en el desarrollo de un modelo administrativo de flotas basado en la dinámica de sistemas* 131

Lista de figuras

Figura 1. Indicadores de productividad en la región y otros países 4
Figura 2. Distribución por grupos de edad en años del parque automotor 5
Figura 3. Problemas generados por la antigüedad del parque automotor 5
Figura 4. Antigüedad de la flota en catorce países de Latinoamérica 6
Figura 5. Metodología o herramienta utilizada por transportadores para mantenimiento y renovación vehicular 12
Figura 6. Vista General de las características de los sistemas complejos..... 13
Figura 7. El espacio de las ciencias de la complejidad en contraste con la ciencia normal. 14
Figura 8. Fases metodológicas de la investigación 21
Figura 9. Participación de los servicios de transporte 23
Figura 10. Estado de la red vial pavimentada, segundo semestre de 2018 26
Figura 11. Estado de la red vial no pavimentada, segundo semestre de 2018 27
Figura 12. Distribución de empresas de transporte en 2007..... 28
Figura 13. Distribución de la propiedad del parque automotor en 2005 28
Figura 14. Propiedad por tipo de sociedad comercial de una muestra de tractocamiones del 2010-2018 en Colombia..... 30
Figura 15. Estructura organizacional del sector..... 32
Figura 16. Propiedad pública de la infraestructura y operadores privados..... 33
Figura 17. ICTC. Porcentajes ponderados de grupos de costos..... 37
Figura 18. ICTC. Porcentajes ponderados de subgrupos de costos..... 37
Figura 19. Movimiento de carga nacional por modo de transporte carretero 42
Figura 20. PIB anual y movimiento de carga terrestre 43
Figura 21. Participación del movimiento de carga interna por modo de transporte 2018 43
Figura 22. Total de vehículos de Peso Bruto Vehicular mayor a 10,5 toneladas, matriculados en el RUNT del 2010 al 2019 (Proyectado) 46
Figura 23. Resultados de superávit/déficit de oferta en toneladas/hora 47
Figura 24. Primer escenario. Evolución del reparto modal en el escenario tendencial 48
Figura 25. Segundo escenario. Evolución del reparto modal en el escenario de intermodalidad moderada 49
Figura 26. Tercer escenario. Evolución del reparto modal en el escenario de intermodalidad intensa..... 49
Figura 27. Diagrama de sistemas sociopoiéticos y abiertos..... 68

Figura 28. Las nuevas ciencias de la complejidad en los 2000 73
Figura 29. Las nuevas ciencias de la Complejidad en 2018 74
Figura 30. Combinación de definiciones de sistemas complejos 77
Figura 31. Dos series a partir de la ecuación logística Xn+1=4Xn(1-Xn) Con Xo=0.3400 y Xo=0.3401 78
Figura 32. Pasos para construir el triángulo de Sierpinski 79
Figura 33. Estructura conocida como máquina de Turing 80
Figura 34. Enfoque de análisis de la renovación vehicular a partir de la dinámica de sistemas como herramienta dentro de las ciencias de la complejidad 83
Figura 35. Dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Hitos en la evolución del enfoque de sistemas en general y de la dinámica de sistemas en particular. Teoría de sistemas. 88
Figura 36. Dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Hitos en la evolución del enfoque de sistemas en general y de la dinámica de sistemas en particular. Fundamentos de dinámica de sistemas 88
Figura 37. Dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Hitos en la evolución del enfoque de sistemas en general y de la dinámica de sistemas en particular. Metodología de sistemas 89
Figura 38. Dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Hitos en la evolución del enfoque de sistemas en general y de la dinámica de sistemas en particular Selección de trabajos recientes en dinámica de sistemas 89
Figura 39. Tres desarrollos previos a partir de los cuales surge la dinámica de sistemas..... 91
Figura 40. Creando un modelo de dinámica de sistemas 92
Figura 41. Creación y eliminación de defectos. 98
Figura 42. Modelo de mantenimiento total productivo 100
Figura 43. Diagrama de retroalimentación causal para la gestión de activos (flota de buses) 101
Figura 44. Modelo básico de reemplazo 108
Figura 45. Modelo de costo equivalente anual uniforme 109
Figura 46. Ergonomía. Diseño centrado en el humano 113
Figura 47. Mediana en aplicación recolección – entrega de carbón elemental (CE) por año modelo del camión 115
Figura 48. Accidentes y muertes en carreteras 118
Figura 49. Relación entre todos los costos y el momento de reemplazo apropiado 125
Figura 50. Sector de innovación del activo nuevo 128

Introducción

Esta tesis inicia una línea de investigación que busca un enfoque alternativo a los que hasta el momento se han intentado implantar para la renovación del parque automotor de transporte de carga por carretera más antiguo que transita aún por la infraestructura vial colombiana; esto último se demostrará en los primeros capítulos.

Este documento tiene 6 componentes, en su orden son: 1) la justificación de la investigación, el problema, la pregunta de investigación, los objetivos de la misma, la metodología utilizada y el alcance; 2) la situación actual del transporte de carga por carretera en Colombia; 3) cuáles son los cuatro modelos administrativos detectados en la fase de exploración de la tesis; 4) un acercamiento conceptual a la teoría de la complejidad y los modelos que más se adecúan para el estudio de la problemática en cuestión; 5) una revisión y conceptualización de los indicadores que se puedan considerar dentro de un modelo administrativo para la renovación vehicular; y, finalmente, 6) la conceptualización y desarrollo de un modelo administrativo nuclear para la renovación del parque automotor.

Los primeros tres componentes son el marco referencial y el contexto dentro del cual se intentará presentar un modelo partiendo de una hipótesis en la que a partir del conocimiento de las herramientas de modelamiento existentes en la teoría de la complejidad, sea posible aplicar alguna de ellas para la renovación del parque automotor de transporte de carga por carretera.

En este punto se hace necesario un marco referencial para entender el impacto negativo que tiene el alto nivel de antigüedad en la flota de camiones utilizados para el movimiento de mercancías, sobre la economía y el crecimiento económico de Colombia; dado que la industria del transporte en Colombia representaba en el año 2017 el 4.07 % del Producto Interno Bruto (PIB) de Colombia y de este valor el transporte por carretera representaba el 83.4 % (Ministerio de Transporte, 2018). Las estadísticas anteriores dan cuenta de la importancia que tiene esta industria para la economía colombiana.

El sector del transporte por carretera como industria reconocida[1]tiene varios factores que lo integran para la prestación del servicio de movimiento de mercancías de un punto determinado a otro dentro de un espacio geográfico.

[1] "Su calidad de industria le fue reconocida por la escuela inglesa que lo estudió en la segunda mitad del siglo XIX desde el punto de vista de la estructura requerida para producir servicios y las variables de

En el contexto del transporte y su economía, estos factores son productivos dado que al combinarse generan un nivel de producción determinada y su combinación se denomina función de producción en la teoría económica (De Rus, Campós, & Nombela, 2003).

Particularmente este trabajo se encuentra focalizado en uno de los factores de producción del transporte en el modo carretero que componen la función de producción **E** definido como el equipo móvil, tal como lo expresan De Rus et al. (2003)[2] y que en este caso son los camiones de carga. Estos a su vez forman parte de la totalidad del parque automotor que transita por la infraestructura colombiana y su alcance se establecerá en el análisis de los vehículos de más de 10.5T de PVB que son los que mueven el mayor porcentaje (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2013) de toda la carga transportada por este modo de transporte.

En la primera parte de este documento se presenta la situación actual de Colombia en cuanto a la antigüedad de la flota general de los camiones de carga en comparación con México, Brasil, Chile, Estados Unidos, Australia, España y Canadá. Lo anterior debido por un lado a que son los países considerados como los más avanzados en cuanto a sus modos de transporte en general y del modo carretero en particular, tanto en Latinoamérica como en el mundo; y por otro, a que son países paradigmáticos de cada continente[3] Se presenta igualmente la justificación de la investigación, el problema a resolver, los objetivos y la metodología planteada para realizarla.

La segunda parte de este documento se concentra en hacer una contextualización del transporte de carga por carretera en Colombia para hacer relevante su importancia dentro de la economía de este país, describir los principales modelos administrativos para la gerencia de las flotas y la renovación del equipo móvil.

capital, la mano de obra y las materias primas demandadas para su generación" ((Bonavia, 1936) Citado en (Salazar, 2015, pág. 33).

[2] La función de producción estilizada de los servicios de transporte se puede representar como una función matemática del tipo q=f(K,E,L,F,N;t) donde q es la cantidad de servicios de transporte, K son las unidades de infraestructura (por ejemplo, el número de carriles de una carretera), E es el equipo móvil, L es el personal para tripularlo y realizar otras actividades de apoyo, F la energía, combustible, repuestos y otros consumibles que permiten el movimiento de los vehículos, N que son otros activos que incluyen principalmente los recursos naturales como el suelo y t es el tiempo de los usuarios, en este caso mientras las mercancías son trasladadas de un lugar a otro (De Rus et al., 2003, págs. 25-26).

[3] Estados Unidos representa a Norteamérica; México a Centroamérica, aunque con el North American Free Trade Agreement (NAFTA) NAFTA se podría considerar de Norteamérica; España, representa a Europa Occidental.

En la tercera parte se conceptualizan y describen las variables[4] que se tendrían en cuenta en un futuro modelo complejo para la renovación del parque automotor mayor a 10.5T de Peso Bruto del Vehículo (PBV) en Colombia.

En la cuarta parte del documento se plantea y desarrolla un acercamiento al mundo de las ciencias de la complejidad, partiendo de una escuela reconocida sobre complejidad a nivel mundial y especialmente en las américas con base en Estados Unidos, que es uno de los países con un promedio de flota más nuevo y que se presenta en el cuerpo de este documento. También, se hace el ejercicio a partir de las definiciones de autores primordialmente latinoamericanos y colombianos que han estudiado y son autoridades reconocidas en el mundo de las ciencias de la complejidad en este continente y en Colombia. De igual manera se presenta un acercamiento a partir del entendimiento del mapa de las ciencias de la complejidad en ciencias sociales desarrollado por Castellani y Hafferty (2009), Castellani (2018) y la enciclopedia de complejidad y ciencias de los sistemas de Meyers (2009). Adicionalmente se describe la herramienta sugerida por el autor como aporte a futuras investigaciones, la cual utiliza como base la dinámica de sistemas con una aproximación deductiva desde las ciencias de la complejidad hasta la renovación vehicular.

En la quinta parte de este documento se exponen las variables que podrían integrar un modelo nuclear inicialmente de simulación para la renovación del parque automotor y uno posterior basados en la dinámica de sistemas. Se conceptualizan las mismas con el fin de que queden como fundamento para futuras investigaciones que profundicen y se den a la tarea de validar tanto las variables como el modelo nuclear planteado y acometan la tarea de adaptar al medio colombiano los modelos basados en dinámica de sistemas encontrados por el autor en su investigación y primordialmente uno que se deja sugerido al final de la tesis.

En la sexta parte del documento se desarrollan los conceptos de lo que el autor ha denominado modelo nuclear y que deberá servir como base para el acondicionamiento cultural de las áreas administrativas de pequeñas, medianas y grandes empresas de transporte de carga por carretera en Colombia con vehículos mayores a 10,5 toneladas de Peso Bruto Vehicular.

Finalmente se presentan las conclusiones, los hallazgos y las recomendaciones de futuras investigaciones enmarcadas en el mundo de las ciencias de la complejidad.

[4] Según la RAE (s.f.) variable en términos matemáticos se define como “Magnitud que puede tener un valor cualquiera de los comprendidos en un conjunto” (párr. 1).

1 Presentación de la investigación

1.1 Antigüedad del parque automotor y modelos de renovación

En países desarrollados la antigüedad del parque automotor de Carga Pesada (mayor a 10,5 toneladas de PVB) es menor a diez años y en algunos países como los Estados Unidos se estima en cinco años, en Francia siete, en México quince, en Chile doce y en Brasil trece (Barbero, 2014; Solano Vargas, 2014). Para 2007, en Colombia la antigüedad del parque automotor de carga se estimó en 24,4 años, con un máximo de 25,5 años y un mínimo de 19,5 años dependiendo de la configuración vehicular (Ministerio de Transporte, 2007). En un estudio más reciente se encuentra que para el segmento de PVB mayor a 10,5 toneladas la edad promedio sigue siendo mayor a veinte años con un 31 % mayor a treinta años (DNP y otros, 2013).

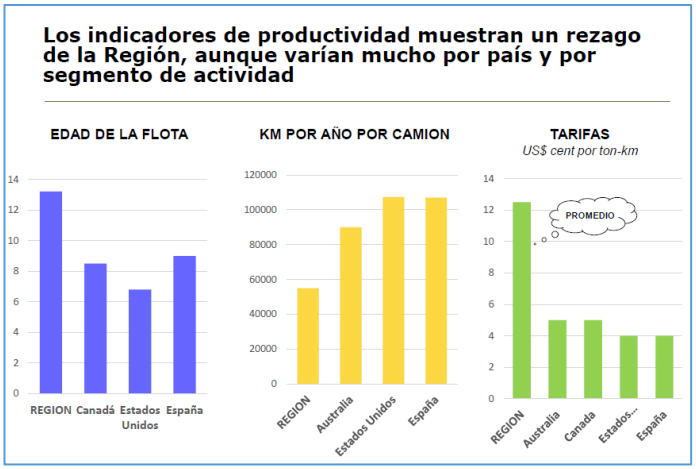

Figura 1. Indicadores de productividad en la región y otros países

Fuente: Barbero, 2014

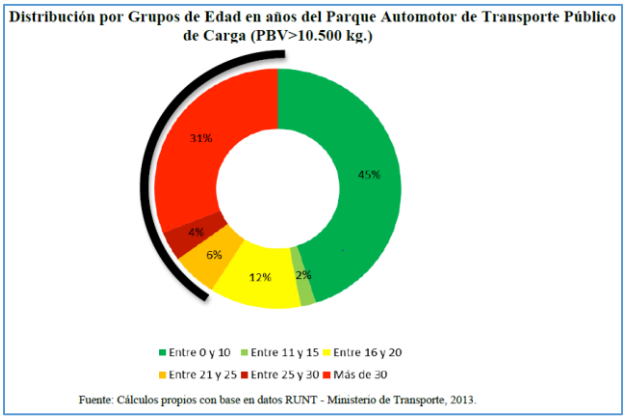

Figura 2. Distribución por grupos de edad en años del parque automotor

Fuente: (Conpes 3759, 2013, p. 21)

La alta antigüedad tiene serias implicaciones negativas en la competitividad del transporte (Ávila Rodríguez, 2013), además de constantes varadas en las ciudades, lo cual ocasiona la disminución en la velocidad vehicular, problemas ergonómicos en los operadores debido a la antigüedad de las cabinas, problemas en la salud de los conductores debido a la exposición continua a emisiones de gases tóxicos por encima de lo permitido y afecciones neumológicas en los habitantes de las ciudades por donde circula tal parque automotor (WHO, 2005).

Figura 3. Problemas generados por la antigüedad del parque automotor

Fuente: elaboración propia. Fotos de William León

Por otro lado, el parque automotor de carga pesada en Colombia se mantiene como una de las antigüedades promedio más altas del continente americano (Barbero, 2014). Esto puede evidenciarse la Figura 4.

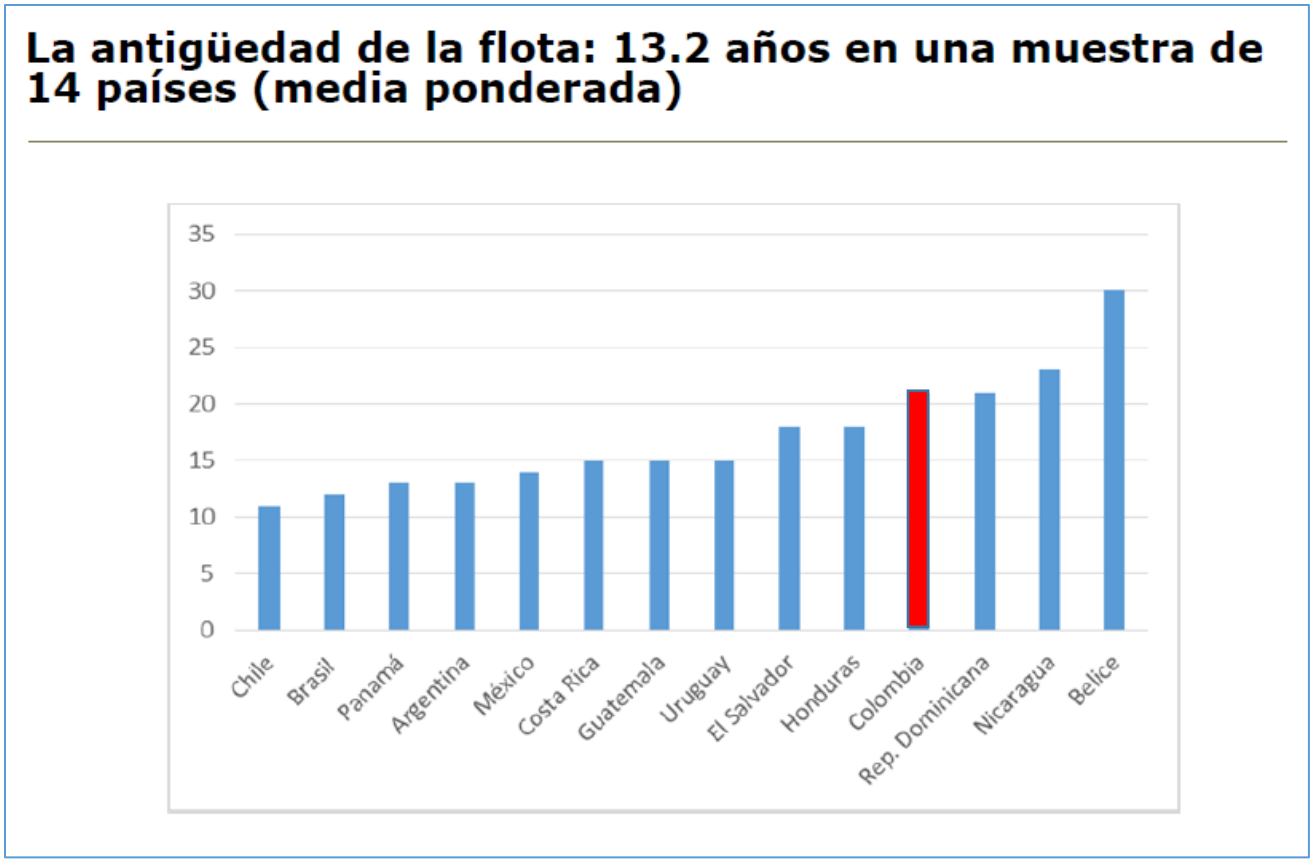

Figura 4. Antigüedad de la flota en catorce países de Latinoamérica

Fuente: (Barbero, 2014, p. 21)

Para las compañías transportadoras grandes, medianas y pequeñas, así como para los propietarios de menos de cinco vehículos, la evidencia confirma que siempre se presenta un incremento en los costos de operación que incluyen: mantenimiento y mayor consumo tanto de fluidos como de partes del vehículo por efectos del desgaste natural asociado a su continua utilización (Victoria Transport Policy Institute, 2009; DNP y otros, 2013).

Así, esta tesis buscó conceptualizar un modelo que permitiera identificar el tiempo adecuado de uso de un vehículo de carga en el contexto particular de cada país o región y la propuesta fue incluir variables adicionales a las financieras para soportar la toma de esa decisión.

Empíricamente y por su experiencia en el sector del transporte de carga pesada el autor tiene conocimiento de que en los Estados Unidos, por ejemplo, muchos de los vehículos que se reemplazan porque llegan a su punto de renovación, en términos de rentabilidad, son enviados para su reventa como camiones usados a otros países como los centroamericanos (Guatemala, Honduras, El Salvador, etc.), con lo cual se traslada o deslocaliza en este caso los efectos negativos que pudiesen ocasionar dichos vehículos en términos de contaminación, ergonomía, seguridad vial, etc.

Otro punto importante por considerar es que, en Colombia, de acuerdo con la literatura revisada para la contextualización de este documento, se pudo encontrar que hay vehículos circulando por el territorio nacional incluso con más de 35 años de uso con las consecuencias ambientales, ergonómicas o de seguridad vial que se mencionan en el texto.

Adicionalmente, en una publicación reciente que informa sobre la nueva política pública nacional para incentivar la renovación del parque automotor de vehículos de carga con peso bruto vehicular igual o superior a 10,5 toneladas se encuentra la siguiente afirmación:

> Según datos del RUNT, en la actualidad en Colombia existen alrededor de 119 000 vehículos de transporte de carga pesada con un peso bruto vehicular igual o superior a 10 5 toneladas. De estos, aproximadamente 56 000 tienen más de 20 años de antigüedad y en su mayoría son de pequeños propietarios. Con el nuevo programa se espera renovar 25 000 vehículos. (Leal Acosta, 2019, pág. 1)

Existe una variedad de modelos utilizados para la gestión de flotas y entre ellos algunos que permiten encontrar el punto en el cual una flota debe renovarse considerando diversas variables tales como depreciación de los vehículos, costo de adquisición, consumos de combustible, gastos de mantenimiento, cambio de partes, entre otros.

Los modelos más relevantes, de acuerdo con la literatura revisada en una primera fase de la investigación (cuando se estaba construyendo la Propuesta de Investigación), fueron los siguientes: Reliability, Availability and Maintainability RAM y Life Cycle Cost LCC (Carrese & Ottone, 2005), Stochastic Fleet Management Models (Powell, 2002; Topaloglu & Powell, 2006), System Dynamics Models (Bivona & Montemaggiore, 2005) Total Cost of Ownership (Ellram, 1995; Zachariassen & Arlbjørn, 2009; Hagman, Ritzén, Stier, & Susilo, 2016), conditional value at risk (CVaR) (Ansaripoor, Oliveira, & Liret, 2014).

El modelo Vehicle Operating Cost (VOC)- Highway Development and Managemente System (HDM)-4 (Chesher & Harrison, 1987; Nash, 1976) es usado por el Gobierno Colombiano (DNP)

para determinar sus políticas de renovación del Parque Automotor (DNP et al., 2013; Roda, Perdomo, & Sanchez, 2015). Esta aplicación es utilizada también en varios países de Latinoamérica como Ecuador, Perú, México y Colombia, para hacer la planeación de la infraestructura vial y su correlación con el transporte de carga que la transitará (Arroyo & Aguerrebere, 2002).

En el transcurso de la investigación se detectó también, a través de la revisión de artículos extraídos de la literatura en bases como Scopus (ver las ecuaciones de búsqueda en la Tabla 000), que existen adicionalmente una variedad de modelos utilizados en la industria del transporte para la gestión de flotas, algunos de los cuales se presentan en la Tabla 1. Entre ellos, algunos permiten encontrar el punto en el cual una flota debe renovar su parque automotor y consideran diversas variables como depreciación de los vehículos, costo de adquisición, consumos de combustible, gastos de mantenimiento, cambio de partes, entre otros. La información se presenta en dos tablas para una mejor lectura.

Tabla 1*. Ecuaciones de búsqueda en Scopus para detección de modelos de renovación de activos. Búsquedas realizadas en mayo de 2018*

Ecuación de búsqueda	Cantidad de documentos
TITLE-ABS-KEY ("dynamic programming" AND "truck") AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "DECI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATH") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "SOCI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ECON") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MULT"))	182
"vehicle replacement"	126
"fleet replacement"	106
"truck replacement"	11
"fleet replacement" AND complexity	1
"truck replacement" AND models	0
"truck replacement" AND complexity	0
"vehicle replacement" AND complexity	0

Fuente: elaboración propia

Tabla 2. *Resumen analítico de quince artículos con modelos para la renovación de equipos (parte 1)*

TÍTULO ARTÍCULO	AUTOR	AÑO	NOMBRE MODELO	VARIABLES UTILIZADAS
The use of annual maintenance cost limits for vehicle fleet replacement	A. K. S. Jardine; T. S. Coldrick; J. Stender	**1976**	Costo Anual de Mantenimiento Límite	Costos de Mantenimiento, Costos de adquisición, Valor de reventa del vehículo viejo, impuestos.
Equipment Replacement 1n an Unsteady Economy	A. H. Christer y W. Goodbody	**1980**	Modelo de Costos de Operación Esperados de un Camión	Precio de compra cuando está nuevo (P), precio de reventa en un tiempo t (S(t)), costos de operación en un tiempo t (f(t)), factor de Descuento (r)
Vehicle Replacement: A Case Study in Adapting a Standard Approach for a Large Organisation	J. C. Rusell	**1982**	Modelo de reemplazo de vehículos que calcula los costos asociados con un intervalo de periodos de reemplazo de diferentes longitudes.	*"Los costos incluidos son aquellos que pueden ser considerados como variable en una política de reemplazo, es decir, precio de compra, costos de equipamiento, Costos de reparación y mantenimiento, y valor de reventa. Costes de combustible, accidentes, licencias y los seguros están excluidos"*
A Dynamic Infinite Horizon Replacement Economy Decision Model	James C. Bean a , Jack R. Lohmann a y Robert L. Smith	**1984**	Modelo de reemplazo dinámico. Es un modelo económico de reemplazo con programación dinámica de horizonte infinito	VPN, Costos de Operación, Costos de Mantenimiento, Ingresos
A Dynamic Replacement Economy Decision Model	R. V. Oakford a , Jack r. Lohmann b & Arturo Salazar	**1984**	Dynamic programming model for the replacement economy decision problem	*"La formulación presente proporciona tres componentes de flujo de efectivo: Transferencias de capital (primer costo, valor de rescate y ahorros fiscales"*
A Stochastic Replacement Economic Decision Model	Jack R. Lohmann	**1986**	The model is then expressed as a stochastic replacement problem and solved using Monte Carlo simulation and dynamic programming	VPN, Costos de Operación, Costos de Mantenimiento, Ingresos
A decision support system for vehicle fleet planning	Jean Couillard University of Ottawa, Ottawa, Ont., Canada	**1993**	Uses both a multicriteria approach to evaluate alternative plans and a stochastic programming model to generate plans.	*"Indemnizaciones fiscales, flota no homogénea, demanda como un proceso de estacional estocástico no estacionario, alquiler o arrendamiento de vehículos, reemplazo / política de expansión"*

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 3 puede verse que en años recientes hay una tendencia a incluir otro tipo de variables diferentes a los costos, a saber, las emisiones de gases de combustión, por ejemplo el Dióxido de Carbono (CO2). Esto podría reflejar un creciente interés de los investigadores por incluir variables adicionales a las que de forma tradicional se han tenido en cuenta para la renovación de camiones.

Tabla 3. *Resumen analítico de quince artículos con modelos para la renovación de equipos (parte 2)*

TÍTULO ARTÍCULO	AUTOR	AÑO	NOMBRE MODELO	VARIABLES UTILIZADAS
Decision support for truck replacement	John Walker	1995	Decision Support System DSS - Visual Basic	Costo de compra e instalación, costo estimado de operación, valor de reventa, costo promedio equivalente o alquiler.
Optimal Replacement Under Variable Intensity of Utilization and Technological Progress	G. Bethuyne	1998	A formal model in which both age and output (rate) determine replacement time	Costos iniciales, costos de capital (costo de oportunidad de capital invertido en el equipo), costos de operación (costos de mantenimiento, energía, mano de obra, etc), costo de reventa, intensidad de utilización, progreso tecnológico).
Optimal fleet utilization and replacement	Di Jin *, Hauke L. Kite-Powell	2000	An optimal control model that captures both utilization and replacement decisions	El costo operativo unitario de los equipos de capital. El valor de salvamento. El costo de comprar nuevos barcos ".
Case study: bus fleet replacement	Pinar Keles a & Joseph C. Hartman	2004	Multiple challenger parallel replacement formulation	*Costos de operación y mantenimiento, costo unitario de compra del nuevo activo, costos fijos del nuevo activo, valor de recuperación, edad, demanda, vida física máxima del activo.*
Equipment Replacement Analysis: A Literature Review and Directions for Future Research	Joseph C. Hartmanab & Chin Hon Tanbc	2014	MULTIPLE MODELS - LITERATURE REVIEW	
Optimal Sustainable Vehicle Replacement Model	Sharareh Taghipour; Nooshin Salari	2015	Finite planning horizon and develop an optimal replacement policy based on dynamic programming (DP)	Costo de adquisición, combustible, costos de mantenimiento, reventa, emisión de CO2.
Recursive expected conditional value at risk in the fleet renewal problem with alternative fuel vehicles	Amir H. Ansaripoor a, Fernando S. Oliveira b,ĩ, Anne Liret	2016	A multi-stage stochastic programming model for minimising the weighted average of the expected cost and risk, considering the existing constraints and uncertainties in the market.	Precios de combustible, precios de CO2, kilometraje, consumo de combustible para tecnologías de energías fósiles.
Flexible Lease Contracts in the Fleet Replacement Problem with Alternative Fuel Vehicles: A Real-Options Approach	Amir H. Ansaripoor, Fernando S. Oliveira	2017	Model using real options (return and swap) to model contract flexibility and to account for different uncertainties	*"(Precios del CO2, precios del combustible, kilometraje cubierto por un vehículo, consumo de combustible, y tecnológicos) "*

Fuente: elaboración propia

1.2 Problemática

Los modelos que incluyan el costo social, el lucro cesante, la salud de los operadores y de quienes están expuestos a las emisiones de los gases de dichas fuentes móviles, la contaminación ambiental y las particularidades geográficas de Colombia, no son tan evidentes o conocidos en el medio colombiano de acuerdo con la revisión de la literatura realizada por el autor de esta tesis en el momento del planteamiento del proyecto de investigación, y que fue corroborada con la revisión mes profunda realizada durante el curso de la investigación.

Asimismo, una encuesta realizada en el 2019 por la firma EXMA *Consulting* para la compañía Navitrans, distribuidor de la marca de camiones INTERNATIONAL en Colombia, permite concluir que incluso parecieran no existir modelos de mantenimiento y renovación sistemáticos que sean utilizados por los transportadores colombianos y que incluyan variables adicionales a las de costos más tradicionales mencionadas con anterioridad (Exma Consulting, 2019, pág. 28).

Como ejemplo, puede verse en la Figura 5 que solo el 37% de 465 encuestados utiliza alguna herramienta que podría definirse como sistemática para administrar su flota de camiones. De ese 37% apenas un 3% utiliza herramientas como tablas de mantenimiento en Excel.

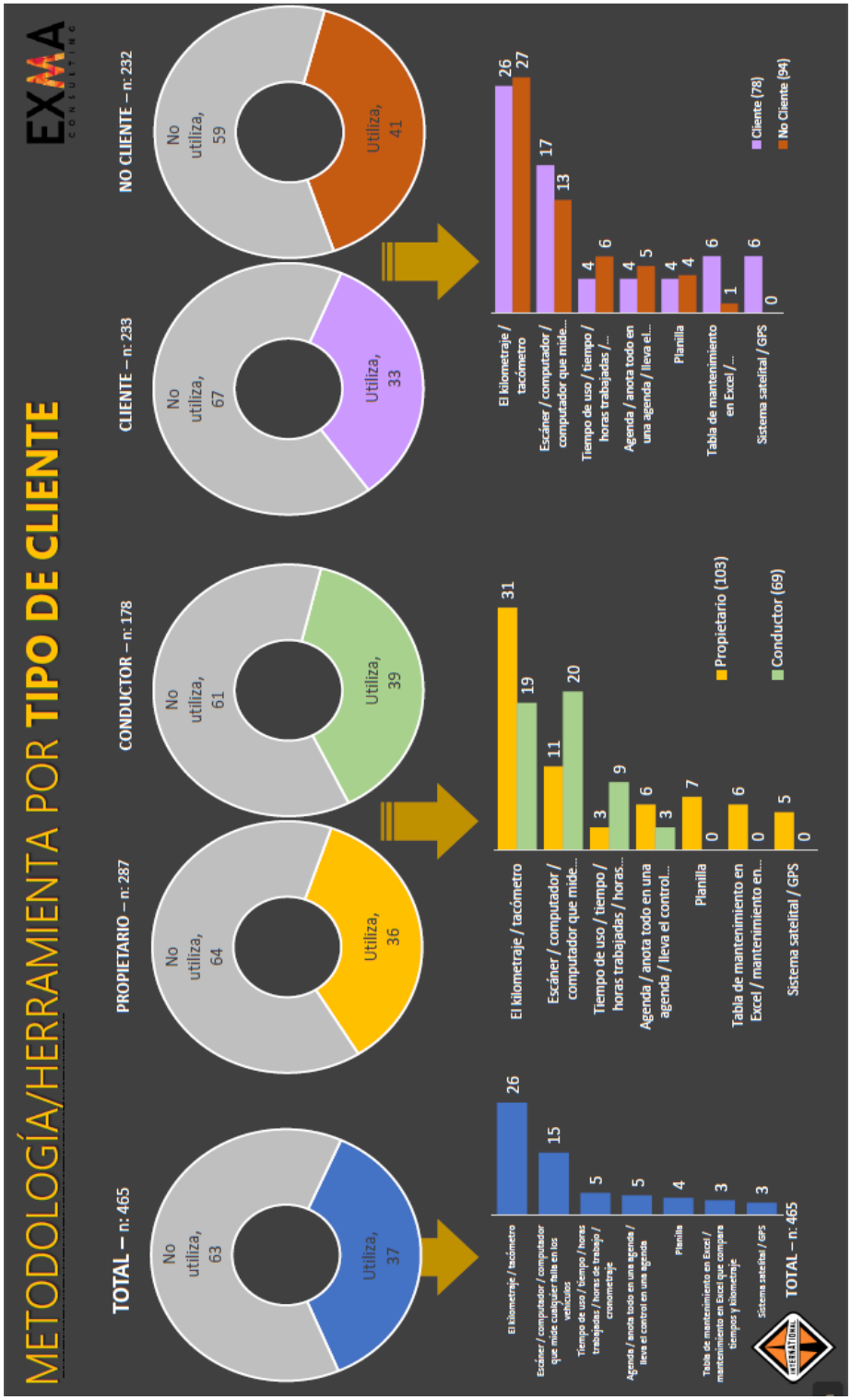

Figura 5. Metodología o herramienta utilizada por transportadores para mantenimiento y renovación vehicular

Fuente: (EXMA Consulting, 2019, pág. 28).

De esta forma, la revisión de literatura al plantear la investigación y durante el proceso posterior deja en evidencia que en Colombia aún no se ha intentado un modelo que integre las variables adicionales a las estudiadas por la mayoría de los modelos mencionados.

Razón por la cual se hace relevante introducir un nuevo modelo que integre todas estas variables y que permita explicar este fenómeno complejo para posteriormente proponer una solución a dicha problemática.

> Dado que la teoría de la complejidad estudia y analiza sistemas complejos y ayuda al entendimiento de su estructura y comportamiento. Un sistema complejo es caracterizado por comportamientos emergentes resultado de la interacción entre las partes y por esta razón, este no puede ser fragmentado sin perder su identidad y propósito. (Ferreira, 2001, pág. 1)

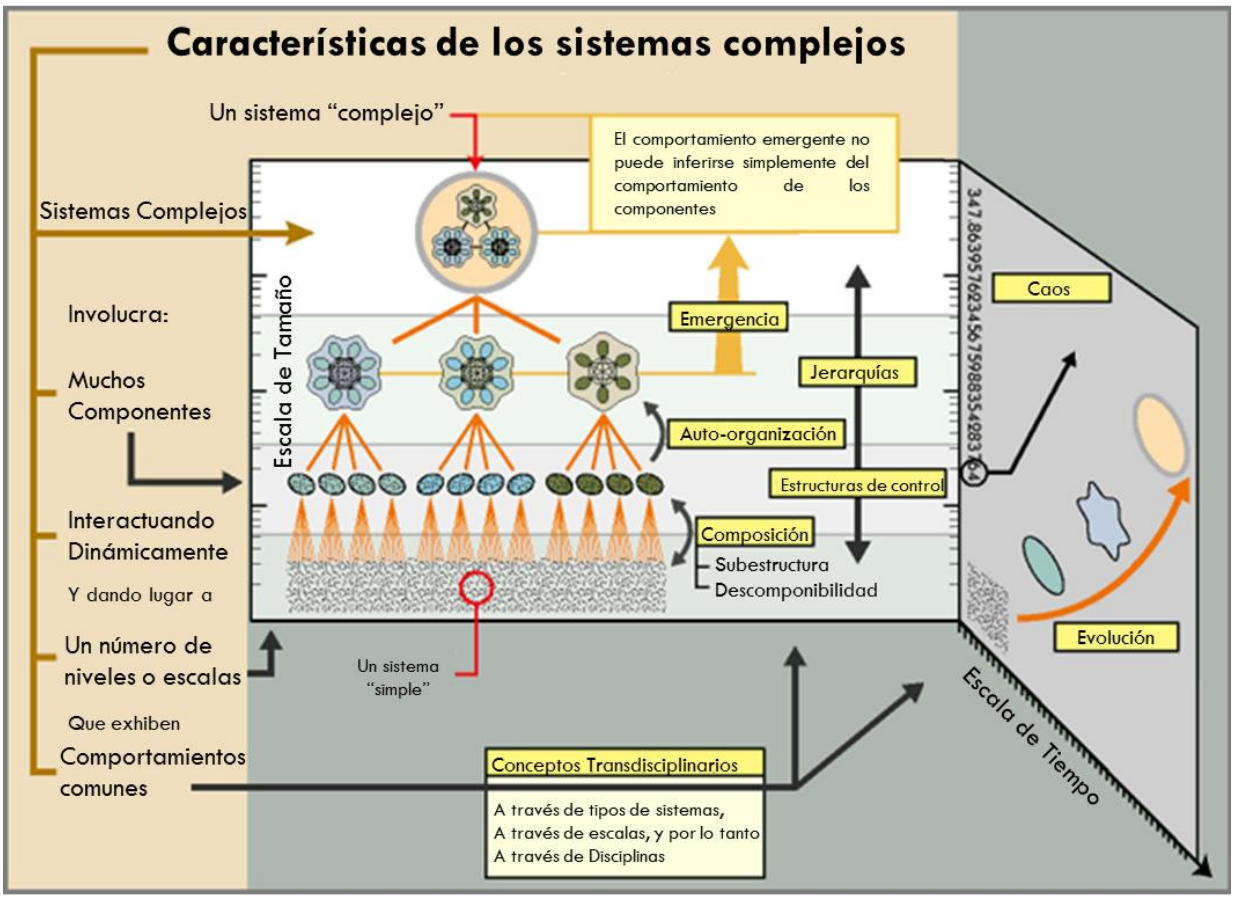

Figura 6. Vista General de las características de los sistemas complejos

Fuente: Ferreira (2001, pág. 3).

De igual forma, Maldonado y Gómez (2010) expresaron que “a través de la teoría de la complejidad se pueden estudiar ámbitos donde ocurren imprecisiones, no linealidad, emergencias, sorpresas, ausencia de control local, bifurcaciones, inestabilidades, fluctuaciones y cascadas de fallas, entre otras” (pág. 9).

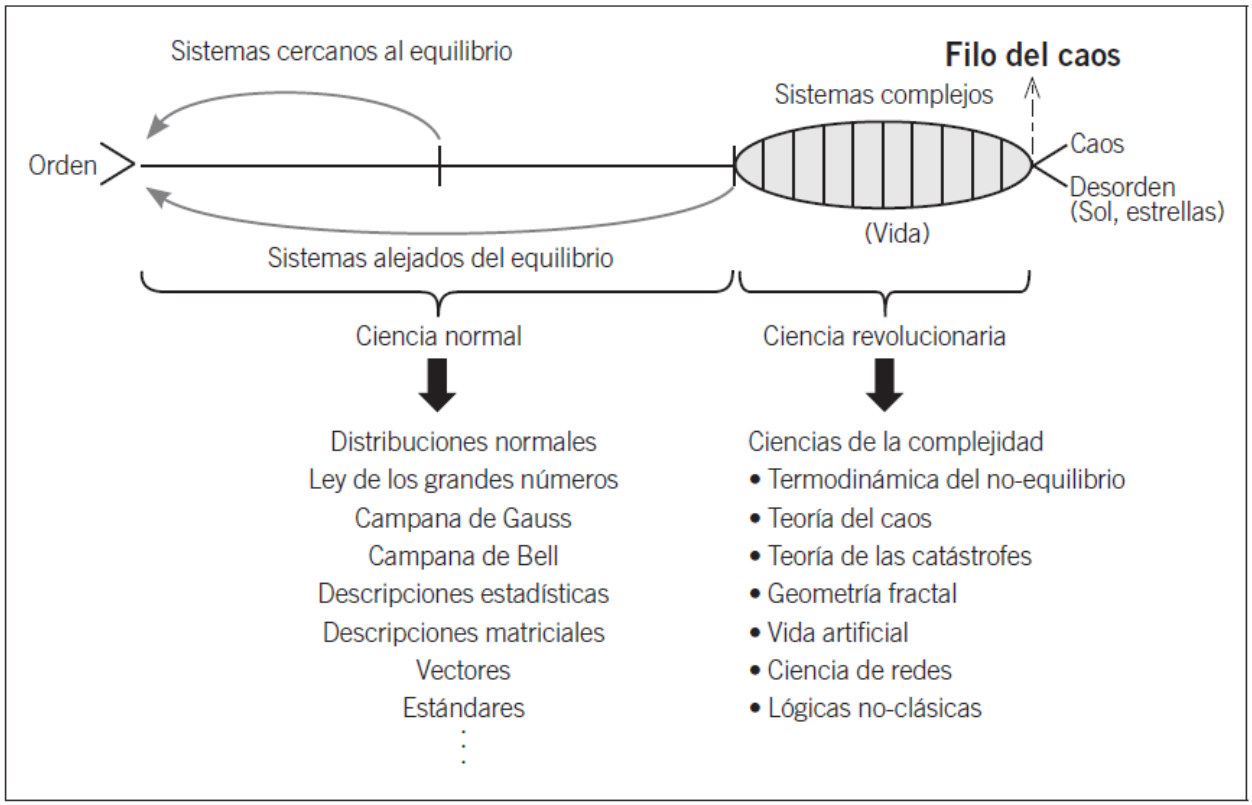

Figura 7. El espacio de las ciencias de la complejidad en contraste con la ciencia normal.

Fuente: Maldonado y Gómez (2010, pág. 9).

Teniendo en cuenta además la revisión preliminar efectuada de manera inicial y las múltiples implicaciones del problema de la antigüedad del parque automotor en Colombia, se planteó como hipótesis y punto de partida para la investigación que la mejor forma de abordar su solución dada la cantidad de variables involucradas que hacen que sea un problema complejo y dinámico, era el estudio del fenómeno a partir de una búsqueda conceptual contenida en la teoría de la complejidad y las herramientas de modelamiento que dentro de esta nueva rama de la investigación científica existen. A partir de su conocimiento y entendimiento se pretende determinar las variables más relevantes que compondrían un modelo de renovación de flotas acorde a las particularidades colombianas.

1.3 Problema de investigación

Con este punto de partida se presenta el siguiente problema: de acuerdo con la literatura revisada por el autor al momento de plantear la investigación, la cual fue corroborado posteriormente en el desarrollo de la misma, no se encontraron modelos administrativos que sean de fácil acceso, reproducibles, sostenibles en el tiempo y que integren todas las variables complejas de esta problemática para la renovación de flotas vehiculares de diversos tamaños en Colombia para que le sean evidentes a los transportadores los beneficios de renovar el parque automotor.

1.4 Pregunta de investigación

Con el fin de plantear una solución se realizó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la combinación de las variables y parámetros que permitan conceptualizar y desarrollar un modelo administrativo de flotas que solucione el problema de la renovación del parque automotor de carga en Colombia mayor a 10,5 toneladas de PVB a partir de la teoría de la complejidad?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo administrativo de flotas que solucione el problema de la renovación del parque automotor de carga en Colombia mayor a 10,5 toneladas de PVB con tres objetivos específicos que fueron.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar los conceptos, identificar las características y estructurar las variables de los cuatro modelos clásicos y más relevantes que puedan ser usados para la renovación de flotas de carga en Colombia desde la teoría de la complejidad.
2. Identificar los factores a través de los cuales se evaluarán las variables del modelo desarrollado a partir de los modelos disponibles más relevantes que puedan ser usados para la renovación de flotas de carga en Colombia.
3. Establecer cuál es el modelo que bajo las condiciones colombianas puede usarse para la renovación de flotas de carga en Colombia.

1.6 Metodología de la investigación

Para Ñaupas (2018) la investigación científica es un proceso cognitivo que tiene tres objetivos fundamentales: ampliar las fronteras de la ciencia, verificar hipótesis y descubrir leyes científicas; cuyo fin es transformar la realidad. El autor presenta a su vez tres enfoques: el cuantitativo, el cualitativo y el total o mixto. Este proceso comprende dos tipologías que son la investigación básica y la investigación aplicada con cuatro niveles definidos: el exploratorio, el descriptivo, el explicativo y el predictivo.

De acuerdo con las definiciones de Ñaupas et al. (2018, pág. 144) la presente investigación podría clasificarse dentro del enfoque cualitativo mayoritariamente, aunque algunos aspectos la enmarcarían también dentro un enfoque total; lo anterior debido a que el objeto de investigación se clasifica como un fenómeno socio – cultural, con un esquema flexible, sin hipótesis, con un método preferente de investigación inductiva-deductiva, con observación participante y no participante; el objetivo de la investigación fue la comprensión, conceptualización e intento de desarrollo aplicativo de los resultados y finalmente como criterio de verdad el enfoque fue la observación y una posible práctica social sugerida a posteriori.

Del mismo modo, esta investigación se podría clasificar de acuerdo con su tipología como multivariada, pues lo que se buscó fue encontrar y conceptualizar las posibles variables a considerar en un modelo a partir de la teoría de la complejidad para la renovación de camiones de más de 10,5 toneladas de peso bruto vehicular (Ñaupas, 2018).

Con base en lo anterior, el autor buscó a partir de una problemática, su observación y contextualización encontrar una solución a partir de la teoría de la complejidad como posible hipótesis de partida para encontrar un modelo que permita demostrar científicamente y con datos tomados del ejercicio real, la inconveniencia de continuar trabajando con vehículos obsoletos tecnológicamente.

El método de esta tesis se fundamentó en una investigación documental (teórica) que se concentró en la recopilación de información en forma documental (Ñaupas et al., 2018). Dicha información fue utilizada con el fin de comprender el contexto donde se realizó el estudio y la construcción conceptual del marco teórico a partir de la teoría de la complejidad y las herramientas de modelamiento que se pudieran encontrar y fuesen aplicables a la solución de la problemática planteada.

Según Chicaíza-Becerra, Riaño, Rojas-Berrio y Garzón (2017) existen tres etapas para la revisión de literatura. La primera, denominada usualmente exploración inicial, consiste en leer acerca del tema escogido en fuentes como *handbooks*, diccionarios temáticos, los *surveys* o revisiones con el fin de comprender y acotar la pregunta de investigación. La segunda etapa es la revisión en sí misma e implica desarrollar una estrategia de búsqueda con palabras clave, así como definir las bases de datos de las que se extraerá la información y llevar a cabo la selección de los documentos que se analizarán en detalle, así como la organización de los resultados (Chicaíza-Becerra et al., 2017). "La tercera etapa corresponde a la elaboración del reporte y divulgación de resultados" (Chicaíza-Becerra et al., 2017, pág. 8).

Con base en las definiciones anteriores, a continuación se describe y presenta un reporte de la metodología utilizada por el autor y los principales pasos que se ejecutaron para llevar a buen término la tesis planteada.

Los principales pasos seguidos por el autor fueron los siguientes:

1. En la fase de exploración inicial de la investigación, cuando se estaba construyendo la propuesta de investigación, se utilizaron las siguientes fuentes:
    a. Documentos oficiales del Ministerio de Transporte extraídos de la página web de dicha entidad.
    b. Información del Banco de la República extraída de las bases de datos existentes en la página web de dicha entidad.
    c. Información del Departamento Nacional de Estadística DANE extraída de las bases de datos existentes en la página web de dicha entidad.
    d. Exploración en tres bibliotecas sobre el tema del transporte y la renovación del parque automotor; la biblioteca central, de ciencia y tecnología, de ciencias económicas de la Universidad Nacional y la Biblioteca Luis Ángel Arango de donde se obtuvo información extraída primordialmente de libros.
    e. Exploración en Google Academics con la consecuente extracción de información, primordialmente artículos no indexados en bases de datos.
    f. Exploración en cuatro bases de datos, Scopus, Science Direct, JStor y Web Science con la consecuente extracción de información pertinente para la tesis.
    g. Exploración en páginas de entidades de transporte de diversos países que se encontraron a través de internet.

El foco principal de esta fase estuvo en entender el contexto del transporte de carga por carretera en Colombia, así como el estado del parque automotor de este país y un contraste con otros países representativos tanto del mundo como de la región latinoamericana. También se orientó hacia la búsqueda de los modelos usados para renovación del parque automotor y las definiciones iniciales de la teoría de la complejidad a partir de autores que hubiesen tratado dicho tema en Colombia.

2. Para construir el contexto, el marco teórico y conceptual de la tesis se acudió a varias fuentes, a saber:
    a. Participación en dos asignaturas que tienen que ver con el sector del transporte dictadas por la Facultad de Ingeniería y cuyos nombres son: Políticas de Transporte en Colombia y Economía del Transporte.
    b. También, como acercamiento al área de la *complejidad* se tomó, como asistente, un curso en la Universidad del Rosario con el Doctor Carlos Maldonado, uno de los más destacados expertos colombianos en *complejidad.*
    c. Se asistió al VIII Encuentro Interuniversitario sobre complejidad: Complejidad y Auto-Organización del 8 al 12 de mayo de 2017 organizado por la Universidad del Rosario y la Universidad Nacional de Colombia.
    d. Se revisaron libros sobre *complejidad* aplicada a diversos campos, publicados por la Universidad del Rosario y la editorial Springer, que tiene una de las enciclopedias sobre complejidad y ciencias de los sistemas más completas y que se encuentra disponible en la Biblioteca Central de la Universidad Nacional de Colombia, y otras.
    e. Se continuó con una exploración más profunda de bases de datos indexadas mediante el uso de ecuaciones de búsqueda como las que se presentan a manera de ejemplo en la Tabla 4.
    f. Se adicionó a la investigación exploratoria la búsqueda en el Repositorio de la Universidad Nacional con las ecuaciones que se resumen en la Tabla 5.

Para la construcción de la tesis el autor revisó más de 1000 documentos entre resúmenes de artículos, artículos completos, libros, publicaciones seriadas, páginas de internet y videos. Dicha revisión siempre tuvo como objetivo encontrar información que permitiera conceptualizar las ciencias de la complejidad, las posibles herramientas de modelamiento existentes y su aplicación a la renovación del parque automotor y específicamente de aquel de transporte de carga por carretera con un peso bruto vehicular mayor a 10,5 toneladas.

Tabla 4. *Resumen de búsqueda sistemática en la base de datos Scopus. Fecha de búsquedas: mayo de 2019*

Ecuación de Búsqueda	Nro de documentos	Referencias Bibliográficas más relevantes
"truck replacement"	11 documents	Lessons from the Mid-Atlantic Dray Truck Replacement Program Wierman, S.S.G., Thomas, D.L., Burian, M.S. 2014 Proceedings of the Air and Waste Management Association's Annual Conference and Exhibition, AWMA 1, pp. 654-665
		Effects of diesel particle filter retrofits and accelerated fleet turnover on drayage truck emissions at the port of Oakland Dallmann, T.R., Harley, R.A., Kirchstetter, T.W. 2011 Environmental Science and Technology 45(24), pp. 10773-10779
		Comparison of technological and operational strategies to reduce trucking emissions in Southern California Facanha, C., Ang-Olson, J. 2008 Transportation Research Record (2058), pp. 89-96
		Australia begins truck-replacement programme Murphy, J. 2005 Jane's Defence Industry (DEC.), pp. 133-134
		Decision support for truck replacement Walker, J. 1995 Journal of Decision Systems 4(3), pp. 199-212
		SOLVING INDUSTRIAL REPLACEMENT PROBLEMS. Jardine, Andrew K.S. 1979 Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium pp. 136-141
		PLANNING A LIFT-TRUCK REPLACEMENT POLICY. Mesquita, T.L. 1977 Precast Concr 8(12), pp. 593-594
"truck replacement" AND models	0	
"truck replacement" AND complexity	0	
"vehicle replacement"	126	Optimal fleet replacement: A case study on a Spanish urban transport fleet Riechi, J., Máclan, V., Tormos, B., Avila, C. 2017 Journal of the Operational Research Society 68(8), pp. 886-894
"fleet replacement" AND complexity	1	
"vehicle replacement" AND complexity	0	
TITLE-ABS-KEY ("artificial neural networks" AND "trucking")	4	Prediction of fuel consumption of mining dump trucks: A neural networks approach, Siami-Irdemoosa, E., Dindarloo, S.R. 2015
TITLE-ABS-KEY ("artificial neural networks" AND "trucks") AND (EXCLUDE (SUBJAREA , "NEUR") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "AGRI") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "PHYS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "EART") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "MEDI") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "HEAL") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "ARTS") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "BIOC") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "CENG") OR EXCLUDE (SUBJAREA , "CHEM"))	104	Human vibration monitoring in large haul trucks - An artificial neural network approach Gupta, M., Szymanski, J., Sharma, A., Soni, R.K. 2007 Proceedings of the 16th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2007 pp. 203-208
		Modeling truck accident severity on two-lane rural highways Nassiri, H., Edrissi, A. 2006 Scientia Iranica 13(2), pp. 193-200
		Development of artificial neural network models to predict driver injury severity in traffic accidents at signalized intersections Abdelwahab, H.T., Abdel-Aty, M.A. 2001 Transportation Research Record (1746), pp. 6-13
		Computing truck attributes with artificial neural networks Gagarin, N., Flood, I., Albrecht, P. 1994 Journal of Computing in Civil Engineering 8(2), pp. 179-200

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. *Búsqueda sistemática en Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. Fecha de búsquedas: junio de 2019*

Alcance	Pertinencia	Base de Datos	Ecuación de Búsqueda	Resultados	Comentarios
Correlación del enfoque desde la Teoría de la Complejidad, la Dinámica de Sistemas y el fenómeno reemplazo de camiones en flotas vehiculares en Tesis la Universidad Nacional	identificar estudios o investigaciones en el área de la Teoría de la Complejidad y la renovación de equipos camiones o flotas en Tesis en Colombia.	Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia	Items del tema "3 Ciencias sociales / Social sciences > 38 Comercio, comunicaciones, transporte / Commerce, communications & transportation"	684	Ninguno tiene que ver con el reemplazo de equipos
			Documentos matches "TRANSPORTE" AND Unidad administrativa matches any of "Facultad de Ciencias Económicas"	313	Ninguno tiene que ver con el reemplazo de equipos
			Documentos matches "complejidad" AND Título matches "transporte"	67	Se encontraron 3 artículos que tienen interés pero no directamente
			Documentos matches "investigacion de operaciones" AND Unidad administrativa matches any of "Administración de Empresas"	58	Ninguno tiene que ver con el reemplazo de equipos
			Documentos matches "TRANSPORTE" AND Unidad administrativa matches any of "Maestría en Administración"	3	Ninguno tiene que ver con el reemplazo de equipos
			Item matches "complejidad AND transporte"	0	
			Título matches "TRANSPORTE" AND Unidad administrativa matches any of "Maestría en Administración"	0	

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 6 se presenta una muestra de la cantidad documentos entre artículos y libros revisados, de los cuales la gran mayoría se utilizaron en la construcción conceptual de las ciencias de la complejidad para el planteamiento del modelo de renovación y la definición de las variables que podrían incluirse en dicho modelo.

Tabla 6. *Artículos revisados para construcción conceptual de la complejidad y las variables de un modelo de renovación. Fecha de búsquedas: mayo de 2019*

Parte del Marco Teórico a aplicar	Temática Específica	Muestra de número de artículos recopilados y revisados por el autor
Modelos de renovación "tradicional"	Modelos de Renovación	13
Ciencias de la complejidad	Ciencias de La Complejidad	17
	Dinámica de Sistemas	20
	Humberto Maturana	11
	Autómatas Celulares	6
	Fractales	3
	Teoría del Caos	3
	Economía como Sistema Complejo	3
	Computación y Turing	2
Definición de variables adicionales a las "tradicionales"	Salud Ocupacional	17
	Polución-Huella de Carbono	8
	Lucro Cesante	6
	Obsolescencia Programada	2
	Accidentalidad	1
	Costo Psicológico	1
	TOTAL MUESTRA	**113**

Fuente: elaboración propia

Las fechas en las cuales se hicieron las búsquedas iniciales con relación al contexto se realizaron en los años 2017 y 2018; y las correspondientes al marco teórico, complejidad, dinámica de sistemas, etc. se realizaron durante los años 2017, 2018 y 2019.

Con el fin de actualizar o complementar fuentes de información que pudiesen aparecer poco actualizadas se utilizaron datos con los cuales se realizaron cálculos estimativos a partir de información de la Intranet de Corporaciones con las que el autor tiene relación comercial y laboral.

Cuando se encontraron los artículos que podrían fundamentar una adaptación al medio colombiano y al transporte de carga por carretera a partir de la dinámica de sistemas, el autor utilizó una de las herramientas de simulación existentes dentro de esta rama, llamada Vensim, la cual se utilizó directamente para reproducir algunos de los modelos encontrados en los artículos correspondientes.

En la Figura 8 se resumen las fases de la metodología de investigación utilizada para desarrollar esta tesis.

Figura 8. Fases metodológicas de la investigación

Fuente: elaboración propia

1.7 Alcance de la investigación

El alcance de esta tesis fue hacer una exploración, conceptualización y consolidación en un solo documento, como punto de partida, de las posibles variables a ser utilizadas en un modelo basado en la dinámica de sistemas, detectado por el autor de esta tesis a través de su proceso de investigación. Como resultado, se planteó un modelo denominado por el investigador como “nuclear” que debería servir de acondicionamiento cultural en la administración en pequeñas, medianas y grandes empresas para el registro de información de costos de operación y mantenimiento precisa y oportuna. Esto permitiría consolidar datos que pudieran ser útiles para la validación de las variables propuestas en futuras investigaciones y extender su utilización a simulaciones por computador del problema de reemplazo de camiones de carga pesada mayores a 10,5 toneladas de peso bruto vehicular en Colombia.

2 Contexto de la investigación

El contexto de la investigación fue el sector del transporte de carga por carretera en Colombia. Este apartado contiene una descripción de las principales características de esta industria en términos de la estructura empresarial, la intervención del Estado, la infraestructura, los costos del transporte, la demanda, etc.

2.1 Estado del parque automotor para transporte de carga por carretera en Colombia

Según el Ministerio de Transporte (2016, pág. 19), el transporte de carga por carretera (como porcentaje de su participación en el Producto Interno Bruto [PIB] de los servicios de transporte y estimado en 4.15 %), representaba a precios constantes para el 2015 el 69.29 % del total de mercancías movilizadas internamente por el territorio colombiano, siendo el principal medio seguido de otro tipo de transportes[5] con el 17.50 % y el aéreo con un 13.20 %.

La Figura 9 describe la distribución porcentual que evidencia la importancia del transporte terrestre por carretera en Colombia. De aquí se desprende la necesidad de entrar a detallar su comportamiento como elemento vital en la competitividad de la economía colombiana dada la dinámica globalizadora.

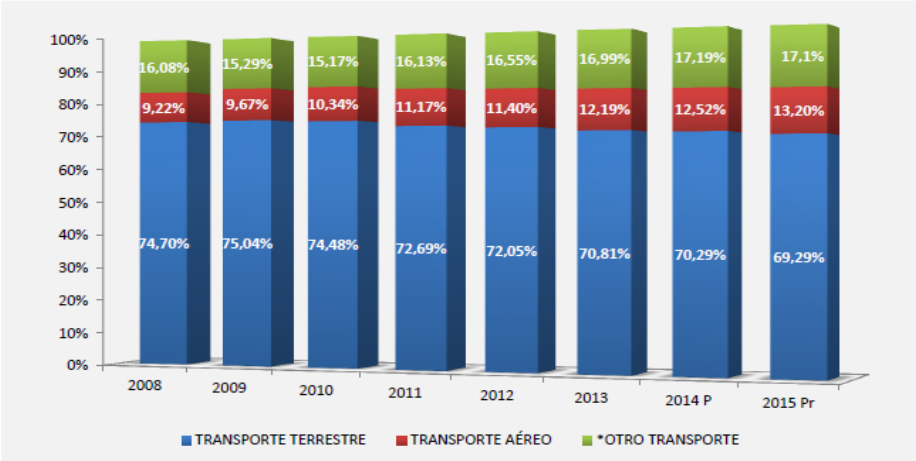

Figura 9. Participación de los servicios de transporte

Fuente: (Mintransporte, Transporte en Cifras Estadísticas 2015, 2016, pág. 21)

[5] Actividades complementarias y auxiliares al transporte; actividades de agencias de viajes y transporte por vía acuática.

También en la Figura 9 puede notarse cómo ha ido aumentando su participación en el PIB otro tipo de transportes, donde el más dinámico es el aéreo, en desmedro del terrestre. Aun así, un porcentaje cercano al 70 % determina que el transporte terrestre sigue siendo estratégico para Colombia.

Dentro de los diferentes tipos de vehículos utilizados para el transporte de mercancías existe una diferenciación en cuanto a tonelaje transportado, la cual provoca la existencia de diferentes clases. Estas se presentan en la Tabla 1 a partir del Peso Bruto Vehicular[6]. Los vehículos con capacidad de Peso Bruto Vehicular por encima de 10,5 toneladas son utilizados primordialmente en el transporte de mercancías en largas distancias, intermunicipales y vehículos de servicio severo[7].

Tabla 7. *Peso bruto de vehículos*

Peso Bruto Vehicular (toneladas)	**Descripción vehicular**
<4	Vehículos pequeños o camionetas
> 4 - < 7	Vehículos livianos
> 7 - < 10	Vehículos medianos
> 10	Vehículos pesados

Fuente: (Mintransporte, 2013)

2.2 Estructura de mercado

"La estructura de un mercado de transporte puede definirse como el modelo de organización a través del cual se realiza la producción final de los servicios" (De Rus et al., 2003, pág. 385).

Se busca un mejor entendimiento del sector de movilización de mercancías por carretera y el impacto que tiene una antigüedad muy alta del parque automotor en el desempeño competitivo

[6] De acuerdo con el artículo 2° del Código Nacional de Tránsito. Ley 769 del 2002, se define como: peso de un vehículo provisto de combustible, equipo auxiliar y el máximo de carga.

[7] "Categoría de Servicio I (servicio severo) se aplica a aquellos vehículos que recorren menos de 6000 millas (10 000 kilómetros) al año o que operan en condiciones extremadas. Algunos ejemplos de servicio severo correspondientes a la Categoría I incluyen: operación en caminos en muy mal estado o donde hay gran acumulación de polvo; exposición constante al calor o al frío extremos, o a aire salobre, o a otros tipos de clima extremo; recorridos frecuentes de corta distancia; operación en zonas de construcción; operación en ciudad (camión de bomberos); u operación agrícola".
(Daimler Trucks North America LLC, 2016, pág. 5).

de este modo de transporte de carga. Para esto se tiene en consideración la estructura particular de este mercado y los costos que aplican, la función de producción de transporte, la identificación de la demanda y la descripción y justificación de la formación de los precios. Además, se verifica si la congestión tiene un impacto en la fijación de los precios, se identifican los mecanismos de regulación y el análisis de las externalidades asociadas al transporte de carga por carretera.

En el caso del sector del transporte de carga por carretera en Colombia, en la provisión de servicios, se utiliza el modelo de libre competencia (De Rus et al., 2003). En este la intervención pública está limitada a suministrar el uso de la infraestructura y a regular las tarifas a través de la tabla de fletes o a una libertad de tarifas regulada por el Estado.

2.2.1 Propiedad de la infraestructura

En Colombia la propiedad de la infraestructura de vías es propiedad del Estado. Este las provee y mantiene a través de concesiones o en forma de contratación por licitaciones para el mantenimiento y operación de las vías. Como se observa en la Tabla 8, para el año 2015 había un total de 206 727 km de red vial en Colombia y se puede evidenciar que a partir de 2010 ha habido un incremento en el número de kilómetros.

Con respecto a los puertos o centrales de carga en los cuales se recoge o entrega la misma, para el caso de generadores de carga empresariales o puertos que han pasado a la esfera privada, la infraestructura puede ser de carácter privado. Mientras que en el caso de generadores de carga como Ecopetrol o los puertos que aún se mantienen como públicos[8], puede ser de carácter público.

Vale la pena hacer un enlace con el parque automotor debido a que un regular, mal o pésimo estado de las vías influirá directamente en el comportamiento de los vehículos en estas. Es claro que entre más exista deterioro en las carreteras, habrá mayores gastos por mantenimiento, daños y accidentes en los camiones. Como ejemplo se puede ver en las figuras 6 y 7 que en 2016 la malla vial primaria a cargo de Invías solo tiene un 22,96 % en estado muy bueno de la red total pavimentada y que es de 6387,24 km, lo que significa que más del 77 % de esta se encuentra entre buen y muy mal estado. De la red afirmada o sin pavimentar, cuyo total es de 2403,4 km, puede verse que apenas el 0,64 % se encuentra en estado muy bueno, es decir, más

[8] En 2009 existían 91 noventa y un puertos marítimos en el país, correspondientes a 53 cincuenta y tres de servicio público y 38 treinta y ocho de servicio privado (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2012, pág. 42).

del 99 % está entre buen y muy mal estado. Lo anterior evidencia el rezago de Colombia en cuanto a la infraestructura que el Estado, como propietario, suministra al transporte de mercancías por carreteras.

Tabla 8. *Infraestructura de transporte - modo carretero*

AÑO	PRIMARIAS			SECUNDARIAS	TERCIARIAS				TOTAL RED VIAL NACIONAL	PUENTES (unidad) Red Nacional y Red Terciaria – INVÍAS
	A cargo de la Nación		Subtotal	A cargo de los departamentos - PVR	A cargo de la Nación – INVIAS	A cargo de los departamentos *	A cargo de los municipios*	Subtotal		
	Concesionado - ANI	No concesionado - INVIAS								
2002	0	16.531	16.531	27.918	240	ND	72.561	72.801	**117.250**	2.296
2003	0	16.528	16.528	34.918	240	ND	65.653	65.893	**117.339**	2.296
2004	0	16.677	16.677	34.918	145	ND	72.761	72.906	**124.501**	2.296
2005	0	16.750	16.750	34.918	145	ND	72.761	72.906	**124.574**	2.296
2006	2.628	14.143	16.771	34.918	145	ND	72.761	72.906	**124.595**	2.296
2007	3.380	13.296	16.676	34.918	145	ND	72.761	72.906	**124.500**	2.361
2008	3.400	13.276	16.676	34.918	27.577	ND	72.761	100.338	**151.932**	2.534
2009	3.400	13.386	16.786	34.918	27.577	ND	72.761	100.338	**117.234**	2.534
2010	5.680	11.463	17.143	38.315	27.577	21.469	86.633	135.679	**191.137**	2.314
2011	5.578	11.320	16.898	42.954	27.577	13.959	100.409	141.945	**201.797**	3.947
2012	5.262	11.856	17.118	43.327	27.577	13.959	100.409	141.945	**202.390**	3.947
2013	5.202	11.835	17.037	44.399	27.577	13.959	100.419	141.955	**203.392**	3.947
2014	6.240	11.194	17.434	45.137	27.577	13.959	100.748	142.284	**204.855**	3.947
2015	10.389	8.917	19.306	45.137	27.577	13.959	100.748	142.284	**206.727**	5.097**

Fuente: (Mintransporte, 2016, pág. 34).

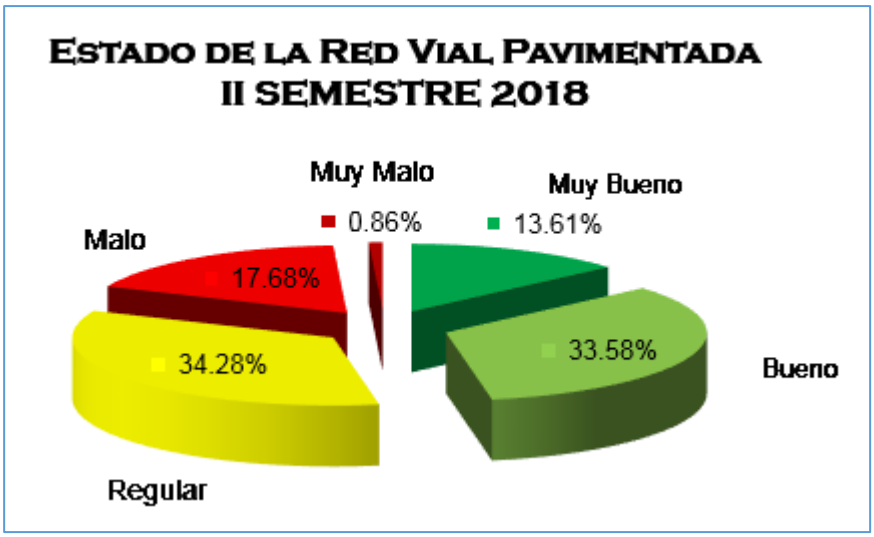

Figura 10. Estado de la red vial pavimentada, segundo semestre de 2018

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2018, pág. 1).

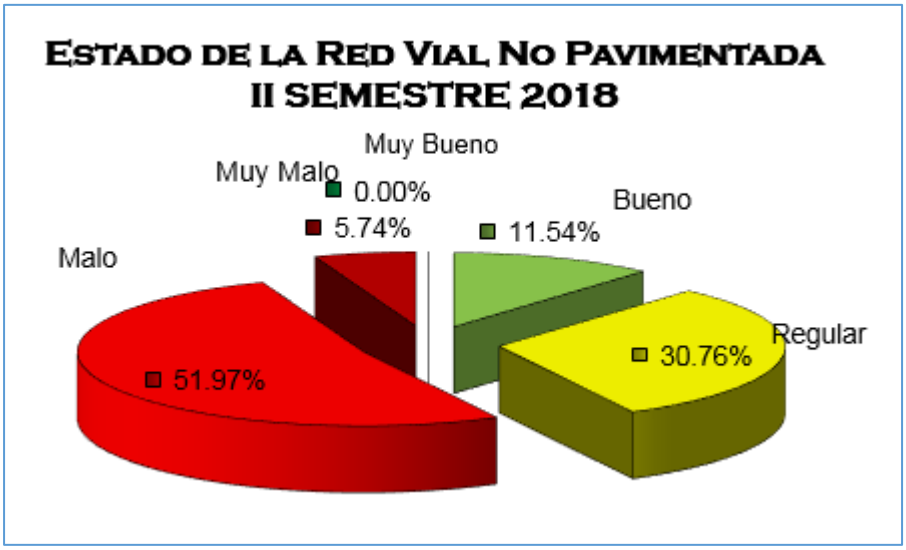

Figura 11. Estado de la red vial no pavimentada, segundo semestre de 2018

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2018, pág. 1).

2.2.2 Estructura empresarial

Para presentar la estructura empresarial del transporte de carga por carretera en Colombia se usará como base el Conpes 3489 de 2007, debido a que recoge el estudio general más actualizado disponible y se asume que la estructura allí descrita, aunque ha variado principalmente por la decisión de compañías generadoras de carga de introducirse como transportadores principales de sus propios productos, en sus fundamentos sigue siendo la misma.

En Colombia existían para el mencionado período 1582 empresas habilitadas para prestar el servicio de transporte de carga por carretera, de las cuales el 59 % eran sociedades limitadas y el 73 % estaban localizadas en la región Andina (ver Figura 11). Esta cantidad era relativamente baja si se tiene en cuenta que en México operan más de 60.000 empresas y en Brasil existen más de 45.000 (Banco Mundial, 2006, págs. 54-55).

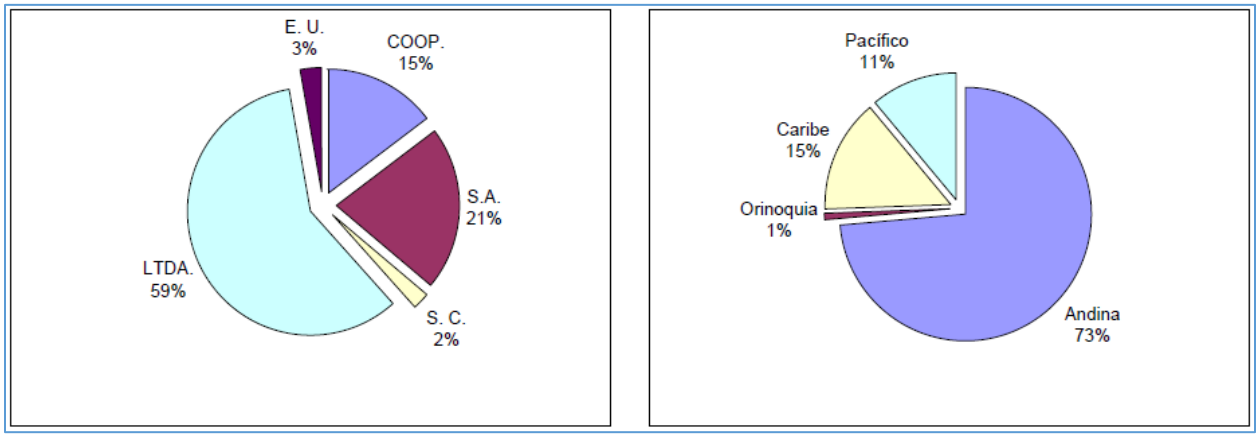

Figura 12. Distribución de empresas de transporte en 2007

Fuente: Ministerio de Transporte

Existen diferentes modalidades operacionales dentro de las que se encuentran empresas *1)* que están organizadas con una amplia capacidad técnica y financiera y con un parque automotor propio; *2)* que articulan la oferta y la demanda de transporte y realizan su operación por medio de la contratación de un tercero, y *3)* que se limitan a la expedición del manifiesto de carga[9].

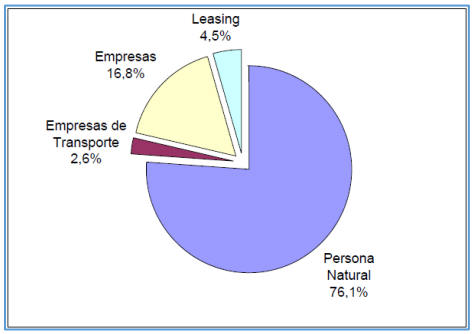

Figura 13. Distribución de la propiedad del parque automotor en 2005

Fuente: Ministerio del Transporte.

Por otro lado, el sector de transporte de carga por carretera en el año 2005 se caracterizaba primordialmente por la propiedad individualizada del parque automotor, tal como se puede

[9] Un ejemplo de esta situación es SAB Miller (Ahora ABInBev) que a finales de 2010 decidió adquirir una compañía de transporte que le prestaba el servicio de movilización de bebidas en medianas y largas distancias para convertirla en un centro de negocios adscrita a la Holding central. SAB Miller adquirió la operación y los vehículos de Transportes Monrub y la convirtió en Transportes TEV. En su momento adquirieron directamente más de 100 tractocamiones para suplir la operación de terceros por vehículos propios. Existen eEjemplos como estose hay en varios sectores de la industria generadora de carga, como la industria del cemento, el transporte de granos para la industria avícola, etc.

evidenciar a través de la Figura 13, en donde se observa que el 76,1 % era de propiedad de personas naturales, el 16,8 % pertenecía a empresas privadas y el 2,55 % era de empresas de transporte, de las cuales solo 8 poseían más de 100 vehículos (Ministerio de Transporte, 2007, págs. 10-11).

Si bien dicha información es de hace más de catorce años, esta resulta ser la más actualizada y completa disponible en el Ministerio de Transporte sobre la propiedad de vehículos de carga pesada en Colombia. No obstante, como complemento a lo presentado en los párrafos anteriores el autor presenta a continuación en la Figura 14 y en la Tabla 9 la composición estimada de la propiedad del parque automotor de tractocamiones para los años 2010 a 2018 de una muestra del país, a partir del análisis de la información de ventas obtenida de un distribuidor de camiones en Colombia[10].

En la figura puede verse que las compras de 6038 tractocamiones a este distribuidor[11] fueron realizadas por un total de 2125 clientes, de los cuales el 63 % tenían como tipo de sociedad mercantil a personas naturales, el 13 % sociedades por acciones simplificadas (S.A.S.), el 11 % sociedades limitadas (Limitada) y el 10% sociedades anónimas (S.A.).

Lo anterior tiende a ser congruente con la información publicada por el Ministerio de Transporte en el 2005 y 2007, pues permite afirmar que en Colombia el transporte de carga por carretera tiene una alta concentración en personas naturales propietarias de una pequeña cantidad de camiones (uno a cinco camiones).

[10] De acuerdo con el Decreto 173 de 2001 el manifiesto de carga es el documento que ampara el transporte de mercancías ante las distintas autoridades. Por lo tanto, debe ser portado por el conductor del vehículo durante todo el recorrido. Se utiliza para llevar las estadísticas del transporte público de carga por carretera dentro del territorio nacional.

[11] Dicho distribuidor es uno de los más grandes en Colombia y representa para este período (2010-2018) el comportamiento en ventas de la segunda marca más importante de camiones de más de 10.5 toneladas de Peso Bruto Vehicular, en dicho mercado. No se puede revelar la fuente en este trabajo debido al secreto industrial y la sensibilidad de los datos. Fuente derivada de la intranet (no accesible públicamente).

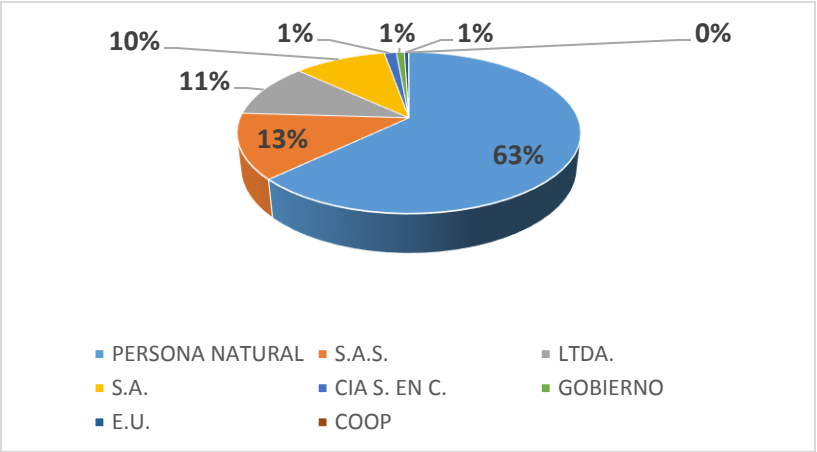

Figura 14. Propiedad por tipo de sociedad comercial de una muestra de tractocamiones del 2010-2018 en Colombia

Tabla 9. *Propiedad por tipo de sociedad comercial de una muestra de tractocamiones del 2010-2018 en Colombia*

TIPO DE SOCIEDAD COMERCIAL	CANTIDAD DE TRACTOCAMIONES	CANTIDAD DE CLIENTES	PROMEDIO	PORCENTAJE DE CLIENTES POR TIPO DE SOCIEDAD COMERCIAL
PERSONA NATURAL	1767	1336	1	62.87%
S.A.S.	1131	278	4	13.08%
LTDA.	696	232	3	10.92%
S.A.	2234	220	10	10.35%
CIA S. EN C.	133	29	5	1.36%
GOBIERNO	61	19	3	0.89%
E.U.	14	10	1	0.47%
COOP	2	1	2	0.05%
	6038	**2125**		

Fuente: elaboración propia a partir de datos derivados de la intranet (no accesible públicamente).

2.2.3 Actores relevantes en la prestación del servicio de transporte por carretera

En la prestación del servicio de transporte de carga por carretera se establece una cadena de actores involucrados para cumplir con su objetivo primordial, el cual es trasladar mercancías por vías de un punto a otro en condiciones de seguridad, eficiencia, economía y con la menor afectación posible al medio ambiente.

De esta manera, a través del ejercicio práctico, se han identificado los siguientes actores relevantes: el generador de carga, la empresa de transporte, el propietario del vehículo, el conductor del vehículo, el destinatario de la carga y las entidades gubernamentales.

2.2.4 Papel del Estado en la regulación de la actividad de las empresas

Según el Ministerio de Transporte (2008) en su diagnóstico del sector, existe un claro enfrentamiento entre los actores de la cadena productiva debido a la falta de conocimiento de la relación existente entre cada uno de ellos, lo cual ha ocasionado una afectación de las relaciones comerciales dentro de la misma cadena, que a su vez ha obligado al Estado a entrar a participar como ente regulador a través de mecanismos de control de los precios a cobrar por los servicios de transporte, que en Colombia se conoce como "La Tabla de Fletes"[12]; cuyo objetivo es regular principalmente la relación entre las empresas de transporte y los propietarios de los vehículos (ver Figura 14).

[12] Las relaciones económicas entre la empresa de transporte y el propietario del vehículo están reguladas por la Resolución 888 de 2006 del Ministerio de Transporte, donde se establecen los valores mínimos (tabla de fletes entre cada origen y destino) que la empresa debe reconocer al propietario del vehículo por la movilización de la mercancía objeto del contrato de transporte. Sin embargo, en la práctica se presentan ineficiencias en el cumplimiento y control efectivo de estos valores, lo cual genera brechas entre los costos operativos, los valores pactados para la movilización y los valores establecidos por la tabla de fletes.

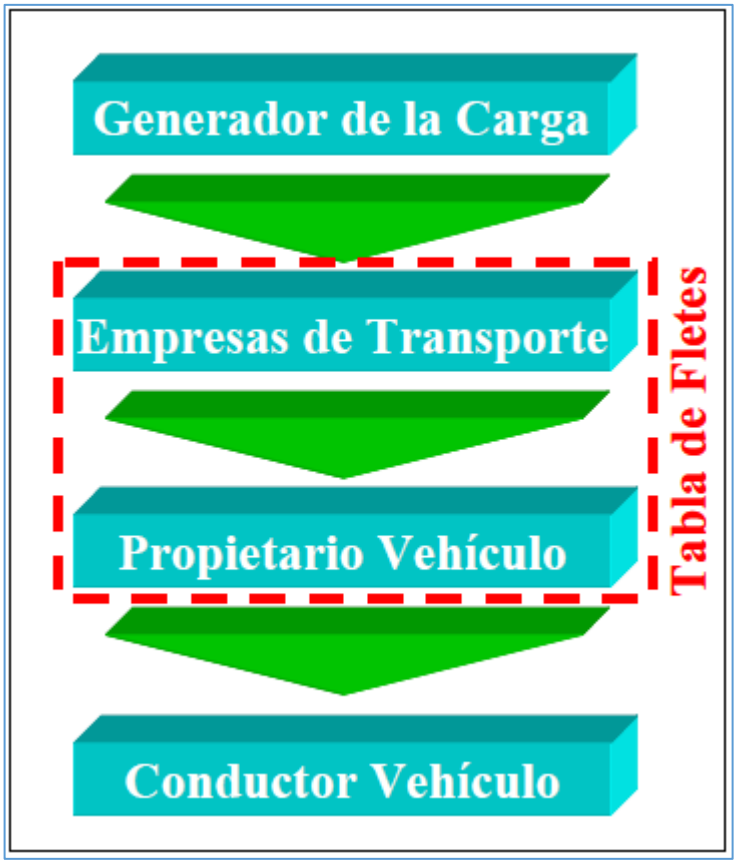

Figura 15. Estructura organizacional del sector

Fuente: (Ministerio de Transporte, Documento Conpes 3489 Política Nacional de transporte público automotor de carga, 2007, pág. 6).

Existe un mecanismo desarrollado a partir de los lineamientos definidos en el Conpes 3489:

> De armonizar las relaciones económicas de todos y cada uno de los integrantes de la cadena, de acuerdo con principios de eficiencia, sostenibilidad, desarrollo y competitividad del sector, es necesario migrar hacia un esquema de regulación basado en el principio de intervenir sólo en los casos en que se presenten fallas de mercado y para esto, se propone la creación del Índice de Precios del Transporte – IPT. Dicho índice deberá estar fundamentado en una metodología que refleje la realidad del mercado, que contenga una estructura de costos de operación eficiente y que sirva de base para formular parámetros de regulación y fórmulas tarifarias. (Ministerio de Transporte, 2007, pág. 8)

El mecanismo descrito se denomina "Política de libertad de tarifas" y tiene tres objetivos principales: vigilancia, concertación y pedagógico[13]. Esta política se fundamenta en una

[13] "Política de Libertad de Tarifas busca modernizar el sector, promover la competencia y la innovación. El objetivo de la medida es permitir que los más eficientes tengan la posibilidad de competir con menores precios, mientras que el gobierno monitorea el mercado y garantiza el pago de tarifas justas de forma

herramienta electrónica llamada SICE-TAC, acrónimo de Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga[14].

Con respecto a la estructura del mercado en la industria del transporte de carga por carretera, se puede anotar con un alto grado de certeza que esta se enmarca en la definición establecida por De Rus, Campós y Nombela (2003) en la Figura 15.

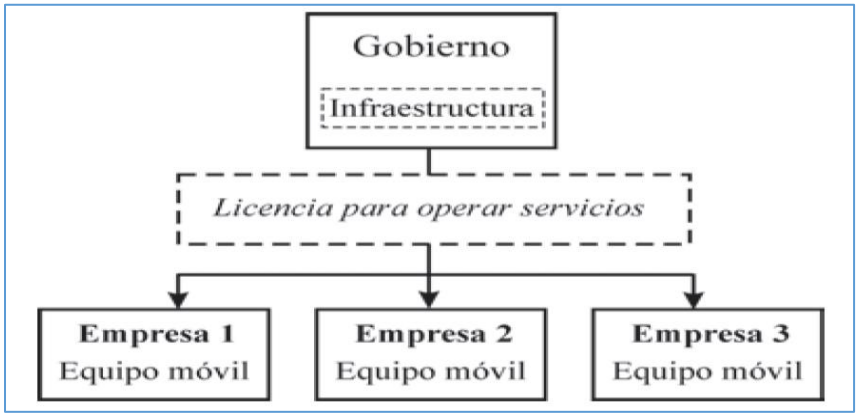

Figura 16. Propiedad pública de la infraestructura y operadores privados

Fuente: (De Rus et al., 2003, pág. 400).

generalizada. La nueva política tarifaria tiene tres objetivos principales: VIGILANCIA: monitorear el mercado de tal forma que el Estado identifique las situaciones que requieren de su intervención. CONCERTACIÓN: permitir que el propietario, el generador y la empresa de transporte tengan un criterio que facilite la negociación.
PEDAGÓGICO: dotar de herramientas a conductores y propietarios que les permitan conocer la estructura de costos del transporte de carga y así tecnificar su operación." (Ministerio de Transporte, 2017)

[14] "El SICE-TAC. Es un sistema de información que permite medir o calcular los costos de la operación de transporte de acuerdo con las características propias de cada viaje: tipo de vehículo, tipo de carga, origen/destino, horas estimadas de espera, cargue y descargue.
Esta es la estructura de los costos de operación:
Estructura costos operación
Estructura de Costos
Costos variables: son aquellos que se generan por la movilización del vehículo. Están dentro de estos costos, los combustibles, el mantenimiento y reparaciones, las llantas, los peajes, los lubricantes, el lavado y engrase y los imprevistos.
Costos fijos: son aquellos en los que incurre el propietario del vehículo independientemente de si está en operación o no. Están dentro de estos costos, los salarios y prestaciones básicas (tripulación), los seguros, el parqueadero, los impuestos y la recuperación de capital.
Otros costos: son los que dependen de la facturación del viaje que se va a realizar. Están dentro de estos costos, las comisiones y prestaciones, el factor de administración, la retefuente y la reteICA." (Ministerio de Transporte, 2017)

2.3 Costos del transporte de carga por carretera

Para la definición de los costos del transporte de carga por carretera se tomará como base teórica la fundamentación de De Rus et al. (2003), principalmente en cuanto a la estructura de costos y al modelo para la determinación de costos de referencia utilizados actualmente para cumplir con la política de libertad de tarifas en Colombia, que representa la forma en la cual el Estado tiene la potestad de intervenir si encuentra fallas en el mercado de esta industria.

Según De Rus et al. (2003) el coste social total (Cs) al que una sociedad debe enfrentarse para disfrutar de determinado nivel de prestación de servicios e infraestructura de transporte tiene involucrado los costos del productor (Cp), los costos de los usuarios (Cu) y los costos externos (Ce), y se puede presentar bajo la expresión matemática:

$$Cs = Cp+Cu+Ce$$

2.3.1 Costos del productor

En el caso del transporte de carga por carretera los costos del productor incluyen los de la infraestructura, los de los equipos móviles y los de operación. En cuanto a la infraestructura, como se anotó, las vías transitadas están a cargo del Estado a través de su gestión directa o a través de concesiones[15]. Por tanto, la infraestructura física a la que debería directamente hacer frente un transportador serían los parqueaderos y talleres en el caso de empresas grandes y organizadas, si se deciden a tener terrenos propios de operación; en el caso de los transportadores independientes pequeños o aquellos que son dueños y operadores de su propio camión, este costo de infraestructura no se tendría en cuenta directamente, sino a través del pago a destajo o por contrato de los parqueaderos de los vehículos y, por supuesto, la estadía en los talleres de mantenimiento y reparación correría por cuenta del prestador de dichos servicios y serían cobrados a través de las facturas a los transportadores.

La estructura de los costos de operación tiene tres elementos básicos: variables, fijos y otros. Dentro de los costos variables los rubros más importantes son los peajes, el combustible, las

[15] Debido a que los costos de construcción y mantenimiento de las vías de concesión se recuperan por el inversionista constructor a través del cobro de peajes, el transportador en efecto si paga parte del uso de esa infraestructura vial a través de este medio, de hecho, en su estructura de costos, los peajes en Colombia se convierten en un rubro importante para tener en cuenta en cualquier análisis de rentabilidad.

llantas, los lubricantes, los filtros, el mantenimiento, los servicios de estación y los imprevistos. Mientras que los costos fijos contemplan los seguros, los salarios y prestaciones básicas (tripulación), el parqueadero, los impuestos y la recuperación del capital. Y los otros contemplan las retenciones, la comisión del conductor, la facturación y los gastos de administración.

En Colombia existe, a partir de la implementación de la política de libertad de tarifas, el índice de costos del transporte de carga por carretera (ICTC) que es publicado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para conocimiento de todo el sector transportador. Como ejemplo puede verse la Tabla 10, que muestra la ponderación e índices por total nacional y por grupo de costos de 2009 a 2017 y que evidencia cómo los combustibles, los costos fijos y peajes son más del 85 % de los costos totales de operación (ver figuras 16 y 17).

Tabla 10. *ICTC. Ponderación e índices total nacional y por grupos de costos (2009–2019)*

Periodo		Mensual								
			Grupos de Costos							
		Total nacional	Combustibles		Insumos		Costos fijos y peajes		Partes, piezas, servicios de mantenimiento y reparación	
			Variación (%)	Contribución (p.p.)	Variación (%)	Contribución (p.p.)	Variación (%)	Contribución (p.p.)	Variación (%)	Contribución (p.p.)
2009	Marzo	0.79	0.51	0.15	2.40	0.22	0.54	0.29	1.79	0.13
	Junio	-2.28	-6.37	-1.92	0.22	0.02	-0.78	-0.42	0.50	0.04
	Septiembre	-0.20	0.72	0.21	-0.41	-0.04	-0.65	-0.35	-0.32	-0.03
	Diciembre	0.03	1.04	0.31	-0.32	-0.03	-0.38	-0.20	-0.53	-0.04
2010	Marzo	1.32	3.15	0.93	0.65	0.06	0.64	0.34	-0.10	-0.01
	Junio	0.99	2.63	0.79	0.65	0.06	0.30	0.16	-0.22	-0.02
	Septiembre	1.17	4.35	1.33	0.98	0.09	-0.40	-0.21	-0.52	-0.04
	Diciembre	1.34	4.37	1.38	0.22	0.02	-0.06	-0.03	-0.38	-0.03
2011	Marzo	2.11	2.95	0.96	2.00	0.18	1.85	0.95	0.27	0.02
	Junio	1.40	2.39	0.78	2.06	0.19	0.80	0.41	0.24	0.02
	Septiembre	0.09	-0.93	-0.31	1.74	0.16	0.51	0.26	-0.31	-0.02
	Diciembre	1.65	4.41	1.44	0.96	0.09	0.23	0.12	0.14	0.01
2012	Marzo	2.48	3.86	1.30	1.90	0.18	2.11	1.06	-0.78	-0.05
	Junio	-0.33	-1.25	-0.42	0.14	0.01	0.18	0.09	-0.14	-0.01
	Septiembre	0.15	0.99	0.33	-1.10	-0.10	-0.13	-0.07	-0.25	-0.02
	Diciembre	0.50	1.60	0.54	-1.29	-0.12	0.19	0.10	-0.29	-0.02
2013	Marzo	0.94	1.92	0.66	1.22	0.11	0.31	0.16	0.22	0.01
	Junio	-1.60	-2.33	-0.81	0.19	0.02	-1.62	-0.81	0.01	0.00
	Septiembre	0.01	1.74	0.60	-0.13	-0.01	-1.18	-0.59	0.19	0.01
	Diciembre	-0.02	-0.29	-0.10	-0.07	-0.01	0.18	0.09	0.04	0.00
2014	Marzo	1.48	1.15	0.40	1.12	0.10	1.90	0.94	0.68	0.05
	Junio	-0.13	0.82	0.29	-0.02	0.00	-0.88	-0.43	0.26	0.02
	Septiembre	0.13	-0.17	-0.06	-0.69	-0.06	0.51	0.25	0.00	0.00
	Diciembre	1.01	-1.25	-0.44	0.26	0.02	2.78	1.37	0.86	0.06
2015	Marzo	0.44	-6.19	-2.12	1.84	0.16	4.31	2.16	3.56	0.24
	Junio	0.68	1.53	0.49	1.47	0.13	-0.13	-0.07	1.80	0.12
	Septiembre	1.35	-1.61	-0.52	2.33	0.21	2.72	1.41	3.53	0.25
	Diciembre	0.39	-2.40	-0.75	1.93	0.18	1.58	0.83	1.86	0.13
2016	Enero	1.41	-0.56	-0.23	1.00	0.10	3.28	1.48	1.02	0.05
	Febrero	0.00	-1.59	-0.63	0.86	0.08	1.08	0.50	0.85	0.04
	Marzo	-0.81	-0.34	-0.13	0.52	0.05	-1.65	-0.77	0.65	0.03
	Abril	-0.36	-0.43	-0.17	0.38	0.04	-0.53	-0.24	0.29	0.01
	Mayo	0.54	0.92	0.36	0.07	0.01	0.36	0.17	0.09	0.00
	Junio	0.00	0.05	0.02	0.15	0.02	-0.11	-0.05	0.32	0.02
	Julio	0.12	0.06	0.02	0.07	0.01	0.19	0.09	0.12	0.01
	Agosto	-0.27	-0.90	-0.35	-0.32	-0.03	0.27	0.12	-0.07	0.00
	Septiembre	0.43	1.52	0.59	0.19	0.02	-0.41	-0.19	0.09	0.00
	Octubre	-0.06	-0.04	-0.02	0.17	0.02	-0.13	-0.06	-0.06	0.00
	Noviembre	0.99	1.57	0.62	0.10	0.01	0.78	0.36	-0.01	0.00
	Diciembre	-0.29	0.00	0.00	0.23	0.02	-0.70	-0.32	0.20	0.01
2017	Enero	2.09	2.57	1.02	1.57	0.16	1.87	0.85	1.43	0.07
	Febrero	0.53	-0.02	-0.01	1.18	0.12	0.80	0.36	1.06	0.05
	Marzo	0.35	0.41	0.16	0.73	0.07	0.21	0.10	0.22	0.01
	Abril	-0.16	-0.05	-0.02	0.52	0.05	-0.43	-0.20	0.02	0.00
	Mayo	0.04	-0.02	-0.01	0.30	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00
	Junio	0.05	0.07	0.03	0.14	0.01	0.01	0.00	0.10	0.00
	Julio	0.04	0.14	0.05	0.16	0.02	-0.07	-0.03	0.06	0.00
	Agosto	0.29	1.13	0.45	0.27	0.03	-0.41	-0.19	-0.05	0.00
	Septiembre	0.55	1.57	0.63	0.05	0.00	-0.19	-0.09	-0.03	0.00
	Octubre	0.01	0.00	0.00	-0.04	0.00	0.03	0.01	0.09	0.00
	Noviembre	0.15	0.04	0.01	0.15	0.01	0.26	0.12	0.07	0.00
	Diciembre	0.71	1.87	0.75	0.04	0.00	-0.10	-0.05	-0.01	0.00
2018	Enero	0.70	-0.02	-0.01	0.13	0.01	1.56	0.69	0.11	0.01
	Febrero	0.83	1.46	0.59	0.27	0.03	0.43	0.19	0.35	0.02
	Marzo	0.03	0.06	0.02	0.10	0.01	-0.03	-0.01	0.30	0.01
	Abril	-0.13	-0.01	0.00	0.12	0.01	-0.34	-0.15	0.15	0.01
	Mayo	0.64	1.06	0.43	0.04	0.00	0.45	0.20	0.08	0.00
	Junio	0.78	1.82	0.75	0.02	0.00	0.07	0.03	-0.07	0.00
	Julio	0.04	0.05	0.02	0.03	0.00	0.02	0.01	0.06	0.00
	Agosto	0.10	-0.01	-0.01	0.18	0.02	0.19	0.08	0.07	0.00
	Septiembre	0.64	1.14	0.47	0.08	0.01	0.35	0.15	0.03	0.00
	Octubre	0.57	1.25	0.52	0.07	0.01	0.10	0.04	0.02	0.00
	Noviembre	0.63	0.90	0.38	0.11	0.01	0.55	0.24	0.17	0.01
	Diciembre	0.20	0.19	0.08	0.33	0.03	0.18	0.08	0.18	0.01
2019	Enero	0.57	-0.37	-0.16	0.28	0.03	1.54	0.67	0.48	0.02
	Febrero	0.61	1.07	0.44	0.28	0.03	0.29	0.13	0.30	0.01
	Marzo	0.33	0.63	0.26	0.12	0.01	0.09	0.04	0.23	0.01
	Abril	0.16	0.23	0.10	0.18	0.02	0.08	0.03	0.18	0.01
	Mayo	0.24	-0.02	-0.01	0.10	0.01	0.52	0.23	0.20	0.01
	Junio	0.04	0.18	0.08	0.18	0.02	-0.15	-0.07	0.31	0.01
	Julio	0.52	1.47	0.62	0.09	0.01	-0.26	-0.11	0.11	0.01
	Agosto	0.41	0.00	0.00	0.15	0.01	0.90	0.39	0.18	0.01
	Septiembre	**0.47**	**0.96**	**0.40**	**0.22**	**0.02**	**0.05**	**0.02**	**0.46**	**0.02**

Fuente: (DANE, 2019, pág. 2)

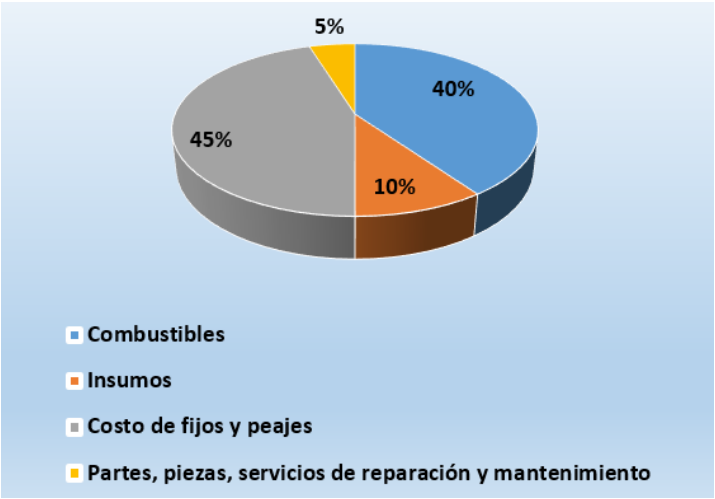

Figura 17. ICTC. Porcentajes ponderados de grupos de costos

Fuente: elaboración propia a partir de DANE (2019, pág 2).

Figura 18. ICTC. Porcentajes ponderados de subgrupos de costos

Fuente: elaboración propia a partir de DANE (2019, pág. 3)

2.3.2 Costos del usuario

En el transporte de carga por carretera se presentan dos formas de acercarse a la definición de los costos de los usuarios: la primera, lo plantea como aquel en el que una empresa de una industria diferente a la del transporte decide adquirir una flota de camiones y utilizar su personal para conducirlos y así transportar sus propias mercancías, en lugar de contratar los servicios con una empresa de transporte. En este caso, se unen en un solo agente los costos de los usuarios (tiempo) con los costos del productor (gastos de operación del vehículo). La segunda, lo define como el transporte por cuenta ajena, en el cual "el precio pagado por un usuario al proveedor de transporte en forma de flete no forma parte del costo del usuario, puesto que no se trata de un input aportado por éste a la actividad del transporte" (De Rus et al., 2003, pág. 98). Por tanto, para cualquiera de los dos tipos de usuarios definidos en este párrafo, la principal partida de coste viene determinada por el coste de oportunidad del tiempo invertido por sus mercancías en transportarse de un punto a otro. Este coste se puede definir matemáticamente con la expresión:

$$Cu(q,t) = vtq$$

Donde **t** es el tiempo consumido en cada viaje, **v** es el valor de dicho tiempo para el usuario y **q** el número de viajes realizados (De Rus et al., 2003).

2.3.3 Costos externos

De acuerdo con la definición por parte de De Rus et al. (2003), para el modo carretero los verdaderos costos externos llevan a considerar la contaminación ambiental derivada del transporte en términos de emisión de gases contaminantes y ruido, debido a que esta afecta a toda la sociedad, sean usuarios o no del modo de transporte en particular; también los accidentes cuyo efecto social abarca no solo a los involucrados en los mismos sino a toda la sociedad en su conjunto. Otro costo externo es el que se genera por las varadas constantes en vehículos obsoletos o por la disminución de la velocidad promedio, la cual no es atribuible a la congestión sino a la baja capacidad para transitar a una velocidad dentro de los límites de la seguridad vial correspondiente y regulada por el Estado.

En el caso de los vehículos, la caracterización de los costos totales, medios o unitarios y los marginales está determinada con relación al tiempo o a la distancia según De Rus et al. (2003), así como a la carga a transportar o capacidad. De esta forma en el transporte de mercancías por carretera para largas distancias y cargas hasta de 52 toneladas se utilizan tractocamiones, para

distancias cortas y cargas medianas se utilizan vehículos desde 17 toneladas hasta 28 toneladas, y para distancias cortas entre ciudades y urbanas con cargas pequeñas se utilizan vehículos hasta de 17 toneladas.

2.3.4 Costos de operación del equipo móvil

Otro punto de enlace con el objetivo del trabajo de establecer un modelo para la renovación oportuna de una flota vehicular, son los costos de operación del equipo móvil, cabe señalar que, tal como se mostró en los costos del productor para el modo carretero, estos se analizarán más adelante en la explicación de la función de producción.

> Muchos de estos elementos se encuentran relacionados entre sí. Los gastos de mantenimiento, por ejemplo, pueden alargar la vida útil de los vehículos, permitiendo a la empresa de transporte utilizar durante más tiempo su equipo móvil. En ocasiones, la decisión de renovar la flota puede reemplazarse por un incremento en los gastos de mantenimiento, utilizando por ejemplo las piezas de los equipos que dejan de funcionar como repuesto para el resto de los vehículos (De Rus et al., 2003, pág. 93).

La estructura de costos

> En el caso del transporte por carretera depende del tipo de vehículo utilizado (el cual depende a su vez del tipo de mercancía) y de la distancia recorrida. En el transporte de carga a media y larga distancia por medio de camiones los costes de combustible y personal son los más importantes, aunque en ocasiones la posibilidad de hacer viajes de retorno sin carga complica los mecanismos de asignación correcta de dichos costes (De Rus et al., 2003, pág. 94).

2.4 Función de producción

En este punto del estudio es necesario precisar que los factores de la función de producción son:

$$q= f (K,E,L,F,N;t)$$

Correspondientes a E (equipo movil), L (trabajo), F (energía y repuestos); tal como se explicó anteriormente K (unidades de infraestructura) que está a cargo del Estado[16], t (tiempo de los usuarios) y N (recursos naturales) forman parte de los costos de los usuarios y de los costos externos.

Al analizar la incidencia de los factores en la productividad se puede anotar que un equipo móvil obsoleto incidirá directamente sobre los otros factores, en tanto que habrá un mayor consumo de combustible, en principio, por menores eficiencias en el proceso de combustion, además de un mayor consumo de repuestos y mantenimiento. Esto último por el lógico deterioro de los componentes del camión, así como por la retención de los conductores debido a la falta de garantías ergonómicas[17] y de seguridad industrial. Lo anterior conlleva una alta rotación de conductores y una continua contratación de otros que pueden no tener la experiencia necesaria y ocasionar daños mayores en los vehículos, e incrementar a su vez el costo de reparación y mantenimiento de las unidades.

Sobre la base de las definiciones de De Rus et al. (2003) la adaptación de los ejemplos de los indicadores técnicos y económicos para este modo de transporte sería la que se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. *Ejemplos de indicadores técnicos y económicos utilizados en el transporte de carga por carretera*

	Tipo	Objetivo a medir	Ejemplos
Indicadores técnicos	$\frac{OUTPUT}{INPUT}$	Productividad media	$\frac{Ton-km}{Trabajadores}$, $\frac{Ton-km}{Flota}$
	$\frac{OUTPUT}{OUTPUT}$	Composición del producto Distribución de tráficos Coeficientes de ocupación	$\frac{Ton-km}{Capacidad\ máxima\ de\ carga-km}$
	$\frac{OUTPUT}{INPUT}$	Uso relativo de factores Eficiencia técnica	$\frac{Capital}{Trabajo}$, $\frac{Flota}{Empleados}$
Indicadores económicos	$\frac{INGRESOS}{OUTPUT}$	Ingreso medio	$\frac{Ingresos}{Ton}$, $\frac{Beneficios}{Ton-km}$
	$\frac{INGRESOS}{INPUT}$	Rentabilidad de los factores	$\frac{Ingresos}{Trabajadores}$, $\frac{Beneficios}{km}$
	$\frac{COSTES}{OUTPUT}$	Coste medio	$\frac{Costes}{Viajes}$, $\frac{Costes}{Ton-km}$
	$\frac{COSTES}{INPUT}$	Coste de los factores Eficiencia económica	$\frac{Coste\ laboral}{Trabajadores}$, $\frac{Coste\ energía}{Flota}$
	$\frac{INGRESOS}{COSTES}$	Ratios de cobertura Costes e ingresos relativos	$\frac{Ingresos}{Costes}$

Fuente: adaptado de De Rus et al. (2003, pág. 62)

2.5 La demanda de transporte

Para el año 2018 la demanda estimada de transporte por carretera fue de más de 243 millones de toneladas, de acuerdo con el Ministerio de Transporte (2018), tal como describe la Figura 19, en la cual se puede evidenciar una tendencia incremental desde 1990 hasta los últimos datos disponibles de 2018.

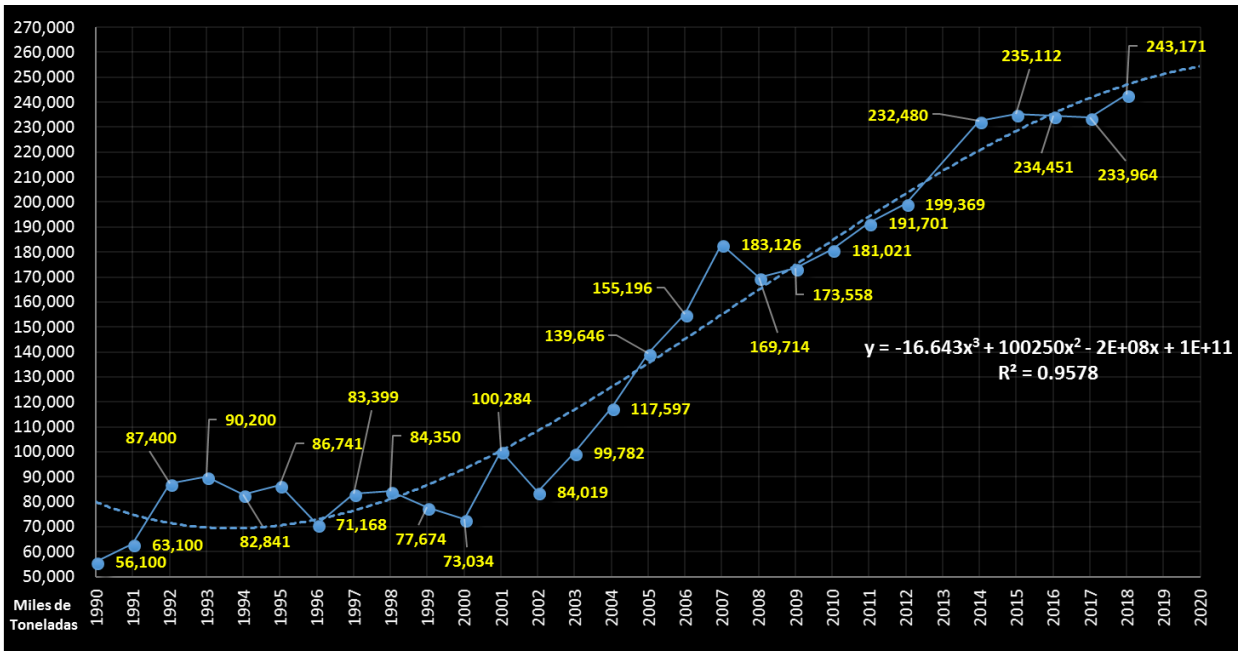

Figura 19. Movimiento de carga nacional por modo de transporte carretero

Fuente: elaboración propia a partir de datos de Ministerio de Transporte (2018, pág. 75)

Resulta evidente el crecimiento del transporte de carga por carretera y si adicionalmente se hace una extrapolación simple, con una función polinomial de tercer orden, puede verse cómo la carga tendría un crecimiento para los años 2019 y 2020. Este comportamiento sería coherente con el bajo crecimiento en el PIB de Colombia durante los últimos tres años y que para el año 2017 se encontraba en 1.4 % (ver Figura 20).

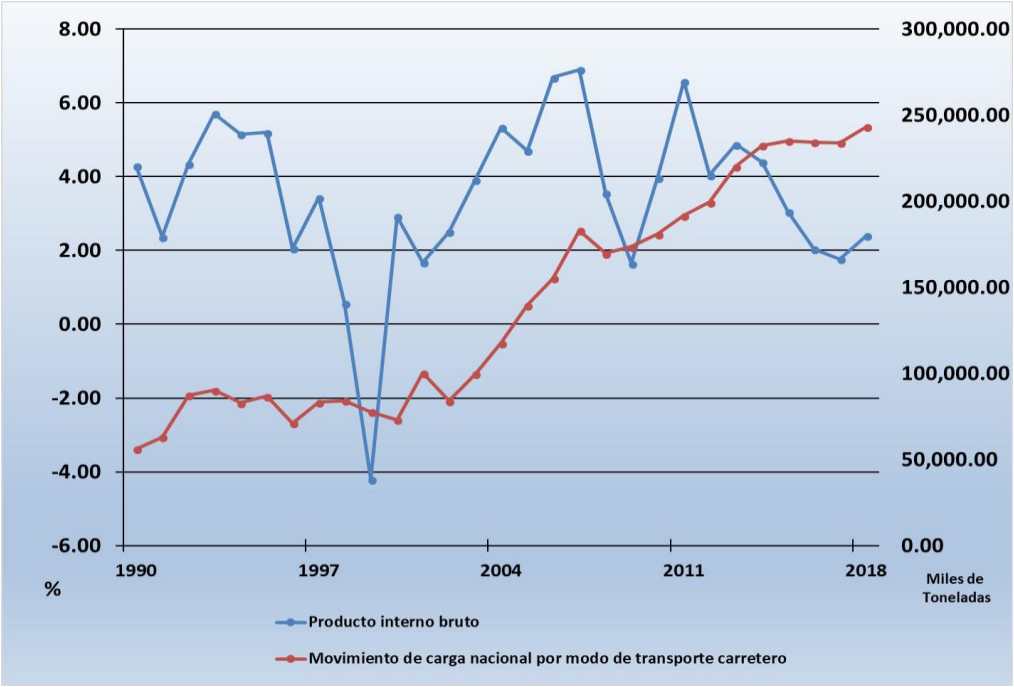

Figura 20. PIB anual y movimiento de carga terrestre

Fuente: elaboración propia a partir de datos de Banco de La República (2019) y Ministerio de Transporte (2018, pág. 75)

En la Figura 20 se muestra que para el año 2018 la composición de mercancia transportada corresponde en un alto porcentaje al modo de transporte carretero, lo cual reafirma la importancia de este modo de transporte en Colombia.

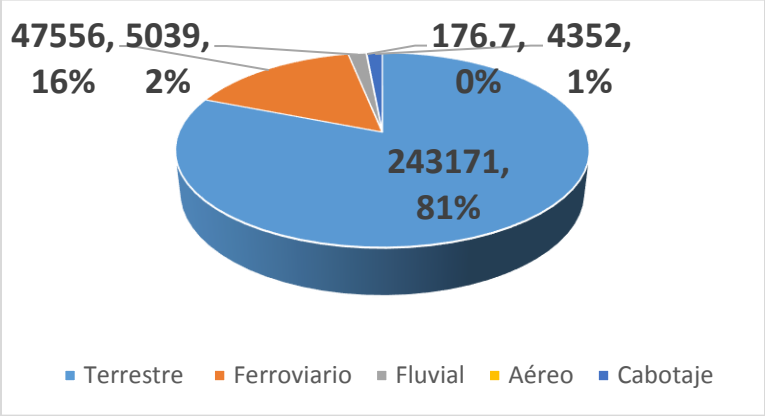

Figura 21. Participación del movimiento de carga interna por modo de transporte 2018

Fuente: elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Transporte (2018, pág. 75)

También, con el último y más completo reporte del Ministerio de Transporte, el cual fue publicado en el año 2014, se evidencia que del total de la carga movilizada durante ese año por sectores, el industrial y el agroindustrial representaron cerca del 73 % de la carga transportada, seguidos por el sector agrícola con un 17.4 % y el minero con un 9.4 % (ver Tabla 12) (Ministerio de Transporte, 2014, pág. 15).

Tabla 12. *Participación de carga y viajes por sector*

Sector	Total de carga	% de participación
Agroindustriales	59,550,892.66	27.031%
Industriales	101,625,168.76	46.129%
Minero	20,797,422.43	9.440%
Productos Agrícolas	38,329,416.01	17.398%
Otros	5,635.70	0.003%
TOTAL GENERAL	**220,308,535.56**	**100.000%**

Fuente: tomado de Ministerio de Transporte (2014, pág. 15).

En este punto, resulta importante contrastar la demanda de movimiento de carga con la oferta disponible de vehículos para transportarla. Para lograr este propósito se tomaron como base dos análisis encontrados por el autor publicados en el año 2013 y que consideró los más actualizados realizados por el Ministerio de Transporte de acuerdo con la búsqueda realizada en la base de datos de la página de dicha entidad, que es la que realiza y contrata los estudios más completos sobre el transporte en Colombia de manera sistemática y recurrente. El primero, corresponde al modelo de oferta vehicular, cuyo objeto era “establecer e implementar una metodología de análisis y cálculo de la oferta vehicular actual y futura, y determinar las necesidades de equipos para la prestación del servicio de transporte de carga por carretera en Colombia” (Ministerio de Transporte, 2013); este además realiza un ejercicio de modelamiento de la demanda y la oferta, a través del cual se llega a conclusiones importantes al respecto. El segundo, titulado “plan estratégico intermodal de infraestructura de transporte” (Ministerio de Transporte & EPYPSA, 2013, pág. 1) hace una prospectiva a 2032 en la cual a través de la formulación de varios escenarios establece como conclusión un mayor enfoque hacia la intermodalidad que afectaría la demanda de carga para el transporte por modo carretero.

Como antecedente se encontró también en el Conpes 3489 que para el año 2006 existía una sobreoferta de transporte por carretera, debido a que, para ese año se hicieron 9,2 millones de viajes movilizando 129 millones de toneladas (Ministerio de Transporte, 2007, pág. 14). Entre estos, el 93 % se movió en 116 048 vehículos de servicio público, con una capacidad instalada de 1 520 784 toneladas[18]. Igualmente, "para el período 1997-2004, los vehículos de carga presentaron una utilización promedio del 50 % de capacidad en peso y del 74 % de la capacidad en volumen" (Ministerio de Transporte, 2007, pág. 14). Los dos hechos anteriores significan que hay una baja utilización de los equipos que puede ser sintomático de un desbalance entre la demanda de servicio de transporte y la oferta vehicular (Ministerio de Transporte, 2007).

En 2013 en el modelo de oferta vehicular del Ministerio de Transporte, el parque automotor registrado en el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) fue en total de 319 mil vehículos, de los cuales se consideraron los de transporte público, sin aquellos que utilizaban carrocería de volqueta, y se eliminó la mitad de los vehículos de menos de 10,5 toneladas de PBV, por considerar que trabajaban en transporte urbano por lo que para el análisis de oferta se dejaron 179 mil (Ministerio de Transporte, 2013).

Con el fin de complementar y actualizar la información anterior se establecen los siguientes cálculos a partir de fuentes primarias (Navistar, 2019). Como se puede ver en la Figura 22, si se consideran los 179 000 vehículos como aquellos matriculados hasta el año 2012 según el RUNT y se adicionan los vehículos importados a Colombia en este segmento de Peso Bruto Vehicular desde el año 2013 con una cifra proyectada para el año 2019 de 25 223 camiones adicionales, se tendría un total de 204 223 unidades estimadas; lo anterior significaría un incremento estimado de un 14 % en el parque automotor.

[18] "En promedio, un vehículo puede realizar 73 viajes a plena capacidad con una distancia de 377 Km" (Ministerio de Transporte, 2007, pág. 14).

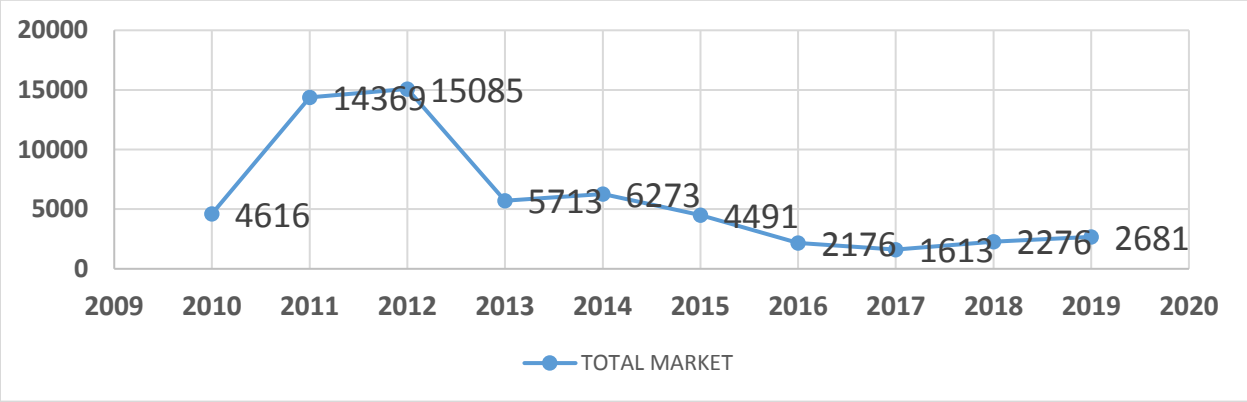

Figura 22. Total de vehículos de Peso Bruto Vehicular mayor a 10,5 toneladas, matriculados en el RUNT del 2010 al 2019 (Proyectado)

Fuente: elaboración propia con datos tomados de la intranet (no accesible públicamente) de Navistar (2019).

El factor de ocupación que encontraron para el 2012 a través del manifiesto de carga fue del 65 % en promedio (Ministerio de Transporte, 2013). Lo anterior combinado con otros dos factores, los cuales fueron los días disponibles para movilización y los tiempos de trabajo de los conductores que oscila entre ocho y doce horas, permitió encontrar la oferta. La demanda se determinó a través de la encuesta origen-destino del 2008 y se hicieron las proyecciones hasta encontrar un valor de 201 millones de toneladas[19] (Ministerio de Transporte, 2013). Con esos dos datos se encontró que existe un amplio rango en el cual efectivamente habría superávit de oferta en Colombia, puesto que a partir de las nueve horas de trabajo en promedio la curva de oferta supera a la de la demanda, como se evidencia en la Figura 23 (Ministerio de Transporte, 2013).

[19] Este valor resultó cercano a la realidad en una desviación del 8.76 % por debajo debido a que el real reportado por el Ministerio de Transporte fue de 220´ 309. 000 toneladas.

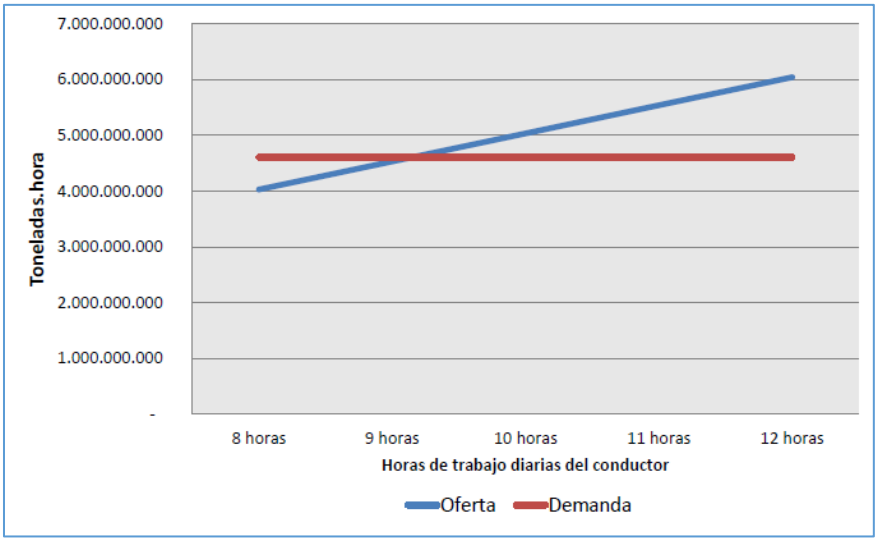

Figura 23. Resultados de superávit/déficit de oferta en toneladas/hora

Fuente: tomado de Ministerio de Transporte (2013, pág. 26)

El 65 % de ocupación estimado para el año 2012 podría ser mayor por el incremento del parque automotor y por la renovación inefectiva de camiones, dado que el programa que existía de chatarrización fundamentado en la compra de una póliza de cumplimiento que obligaba a realizar la disposición final del vehículo antiguo provocó una siniestralidad de estas muy alta (Umaña, 2014). Por tal razón se suspendió dicho programa y se estableció otro donde en términos generales se obligaba a chatarrizar un vehículo viejo para ingresar uno nuevo, lo que en la práctica restringió el acceso de vehículos nuevos en una mayor cantidad, debido a que el incentivo económico para sacar una unidad vieja de circulación para ser reemplazada por una nueva resultó insuficiente para el transportador (Umaña, 2014).

Lo anterior podría significar que si el promedio fuera de doce horas diarias habría una sobreoferta de veintitrés mil tractocamiones 3S[20], y si se usaran dos conductores por vehículo con ocho horas de trabajo la sobreoferta sería de cincuenta y seis mil tractocamiones 3S (Ministerio de Transporte, 2013, pág. 27).

Como reflexión del autor de este documento se plantea que los resultados de este Modelo de Oferta Vehicular (Ministerio de Transporte, 2013) podrían sugerir que no sería necesaria una renovación del parque automotor con una alta antigüedad, sino la chatarrización de los vehículos más obsoletos (con más de 35 años de vida útil) con la posibilidad de que no fuesen

[20] La abreviatura 3S corresponde a la denominación utilizada en Colombia para la configuración de tractocamiones de 3 ejes (Ministerio de Transporte, 2007, pág. 25).

reemplazados. Lo anterior tendría que venir acompañado con un programa de sustitución de la actividad del transportador dueño de dicho vehículo y con la optimización de la oferta y la demanda de transporte de carga para incrementar el porcentaje de uso de los camiones que permanecieran en operación.

Se plantea también como reflexión particular del autor de este documento que una vida útil de un camión por encima de 35, 40 o 50 años ya tiene una obsolescencia que significa una mayor contaminación, riesgos de seguridad vial, problemas de salud por ergonomía deficiente, velocidades demasiado bajas, continuas varadas en carreteras, etc. que hacen necesaria su disposición final de la forma más amigable posible con el medio ambiente.

Como se mencionó, el Ministerio de Transporte y EPYPSA (2013) presentaron en el año 2013 un estudio que contemplaba tres escenarios para el año 2032, en los cuales se afectaría la forma en que se moviliza la carga por el territorio colombiano y la demanda de carga para el transporte terrestre. El primero tiene en consideración que el sistema intermodal se mantendrá en la misma línea de acción (escenario tendencial -ET-), lo que conducirá a una mayor concentración del modo carretero (ver Figura 24) (Ministerio de Transporte & EPYPSA, 2013).

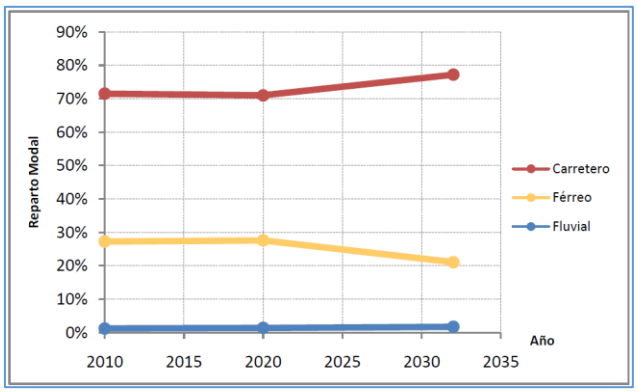

Figura 24. Primer escenario. Evolución del reparto modal en el escenario tendencial

Fuente: tomado de Ministerio de Transporte y EPYPSA (2013, pág. 204)

El segundo escenario consiste en un desarrollo de intermodalidad moderada (IM), el cual amplía las opciones de otros modos diferentes al carretero como forma de transporte de las mercancías en el país. Este escenario afectaría la demanda de movilización por carretera, puesto que se estimaría un descenso en este modo a un 64 % y se incrementaría el modo ferroviario como mecanismo de transporte de carga (ver Figura 24) (Ministerio de Transporte & EPYPSA, 2013).

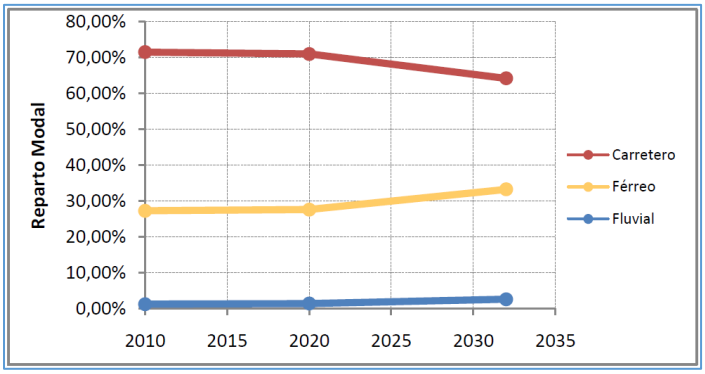

Figura 25. Segundo escenario. Evolución del reparto modal en el escenario de intermodalidad moderada

Fuente: tomado de Ministerio de Transporte & EPYPSA (2013, pág. 212)

El tercer escenario llamado de intermodalidad intensa (EII) establece la posibilidad de llegar a una participación del 58 % del modo carretero frente a un 39 % del modo ferroviario y un incremento al 3 % del modo fluvial (ver Figura 25) (Ministerio de Transporte & EPYPSA, 2013).

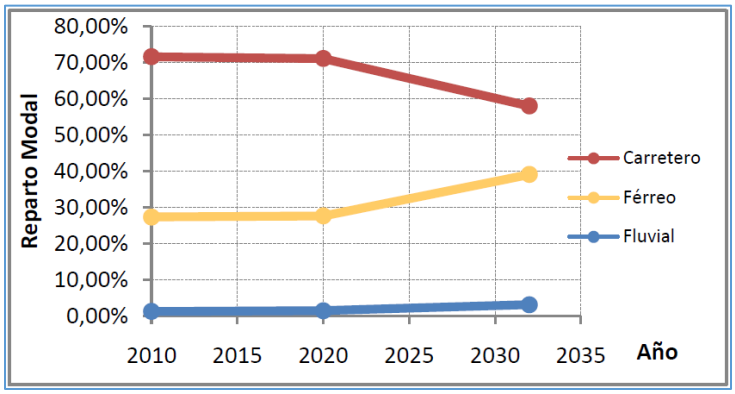

Figura 26. Tercer escenario. Evolución del reparto modal en el escenario de intermodalidad intensa

Fuente: tomado de Ministerio de Transporte & EPYPSA (2013, pág. 220)

Como conclusión, en todos los escenarios se plantea una demanda creciente en el modo carretero, que llegaría a cuatrocientos catorce millones de toneladas en el escenario tendencial, trescientos cuarenta y cuatro millones de toneladas en el escenario IM y trescientos diez millones en el escenario EII (Ministerio de Transporte & EPYPSA, 2013).

Con relación al concepto de precio generalizado para este modo de transporte existen dos formas que determinan la demanda, una es cuando el generador de carga es el mismo transportador y

la otra cuando el primero decide contratar a un transportista para que le preste el servicio de movilización de sus productos. En ambos casos se utiliza la expresión:

$$g = p + vt + \theta$$

En esta formulación g es el precio generalizado, p representa a los componentes monetarios del viaje, vt es el valor del tiempo total empleado en el mismo y θ es la valoración monetaria del resto de los elementos cualitativos que intervienen en la decisión (De Rus et al., 2003).

En el primer caso, empresa productora-transportadora, p son todos los costos del transportador involucrados en la operación y en el caso del transporte por cuenta ajena se representa en el pago del flete por el transporte de la mercancía. Con relación a vt este se obtiene del producto del tiempo total invertido en el transporte por el valor de cada unidad, la duración total del viaje depende en este caso de la distancia recorrida y de la velocidad a la que se viaja (De Rus et al., 2003, pág. 133). En el caso del transporte por carretera en Colombia esa distancia recorrida dependería también de la topografía en dicho país, que es una de las más exigentes en cuanto a pendientes a vencer por la presencia de tres cordilleras; lo anterior incidiría también en la velocidad promedio alcanzada debido a que estaría determinada por esta dificultad geográfica y adicionalmente por la obsolescencia promedio del parque vehicular, la cual es muy alta para esta nación, tal como se ha demostrado previamente en este mismo documento. Con relación al tercer componente, este se analizará más adelante debido a que tiene que ver con las externalidades de este modo de transporte (De Rus et al., 2003).

La demanda en este medio de transporte se ve afectada por las variables básicas de demanda agregada que son población, actividad económica, geografía, historia, cultura y política de transporte (De Rus et al., 2003, pág. 130).

En Colombia, el modo de transporte carretero es preponderante en toda la historia reciente (tal como se pudo evidenciar en la Figura 16) del país debido a que se ha privilegiado este tipo de modo sobre el férreo y el fluvial, el primero probablemente por una dificultad en su gestión y la misma topografía colombiana que no habría permitido pendientes adecuadas para la función ferrocarrilera en la mayoría del territorio colombiano, y el segundo también por una posible falta de gestión; de manera paradójica en Colombia las vías fluviales son numerosas pero podría haber un mayor compromiso estatal y privado para encontrar la forma de hacer las vías hídricas navegables.

Podría anotarse que la movilización de carga por carretera, al ser en la práctica un “monopolio” como modo de transporte, tiene una demanda inelástica. Existe una competencia “intramonopolio” que en efecto ha tenido que ser regulada por el Estado, al principio a través de “la tabla de fletes” y en la actualidad a través de la metodología de libertad vigilada con la metodología SICE-TAC-ICTC, explicada con anterioridad. En Colombia, en la práctica, no existiría elasticidad cruzada al no haber alternativas sustitutas o complementarias en términos de precio y nivel de servicio.

2.6 Fijación de precios, regulación y beneficios del productor

La fijación de precios en Colombia durante varios años estuvo regulada a través de “la tabla de fletes” definida por el Estado, la cual se volvió impráctica debido a que había rutas que estaban infravaloradas y otras que estaban sobrevaloradas; por tal razón a partir de 2011 se implementó una metodología de libertad vigilada, fundamentada en tener un seguimiento de los costos del productor a través del Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera -ICTC- y con tres objetivos básicos: la vigilancia a través de un sistema de monitoreo que facilite la intervención del Estado en el caso de fallas de mercado; la concertación a través de la unificación de criterios de los integrantes de la cadena en la determinación del costo, que facilite el proceso de negociación y la sensibilización de los integrantes de la cadena sobre la estructura de costos en el transporte de carga.

La regulación actual de las relaciones económicas en el modo carretero puede resumirse de la siguiente manera:

El esquema de política de libertad vigilada, que rige actualmente las relaciones económicas del transporte de carga por carretera, se basa en el principio de intervenir solo en los casos en que se presenten fallas de mercado. Este se delineó en el CONPES 3489 de 2007, se reglamentó mediante el Decreto 2092 de 2011 y se modificó con el Decreto 2228 de 2013, el cual dispone en su artículo 3º lo siguiente:

> Las relaciones económicas entre el Generador de la Carga y la empresa de transporte público, y de esta con los propietarios, poseedores o tenedores de vehículos, serán establecidas por las partes, sin que en ningún caso se puedan efectuar pagos por debajo de los Costos Eficientes de Operación[21] (ANDI, 2015, pág. 50)

[21] Costos eficientes de operación: son los costos de operación del servicio público de transporte

En complemento a los decretos mencionados se emitió la Resolución 0000757 de 2015, por la cual se estableció la aplicación del artículo 2 del Decreto 2228 de 2013 y se dictaron otras disposiciones tendientes a evitar que se pagaran precios por debajo de los costos obtenidos a través de la información de costos reportada y contenida en el SICE-TAC.

A partir del Decreto 2228 de 2013 con sus modificaciones y reglamentaciones se estableció que el flete o valor a pagar por el servicio será establecido entre las partes. En este caso no existe en el decreto y en sus modificaciones mención alguna a los márgenes de rentabilidad mínimos a pactar, solamente que el precio pactado no podrá ser menor a los costos reportados en el SICE-TAC. Esto podría provocar que algunas empresas decidan pactar con unos márgenes de utilidad tendientes a cero en algunas rutas y otras con cero utilidades, amparándose en el argumento de que los costos reportados en el sistema son promedios; estos en general serán más altos para aquellas empresas con prácticas ineficientes o para transportadores individuales que no pueden tener economías de escala al tener que comprar sus repuestos e insumos de operación como entes individuales. Lo mencionado resulta ser una ventaja para empresas organizadas y con una alta cantidad de vehículos y prácticas eficientes de mantenimiento y operación del transporte terrestre por carretera.

En consecuencia, al ser la oferta de transporte en Colombia prestada en su mayoría por una gran cantidad de actores o empresas unipersonales o pequeñas que están afiliadas a empresas que se encargan de la consecución de la carga, sería de utilidad, como se ha demostrado en casos como Cotrasur[22] y otras, que se establecieran mecanismos cooperativos de transporte de carga

terrestre automotor de carga que se obtienen en una ruta origen – -destino, considerando los parámetros de operación más eficientes, atendiendo criterios técnicos, logísticos y de eficiencia, con base en la información de costos reportadas y contenida en el SICE-TAC (ANDI, 2015, pág. 50)

[22] Con el esfuerzo y la unión de un grupo de transportadores, que encontraron en el cooperativismo la oportunidad de formar una organización con grandes posibilidades de crecimiento, se crea en Bucaramanga Santander el 22 de febrero de 1955, la Cooperativa de Transportadores del Sur (Cotrasur). Esta es una empresa de economía solidaria que, sin perseguir el ánimo de lucro, busca en todo momento maximizar el bienestar social y colectivo de sus asociados con el desempeño eficiente de su Conceptualización y desarrollo de un modelo administrativo basado en la teoría de la complejidad para la renovación vehicular de transporte de carga con mayor énfasis para así poder tener alcance a economías de escala en la compra de insumos de mantenimiento y operación. Si bien esto se ha intentado, pero debido a los intereses particulares de algunos de los directivos no se permite un trabajo eficiente en la disminución coordinada de los costos de transporte para todos los asociados. Uuna empresa de economía solidaria que, sin perseguir el ánimo de lucro, busca en todo
momento maximizar el bienestar social y colectivo de sus asociados con el desempeño eficiente de su actividad económica, la cual es prestar los servicios de transporte de carga masiva en el ámbito nacional e internacional, a las empresas allí establecidas que necesitan día a día el traslado rápido y seguro de sus mercancías y materias primas de un lugar a otro. Con más de 60 sesenta años de experiencia en el ramo, y, con una de las flotas propias más grande, moderna y diversificada del país, al lado de un eficiente sistema operativo que le permite reducir los tiempos de entrega, esta compañía está preparada para

con mayor énfasis para así poder tener alcance a economías de escala en la compra de insumos de mantenimiento y operación. Si bien esto se ha intentado, debido a los intereses particulares de algunos de los directivos no se permite un trabajo eficiente en la disminución coordinada de los costos de transporte para todos los asociados.

atender en todo momento en forma rápida y oportuna, las necesidades de transporte de mercancías. (Cotrasur, 2017).

3 Marco teórico para la renovación de flotas

Entre más antiguos sean los vehículos, más ineficientes son en cuanto a los siguientes aspectos: disponibilidad, altos costos de operación por mayores consumos de combustibles, altos costos de mantenimiento por daños más frecuentes debido a desgaste de las partes integrantes del vehículo, mayor contaminación por no contar con dispositivos que permitan una mejor combustión y por ende menores emisiones contaminantes, constantes varadas en carreteras y ciudades ocasionando disminución en el promedio de velocidad vehicular en dichas vías, y menores sistemas de seguridad (frenos ABS, control de tracción, cabinas más resistentes a los impactos, etc.) para el operador de las unidades y los otros vehículos que transitan por las vías además de los peatones.

Pese a lo anterior, la situación del parque automotor en Colombia evidencia un atraso en la edad promedio, razón por la cual se hace necesario desarrollar una metodología que permita a los usuarios pequeños, medianos y grandes de camiones encontrar el momento en el que se debe renovar determinada unidad con el fin de que sea beneficioso cambiar el vehículo en lugar de conservarlo, no solo desde la perspectiva financiera sino en términos de los costos del productor, los costos del usuario y los costos externos.

De acuerdo con la literatura revisada por el autor en la etapa inicial de exploración no se encontraron modelos administrativos que fueran de fácil acceso, reproducibles, sostenibles en el tiempo y que integraran todas las variables complejas de esta problemática para la renovación de flotas vehiculares de diversos tamaños en Colombia para que sean comprensibles a los transportadores los beneficios de renovar el parque automotor.

Así, el autor de esta tesis propuso determinar cuál podría ser la combinación de las variables y parámetros que permitan conceptualizar y desarrollar un modelo administrativo de flotas que solucione el problema de la renovación del parque automotor de carga en Colombia mayor a 10,5 toneladas de Peso Bruto Vehicular a partir de la teoría de la complejidad tal como se explicó previamente en la introducción de este documento.

3.1 Alcance

Los factores que generalmente se tienen en consideración en modelos estándar de renovación de equipos en general y de equipos vehiculares en particular son los siguientes: costos de adquisición y financiamiento, costos de operación, costos de mantenimiento (Mora, 2012); y

podría decirse, basado en la revisión de la literatura realizada por el autor, que en menor medida aquellos que se consideran externalidades del transporte como por ejemplo: afectación del medio ambiente, accidentalidad y congestión vehicular (Mora, 2012).

3.2 Algunos modelos relevantes para administración y renovación de flotas

Tal como ya se ha presentado en apartes anteriores de este documento existe una gran variedad de modelos que podrían aplicarse para la renovación del parque automotor en Colombia. A continuación, se explican de manera sucinta los cuatro modelos de administración de flotas y su renovación, que fueron detectados como los más representativos en la parte inicial exploratoria de esta tesis a manera de introducción y contextualización más específica con relación al problema planteado.

3.2.1 Modelo de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y costo del ciclo de vida

El mantenimiento de vehículos representa un aspecto importante de los costos de operación de una compañía de transporte de carga. Utilizando los parámetros de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (CDM), se han desarrollado varios modelos que pueden ayudar al pronóstico y los costos de operación de la flota. Entre ellos, se encuentra un modelo probabilístico para la gestión de averías y para las operaciones del taller de mantenimiento y otro para el cálculo del costo del ciclo de vida (CCV) (Carrese & Ottone, 2005).

3.2.2 Modelos estocásticos para la administración de flotas

Se considera el problema de asignar un conjunto homogéneo de vehículos (o recursos) a la demanda de un cliente (o tarea) que surge aleatoriamente con el tiempo. Cada vehículo está en una ubicación geográfica determinada y cada tarea requiere uno en un lugar geográfico determinado. Asignar un camión a una tarea genera una rentabilidad y remueve la tarea del sistema. Esto también cambia el lugar geográfico de la unidad de transporte. Un vehículo en un lugar geográfico determinado puede transferirse a otros puntos a un costo específico. Una tarea puede ser asignada a recursos en un subconjunto específico de lugares. Finalmente, se puede asumir que todas las transiciones requieren un periodo de tiempo (cuatro horas o un día, por ejemplo). Por lo anterior, es lógico que se requiere una solución integral para este problema (Godfrey & Powell, 2002).

Lo descrito es un Problema de Asignación de Recursos Dinámicos Estocásticos[23] (PARDE) y tiene sus raíces en la administración de flotas (Allen, 2003; Stirzaker, 2005).

3.2.3 Modelo de dinámica de sistemas

El uso de modelos de dinámica de sistemas (SD por sus siglas en inglés) puede soportar a la gerencia en el análisis de los costos y beneficios que es necesario realizar para evaluar las estrategias alternativas de mantenimiento y administración de flotas. Una aproximación a través de la dinámica de sistemas, en particular, permitiría a los gerentes examinar el impacto potencial de las diferentes estrategias de mantenimiento y de desempeño corporativo, considerando a la vez aspectos de calidad y financieros. Así, estos modelos pueden ayudar en dos de las preguntas más fundamentales para un gerente de flotas: ¿es más rentable reparar o renovar la flota de una compañía? y ¿es más conveniente reducir la edad promedio de los diferentes activos (por ejemplo, incrementando la inversión en camiones nuevos) o ¿expandir las actividades de mantenimiento (por ejemplo, aumentando los costos de reparación)? (Bivona & Montemaggiore, 2005).

3.2.4 Modelo basado en el costo total de propiedad

Se define costo total de propiedad (CTP) como una herramienta de compras que está dirigida a entender el verdadero costo de comprar un bien o un servicio de un proveedor en particular (Ellram, 1995). El CTP es un cálculo útil para que los consumidores y firmas evalúen los costos directos e indirectos asociados a una compra. El CTP también es importante ya que el precio de compra no es el único costo asociado con la compra. Son las compañías las que más usan el CTP. Las herramientas para los consumidores finales han sido limitadas. Como resultado, existen razones para sospechar que los consumidores finales tienen un conocimiento limitado sobre el concepto del CTP, lo cual puede llevar a decisiones poco económicas al comprar un vehículo (Hagman, Ritzén, Stier, & Susilo, 2016). Esto es una clara desventaja para los “hombres camión”[24] o pequeños propietarios de camiones, en comparación con las empresas grandes y

[23] Según la Real Academia Española el término estocástico se refiere a la teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria, tal como la secuencia de las tiradas de un dado (Real Academia Española, 2019).

con recursos para aplicar el concepto del CTP. La literatura en CTP de vehículos es un campo de estudio relativamente nuevo y, por lo tanto, también su alcance es limitado (Hagman, Ritzén, Stier, & Susilo, 2016).

3.2.5 Modelo basado en valor condicional en riesgo

La sostenibilidad es sin duda el reto más grande de nuestra generación y la próxima. La pregunta de cómo cumpliremos con las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las generaciones futuras para cumplir con las suyas tiene importantes dimensiones ambientales, económicas y sociales (World Commission on Environment and Development [WCED], 1987). En la actualidad, las compañías del mundo son convocadas ética, moral e, incluso, legalmente a controlar su huella de carbono en el mundo. Tienen que medir su impacto en el medio ambiente.

Las actividades básicas que contribuyen a la huella de carbono son la producción y transporte de productos, el reciclaje, la remanufactura de productos usados y el diseño de nuevos productos (Kleindorfer, Singhal, & Wassenhove, 2005). La administración de flotas es un esfuerzo importante que puede llevar a un transporte sostenible desde dos perspectivas. La primera es el efecto económico directo en la inversión, el mantenimiento y los costos de operación. La segunda tiene que ver con la huella de carbono generada por la Compañía (Ansaripoor, Oliveira, & Liret, 2014).

Los modelos de decisión estocásticos dependen de eventos futuros. El futuro puede ser representado por un conjunto de escenarios que son realizaciones discretas de parámetros estocásticos (Ansaripoor et al., 2014).

3.2.6 VOC-HDM-4

El modelo ***VOC-HDM-4*** (Chesher & Harrison, 1987; Nash, 1976), es usado por el Gobierno colombiano (DNP) para determinar sus políticas de renovación de parque automotor (Departamento Nacional de Planeación, 2013). Esta aplicación es utilizada también en otros países de Latinoamérica como Ecuador, Perú y México para hacer la planeación de la

Infraestructura vial y su correlación con el transporte de carga que la transitará (Arroyo & Aguerrebere, 2002).

Llama la atención que aplicando este modelo para Colombia “la edad óptima de reposición de un camión se encuentra entre los 5 y los 8 años para tractocamiones, y entre 8 y 13 años para camiones” (Departamento Nacional de Planeación, 2013, pág. 19).

3.3 Ciencias de la complejidad

Tal como se planteó en la justificación de este documento, lo que se buscó con esta tesis fue aportar a la solución de la antigüedad del parque automotor de más de 10.5 toneladas de PBV en Colombia. Esto teniendo en cuenta que la administración de vehículos y especialmente de flotas de camiones es un fenómeno dinámico, con muchas variables involucradas tanto internas como externas, que puede tener fenómenos emergentes, inestabilidades, etc. También se resalta que a nivel mundial, en Latinoamérica y en Colombia, existen muchos modelos para la renovación de equipos, de los cuales se pueden encontrar ejemplos en variados artículos, algunos de los cuales se referencian en este documento y otros de forma específica en una tesis de la Universidad de Valladolid titulada “Análisis de Modelos y Métodos de Renovación de Flotas de Vehículos por carretera” (Mora, 2012), donde se realiza una presentación y un análisis de por lo menos siete modelos que llevan a quince variaciones en total. Entonces se buscó plantear desde una perspectiva no intentada previamente, dar una visión desde la complejidad para intentar hacer un aporte al problema planteado.

En una primera instancia se quiso tomar como punto de partida los planteamientos del Instituto Santa Fe y de autores reconocidos en el ámbito latinoamericano y colombiano, esto como postura epistemológica de inicio. Para dar mayor solidez a este punto de vista se hizo una exploración inicial que se presenta al inicio de este capítulo fundamentado en una búsqueda exploratoria con ecuaciones que contuvieran los autores escogidos y así ver su relevancia en números de referencias detectadas.

En efecto se encontró que el número de referencias es relevante para los autores escogidos y se continuó realizando las definiciones de complejidad, a partir de estos. Sin embargo, al avanzar en la investigación se pudo detectar que el Instituto Santa Fe no ha realizado, por lo que se pudo encontrar en su página oficial, estudios o investigaciones que permitieran encontrar una herramienta dentro de la complejidad aplicable a la renovación vehicular de camiones.

Por tal razón, aunque se conservan en este texto referencias a este instituto, dada su importancia se decidió ampliar la perspectiva y por tal razón se acudió a los autores Castellani y Hafferty (2009) y a Meyers (2009).

Lo mismo ocurrió con las definiciones de los demás autores que, aunque fundamentales para entender la complejidad desde una perspectiva filosófica y aplicada en algunos campos de las ciencias sociales, tampoco tenían trabajos correlacionados con la renovación del parque automotor en Colombia de acuerdo con la revisión que se hizo de sus trabajos publicados más importantes; sin embargo, sus definiciones fundamentales se dejan presentes en este documento.

Dentro del proceso de investigación se intentó hacer un desarrollo de un modelo general para el sector del transporte a partir de los trabajos de Maturana (1975) y Luhmann (2013). Este modelo preliminar se deja solamente planteado en este documento también como aporte exploratorio y propositivo para futuras investigaciones que quieran seguir esta línea planteada de manera inicial.

Posteriormente, se regresó a buscar modelos en la literatura fundamental relacionada previamente en la metodología para verificar si dentro de las ciencias de la complejidad existían herramientas para el modelamiento y se decidió buscar una base a través de su fundamentación y evolución, para ello se partió de un autor latinoamericano llamado Pablo Razeto por ser un referente reciente en la región y de quien se explica más adelante dentro de este apartado. Se intentó a través de la guía tomada de una presentación realizada por el investigador mencionado, realizar una aproximación conceptual más profunda a algunos de los principales hitos considerados dentro de las ciencias de la complejidad, como son la definición de sistemas complejos, teoría del caos, fractales y los autómatas celulares.

También se buscó un entendimiento de las ciencias de la complejidad a partir de Castellani (2009; 2018) y Hafferty (2009) quienes tienen el mapa más completo disponible y en continua actualización sobre estos múltiples campos de estudio. Igualmente se regresó a consultar en la enciclopedia más completa sobre complejidad y ciencias de los sistemas para seguir buscando pistas que condujesen a encontrar la herramienta de modelamiento más adecuada al problema.

Estas dos fuentes de partida llevaron a la detección de al menos cuatro formas que podrían ser utilizadas para enfrentar el problema de renovación de equipos, a saber: modelamiento basado en agentes, redes neuronales, algoritmos genéticos y dinámica de sistemas. De estas cuatro ramas el autor decidió decantarse por la dinámica de sistemas debido a que se encontró

nuevamente con esta herramienta y al realizar un análisis del alcance del proyecto, pues esta metodología pareciera no haber sido utilizada en Colombia, pero sí en otros países del mundo con lo cual se podría intentar proponer la adaptación de esta metodología de modelación para la renovación del parque automotor en Colombia.

Para hacer una sustentación más robusta de la utilización de esta herramienta se estableció una ruta deductiva a partir de las ciencias de la complejidad, pasando por la teoría de sistemas, la dinámica de sistemas y su utilización para la gestión de operaciones, las operaciones de mantenimiento y finalmente la renovación de camiones.

Se presenta a continuación el desarrollo de este capítulo con los apartados mencionadas en la introducción.

3.3.1 Posición epistemológica de partida.

Existen múltiples formas y definiciones para acercarse al mundo de las ciencias de la complejidad. El Instituto Santa Fe, por ejemplo, es reconocido como uno de los centros más destacados del mundo occidental en este campo. En Latinoamérica existen investigadores destacados que se han adentrado en el estudio de estas ciencias, como Humberto Maturana, Carlos Maldonado, Julio Mario Rodríguez Devis, Pablo Razeto y otros. En esta tesis se presentarán algunos de los conceptos acuñados por estos investigadores para enmarcar teóricamente el análisis del problema al que se enfrenta este documento. Se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. *Escuela y autores en ciencias de la complejidad que soportaron la postura epistemológica de la investigación*

Escuela o autor	Alcance
Instituto Santa Fe	Global
Humberto Maturana	Latinoamérica
Pablo Razeto	Latinoamérica

Carlos Maldonado	Colombia
Julio Mario Rodríguez Devis	Colombia

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 14 se resume una búsqueda realizada por el autor con el fin de verificar la producción académica de la escuela y los autores seminales planteados en la etapa de exploración y se puede notar que al buscar en una base de datos indexada como Scopus, la cantidad de menciones baja de manera sensible en todos los casos. Este resultado podría llevar a concluir que para las bases de datos indexadas los trabajos en las ciencias de la complejidad aún tienen camino por recorrer.

Tabla 14. *Resumen de búsqueda de escuela y autores en los cuales se fundamentó la aproximación a la complejidad*

Alcance	Pertinencia	Base de datos	Ecuación de Búsqueda*	Resultados (menciones)
Instituto Santa Fe	Verificar la producción académica de esta escuela	Google Academics	"Santa Fe Institute"	52 200
		Google Academics	"Santa Fe Institute" AND Complexity	34 900
		Scopus	"Santa Fe Institute"	50
		Scopus	"Santa Fe Institute" AND Complexity	13
Humberto Maturana	Verificar la producción académica de este autor	Google Academics	"Humberto Maturana"	22 400
		Google Academics	"Humberto Maturana" AND Complexity	8 820
		Google Academics	"Humberto Maturana" AND Complejidad	5 760
		Scopus	"Humberto Maturana"	68
		Scopus	"Humberto Maturana" AND Complexity	3
		Scopus	"Humberto Maturana" AND Complejidad	0
Pablo Razeto Barry	Verificar la producción académica de este autor	Google Academics	"Pablo Razeto Barry"	135
		Google Academics	"Pablo Razeto Barry" AND Complexity	76
		Google Academics	"Pablo Razeto Barry" AND Complejidad	37
		Scopus	"Pablo Razeto Barry"	1
		Scopus	"Pablo Razeto Barry" AND Complexity	0
		Scopus	"Pablo Razeto Barry" AND Complejidad	0
Carlos Eduardo Maldonado	Verificar la producción académica de este autor	Google Academics	"Carlos Eduardo Maldonado"	741
		Google Academics	"Carlos Eduardo Maldonado" AND Complexity	264
		Google Academics	"Carlos Eduardo Maldonado" AND complejidad	483
		Scopus	"Carlos Eduardo Maldonado"	0
		Scopus	"Carlos Eduardo Maldonado" AND Complexity	0
		Scopus	"Carlos Eduardo Maldonado" AND Complejidad	0
Julio Mario Rodríguez Devis	Verificar la producción académica de este autor	Google Academics	"Julio Mario Rodriguez Devis"	58
		Google Academics	"Julio Mario Rodriguez Devis" AND complexity	11
		Google Academics	"Julio Mario Rodriguez Devis" AND complejidad	22
		Scopus	"Julio Mario Rodriguez Devis"	0
		Scopus	"Julio Mario Rodriguez Devis" AND Complexity	0
		Scopus	"Julio Mario Rodriguez Devis" AND Complejidad	0

Fuente: elaboración propia

3.3.1.1 Complejidad según el Instituto Santa Fe

El Instituto Santa Fe, según su propia definición, es “un centro de investigación independiente persiguiendo las grandes preguntas en las fronteras de la ciencia” (Santa Fe Institute, 2017, párr. 1). Fue fundado en 1984 para estudiar y comprender los sistemas adaptativos complejos.

> La complejidad surge en cualquier sistema en el que muchos agentes interactúan y se adaptan entre ellos y sus entornos. Estas adaptaciones dieron como resultado procesos evolutivos y a menudo sorprendentes comportamientos “emergentes” a nivel macro. La Ciencia de La Complejidad intenta encontrar mecanismos comunes que conducen a la complejidad en sistemas físicos, biológicos, sociales y tecnológicos nominalmente distintos (Santa Fe Institute, 2017, párr. 3).

Algo interesante es que al buscar en la página del Instituto Santa Fe usando las palabras claves “freight transport” y “cargo transport” no se encuentra ningún resultado. Al buscar “trucking” se encuentran tres resultados (noticias) que tratan sobre el costo real de los vehículos verdes, las señales de tránsito autoorganizadas y un estudio sobre el noveno grado en estudiantes de los Estados Unidos y su efecto en la universidad.

De estos tres solo dos podrían asociarse al campo de estudio de esta tesis y primordialmente el primero que se menciona. También se evidencia un documento de trabajo o artículo por parte del Instituto Santa Fe en el campo de estudio del presente trabajo que no se encuentra publicado.

Llama la atención la primera noticia, pues hace referencia a un estudio realizado por investigadores del Instituto Tecnológico de Massachusetts en el que participa una investigadora que pertenece también al Instituto Santa Fe. En este estudio se demostró que los vehículos verdes (híbridos y eléctricos) en realidad son más económicos, en el largo plazo, que los vehículos propulsados con diésel u otros derivados del petróleo. El anterior resultado se obtuvo al hacer un comparativo entre diferentes marcas de automóviles de uso particular, usando como variables en el estudio, el consumo de combustible, los costos de mantenimiento y las emisiones, a través de todo el ciclo de vida. Al final se pudo determinar que tanto los vehículos híbridos como los eléctricos cumplirán con los requisitos de emisión de gases para el año 2030, pero solamente los eléctricos lo harán para el año 2050 (Miotti, Supran, Kim, & Trancik, 2016).

3.3.1.2 Complejidad según Humberto Maturana

Humberto Maturana es un médico graduado de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile y Doctorado en Biología de la Universidad Harvard en los Estados Unidos. Trabajó como investigador asociado en el *Massachusetts Institute of Technology* y fue Profesor Titular del Departamento de Biología de la Universidad de Chile. Es fundador del Instituto de Formación Matríztica y en la década de los setenta fue creador y desarrollador junto a Francisco Varela del concepto de Autopoiesis (Universidad de Chile, 2017). En un artículo de 1975 Humberto Maturana se plantea como propósito:

> Presentar una teoría de la organización de los sistemas vivientes como entidades autónomas, y una teoría de la organización de los sistemas nerviosos como una red cerrada de neuronas interactuando estructuralmente acopladas a los sistemas vivos a cuya realización contribuye (Maturana, 1975, pág. 314).

Maturana (1975) plantea también en su artículo dos antecedentes principales, en el primero refiere que para su tiempo no existía “una teoría adecuada de la organización de los sistemas vivientes como unidades autónomas individuales” (Maturana, 1975, pág. 314). De acuerdo con su concepción, solo hay descripciones de algunos de los estados internos y de su interacción, esto significa reproducción, procesamiento de información o relaciones jerárquicas internas y que estas descripciones se convierten en características fundamentales de una organización viva. Sin embargo, al hacer un análisis más profundo se encuentra que ninguna de esas características podría tomarse como exclusiva o definitoria de los sistemas vivos. De hecho, “la noción de procesamiento de información representa una manera de descripción de las interacciones y cambios del estado de un sistema, y como tal es aplicable a cualquier posible sistema dinámico” (Maturana, 1975, pág. 314).

En el segundo antecedente el autor plantea que “el objetivo de muchos científicos que trabajan en la teoría del autómata[25] es modelar los fenómenos más singulares generados por los sistemas vivientes, como la autonomía, el lenguaje y la autoconciencia” (Maturana, 1975, pág. 314). “Sin embargo, tal objetivo no puede ser alcanzado en ausencia de una teoría que muestre la

[25] La teoría del autómata es un cuerpo de principios lógicos y físicos subyacentes en la operación de cualquier elemento electromecánico (un autómata) que convierte la información de una forma a otra de acuerdo con un procedimiento definido. Un autómata real o hipotético de variada complejidad ha venido a convertirse en una herramienta indispensable para la investigación e implementación de sistemas que tienen estructuras susceptibles de análisis matemático (Rankin & Nelson, 2018, pág. 1).

naturaleza de dichos fenómenos y como surgen en un sistema biológico" (Maturana, 1975, pág. 314).

Establece y define diez conceptos preliminares para contextualizar su teoría: observador, unidad, interacción, espacio, explicación, organización estructura, sistema de estado determinado, dominio consensual y dominio fenomenológico (Maturana, 1975).

Su propósito, después de las consideraciones preliminares, se enfoca desde dos objetivos fundamentales:

a. Explicar la organización de los sistemas vivos a través de la descripción de la organización que constituye un sistema como una unidad autónoma que puede, en principio, generar toda la fenomenología propia de los sistemas vivos si las adecuadas contingencias históricas se dan (Maturana, 1975, pág. 317).
b. Explicar la organización de los sistemas nerviosos a través de la descripción de la organización que hace una red neuronal, integrada como un subsistema componente en un organismo, un sistema que puede generar toda la fenomenología propia de un sistema nervioso (Maturana, 1975, pág. 317).

La teoría que plantean Humberto Maturana y Francisco Varela tiene como nombre autopoiesis del griego αύτόσ (yo) ποιειν (hacer). Fue concebida, inicialmente, para definir aquellos sistemas vivos que se autogeneran dentro de sus propios límites. Por ser esta una teoría que ha trascendido el ámbito biológico en el cual fue desarrollada, para ser utilizada como mecanismo para el mejor entendimiento de otros sistemas, se transcribe en su integridad a continuación:

> Los sistemas vivos están dados y generan una fenomenología específica, la fenomenología de los sistemas vivos. Por lo tanto, para explicar los sistemas vivos es necesario y suficiente puntualizar a la organización que define una clase de unidades que generan una fenomenología indistinguible de la fenomenología propia de los sistemas vivos. Tal organización puede ser descrita como sigue:
>
> Hay una clase de sistemas mecánicos en los cuales cada miembro de la clase es un sistema dinámico definido como una unidad a través de relaciones que se constituyen como una red de procesos de producción de componentes, los cuales: a) recursivamente participan a través de sus interacciones en la generación y realización de la red de procesos de producción de los componentes que los producen; y b) se constituye esta red de procesos de producción de componentes como una unidad en el espacio en el cual ellos (los componentes) existen a través de la realización de sus límites.

> Tales sistemas, yo los llamo sistemas autopoiéticos: la organización de un sistema autopoiético es la organización autopoiética. Un sistema autopoiético que existe en el espacio físico es un sistema vivo (Maturana, 1975, págs. 317,318).
>
> Como resultado de su organización, los sistemas autopoiéticos operan como sistemas homeostáticos[26] que tienen su propia organización como la variable fundamental crítica que los mantienen constantemente activos. En un sistema autopoiético todos estos estados (dinámicos) son estados en autopoiesis y direccionan hacia la autopoiesis. En este sentido, los sistemas autopoiéticos son sistemas cerrados, y, como resultado de esto, toda la fenomenología de los sistemas autopoiéticos son necesariamente subsirvientes a su autopoiesis, y un fenómeno dado es un fenómeno biológico solo en la medida en la cual éste involucre la autopoiesis de al menos un sistema vivo." (Maturana, 1975, pág. 318).

Tal como se describió previamente, la teoría de la autopoiesis, a pesar de haber sido circunscrita en sus inicios a procesos celulares "se extendió a sistemas más complejos, en tanto dispusieran de autonomía, clausura operativa, capacidades de autoestructuración y auto-reproducción" (Arnold y Cadenas, 2013, pág. 2).

En un principio, la aplicación de la teoría de la autopoiesis se objetaba incluso por el mismo Varela al oponerse a las intenciones de Stafford Beer de aplicar el concepto a las empresas o a las de Gordon Pask que pretendía postular las "conversaciones" como sistemas autopoieticos.. Según Arnold y Cadenas (2013) este bloqueo al concepto responde a una concepción reduccionista y biologicista por parte de los generadores del concepto de autopoiesis (Arnold y Cadenas, 2013).

Desde la vertiente sociológica, desde los sesenta, Niklas Luhmann intentaba "explicar las modalidades de autoorganización en los sistemas sociales, utilizando los conceptos de acción y de comunicación" (Arnold y Cadenas, 2013, pág 4). Posteriormente, Luhmann incorpora los trabajos de Maturana y su equipo a su teoría sociológica, en la cual su aporte fundamental a las

[26] Homeostasis (del griego homo [ὅμος] que significa "similar" y estasis [στάσις] "estado", "estabilidad") es una propiedad de los organismos vivos que consiste en su capacidad de mantener una condición interna estable (en la que su estado permanece casi invariante en el tiempo) compensando los cambios que se producen en su entorno mediante el intercambio regulado de materia y energía con el exterior (metabolismo), La homeostasis es una forma de equilibrio dinámico posible gracias a una red de sistemas de control realimentados que constituyen los mecanismos de autorregulación de los seres vivos. El concepto fue aplicado por Walter Cannon en 1926, 1929 y en 1932, para referirse al concepto de medio interno (milieu intérieur) de Claude Bernard, considerado a menudo como el padre de la fisiología, y publicado en 1865. Tradicionalmente se ha aplicado en biología, pero, dado el hecho de que no sólo lo biológico es capaz de cumplir con esta definición, otras ciencias y técnicas han adoptado también este término (Educalingo, 2019, pág. 1).

ciencias sociales se basa en “generalizar y a la vez especificar, el concepto de autopoiesis, en tanto programa teórico para caracterizar y, desde allí, observar la organización de la sociedad” (Arnold y Cadenas, 2013, pág 3).

> Para Luhmann, la autopoiesis consistiría en el modo en que los sistemas se diferencian de su entorno y no en la producción de una determinada forma estructural. Con ella se designaría la propiedad de entidades que reproducen internamente, por medio de sus selecciones (operaciones), las diferencias con las cuales se constituyen” (Arnold y Cadenas, 2013, pág. 5).

Luhmann intenta explicar diversos sistemas sociales como parciales a través del concepto autopoietico más abstracto desarrollado por él y dentro de los cuales se encuentran la política, la economía, la justicia, la ciencia, el arte, la familia, la educación formal, la religión, la medicina, las comunicaciones, etc.

A modo de conclusión, según Arnold y Cadenas (2013) la investigación de la teoría sociopoiética está en sus inicios y entre los muchos obstáculos presentes en la actualidad está la falta de desarrollo de metodologías que permitan capturar de forma adecuada las complejas redes operacionales de la sociedad y la forma en que estas se estructuran para poder superar las descripciones generales y poder analizar e intervenir con mayor profundidad sistemas sociales específicos. Aun así, esta teoría empieza a presentar un marco conceptual desde el cual los nuevos investigadores pueden partir para entender la complejidad de la sociedad contemporánea y los retos que enfrentarán para su comprensión.

3.3.1.2.1 Autopoiesis y el sistema de transporte de carga por carretera

Intentar utilizar la socioautopoiesis como una forma de explicar el sistema de transporte de carga por carretera abriría una nueva línea de investigación de este subsistema que está por fuera del alcance de este trabajo, pero que permitiría tener una visión alternativa de las interacciones de los diferentes componentes del mencionado sistema.

El sistema de transporte de carga por carretera (STCC) puede considerarse como un subsistema parte del subsistema económico de la sociedad que se define en primera instancia como otro subsistema autopoietico bajo autonomía funcional, puesto que los elementos del sistema son producidos por otros elementos a su interior y su entorno no contendría ningún elemento interno de este subsistema económico. El STCC también podría considerarse como un sistema abierto

pues sus operaciones están adaptadas a las necesidades del entorno social y humano (Luhmann, 2013) (Figura 27).

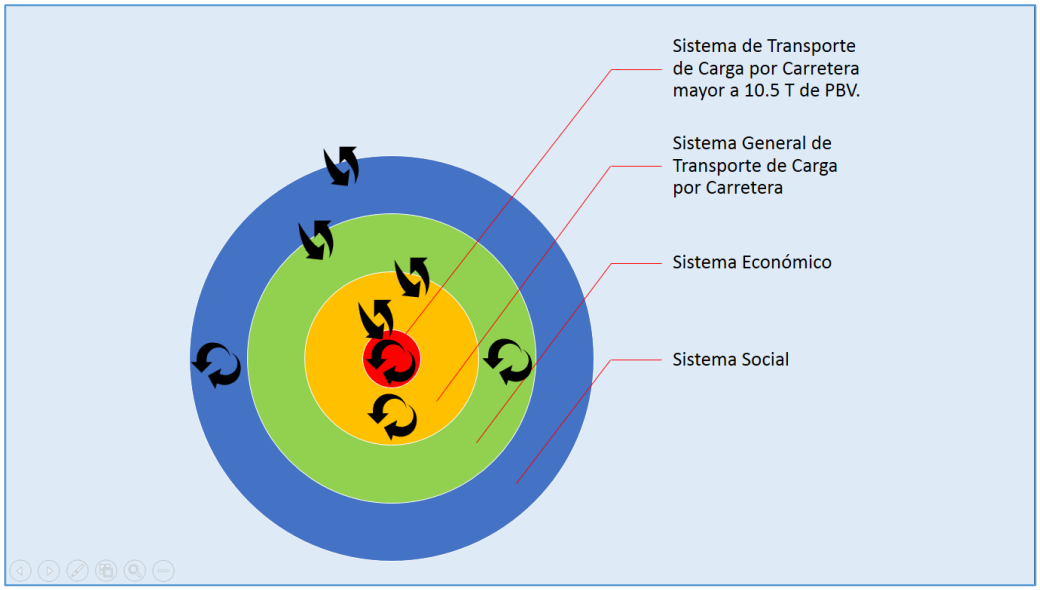

Figura 27. Diagrama de sistemas sociopoiéticos y abiertos.

Fuente: elaboración propia.

3.3.1.3 Complejidad según Carlos Maldonado

En este apartado se planteará la posición de Carlos Maldonado en cuanto a la definición de las ciencias de la complejidad en relación con las ciencias sociales y la posición de este autor frente a las posibilidades del uso del modelamiento y la simulación de fenómenos y sistemas complejos en la sociedad. Es relevante porque lo que se busca con esta tesis es dejar planteadas las bases conceptuales para una modelación del sistema de renovación del parque automotor en Colombia.

Carlos Eduardo Maldonado es Ph.D. en filosofía por la KULeuven (Bélgica): tiene postdoctorados como Visiting Scholar de la Universidad de Pittsburgh, como Visiting Research Profesor de la Universidad Católica de América en Washington D.C. Ha sido profesor de la Universidad del Rosario en la Facultad de Ciencias Política y Gobierno (Maldonado, 2016).

Trabaja en ciencias de la complejidad, sistemas no-lineales, lógicas no-clásicas y ha publicado más de once libros, tiene capítulos en más de cuarenta libros, ha sido editor de más de seis libros

y autor de más de ochenta artículos en revistas especializadas nacionales e internacionales (Maldonado, 2012).

Para Maldonado (2016) “las ciencias de la complejidad solo se ocupan de aquellos fenómenos, sistemas y comportamientos: a) que exhiben complejidad; b) que son efectivamente complejos” (pág. 27) . Expresa que una marca que distingue la complejidad en la naturaleza y la sociedad consiste en la existencia de una diversidad, multiplicidad, variedad que no puede, en ningún sentido, ser reducida: ni metodológica, ni epistemológica, o físicamente (Maldonado, 2016, pág. 28).

Manifiesta también que los sistemas sociales son dinámicos y plantea la siguiente clasificación: clásicos, hamiltonianos, lagrangianos, de la mecánica estadística, de la termodinámica, de la mecánica cuántica, no-lineales y de la teoría Kolmogorov-Arnold-Moser (KAM) (Maldonado, 2016, págs. 127-128). Estableció que dentro de la matemática discreta existen problemas combinatorios y que el campo encargado de estudiar los temas de la complejidad combinatoria es la teoría de la complejidad computacional. Así, el empleo de matemáticas y de ciencias de la computación serían fundamentales en la solución de dichos problemas (Maldonado, 2016, pág. 133). Argumenta también que la teoría de la complejidad computacional ayuda a explicar el qué, cómo y por qué las ciencias sociales y humanas son las más complejas. Incluye tres factores explicativos de la complejidad de las ciencias sociales: el primero consiste en sus divisiones internas y ramificaciones, en las especializaciones y las clasificaciones; el segundo, su componente de densidad temporal; y el tercero un contrapunto con las ciencias exactas pretendiendo desmarcarse de estas (Maldonado, 2016, págs. 135,136).

Enmarcado dentro de las ciencias sociales interdisciplinarias presenta las ciencias de la complejidad como una nueva forma de organización social, radicalmente diferente y emergente del conocimiento. También como una nueva manera de comprensión del mundo, de la realidad y la interacción o la relación del ser humano con la naturaleza (Maldonado, 2016, pág. 151).

Según Maldonado (2016) en relación con las ciencias sociales computacionales como fenómeno reciente, altamente importante y de impacto creciente, estas tienen como pilar fundamental la capacidad de formular y luego trabajar con un modelo matemático que permita desentrañar no-linealidades, sorpresas y autoorganización. Así, la mejor forma de ver y trabajar con complejidad es gracias a la computación y a sus herramientas de modelamiento y simulación. Dentro de estas herramientas se permitiría a través del uso de lenguajes de programación hacer experimentos por vía del computador y realizar simulaciones de fenómenos y sistemas complejos. Permitirían

por primera vez en la historia de las ciencias sociales y humanas, la posibilidad de experimentar con procesos, estructuras y eventos sociales de diversa índole y complejidad (Maldonado, 2016, pág. 175). Es así como este autor puntualiza citando a Pagels (1989) que “las ciencias de la complejidad son el resultado de la computación en general, pero al mismo tiempo han contribuido enormemente al propio desarrollo de esta” (Maldonado, 2016, pág. 177).

Para Maldonado (2016) el modelamiento y la simulación permiten trabajar con modelos y sistemas reales y ver posibilidades antes de que sucedan, los diversos modos y probabilidades en que podrían ocurrir y las variaciones en el espacio, el tiempo, las relaciones y los contextos que podrían tener lugar.

3.3.1.4 Complejidad según Julio Mario Rodríguez Devis

La visión de este autor complementa, según el investigador, el trabajo de esta tesis, debido a que el marco particular de la conceptualización de las variables y el modelo finalmente detectado y sugerido tendría una aplicación inicial desde el interior de las organizaciones y serían un punto de innovación cultural y tecnológica en el sector del transporte para tratar de influir en la cultura organizacional hacia una disciplina de la recolección precisa y oportuna de información y de datos que permitan tomar mejores decisiones en un entorno competitivo y cambiante como el actual. También tener una visión más holística de las organizaciones pequeñas, medianas y grandes del sector transportador en Colombia. Esta mirada debería incluir todas las variables que se involucran en este fenómeno complejo y que afectan no solamente a la empresa y su sector, sino a toda la sociedad en su conjunto.

Julio Mario Rodríguez Devis es Ph.D. en pensamiento complejo de la Universidad Nuevo Mundo de México, M.Sc., también en administración e ingeniero mecánico de la Universidad Nacional de Colombia, profesor pensionado y director del grupo *Complexus* de esta misma universidad; también ha sido profesor de varias universidades en Colombia. Su trabajo ha estado enmarcado en los últimos años en la aplicación de las ciencias de la complejidad a las organizaciones y sus procesos de innovación tecnológica. Para Rodríguez (2002):

> Una teoría de la complejidad se puede ver como una teoría del modelamiento, que abarca la reducción de varios esquemas (eliminación o agregación de variables, separación de los acoplamientos débiles de los fuertes, definición promedio de subsistemas), que evalúa su eficiencia y, posiblemente, que sugiere representaciones novedosas de los fenómenos naturales (pág. 91).

Esta definición considera tres aspectos: el primero sería que para entender el fenómeno se requeriría la presencia de un sujeto que defina el objeto, de manera usual a través de modelos predictivos. El segundo consistiría en dividir el objeto o su representación en partes y subelementos formando una jerarquía conveniente. Y el tercero, el estudio de las interacciones entre los subsistemas y su incorporación a un modelo complejo tomando en consideración el concepto de escala (Rodríguez, 2002, pág. 91).

Afirma Rodríguez (2002) que “la complejidad está basada en las teorías de la información, la cibernética, de los sistemas y de los sistemas dinámicos no-lineales” (pág. 92). Dentro de estos elementos la teoría sistémica tendría un papel fundacional como sustento de la teoría de la complejidad en la cual la visión se enfoca en la unidad compleja y en el nivel transdiciplinario. El sistema al estar constituido por diversas partes interrelacionadas es una unidad global. Es también no indivisible, pero al descomponerla en sus partes su existencia se descompone (Rodríguez, 2002, pág. 93). Sobre la teoría de sistemas se regresará más adelante en este documento con mayor amplitud.

También se define la organización como un sistema dinámico que se encuentra unido en un bucle solidario con el orden y el desorden a través de encuentros e interacciones. Se rige a través de los principios de estratificación, interacción entre niveles y articulación interna. Para Rodríguez “los seres humanos y las estructuras ecológicas, sociales, económicas y políticas, constituyen sistemas complejos” (Rodríguez, 2002, pág. 98).

Finalmente, para Rodríguez (2002), abordar las organizaciones desde la complejidad permite comprender su dinámica y comportamiento como producto de las interacciones y las retroacciones de sus componentes entre sí y con el entorno dinámico y cambiante. Plantea a los administradores su deber de, a partir de esta nueva mirada, proponer nuevos modelos de comportamiento alejados, ojalá, de la visión rígida y mecanicista de las estructuras dominantes en la actualidad.

3.3.1.5 Complejidad según Pablo Razeto, evolución de las ciencias de la complejidad y tres hitos en su desarrollo

Para la presentación de la evolución de las ciencias de la complejidad se utilizará la línea argumentativa de Razeto (2016), en un intento por dilucidar de manera más comprensible esta área de estudio tan amplia.

Pablo Razeto (2016) es licenciado en física, biología y doctor en ciencias mención ecología y biología evolutiva de la Universidad de Chile, también licenciado en filosofía y magíster en estudios filosóficos de la Universidad Alberto Hurtado. Actualmente es director del Instituto de Filosofía y Ciencias de la complejidad (IFICC) de Chile. “Sus líneas de investigación son biología teórica, genética evolutiva, modelamiento de sistemas complejos, filosofía y divulgación de la ciencia, de la biología y la bioética” (Complejidad, 2019, pág. 1).

Según Razeto (2016) las ciencias de la complejidad no son una disciplina estructurada, armada y ordenada, como pueden serlo la física o la química. Por ejemplo, cuando se ingresa una búsqueda sencilla en internet con la ecuación “*Complexity Sciences*” aparece con frecuencia un mapa de las ciencias de la complejidad que ya se ha convertido en referente para todo aquel que quiera adentrarse en este, a juicio del autor fundamentado en la revisión de literatura realizada sobre complejidad en la fase exploratoria y en el desarrollo mismo de la investigación, nuevo mundo de las ciencias.

En este mapa desarrollado inicialmente por Castellani y Hafferty (2009) se intenta consolidar desde una serie de matrices fundamentales los antecedentes de las ciencias de la complejidad y las vertientes que se desprenden de ellas.

En la Figura 28 puede verse que entre las décadas de 1940 y 1950 se originan las ciencias de la complejidad fundamentada en la ciencia de los sistemas, la cibernética y los primeros desarrollos de la inteligencia artificial se presentan como originadores principales de las ciencias de la complejidad. En la década de 1960 aparece la teoría de los sistemas dinámicos que se complementa con la ciencia de sistemas y la cibernética, impulsando con mayor fuerza a las ciencias de la complejidad a inicios de la década de 1970. Posteriormente, directamente de las ciencias de la complejidad se desprenden por un lado los estudios de autoorganización a mediados de los setenta, el concepto de autopoiesis a inicios de los ochenta y el de emergencia a mediados de esa misma década, la dinámica de sistemas a inicios de los noventa y la nueva ciencia de redes a finales de ese decenio. Por otro lado, da origen al modelamiento basado en agentes a mediados de los setenta y los autómatas celulares a finales de estos mismos años, los algoritmos genéticos y la vida artificial en los ochenta, la sociología computacional y el modelamiento de multiagentes durante los años noventa y los años posteriores. Existen otras ramas de estudio que se desarrollaron también durante estos años, a partir de algunas de las anteriores y por combinación de otras. Estas pueden evidenciarse en la Figura 28 (Castellani y Hafferty, 2009).

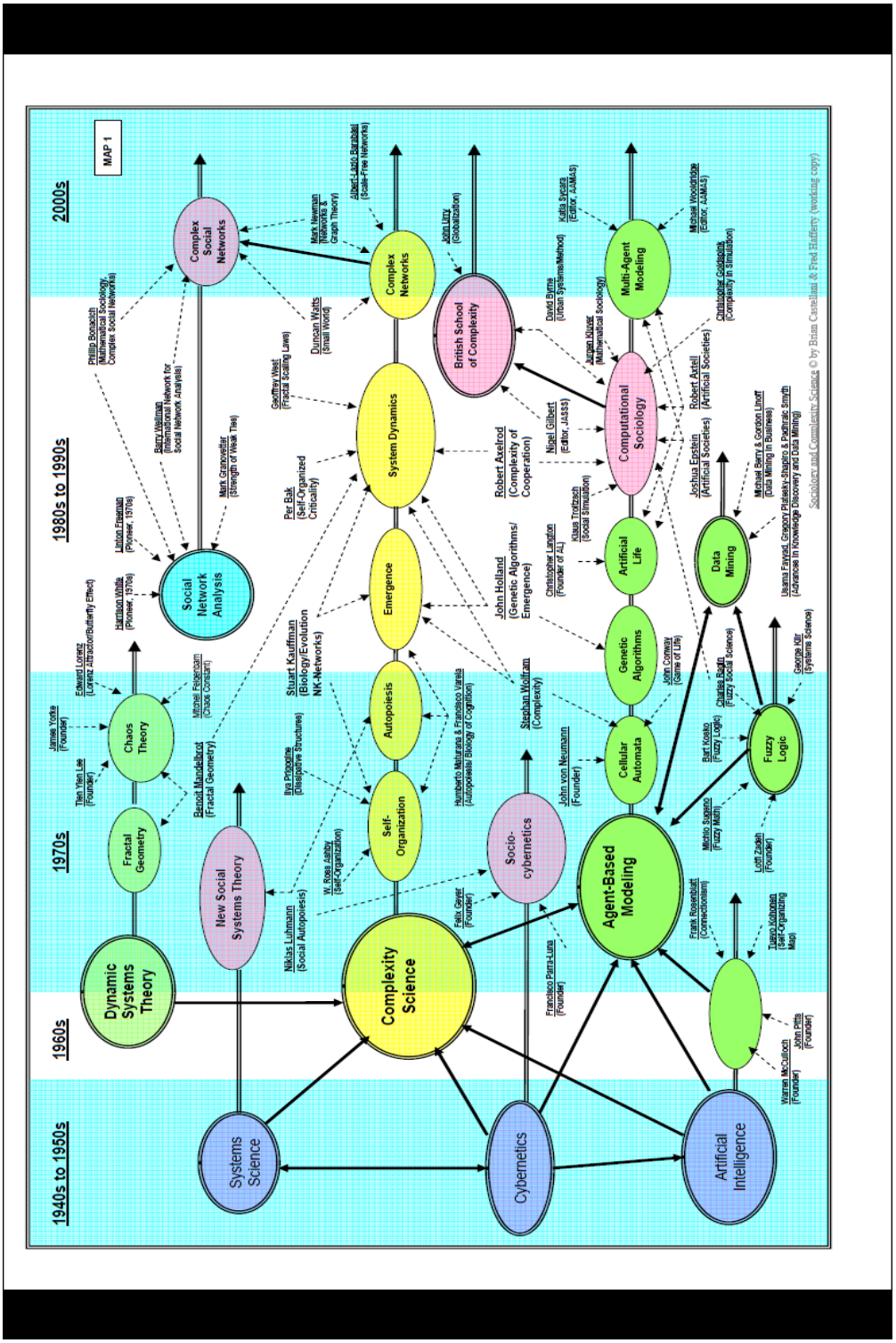

Figura 28. Las nuevas ciencias de la complejidad en los 2000

Fuente: Castellani y Hafferty (2009, pág. 244)

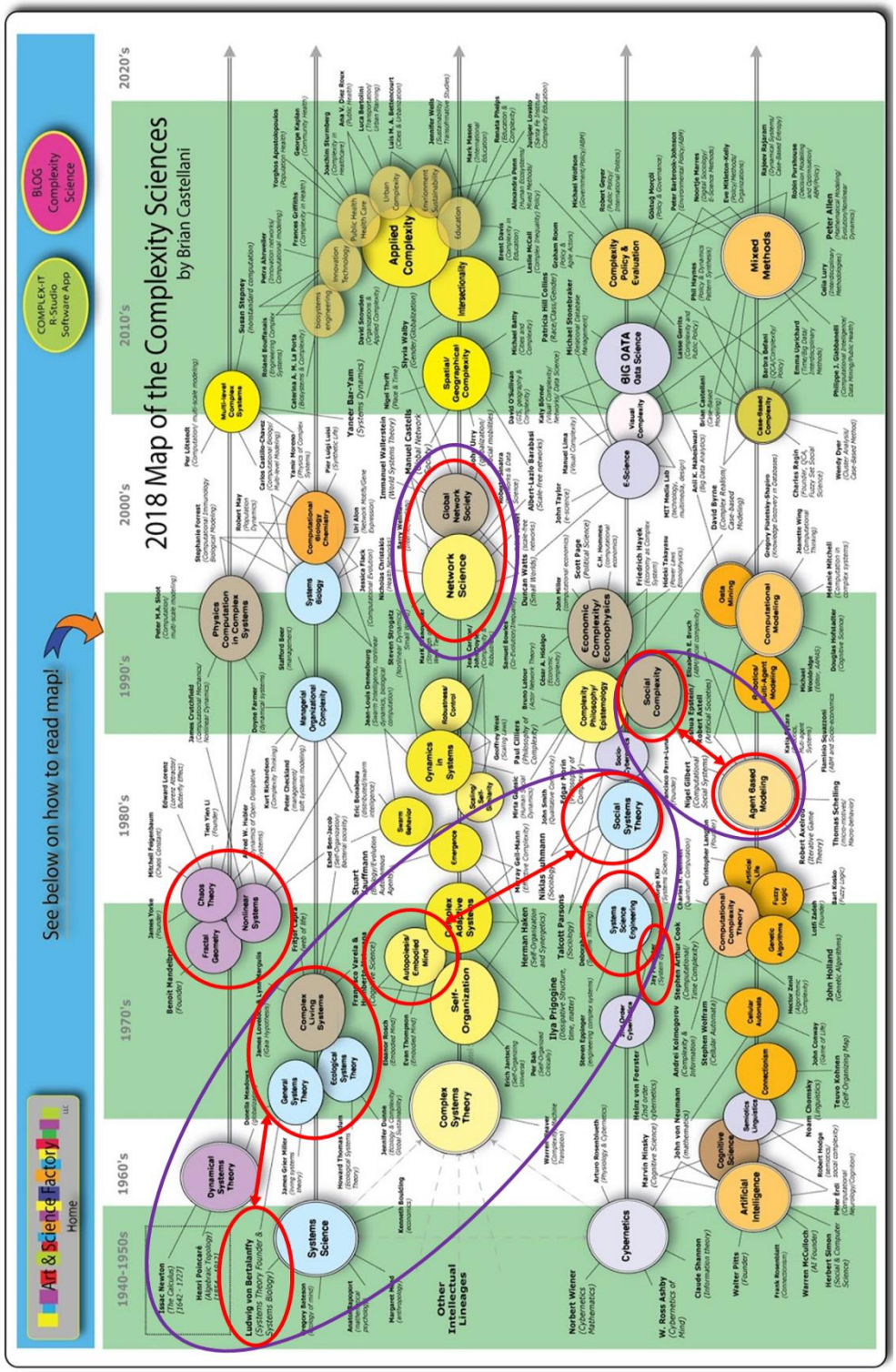

Figura 29. Las nuevas ciencias de la Complejidad en 2018

Fuente: Castellani (2018, pág. 1).

De hecho, se puede ver en la Figura 29 que lo que Castellani y Hafferty (2009) llamaron en el año 2009 “ciencias de la complejidad”, según se evidencia en la Figura 27, en la actualidad es denominado por Castellani (2018) teoría de los sistemas complejos y según el último mapa publicado, a todas las ramas de estudio dentro de él, las denomina “ciencias de la complejidad”.

Dentro de este mapa de Castellani (2018) se identifican claramente cinco ramas de evolución interrelacionadas a través de sus orígenes y de sus autores. Se pueden identificar los últimos desarrollos de cada una de estas ramas de estudio. Así, de la línea originada en la teoría de los sistemas dinámicos, el último desarrollo son los sistemas complejos multinivel; de la línea de la ciencia de los sistemas, sus últimos avances están determinados por la biología computacional; de la teoría de los sistemas complejos, se está trabajando en la complejidad geográfica espacial; de la rama de la cibernética, los últimos desarrollos están enfocados, entre otras áreas de estudio, en la ciencia de los datos, y, de la rama originada en la inteligencia artificial y la ciencia cognitiva, se está trabajando en modelamiento basado en casos.

Como puede notarse en el comparativo de los dos mapas, las ciencias de la complejidad son un campo de estudio multidisciplinario en continua evolución y modificación de sus propios paradigmas. De hecho, Maldonado y Gómez (2010, pág. 10) sostienen que constituye un “nuevo paradigma” en la ciencia, tal como lo definió Thomas Khun en su obra clásica. Y el autor de esta tesis podría afirmar, dada la ebullición de saberes interdisciplinarios y múltiplemente interrelacionados, que dicho paradigma cuenta con modificaciones constantes de sí mismo y que nuevas están surgiendo continuamente.

3.3.1.5.1 Conceptualización de sistema complejo

Para Razeto (2016), una forma de intentar dilucidar las ciencias de la complejidad es empezar por definir el concepto de sistema complejo, del cual existen varias aproximaciones que no son estándar ni consensuadas, pero que ayuda a demarcar de forma teórica un punto de partida al entendimiento de este nuevo paradigma.

Un primer enfoque de definición viene dado por la existencia dentro de un sistema de una gran cantidad de elementos, de diversas clases y con múltiples relaciones. Esta visión es utilizada de manera primordial por aquellos científicos o investigadores focalizados en la teoría de redes.

Una segunda postura estaría determinada por establecer que un sistema complejo es aquel que tiene propiedades o comportamientos con un alto grado de dificultad en su predicción o inferencia a partir de las propiedades y comportamientos de las partes que lo componen; estas llevan a que el sistema en sí sea de comportamiento indeterminado e irreversible y a que se presenten, por lo tanto comportamientos emergentes inesperados, emergencias. Dentro de esta visión se encuentran autores como Bedau, Prigogine y otros.

Un tercer acercamiento vendría dado por la definición en términos de algoritmos[27], a partir de la conceptualización realizada por Gregory Chaitin. En esta, un sistema complejo sería aquel que requiere para su descripción más básica una gran cantidad de información.

Una cuarta aproximación a los sistemas complejos está fundamentada en el trabajo del Instituto Santa Fe, que los define como aquellos sistemas adaptativos autoorganizados que no poseen un control central, que tienen un control distribuido. Así, por ejemplo, en un organismo cada célula actúa según su entorno y sin ningún control centralizado, el sistema se autoorganiza y se adapta a los cambios del ambiente.

Si se combinan estas cuatro grandes definiciones se puede tener un concepto más global de los sistemas complejos, en el cual estos tendrían una gran cantidad de elementos, con múltiples interrelaciones, con comportamientos indeterminados que conllevan a emergencias, que requieren una gran cantidad de información para poder describirlos de la manera más completa posible y que pueden adaptarse a su entorno y autoorganizarse sin un control o mando central (Figura 30).

[27] Un algoritmo es un conjunto de reglas que permiten describir un fenómeno determinado. (Razeto, 2016)

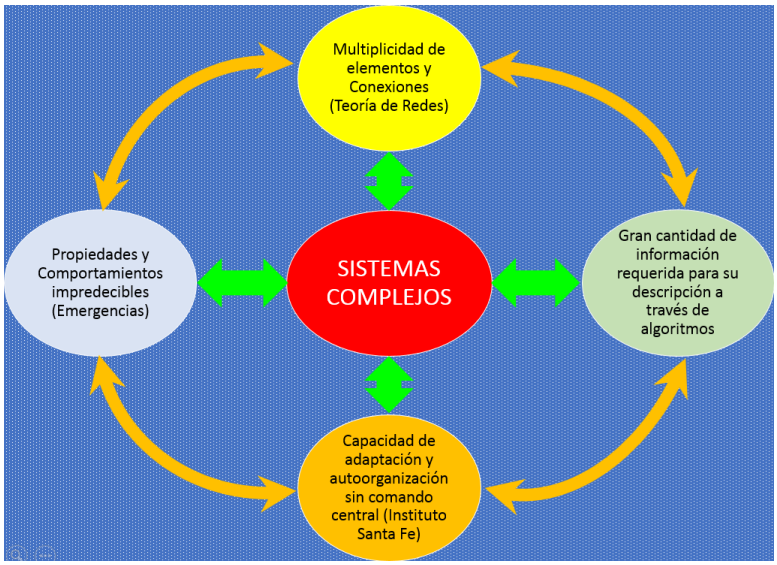

Figura 30. Combinación de definiciones de sistemas complejos

Fuente: elaboración propia a partir de Razeto (2016)

3.3.1.5.2 Teoría del caos

Para Razeto (2016) la noción de complejidad empezó a tener una aceptación positiva de manera reciente, debido a que antes del siglo XX, cuando se hablaba de complejidad ya fuese en un sistema matemático o en un sistema real, el concepto se asociaba como algo negativo, falto de elegancia, sin interés y con ausencia de belleza, puesto que se buscaba simplificar todas las visiones posibles de un sistema para hacerlas así más entendibles. Todo esto cambió, según Razeto (2016), a partir de la aparición de la computación y el inicio de la extensión del uso de los computadores desde las décadas de 1960 y 1970.

De hecho, fue a partir de la posibilidad del uso de los computadores que se pudo dar inicio a la teoría del caos, en la cual uno de sus fundamentos es que aplicando pequeñas variaciones en las condiciones iniciales de un sistema determinístico se obtienen grandes variaciones a través del tiempo[28]. En la Figura 30 puede verse una gráfica basada en una ecuación logística; la cual a partir de una pequeña variación en las condiciones iniciales, genera grandes cambios en el

[28] El matemático y meteorólogo Edward N. Lorenz es considerado el padre de la teoría del caos y sus principales planteamientos se encuentran en su libro titulado “The Essence of Chaos”. En este libro se presenta el postulado que se ha hecho popular para representar la teoría del caos y que dice: “¿Puede el aleteo de una mariposa en Brasil ocasionar un tornado en Texas?” conocido como el efecto mariposa y que fue presentado por primera vez en diciembre de 1972 en la 139 reunión de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia en Washington D.C. (Lorenz, 1993, pág. 181).

comportamiento de los resultados después de una serie de iteraciones. Esto fue lo que Lorenz (1993) pudo detectar en sus ecuaciones explicativas del clima.

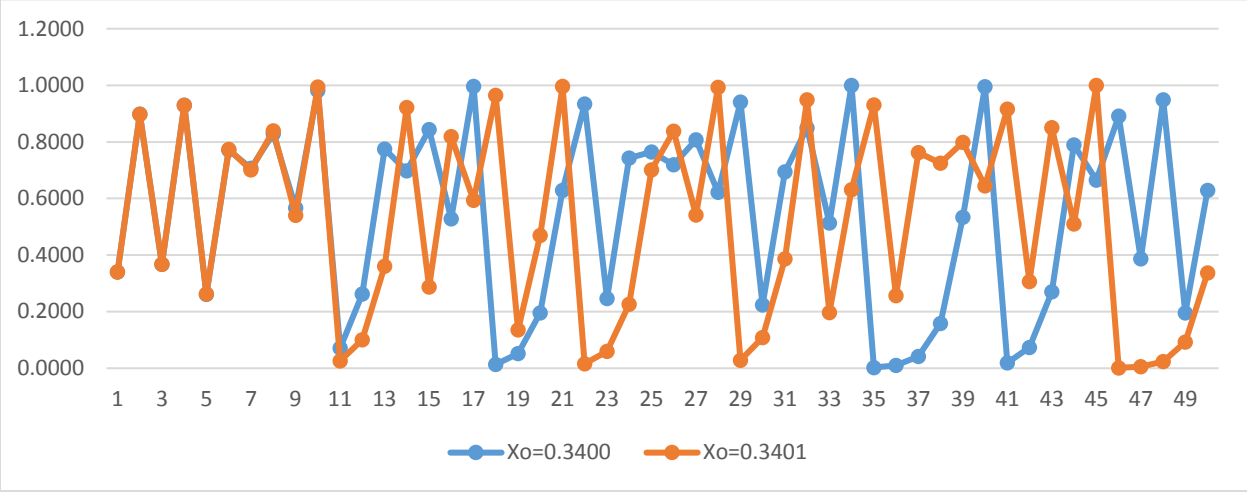

Figura 31. Dos series a partir de la ecuación logística Xn+1=4Xn(1-Xn) Con Xo=0.3400 y Xo=0.3401

Fuente: elaboración propia a partir de Groisman (2019, pág. 17).

3.3.1.5.3 Geometría fractal

Con el desarrollo de los computadores aparece también la formalización de los sistemas dinámicos, en los cuales se empiezan a identificar atractores y, entre estos últimos, los atractores extraños. La estructura de estos es tridimensional y su secuencia pareciera tener un comportamiento al azar, sin serlo en la realidad (Razeto, 2016).

El concepto, la identificación y el entendimiento de los fractales surgen también con el desarrollo de los computadores. Estas figuras geométricas tienen una dimensión fraccional y están entre la geometría euclidiana, excesivamente ordenada, y el caos geométrico de las matemáticas generales (Mandelbrot y Blumen, 1989). La definición de fractales realizada por estos dos autores es considerada por el autor de este documento, como fundamental para entender la geometría fractal, por lo que se reproduce a continuación de manera textual:

> En términos generales, los fractales matemáticos y naturales son formas cuya rugosidad y fragmentación no tienden a desaparecer, ni fluctúan hacia arriba y hacia abajo, sino que permanecen esencialmente inalteradas a medida que se amplía continuamente y el examen se refina. Por lo tanto, la estructura de cada pieza es la clave de toda la estructura. (Mandelbrot & Blumen, 1989, pág. 4)

Los fractales ya habían sido estudiados a finales de 1800 e inicios de 1900. De hecho, en 1916, Sierpinski creó su famoso triángulo, llamado también *Sierpinski gasket.* En este se toma un triángulo equilátero y se van dibujando en su interior nuevos triángulos equiláteros una y otra vez (Figura 32) (Adams & Aslan-Tutak, 2006).

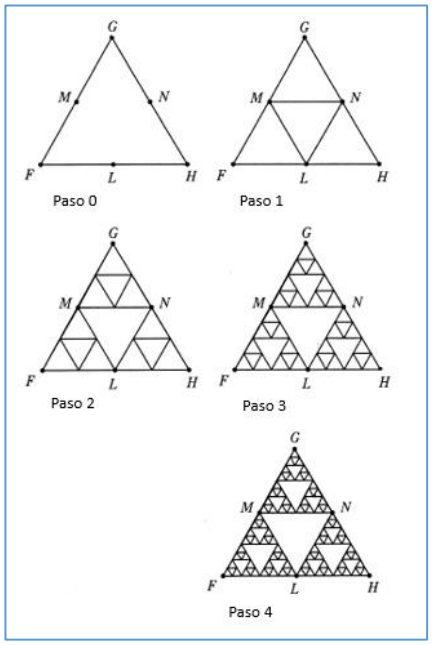

Figura 32. Pasos para construir el triángulo de Sierpinski

Fuente: Adams & Aslan-Tutak (2006, pág. 249)

De hecho, a partir del uso de los computadores se ha detectado que los algoritmos que permiten obtener figuras geométricas fractales son extremadamente cortos, pero tienen la capacidad de generarlas con una gran complejidad y belleza.

Otra rama de estudio que surge a partir del desarrollo de los computadores son los autómatas celulares, su formalizador desde el punto de vista computacional fue John Horton Conway. Él, en 1970 dio a conocer un procedimiento matemático que, con reglas muy sencillas, puede generar comportamientos complejos en una cuadrícula determinada. Este procedimiento matemático fue llamado “El juego de la vida”. Está basado en reglas genéticas básicas que se llevan a cabo de forma simultánea. Estas son:

1. Sobrevivientes. Cada contador con dos o tres contadores vecinos sobrevive para la siguiente generación.

2. Muertes. Cada contador con cuatro o más vecinos muere (es retirado) de la sobrepoblación. Cada contador con un vecino o ninguno muere por aislamiento.

3. Nacimientos. Cada casilla vacía adyacente a tres vecinos exactamente "no más, no menos" es una celda de nacimiento. Un contador es puesto en su lugar para el siguiente movimiento (Gardner, 1970, pág. 2).

Con estas sencillas reglas, otros cortos procedimientos y a través de programas de simulación computacional, en la actualidad se puede llegar a resultados de una alta complejidad como los presentados en la Figura 33[29].

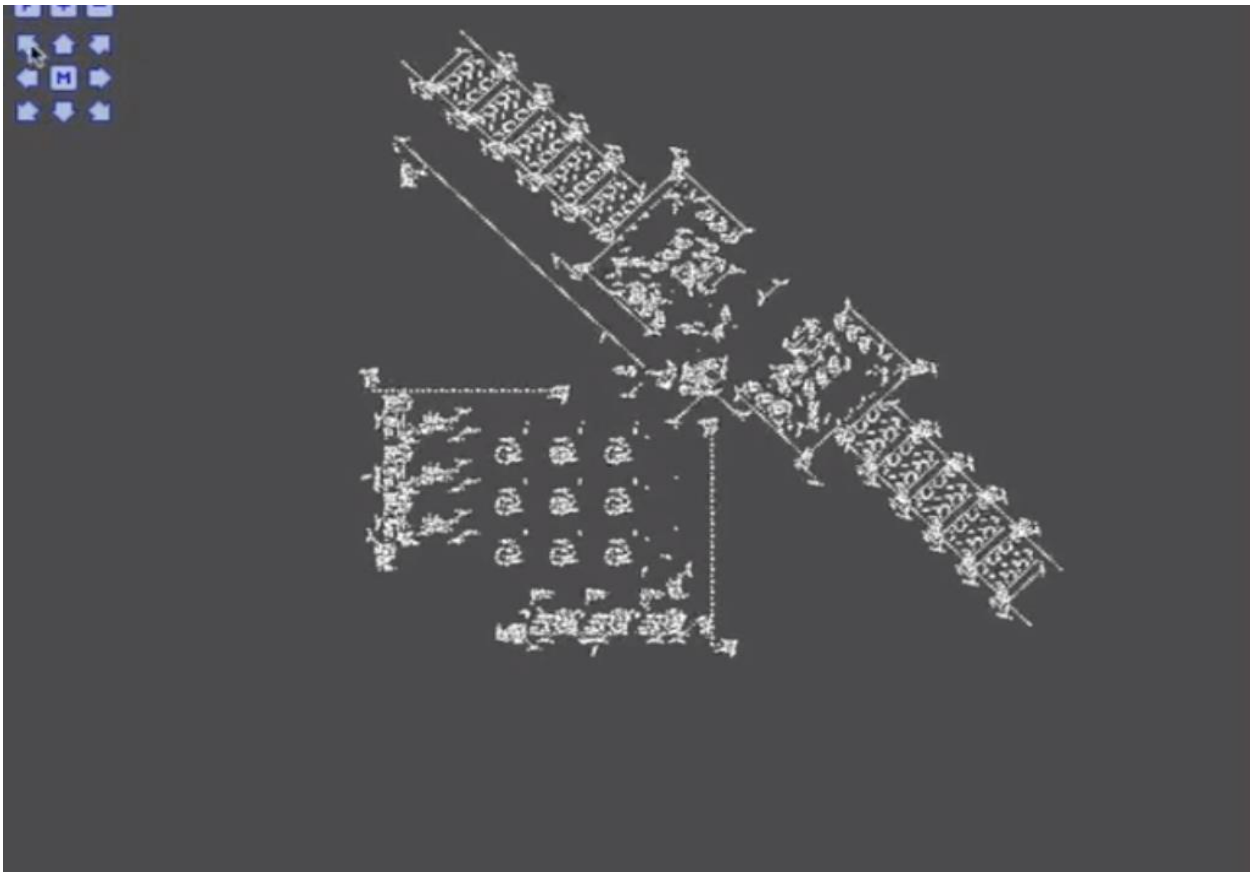

Figura 33. Estructura conocida como máquina de Turing

Fuente: Gershenson (2012, min. 20:22)

[29] Para mayores detalles puede leerse el artículo de Gardner (1970) y múltiples ejemplos que se encuentran en internet. Ver por ejemplo (Gershenson, 2012) a partir del minuto 17:17.

De hecho, Wolfram (2002) asevera que, a partir de muy pocas instrucciones en un algoritmo, se pueden generar estructuras y comportamientos complejos a nivel computacional, también estudia de forma empírica, sistemática y en profundidad el fenómeno de los autómatas celulares (Wolfram, 2002). Sus estudios, condensados en un libro, han sido publicados por su propia compañía de *software* y, según algunos de sus críticos, como Kadanoff (2002), Dyson (2002) y Gad-el-Hak (2003), sus planteamientos no han pasado por publicaciones indexadas o por revisión de pares, lo cual lo hace poco confiable a la luz de la ciencia ortodoxa establecida. Tanto así que uno de sus críticos escribe lo siguiente:

> Para una lectura divertida y fotografías bonitas, este libro no es una mala recomendación. Para inspiración, lea *Principia Mathematica* de Isaac Newton en Latin. Para resolver problemas en mecánica aplicada, el marco de referencia newtoniano es aún la mejor apuesta y el tiempo de uno es mejor gastarlo leyendo libros y artículos tradicionales en mecánica. (Gad-el-Hak, 2003, pág. 3)

A juicio del autor lo presentado podría evidenciar la existencia de un debate entre la ciencia ortodoxa y las ciencias de la complejidad en el cual la primera pareciera querer exigir que las segundas entren dentro del marco de la investigación científica aún dominante. Este debate podría estar presente hoy en día y podría continuar por mucho tiempo.

Lo anterior permite evidenciar que, gracias a la existencia de los computadores, fenómenos que podrían ser muy complejos analíticamente pueden ser representados de forma simple a nivel computacional ya que los sistemas pueden ser muy sensibles a pequeños cambios, como en la teoría del caos; también, que a través de reglas simples se puede llegar a una alta complejidad, como en el caso de la geometría fractal o de los autómatas celulares.

Gracias a los computadores, problemas que de forma analítica serían muy difíciles de solucionar, pueden ser fácilmente solucionados. Por esto, ya no sería necesario hacer una simplificación exagerada de los supuestos para poder hacer modelamiento de problemas o teorías, ya que es posible modelar también las particularidades de estas teorías o problemas (Razeto, 2016).

Se han presentado de manera primordial y de forma general tres de los fenómenos o subteorías que se encuentran en el mar de las llamadas ciencias de la complejidad, a saber: la teoría del caos, la geometría fractal y los autómatas celulares, como ejemplo de la diversidad de tópicos que se pueden tratar dentro de este nueva forma de abordar la solución de problemas y su solución a través de una visión transdisciplinaria, interdisciplinaria y multidisciplinaria. Es claro que hay muchos más fenómenos y campos de estudio como se puede observar en los mapas 1 y 2, pero por limitaciones de esta investigación no se incluyen en este documento.

Aun así, vale la pena mencionarlas tal como se encuentran enumeradas en una de las enciclopedias más destacadas y robustas de las ciencias de la complejidad, titulada "Enciclopedia de Complejidad y Ciencia de Sistemas"; dichas herramientas matemáticas y de modelación de los sistemas complejos son las siguientes:

Simulación y modelación basada en agentes.

Aplicaciones de física y matemáticas a la ciencia social

Bases matemáticas de los autómatas celulares

Caos y complejidad en astrofísica

Modelamiento del clima, calentamiento global y predicción del clima

Redes complejas y teoría de grafos

Complejidad y no linealidad en robótica autónoma

Complejidad en química computacional

Complejidad en temblores, tsunamis y volcanes, y predicción y alerta temprana de sus peligros

Nanociencia computacional y teórica

Control y sistemas dinámicos

Minería de datos y descubrimiento del conocimiento

Complejidad ecológica

Teoría ergódica

Finanzas y econometría

Fractales y multifractales

Teoría de juegos

Computación granular

Sistemas inteligentes

Ecuaciones diferenciales no Lineales ordinarias y sistemas dinámicos

Ecuaciones diferenciales no lineales parciales

Percolación

Teoría de la perturbación

Probabilidad y estadística en sistemas complejos

Ciencia de la información cuántica

Análisis de redes sociales

Computación blanda

Solitones

Física estadística y no lineal

Sinergias

Dinámica de sistemas

Biología de sistemas

Dinámica compleja de la gerencia del tráfico

Computación no convencional

Ondículas" (Meyers, 2009)

Además, una vez realizada esta introducción a lo que se podría llamar ciencias de la complejidad computacional se presentará la justificación teórica a partir de una revisión del origen, la evolución y la adecuación de la herramienta para modelación que se considera más pertinente para el objeto de estudio de esta tesis, a saber: la dinámica de sistemas.

3.4 Teoría de los sistemas y dinámica de sistemas

En la Figura 34 se puede ver en forma de espiral descendente el enfoque deductivo a partir de la teoría que se seguirá desde este momento para el acercamiento a la utilización de la dinámica de sistemas como herramienta de análisis del problema planteado en este trabajo.

Figura 34. Enfoque de análisis de la renovación vehicular a partir de la dinámica de sistemas como herramienta dentro de las ciencias de la complejidad

Fuente: elaboración propia

En esta parte se hará una revisión de los conceptos de sistemas, teoría general de sistemas, teoría de dinámica de sistemas y al finalizar su posible aplicación a la conceptualización de un modelo o una parte del modelo general administrativo que se quiere desarrollar a partir de las ciencias de la complejidad.

3.4.1 Teoría general de los sistemas

"La palabra sistema deriva del latín systema y ésta a su vez del griego σύστημα (unión de cosas de una manera organizada), compuesta por σύν (syn=junto), ιστημι (hístemi=establecer, poner en pie, detener, estar en pie) y el sufijo -μα (ma=instrumental, medio, resultado)." (Diccionario Etimológico Español en Línea, 2019).

En la actualidad existen variados enfoques para acercarse a los sistemas como teoría pero las dos vertientes más destacadas son las de Von Bertalanffy, quien, a partir de su teoría general de los sistemas, estableció todo un movimiento que ha provisto un aparato formal a su estudio y, por otro lado, Norbert Wiener, un matemático estadounidense del Instituto de Tecnología de Massachussets, quien, a partir de su libro seminal "Cibernética", construyó un trabajo interdisciplinario con Bigelow, un ingeniero de IBM, y con Rosenblueth, un psicólogo, en el cual se establecieron los fundamentos del diseño del control y las comunicaciones de todo tipo de sistemas dinámicos (Schwaninger, 2009).

Por considerarse por parte del autor de importancia para este documento y que en general en la literatura (artículos y libros sobre complejidad y sistemas complejos) que citan a Von Bertalanffy tan solo se menciona que es el padre de la teoría de sistemas, se procederá a citar algunos de los planteamientos más importantes de este autor, para un mayor entendimiento de este campo de las ciencias de la complejidad. Es así como se plantean las metas de la teoría general de sistemas de la siguiente forma:

(1) Hay una tendencia general hacia la integración en las varias ciencias, naturales y sociales.

(2) Tal integración parece girar en torno a una teoría general de los sistemas.

(3) Tal teoría pudiera ser un recurso importante para buscar una teoría exacta en los campos no físicos de la ciencia.

(4) Al elaborar principios unificadores que corren verticalmente por el universo de las ciencias, esta teoría nos acerca a la meta de la unidad de la ciencia.

> *(5) Esto puede conducir a una integración, que hace mucha falta, en la instrucción científica."* (Von Bertalanffy, 1976, pág. 38)

Algo importante que menciona Von Bertalanffy (1976) es lo siguiente:

> *El enfoque matemático adoptado en la teoría general de sistemas no es el único posible ni el más general, sino que existen otra serie de enfoques afines, tales como las teorías de la información, la cibernética, las teorías de los juegos, la decisión y las redes, los modelos estocásticos, la investigación de operaciones -por solo mencionar los más importantes.* (pág. 38)

Von Bertalanffy (1976) también plantea que, a pesar de todo, dado que las ecuaciones diferenciales cubren muchas áreas en las ciencias físicas, biológicas, económicas y las ciencias del comportamiento, estas serían una ruta apropiada para el estudio de los sistemas generalizados (pág. 38).

Otro de los puntos importantes que analiza Von Bertalanffy (1976) es la diferencia entre los sistemas cerrados y abiertos, la cual radica no solo en el análisis de su comportamiento, sino en su efectiva representación de la realidad. De hecho, explica que los sistemas cerrados con normalidad se estudian a partir de la física, tomando en consideración su aislamiento del medio circundante. Un ejemplo podrían ser las reacciones químicas que se llevan a cabo dentro de un Erlenmeyer, sin "ningún" tipo de interacción fuera del recipiente, dado que allí se cumplen de manera mucho más exacta las leyes de la termodinámica clásica[30].

Por otro lado, están los sistemas abiertos, que serían la mayoría de los biológicos, los cuales están intercambiando masa y energía de forma continua con su medio a través de toda su existencia. Dando continuidad a esta línea, Von Bertalanffy (1976) plantea que, así como la energía es la "moneda" de intercambio más corriente en la física, en algunos campos de esta y en la tecnología, esta "moneda" no sería aceptable, por lo que surge otra forma de intercambio que es la información y que es mucho más precisa, de hecho en la tecnología y en los sistemas sociales; esto dio origen a la teoría de la comunicación y el control.

Esta teoría tiene tres aspectos centrales, a saber: la transmisión de la información, la medición de esta, en términos muy similares a cómo se mide la entropía, y la retroalimentación; siendo esta última central para el control de los sistemas.

[30] Las dos principales leyes de la termodinámica son las siguientes; la primera dice que la materia no se crea ni se destruye, sino que se transforma y la segunda postula que la cantidad de entropía tiende a aumentar con relación al tiempo e introduce el concepto de irreversibilidad (que existen procesos que son irreversibles, como, por ejemplo, el que una mancha de leche en una taza de café vuelva a concentrarse en un punto de pequeño volumen).

Un punto que resalta Von Bertalanffy (1976) es una comparación entre la ciencia clásica nacida de la física en el siglo XIX, en donde se privilegiaba la descomposición de la realidad en unidades que fuesen fácilmente solucionables y donde lo que parecía existir y tenerse en cuenta era un sentido de análisis unidireccional de los sistemas y los fenómenos. Esto, en contraste con la ciencia actual, en la cual han empezado a aparecer nociones como las de totalidad, holismo, organismo, *Gestalt*[31], etc.; las cuales invitan a pensar en términos de sistemas de elementos en interacción mutua.

Para cerrar este apartado de la teoría de sistemas se acoge el planteamiento que ha hecho Von Bertalanffy (1976) con relación a los sistemas abiertos:

> En la teoría de los sistemas abiertos (y su posterior generalización en la teoría general de los sistemas) se manifiestan principios de interacción entre múltiples variables (p. ej., cinética de reacción, flujos y fuerzas en termodinámica irreversible), organización dinámica de los procesos y una posible expansión de las leyes físicas, teniendo en consideración el reino biológico. Con lo cual estos adelantos forman parte de una nueva formulación de la visión científica del mundo. (Von Bertalanffy, 1976, pág. 160)

3.4.2 Dinámica de sistemas

A partir de los fundamentos de Von Bertalanffy y de otros autores acerca de la teoría general de sistemas, se realizaron variados estudios y aplicaciones (mencionados en la Tabla 6), hasta que, a partir de los trabajos de Jay Wright Forrester, profesor del Instituto Tecnológico de Massachussets, se empiezan a desarrollar los fundamentos de lo que se llamará hoy la dinámica de sistemas. Forrester en su libro *Industrial Dynamics* plantea los fundamentos filosóficos y metodológicos de este nuevo campo, en el cual se analiza la dinámica de los sistemas y su interrelación con otros y con su entorno (Richardson, 2009).

> *La Dinámica de Sistemas es un enfoque, con la ayuda de los computadores, hacia la construcción de teoría, análisis de políticas y un apoyo a decisiones estratégicas que emergen desde un punto de vista endógeno y se aplica a problemas dinámicos que surgen en sistemas complejos sociales, gerenciales, económicos o ecológicos; literalmente cualquier sistema dinámico caracterizado por interdependencia, interacción mutua, información de retroalimentación y causalidad circular".* (Richardson, 2009)

[31] "Como Gestalt se denomina la corriente de la psicología, de corte teórico y experimental, que se dedica al estudio de la percepción. Como tal, Gestalt es una palabra proveniente del alemán, y se puede traducir como 'forma' o 'contorno'." ("Gestalt" (s/f), 2019).

Según Richardson (2009) una aproximación a la dinámica de sistemas involucra:

- La definición de los problemas dinámicamente, en términos de gráficos a través del tiempo.
- Esforzarse por tener una visión endógena del comportamiento de las dinámicas significativas del sistema, un enfoque interno de las características que un sistema puede generarse a sí mismo o exacerbar el problema percibido.
- Un pensamiento dirigido hacia todos los conceptos en un sistema real como unas cantidades continúas interconectadas en bucles de retroalimentación de la información y causalidad circular.
- Identificación de acciones independientes o acumulaciones (niveles) en el sistema y sus entradas y salidas (velocidades).
- Formulación de un modelo de comportamiento capaz de reproducir por sí solo, la dinámica del problema que le concierne. El modelo es usualmente una simulación por computador expresado en ecuaciones no lineales, pero que ocasionalmente se deja sin cuantificar como un diagrama que captura la estructura del flujo de acciones, causas y retroalimentación del sistema.
- Obtención de comprensión y perspectivas de política aplicables del modelo resultante.
- Cambios en la implementación como resultado de la comprensión y las percepciones basados en el modelo. (Richardson, 2009, pág. 8968)

En las figuras 35 a 38 se pueden ver las líneas de tiempo adaptadas por el autor de una cronología recopilada por Schwaninger (2009, pág. 8984) de la dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Como se puede evidenciar son múltiples los autores que han trabajado la teoría se sistemas y su aplicación a la solución de variados aspectos de la industria, la sociedad, la economía etc.

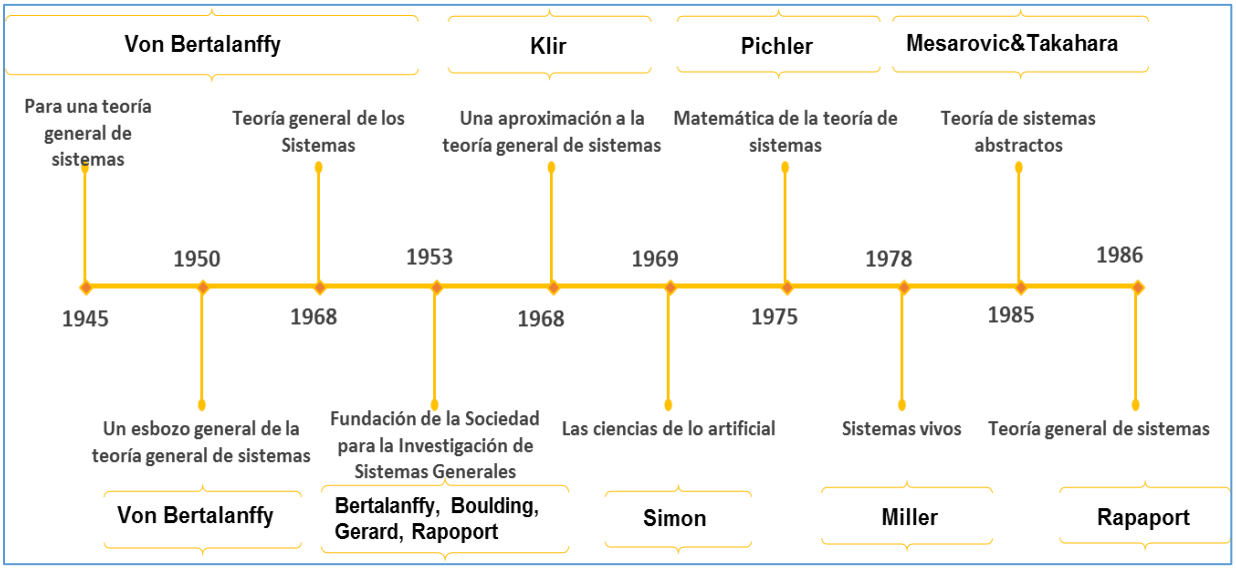

Figura 35. Dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Hitos en la evolución del enfoque de sistemas en general y de la dinámica de sistemas en particular. Teoría de sistemas.

Fuente: elaboración propia a partir de Schwaninger (2009, pág. 8984).

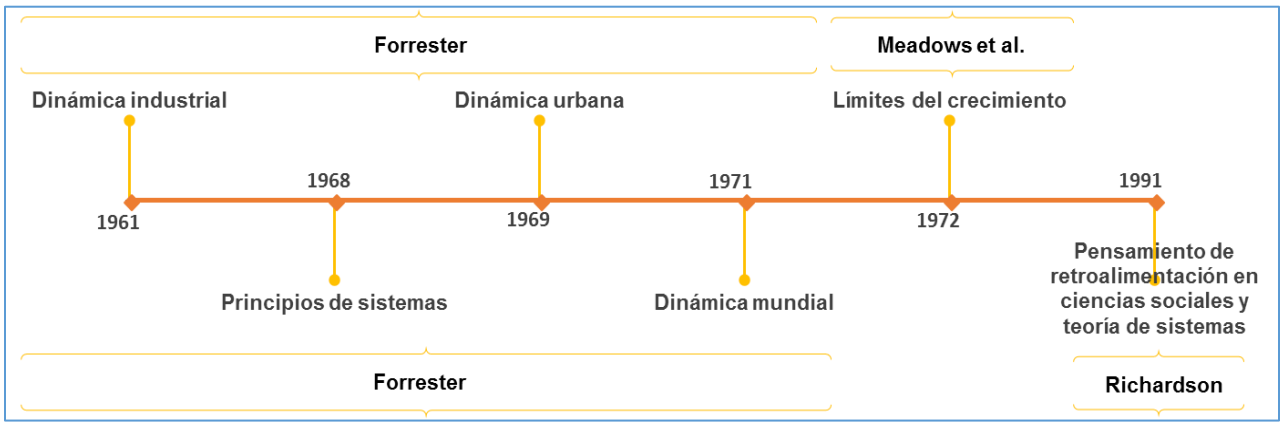

Figura 36. Dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Hitos en la evolución del enfoque de sistemas en general y de la dinámica de sistemas en particular. Fundamentos de dinámica de sistemas

Fuente: elaboración propia a partir de Schwaninger (2009, pág. 8984).

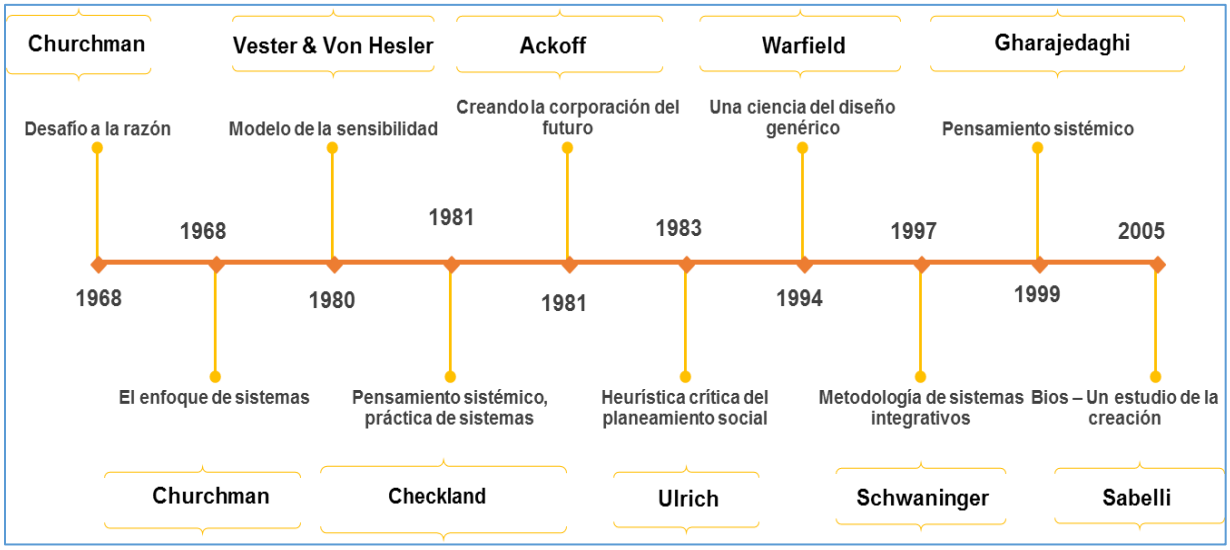

Figura 37. Dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Hitos en la evolución del enfoque de sistemas en general y de la dinámica de sistemas en particular. Metodología de sistemas

Fuente: elaboración propia a partir de Schwaninger (2009, pág. 8984).

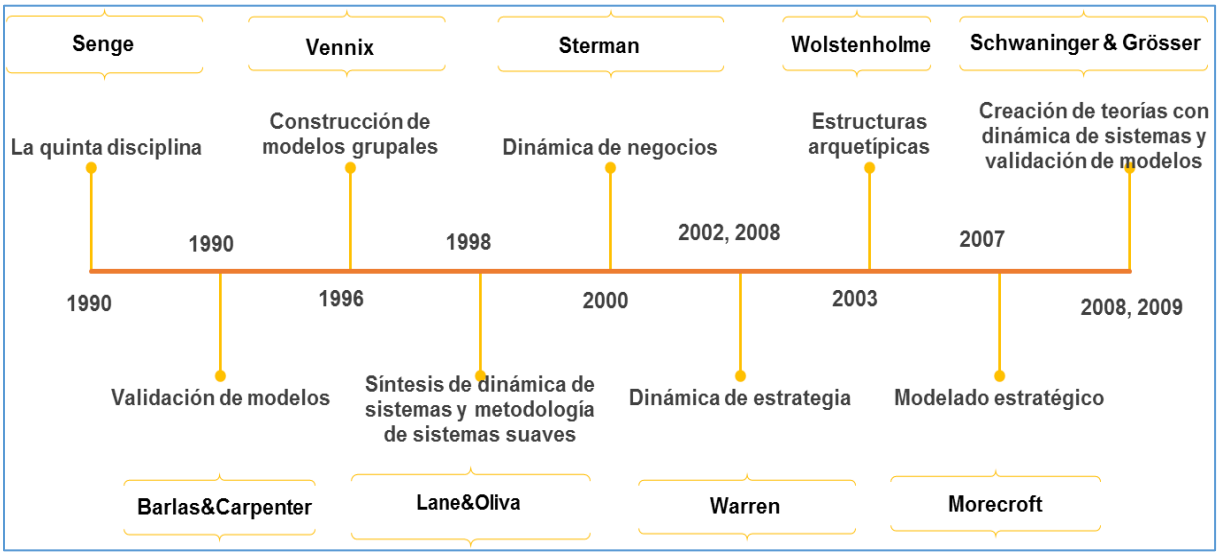

Figura 38. Dinámica de sistemas en la evolución del enfoque de sistemas. Hitos en la evolución del enfoque de sistemas en general y de la dinámica de sistemas en particular Selección de trabajos recientes en dinámica de sistemas

Fuente: elaboración propia a partir de Schwaninger (2009, pág. 8984).

Como ya se mencionó, los trabajos de Forrester sentaron los fundamentos para una nueva metodología de estudio llamada dinámica de sistemas. Su libro Dinámica Industrial "trata del

sistema central subyacente en la actividad industrial y tiene como objetivo el diseño de empresa cuyo propósito es crear mejores políticas de dirección y estructuras organizativas" (Forrester, 1961, pág. 11) y formula que: "La dinámica industrial es una forma de estudiar el comportamiento de los sistemas industriales con el fin de mostrar cómo las políticas, las decisiones, la estructura y las decisiones se interrelacionas para influir en el desarrollo y la estabilidad" (Forrester, 1961, pág. 11).

Para que la dinámica industrial fuese posible fueron necesarios cuatro pilares fundamentales:

> *1)* la teoría sobre los sistemas de realimentación, *2)* la investigación con relación a la toma de decisiones en el contexto de tácticas militares modernas, *3)* la utilización de modelos de sistemas complejos experimentales de esta área y de la ingeniería para tratar de explicar los sistemas sociales y *4)* la computación digital, que se ha convertido en una herramienta práctica y económica que resuelve la gran cantidad de cómputos requeridos (Forrester, 1961, págs. 14-19).

Una década después del establecimiento de los conceptos incluidos en lo que se denominó dinámica industrial, Forrester realizó una revisión de estos conceptos e hizo una definición aún más clara de esta forma de analizar los sistemas complejos. Por su importancia para esta tesis, se reproduce íntegramente:

> La dinámica Industrial, descrita como la aplicación de los conceptos de retroalimentación a los sistemas sociales, está evolucionando hacia una teoría de la estructura en los sistemas tan robusta que ha sido utilizada como una aproximación al diseño de políticas corporativas. En sistemas de alto orden, no lineales, con múltiples bucles y retroalimentación tanto positiva como negativa, se encuentran las maneras de comportamiento que han sido tan desconcertantes en la gerencia y la economía. Se acerca el tiempo en que los conceptos y principios más definidos, pueden formar un núcleo a través de la educación gerencial que interrelacione las áreas funcionales y permita moverse del entendimiento estático al dinámico de los sistemas. Hacer esto ayudaría a cerrar la brecha entre lo que las escuelas de administración pueden enseñar ahora y lo que los gerentes deben entender si se quiere enfrentar exitosamente a la complejidad creciente de nuestra sociedad (Forrester, 1968, pág. 398).

Años después, Forrester utiliza los conceptos desarrollados en la dinámica de sistemas para aplicarlos al estudio de comportamientos aún más complejos, como los que se presentan en la sociedad. En un artículo de 1980, plantea la aplicación a estos sistemas y propone que para modelar los comportamientos económicos todo tipo de información debería usarse para construir los modelos y no solamente información numérica. En este artículo plantea tres tipos de información fundamentales y los define como: los datos mentales, los escritos y los numéricos.

Define también la dinámica de sistemas como una extensión substancial del enfoque de estudio de caso, este término es usado en educación gerencial (Forrester, 1980). El mismo autor plantea también que la dinámica de sistemas surge de tres actividades previas: administración tradicional, sistemas de retroalimentación y cibernética, y simulación computacional, tal como puede verse en la Figura 39 (Forrester, 1980).

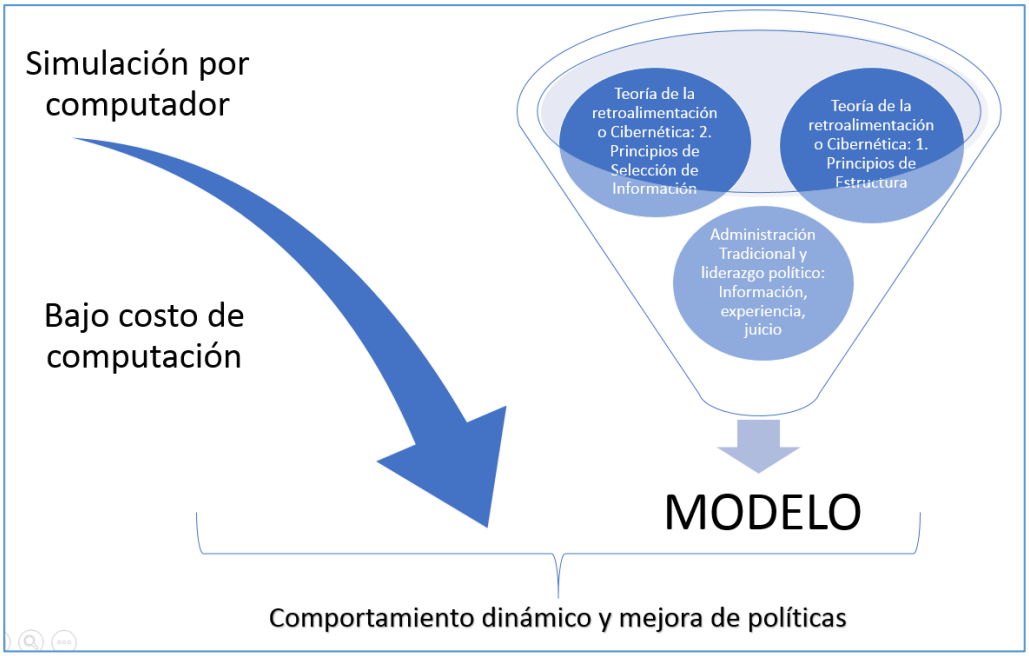

Figura 39. Tres desarrollos previos a partir de los cuales surge la dinámica de sistemas

Fuente: adaptado de Forrester (1980, pág. 559)

Para el desarrollo de modelos, el mencionado autor plantea una lógica de uso de las fuentes de información que es posible observar en la Figura 35. Se puede apreciar en este gráfico cómo el propósito de un modelo proviene de la información mental y escrita que se posea a partir de un comportamiento problemático en un sistema real. Durante la construcción del modelo el foco central debe ser la información tanto mental, como escrita y numérica a la que se pueda tener acceso, además de las posibles series de tiempo involucradas. Tanto la información como el propósito, alineados con los conceptos de modelación apropiados se interpretan a través de los principios de la teoría de la retroalimentación, para así obtener una estructura del modelo (Forrester, 1980).

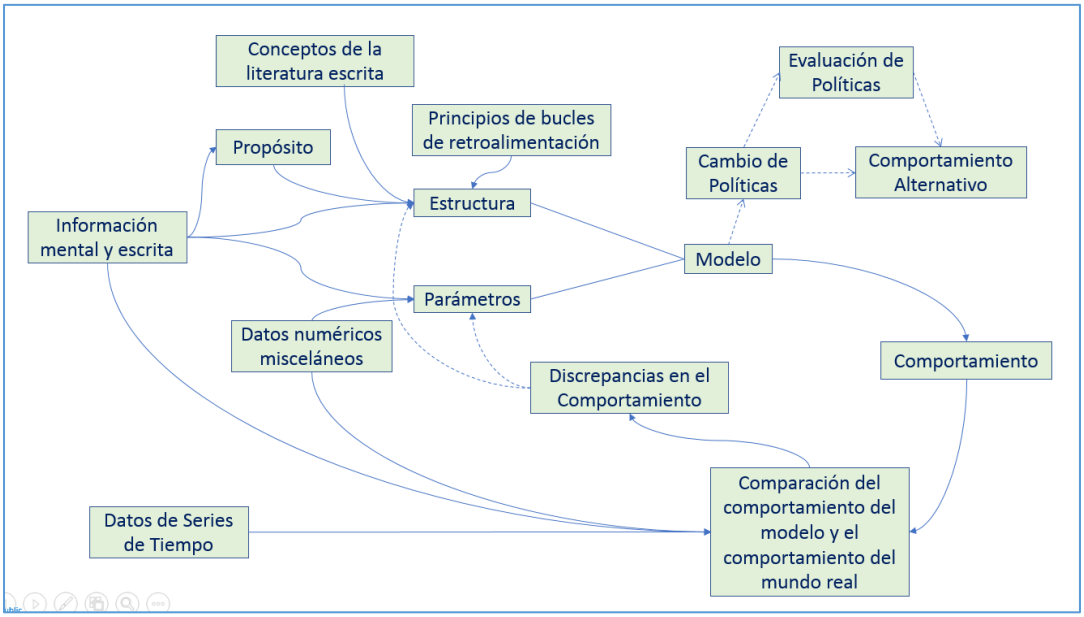

Figura 40. Creando un modelo de dinámica de sistemas

Fuente: adaptado de Forrester (1980, pág. 559)

Los parámetros con frecuencia se derivan de forma directa e individual de la información mental, escrita y numérica. Cuando se construye un modelo sencillo en una escala corta de tiempo algunas variables se pueden asumir como constantes, pero si el horizonte de tiempo es mayor, los parámetros pueden convertirse en variables. En la construcción de un modelo cada variable o parámetro debe tener relevancia en el mundo real y debería consultarse con personas expertas que estén en el día a día de cualquier operación para asegurarse de que se está haciendo una interpretación adecuada de la información. Con posterioridad, al correr el modelo, estos parámetros o variables pueden refinarse dentro de un rango que sea aceptable (Forrester, 1980).

Con todo lo anterior se construye un modelo inicial que será el punto de partida para un proceso de dinámica de sistemas. El modelo de comportamiento se genera en forma de series de tiempo para las variables que se hayan definido. Es así como la diversidad de variables hace posible una multitud de comparaciones entre el modelo y los sistemas reales (Forrester, 1980).

El comportamiento del modelo puede compararse de múltiples formas con la información del comportamiento de la vida real. Es así como la información disponible incluirá conocimiento de posibilidades lógicas de análisis en el modelo; las series de datos que salen del modelo pueden ser comparadas con las series de datos del sistema real y la comparación del comportamiento del mundo real con el comportamiento del modelo revelará discrepancias que al ser evaluadas justificarán o no un cambio determinado y su esfuerzo para llevarlo a cabo (Forrester, 1980).

Después de que un modelo ha sido determinado como aceptable se puede empezar a utilizar como herramienta para el análisis de políticas de la siguiente forma: un cambio en una política podría provenir de realizar un cambio en un parámetro de esta. Posteriormente, se vuelve a correr una nueva simulación y se hacen nuevas comparaciones con los comportamientos reales, para así poder tomar al final una decisión de cambiar o no una política determinada (Forrester, 1980).

Tomando como base los fundamentos de la dinámica de sistemas conceptualizados, desarrollados y aplicados por Forrester a partir de los años sesenta y las décadas posteriores, el autor considera importante introducir uno de los trabajos sistemáticos más importantes sobre dinámica de sistemas y que es utilizado como base para el acercamiento moderno a esta rama de las ciencias de la complejidad como metodología de entendimiento y simulación de sistemas complejos; este trabajo ha sido compilado por Sterman (2000) y se encontró que muchos de los autores que trabajan con esta herramienta, utilizan sus conceptos para desarrollar las aplicaciones específicas a cada campo de estudio.

Este investigador plantea que para que haya toma de decisiones y aprendizaje efectivo en un mundo de creciente complejidad dinámica se requiere que nos convirtamos en pensadores sistémicos capaces de expandir los límites de nuestros modelos mentales y desarrollar herramientas para entender la forma en que la estructura de los sistemas complejos crea su comportamiento (Sterman, 2000).

3.4.3 Dinámica de sistemas y gestión de operaciones

Como se ha visto previamente, la dinámica de sistemas como teoría estructural de los sistemas dinámicos está basada en la hipótesis de que la estructura de los sistemas sociales se caracteriza en términos generales por bucles de retroalimentación, procesos de acumulación y retrasos entre las causas y los efectos, y en otro componente fundamental que es la variable tiempo (GröBler, Thun, & Milling, 2008).

La base para utilizar la dinámica de sistemas en la gestión de operaciones es planteada por Amundson, a través de la aplicación de cuatro criterios: la coincidencia de problemas, conceptos significativos, poder explicativo y coincidencia en las suposiciones subyacentes (GröBler et al., 2008).

Los fenómenos estudiados en la dinámica de sistemas son sistemas complejos y dinámicos, en particular los sistemas socioeconómicos; esto coincide con los fenómenos en gestión de operaciones en tanto que las operaciones pueden ser consideradas como las conexiones entre los sistemas, la gente, los procesos y los procedimientos, que generan valor en una organización o en una cadena de suministro determinada (GröBler et al., 2008).

Con relación a los conceptos fundamentales usados en la dinámica de sistemas están los bucles de retroalimentación, los procesos de acumulación y los retrasos entre causas y efectos. Estos se encuentran también en procesos de gestión de operaciones, por ejemplo, al implementar una mejora en una operación determinada se puede afectar la motivación de un trabajador para hacer que sea exitosa, puesto que, al serlo, este trabajador podría temer perder su lugar de trabajo. También se encuentran procesos de acumulación en la variación de inventarios en una compañía o en la acumulación de vehículos viejos en una flota por falta de incentivos para que dichos equipos sean renovados. Igualmente, se puede presentar una demora en la introducción de un nuevo producto, debido a la necesidad de crear una reputación adecuada con las nuevas características de este.

Los modelos de dinámica de sistemas, gracias a los conceptos de retroalimentación, acumulación y retraso tienen el poder de explicar fenómenos variados en la gestión de operaciones porque pueden representar un conjunto de hipótesis causales entre elementos del sistema (GröBler et al., 2008).

Las ideas de sistema y causalidad son suposiciones subyacentes tanto en la gestión de operaciones como en la dinámica de sistemas y los estudios de los dos, en general, están basados con frecuencia en un punto de vista de causa y efecto (GröBler, et al., 2008).

La dinámica de sistemas es una forma de representar, de la forma más cercana posible, los sistemas del mundo real y su considerable complejidad, pero, en principio, no tienen el objetivo primigenio de ser usado como una metodología de optimización. Esto, a pesar de que algunas aplicaciones recientes han introducido algoritmos de optimización para encontrar soluciones robustas por parámetros y variación de políticas (GröBler et al., 2008).

La dinámica de sistemas es una teoría acerca de la estructura y el comportamiento resultante de los sistemas sociales; sin embargo, también suministra un método para representar su estructura en forma de diagramas y ecuaciones matemáticas. Con frecuencia los proyectos que utilizan dinámica de sistemas se componen de dos fases: conceptualización/modelamiento y simulación/experimentos (GröBler et al., 2008).

En la actualidad existen en el mercado paquetes de *software* disponibles para soportar los procesos de modelación y simulación, como Vensim, Powersim, Stella o iThink. En los mencionados paquetes para cuantificar las variables y los enlaces entre ellas se crean sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales, los cuales se simulan a través de algoritmos numéricos (GröBler et al., 2008). En general, estos paquetes utilizan la integración de Euler[32] como su método de simulación por defecto (Sterman, 2000).

La noción central en la dinámica de sistemas es que los bucles de retroalimentación son los ladrillos de todo sistema social (GröBleret al., 2008). Lo anterior significa que cualquier actividad al final tiene un efecto de retorno en aquel elemento del sistema que inició la actividad.

Existen dos tipos de bucles de retroalimentación: negativo (búsqueda de objetivos) y positivo (reforzamiento). Todos aquellos que tengan un impacto substancial en el comportamiento del sistema deberían ser incluidos en el estudio de la dinámica de sistemas (GröBler et al., 2008).

Los otros dos conceptos importantes en la dinámica de sistemas son la acumulación y los retrasos:

> Las acumulaciones son el resultado de cualquier ciclo de retroalimentación pues cada uno de ellos contiene por lo menos una variable que conserva el estado del sistema y que puede ser usada como un valor inicial para calcular el comportamiento simulado. Estas variables de nivel (o valor) se definen de manera independiente a cualquier intervalo de medida escogido y representan la ruta de un sistema a través del tiempo: Incorporan así, la historia del sistema y determinan su comportamiento futuro. (GröBler et al., 2008, pág. 377).

> El concepto de retraso se considera omnipresente en tanto que cualquier decisión que se tome en los sistemas sociales conllevará a consecuencias que bien podrían ser distantes tanto en tiempo como en espacio. Con la ayuda de la simulación computarizada, tales distancias podrían ser comprimidas para que su análisis esté dentro de un marco aceptable de tiempo (GröBler et al., 2008, pág. 377).

32 En matemática y computación, el método de Euler, llamado así en honor a Leonhard Euler, es un procedimiento de integración numérica para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) a partir de un valor inicial dado. El método de Euler es el más simple de los métodos numéricos para resolver un problema de valor inicial, y el más simple de los Métodos de Runge-Kutta. El método de Euler es nombrado por Leonhard Euler, quien lo trató en su libro *Institutionum calculi integralis* (publicado en 1768-1770). El método de Euler es un método de primer orden, lo que significa que el error local es proporcional al cuadrado del tamaño del paso, y el error global es proporcional al tamaño del paso. El método de Euler regularmente sirve como base para construir métodos más complejos Tomado de: (Zill & Wright, 2011, pág. 68).

Para el manejo de estos elementos es fundamental la simulación computacional. Esto, debido a que todos los ciclos de retroalimentación, los retrasos y las acumulaciones, al combinarse, terminan teniendo un comportamiento no lineal que es muy difícil de manejar de manera analítica. Por lo anterior, para que se puedan entender adecuadamente los comportamientos y relaciones existentes dentro del sistema, es necesario realizar una inmensa cantidad de cálculos numéricos que se pueden realizar de forma rápida a través del poder de cálculo de los computadores modernos (GröBler et al., 2008).

Otro punto importante en los proyectos de modelación con dinámica de sistemas es la consideración de los modelos mentales generados por las personas que conocen el sistema. Estos se convierten en el punto de partida y también en el punto de llegada de los proyectos. Dado que la mejor fuente de información acerca de las variables del modelo ya sean esta medibles o no, es la experiencia de aquellos que trabajan dentro de un sistema determinado o que lo están analizando y, dado que el objetivo final de los proyectos de dinámica de sistemas es la generación de mayor conocimiento acerca de las relaciones entre la estructura del sistema y su comportamiento, estos generan una teoría del contenido de una situación compleja que no puede pueda ser entendida de manera intuitiva (GröBler et al., 2008; Forrester, 1961; Sterman, 2000).

De hecho en el artículo de GröBler et al. que se trabajó, planteó que “La implementación real de una mejora potencial es considerada más importante que la búsqueda de un estado abstracto óptimo del sistema” (GröBler et al., 2008, pág. 378).

Los modelos de dinámica de sistemas son más descriptivos que normativos y estos, aunque persiguen una mejora real en las interacciones dentro de un sistema, no buscan necesariamente una solución óptima. Aun así, tal como se mencionó antes, en la actualidad existen avances para tratar de encontrar una optimización de los modelos que hagan mucho más robusto el análisis y sus futuros impactos en la realidad.

Para terminar, vale retomar la conclusión planteada por parte de GröBler et al. (2008) y que resume de la siguiente forma la aplicación de la teoría de la dinámica de sistemas a la gestión de operaciones:

> La Dinámica de Sistemas es una teoría estructural de los sistemas sociales y puede ser usada fructíferamente en el contexto de la Gestión de Operaciones para explicar una variedad de fenómenos que de otra manera son difíciles de tener bajo control. Su característica principal como teoría estructural es la atención en los ciclos de retroalimentación, los procesos de acumulación y

los retrasos. Los modelos de Dinámica de Sistemas son teorías de rango medio o menor de los entornos sociales, por ejemplo, los problemas de gestión de operaciones. El desarrollo de tales modelos (y así, la generación de teoría) es un proceso en el cual el modelamiento y el trabajo empírico se transforma, proporcionando un balance deductivo-inductivo. Los modelos de simulación son una forma de experimentación, en la cual la teoría (representada por el modelo) es evaluado cuando las pruebas en el mundo real no son factibles o apropiadas (GröBler et al., 2008, pág. 382).

3.4.4 Dinámica de sistemas y operaciones de mantenimiento

La dinámica de sistemas se ha usado para modelar la dinámica compleja de los sistemas de mantenimiento en varios casos, como en el de una planta de Du Pont en 1991. En este, a través del uso de modelos como laboratorio de diseño y prueba de diferentes políticas, se pretendió explicar la paradoja presente en esta empresa, en la cual Du Pont gastaba más en mantenimiento y obtenía menos en términos de disponibilidad y confiabilidad de los equipos (Sterman, 2000). En la Figura 40 puede observarse el primer resultado que obtuvo el equipo de modelamiento para entender las interrelaciones, los bucles de retroalimentación, etc., del sistema de mantenimiento, verificando las diferentes influencias en la acumulación de defectos de equipos[33].

Otro caso es explicado por Jambekar (2000), el cual utiliza los diagramas de bucles o circuitos causales. Estos son parte de las herramientas de la dinámica de sistemas para estructurar la naturaleza de las interrelaciones de los conceptos y variables involucradas en la gestión de operaciones para ofrecer al final información desde una perspectiva de sistemas (Jambekar, 2000).

[33] En las páginas 68 a 79 del libro de Sterman se pueden encontrar más detalles de este ejemplo y de otro utilizado también por la British Petroleum en el segundo lustro de los años noventa, en el cual se lograron ahorros anuales de USD1.5 millones por año y se redujo la polución también; este esfuerzo de mejora tomó 2 semanas y un costo de USD5,000, lo que representó un retorno de la inversión de más de 30,000 % al año (Sterman, 2000, págs. 68-79).

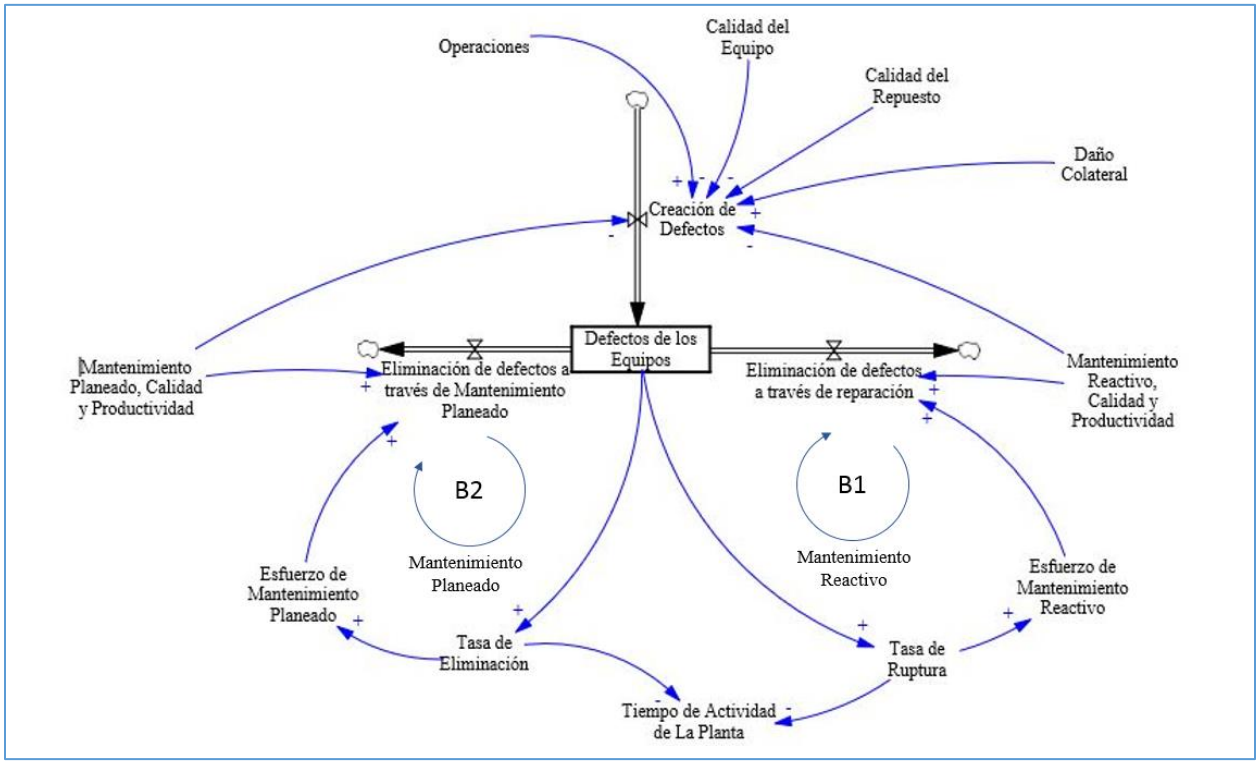

Figura 41. Creación y eliminación de defectos.

Fuente: (Sterman, 2000, pág. 68)

Este investigador plantea también que, a pesar de que el mantenimiento siempre ha sido reconocido como una actividad esencial en cualquier empresa de fabricación, en el presente se ha convertido en una función de negocios crítica capaz de influenciar los estados de resultados de una organización (Jambekar, 2000). Concluye que la tecnología de bucles causales facilita la identificación de ciclos viciosos persistentes, que pueden ser usados como punto de partida para desarrollar políticas a nivel operacional, procedimientos y diseño de infraestructuras que faciliten el mejoramiento continuo; además de construir modelos de dinámica de sistemas específicos y del dominio de organizaciones de manera particular. Estos modelos podrían permitir que los actores en la solución del problema, como gerentes de operaciones, gerentes de mantenimiento y otros actores relevantes, puedan compartir su entendimiento de la forma en que sus acciones contribuyen a influenciar la dinámica del sistema completo (Jambekar, 2000).

Un último caso de la forma en que se puede utilizar la dinámica de sistemas en las operaciones de mantenimiento es planteada por Thun (2004), el cual utiliza los modelos de Forrester para analizar la dinámica del mantenimiento y encontrar la forma en que se puede implementar de

forma exitosa el concepto de mantenimiento productivo total[34] (Thun, 2004). Este autor se fundamenta en la estructura del modelo de mantenimiento presentado en la Figura 41, para extenderlo al modelo que plantea para el mantenimiento productivo total, el cual se puede observar en la Figura 42.

3.4.5 Dinámica de sistemas y operaciones de mantenimiento en flotas vehiculares

En el Journal *System Dynamics Review* de julio a septiembre de 2010, Sheperd y Emberger, en la introducción de una serie de artículos en los cuales se aplica la dinámica de sistemas al análisis de problemas o situaciones determinadas en el sector del transporte, plantean la siguiente aseveración pertinente para reforzar el enfoque de este trabajo:

> Los sistemas de transporte son complejos, involucrando muchos y diferentes agentes y partes interesadas; hay muchos y diferentes procesos de retroalimentación involucrados, con diferentes tiempos de retraso entre las respuestas y los usuarios, desarrolladores, operadores y responsables de las políticas. Los modelos de Dinámica de Sistemas no solo ofrecen una perspectiva diferente, con una completa aproximación sistémica a la planeación del transporte, sino que también demuestran a los responsables de las políticas, la importancia de estos procesos de retroalimentación y respuestas retrasadas. Las plataformas de la dinámica de sistemas también ofrecen herramientas especializadas que ayudan al entendimiento de todos los sistemas subyacentes, la calibración de modelos, optimización de políticas y facilidad de uso a través de simuladores de vuelo. (Shepherd y Emberger, 2010, pág. 2)

[34] El objetivo general del mantenimiento productivo total es elevar la eficacia general de los equipos. La eficacia general del equipo es calculada a través de la multiplicación de la disponibilidad del equipo, la eficiencia de desempeño del proceso y la tasa de productos de calidad. Esta medida puede ser usada como un indicador de la confianza del sistema de producción (Thun, 2004, págs. 2,3).

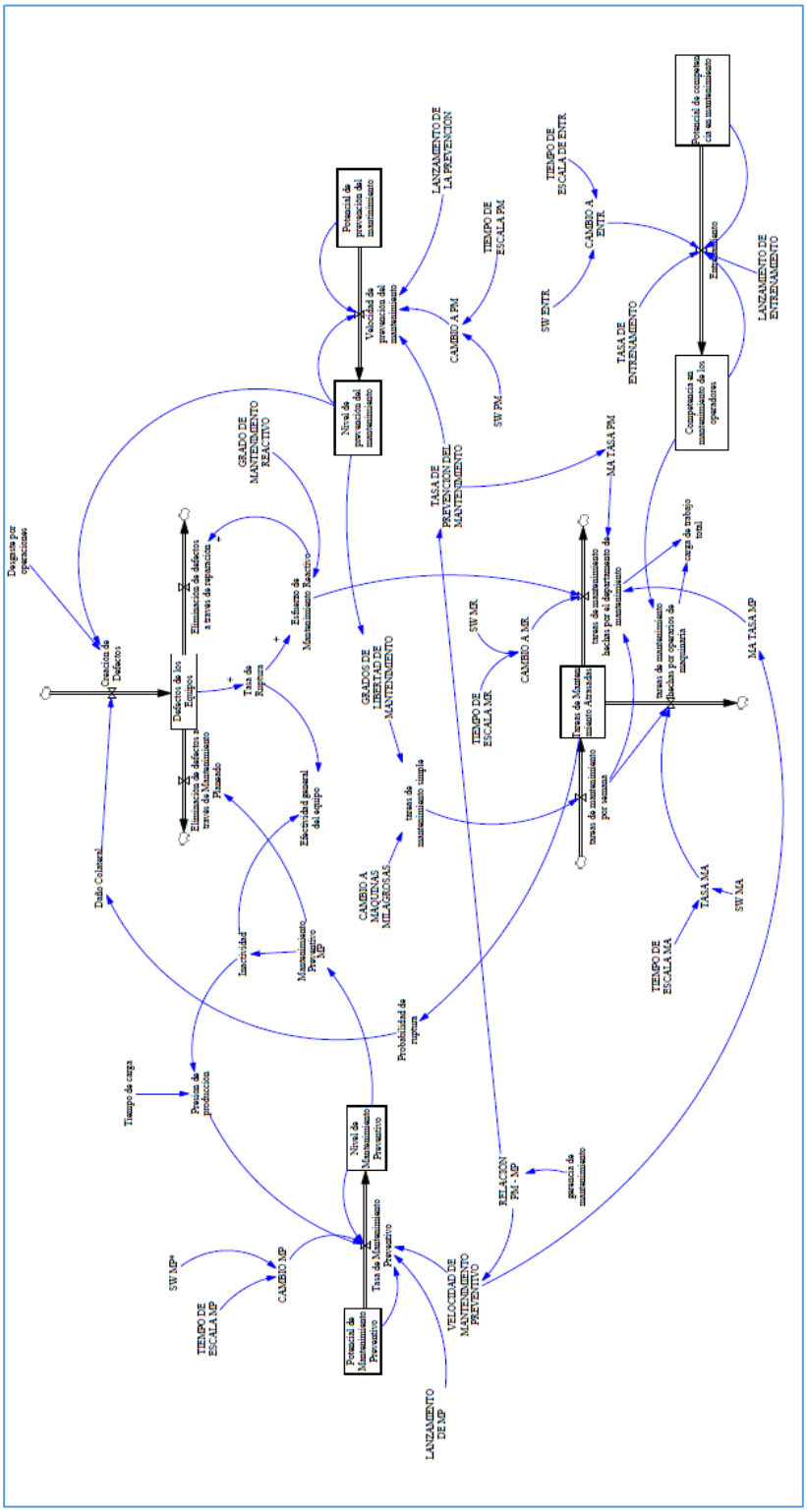

Figura 42. Modelo de mantenimiento total productivo

Fuente: Thun (2004, pág. 7)

Se encuentran también algunas aplicaciones de la dinámica de sistemas para el estudio de los sistemas de mantenimiento en general en Sterman (2000) y también en un artículo de Crespo y Usano (1994), en otros artículos.

Por su parte, Bivona y Montemaggiore (2005) aplican los modelos de dinámica de sistemas al diseño del proceso de la estrategia de mantenimiento para compañías de buses en ciudades. Realizaron una serie de entrevistas a gerentes de mantenimiento en dos flotas que les permitieron entender y analizar en detalle las relaciones causa y efecto entre las variables claves del sistema de mantenimiento y las interacciones con otros subsectores de la compañía. Desarrollaron diagramas causales de retroalimentación, los cuales fueron compartidos con los gerentes de mantenimiento y, al final, los tradujeron a un modelo de simulación de dinámica de sistemas, capturando la información relevante entregada por los gerentes y simulando así los efectos de diferentes alternativas de estrategias de mantenimiento. En la Figura 43 se reproduce el diagrama causal de retroalimentación generado por estos autores, en el cual se pueden encontrar variables como: costos de mantenimiento de la flota, ingresos, frecuencia de servicio, disponibilidad del bus, corrección de costos, reparaciones atrasadas, costos financieros, ingresos netos, deudas, tasa de fallas, etc.

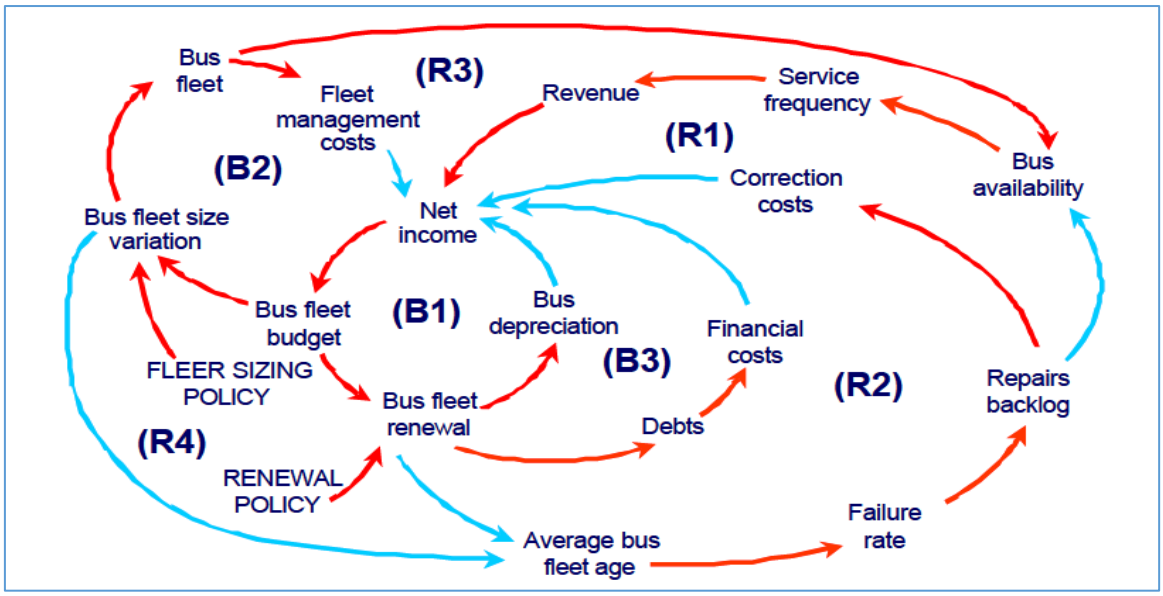

Figura 43. Diagrama de retroalimentación causal para la gestión de activos (flota de buses)

Fuente: (Bivona & Montemaggiore, 2005, pág. 12).

3.4.6 Dinámica de sistemas y renovación de camiones

La aplicación de la dinámica de sistemas, como herramienta de simulación de sistemas complejos dentro de las ciencias de la complejidad aplicada a la renovación de camiones, pareciera no existir en Colombia, basado en la revisión de la literatura realizada por el autor. Por lo que el modelo que se dejará como sugerido en este documento para futuras investigaciones, se basa en aplicar dicha herramienta para mantenimiento y renovación de activos en general y otros vehiculares como los buses. La operación de mantenimiento de buses y de flotas de buses en ciudades, explorado por Bivona y Montemaggiore (2005) y (2010), y el reemplazo de activos, estudiado por Mardin y Arai (2011), pueden extenderse en sus principios básicos al mantenimiento y renovación de camiones. Estos últimos, en la práctica, tienen una aplicación que se complejiza más que la de los buses, en tanto que tienen desplazamientos mucho más largos, pues sus zonas de operación en algunos casos alcanzan todo el territorio nacional.

En los estudios de Bivona y Montemaggiore (2005; 2010) se aborda el mantenimiento de flotas de buses, en los cuales la renovación de la flota forma parte de la estructura general de mantenimiento, es decir no se analiza como una perspectiva central de análisis del sistema.

Asimismo, Mardin y Arai (2011) abordan la renovación de activos desde una perspectiva de cambios tecnológicos, en los nuevos equipos que reemplazarán los antiguos u obsoletos. Para esto, utilizan conceptos, como los costos de operación y mantenimiento y costos de capital, y métodos de cálculo famosos para el clásico problema de reemplazo, como el método de la vida económica (VL) [35] y el método del retador-defensor (RD)[36]. Todo esto lo plantean dentro de un modelo de dinámica de sistemas, en el cual, a través de uno de los *softwares* existentes para modelamiento llamado Stella, analizan cuatro variaciones del problema de reemplazo. Estas son: problema de reemplazo sin política de reacondicionamiento y sin cambio tecnológico, con política de reacondicionamiento y sin cambio tecnológico, sin reacondicionamiento y con cambio tecnológico, finalmente, con reacondicionamiento y con cambio tecnológico. En la Tabla 15 se pueden ver las variaciones de forma más comprensible.

[35] El método de la vida económica (VL) solamente tiene en cuenta los costos asociados con el activo que se está analizando, sin considerar los costos asociados a la unidad nueva que eventualmente lo reemplazará (Mardin y Arai, 2011, pág. 2).

[36] El método del retador-defensor (RD) tiene en cuenta también los costos asociados al activo nuevo (retador) que vendría a reemplazar el que está funcionando actualmente (defensor) (Mardin y Arai, 2011, pág. 3).

Se sugiere que para futuras investigaciones se tengan en consideración estas cuatro variaciones del problema de reemplazo con el fin de verificar los resultados del modelo planteado por Mardin y Arai (2011) en compañías colombianas.

Tabla 15. *Cuatro variaciones del problema de reemplazo*

Variación del problema de reemplazo	**Política de Reacondicionamiento**	**Cambio tecnológico**
Caso 1	No	No
Caso 2	Si	No
Caso 3	No	Si
Caso 4	Si	Si

Fuente: elaboración propia a partir de (Mardin & Arai, 2011, pág. 11)

4 Variables consideradas para el desarrollo de un modelo administrativo para la renovación de flotas

En la Tabla 14 se listan las variables propuestas para que sean tenidas en consideración en un modelo administrativo para la renovación vehicular. Estas variables se pueden clasificar en internas y externas dependiendo de si afectan el desempeño de la empresa y las que afectan al entorno y a la sociedad en su conjunto. Adicionalmente se clasifican en aquellas que son fundamentales y que se utilizarían en un modelo de primera fase que permita la adecuación cultural de los dueños de camiones y flotas a llevar un control estricto de sus costos de adquisición, mantenimiento, operación, depreciación y venta o disposición final del camión.

Estas variables que se utilizarían en un modelo nuclear se encuentran presentes en la mayoría de modelos usados en la industria de acuerdo a la revisión de literatura realizada por el autor, algunos de los cuales se han mencionado a través de este documento en varias partes y que se especifican en este punto para mayor claridad; algunos de esto modelos según Mora (2012) son: Lyfe Cicle Cost Analysis (LCCA), Modelo con Descenso de la Tasa de Utilización con la Edad, Modelo de Regresión de Costes, Costes Totales Descontados, Coste Anual Equivalente (EAC por sus siglas en inglés, Equivalent Annual Cost), Comparación con Coste Anual, Reposición de Activos, Modelos Exhaustivos de Minimización de Costes, Métodos de Reposición por Ordenación, Green Fleet Replacement (este incluiría las variables externas “huella de carbono” y “medio ambiente”), Método de Margen de Utilidad como Criterio de Ordenación y Total Cost of Ownership (TCO) con Pérdidas por Inmovilización Técnica (este incluiría la variable “Tiempo muerto”) (Mora, 2012, págs. 77-113).

Adicionalmente, al encontrarse en los modelos referenciados, estas variables también fueron detectadas a través del proceso de revisión de los documentos publicados por el Ministerio de Transporte (2007) y DNP (2013) además de que su uso frecuente ha sido evidenciado empíricamente por el autor de esta tesis, a través de dieciocho años de experiencia laboral en relación con compañías del sector del transporte en Colombia.

Las variables serán conceptualizadas en este capítulo y al final de cada definición, también se hará una breve descripción de su comportamiento en función del tiempo; esto para que en futuras investigaciones sea corroborado en el campo a través de otros expertos en el sector, diferentes al autor de esta tesis, además de comprobar con experimentación directa en empresas de diferentes tamaños que pudiesen estar dispuestas a permitir la recolección de información

Tabla 16. *Variables consideradas y que podrían usarse en el desarrollo de un modelo administrativo de flotas basado en la dinámica de sistemas*

Tipo	Variables	Modelo en que se usarán
Interna	Costos de adquisición y financiamiento	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Depreciación	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Costos de operación	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Costos de mantenimiento	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Costos de inventario	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Envejecimiento y obsolescencia	Dinámica de Sistemas
Interna	Tiempo muerto	Dinámica de Sistemas
Interna	Costo psicológico	Dinámica de Sistemas
Interna	Lucro cesante	Dinámica de Sistemas
Interna	Salud ocupacional	Dinámica de Sistemas
Interna	Ergonomía	Dinámica de Sistemas
Externa	Medio ambiente	Dinámica de Sistemas
Externa	Congestión en los principales corredores de carga	Dinámica de Sistemas
Externa	Accidentalidad	Dinámica de Sistemas
Externa	Huella de carbono	Dinámica de Sistemas
Externa	Rutas geográficas	Dinámica de Sistemas
Externa	Varadas	Dinámica de Sistemas

Fuente: elaboración propia

A continuación, se realiza la conceptualización de las variables que deberían considerarse dentro de un modelo de administración de flotas, utilizando la dinámica de sistemas como herramienta de modelamiento. Entendiendo conceptualmente estas variables se pueden establecer las interacciones que pueden tener unas con otras y su comportamiento a través del tiempo con el fin de detectar el punto en el cual un vehículo determinado debe renovarse.

En el Capítulo 6 se plantea lo que el autor ha denominado modelo nuclear, ya que este servirá finalmente para cuantificar las variables básicas y proceder a validarlas numéricamente en investigaciones futuras. Posteriormente las variables adicionales (internas y externas) que no se hayan considerado para el modelo nuclear podrán irse incorporando a uno mucho más completo bajo la metodología de la dinámica de sistemas.

Estas variables que se conceptualizaron podrían ser suficientes en las primeras fases de implementación del modelo nuclear y luego los subsiguientes modelos para la renovación vehicular, fundamentados en dinámica de sistemas como herramienta de simulación; lo anterior

basados en los artículos de modelos revisados por el autor, los documentos del Ministerio de Transporte y la experiencia del autor en el sector del transporte.

4.1 Costos de adquisición y financiamiento

Los costos de adquisición y financiamiento de un camión inciden en la primera etapa de la operación del servicio de transporte. Es común que estos sean asumidos por los propietarios o empresarios dedicados a prestar el servicio de transporte. Lo normal es que los vehículos se compren a través de diversas modalidades de pago: con recursos propios, a través de créditos de libre inversión, figuras financieras como el *leasing*, el *leasing* operativo y el *renting*. Cada una de esas modalidades tiene unas características y unos costos asociados a la financiación.
Esta variable tiene dos componentes, el costo inicial del activo y su financiación. El costo inicial es un valor fijo si se paga de contado. Sin embargo si se paga con financiación su comportamiento puede ser constante, decreciente o incremental, dependiendo de la forma definida de amortización de la deuda. Este comportamiento tiene un horizonte definido de tiempo que suele ser desde tres hasta siete años en el medio financiero colombiano.

4.2 Depreciación – Valor residual o de recuperación

Cuando un vehículo usado se vende se recupera parte de la inversión inicial en su adquisición. Este monto recuperado se conoce como “valor residual o de recuperación”. En el mercado de vehículos usados la depreciación no es homogénea en función del tiempo. En general se tiene un mayor valor de la depreciación los primeros años que va decreciendo a medida que pasa el tiempo hasta convertirse prácticamente en una asíntota. La depreciación operativa tiene una variación de 12 a 17 % anual, aunque en algunos casos podría llegar a ser del 30 % dependiendo del tipo de trabajo que se realice con el camión.

Es importante anotar que el valor de recuperación de un camión está determinado por el mercado y es directamente proporcional a la calidad de operación y el servicio de mantenimiento. La depreciación depende del tipo de negocio y de la aplicación específica del vehículo. Un camión tendrá una depreciación mayor, por ejemplo, si este fue adquirido con tasas bancarias elevadas. Por tal razón, es importante tener en cuenta el costo del dinero en el corto y largo plazo, así como el estado general de la economía que pudiese afectar los ingresos del negocio, lo cual podría conducir eventualmente a extender la vida útil de los vehículos en lugar de tomar la decisión de reemplazarlos.

El comportamiento de esta variable en función del tiempo tiende a ser decreciente.

4.3 Costos de operación

Son aquellos que permiten el funcionamiento del camión para prestar el servicio de transporte de carga. Entre estos se encuentran los combustibles, los aceites, las llantas, el pago de los operadores, el pago de los peajes, etc. Estos están en función del kilometraje y la carga a la que sea sometido el vehículo y tiene involucradas variables como la forma de conducir del operador, que puede incidir en un incremento o descenso en los valores de estos rubros. Estas variables incontrolables en vehículos obsoletos tienden a ser más controlables en los vehículos nuevos, puesto que se cuenta con sistemas de telemetría cada vez más avanzados que permiten la detección de formas inadecuadas de operar.

Los costos de operación, en general, tienden a aumentar con el paso del tiempo, debido al incremento del valor de los combustibles, la nómina de los operadores, el valor de los insumos consumibles como llantas, aceites, filtros, etc.; el reemplazo de repuestos y el aseguramiento.

Esta variable tiende a crecer en función del tiempo debido a que a medida que la unidad envejece hay componentes que se desgastan y hacen más ineficiente la operación por lo que se requiere mayor inversión en la misma.

4.4 Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento son aquellos asociados al desgaste natural, por mal manejo o por accidentes de la máquina. Estos tienden a ser crecientes a medida que el equipo va operando y su comportamiento depende de la edad, el manejo del operador y las condiciones geográficas y topográficas por las cuales el vehículo tiene que desplazarse.

El mantenimiento de un camión tiende a aumentar con el uso y el kilometraje recorrido y es uno de los factores más importante en el análisis del costo del ciclo total de vida de un vehículo (Weissmann, Weissmann, y Gona, 2003; Wyrick y Erquicia, 2008; Kim, Porter, Kriett, Mbugua, y Wagner, 2009). Es importante mencionar en este punto que si se establece un plan de mantenimiento preventivo en el cual se hagan cambios de componentes menores (filtros, secadores, etc.) antes de que estos se dañen y ocasionen reparaciones inesperadas que aumenten los tiempos muertos o fuera de operación además de extender la vida de los componentes mayores (motores, transmisión, suspensión, ejes, etc.) se puede lograr que el

reemplazo de los camiones se pueda extender en el tiempo. Así pues, se requiere un seguimiento estricto al mantenimiento para poder tener una información confiable de su costo.

Es fundamental que los costos ocasionados por cambios que ayuden a la prolongación de la vida útil del camión sean aplicados durante todo su periodo de utilización y no en un solo año. En las siguientes figuras (39 y 40) se puede evidenciar el comportamiento del mantenimiento tomado de dos fuentes diferentes, pero ambos fundamentados en el costo equivalente anual uniforme (CEAU)[37].

Esta variable tiene un comportamiento creciente en función del tiempo, debido al desgaste natural de piezas por el uso en la operación.

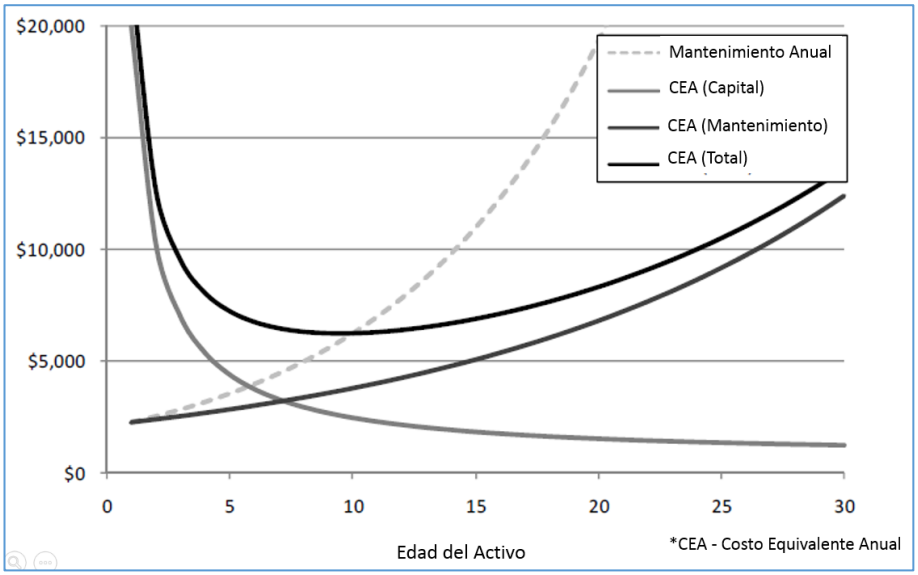

Figura 44. Modelo básico de reemplazo

Fuente: (Kim, Porter, Kriett, Mbugua & Wagner, 2009, pág. 40)

[37] El concepto de costo anualizado se encuentra ampliamente estudiado en la ingeniería económica (Dhillon, 1989; Weissmann, Weissmann, y Gona, 2003).

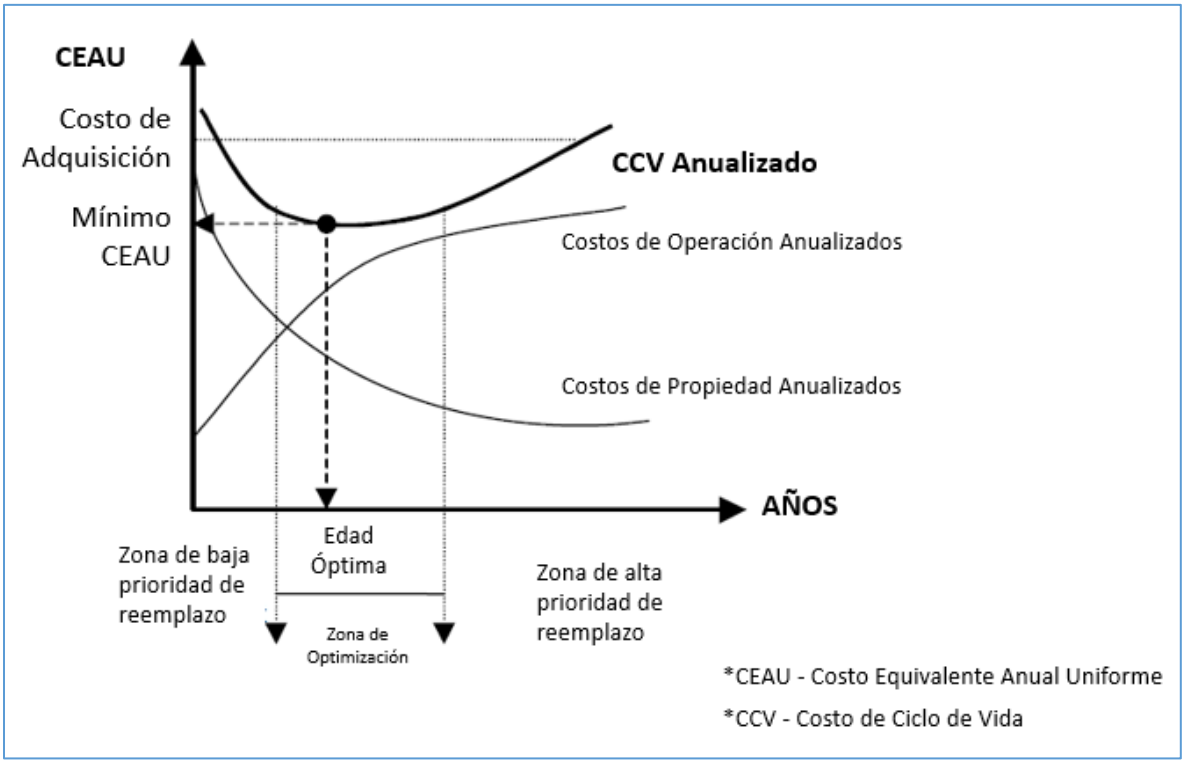

Figura 45. Modelo de costo equivalente anual uniforme

Fuente: (Weissmann, Weissmann & Gona, 2003, pág. 78)

4.5 Tiempo muerto (tiempo unidad inmovilizada)

El tiempo muerto en una operación de transporte de carga se refiere al periodo en el que una unidad vehicular no se encuentra disponible para realizar su recorrido ya sea por fallas mecánicas, varadas en carretera, accidentes, infracciones de tránsito, etc. La medición de estos tiempos, en especial los correspondiente a varadas, accidentes e infracciones de tránsito, en una operación práctica es de muy difícil determinación, pero se debe hacer un esfuerzo por cuantificarlos para que puedan ser incluidos como factores que ayuden a ser más exactos en la determinación de reemplazo de una unidad.

Con relación a los tiempos muertos por reparaciones en talleres existen dos conceptos en mantenimiento llamados disponibilidad e indisponibilidad (Calvo & Sierra, 2017). Estos podrían usarse también para las otras clases de inmovilización. Su representación matemática sería la siguiente:

Disponibilidad(A): D =Tfc / (Tfc + Tm)

En donde:

Tfc: Tiempo de funcionamiento correcto

Tm: Tiempo en el servicio de mantenimiento o en espera de mantenimiento (fuera de producción o del rango pactado).

El valor complementario, indisponibilidad será: I = 1-D

Indisponibilidad (1 - A) = Tm / (Tfc + Tm)

Esta variable tiende a crecer con el tiempo debido a que a mayor antigüedad se van a requerir mayores tiempos de mantenimiento y reparaciones mayores como motor, transmisión, etc.

4.6 Envejecimiento u obsolescencia

El concepto de obsolescencia se refiere a la caída en desuso o bajo rendimiento comparativo con relación a vehículos más modernos, con mejores tecnologías y más eficientes; por ejemplo, en motores menos pesados, con menor consumo de aceite y combustible al tiempo que poseen una mayor capacidad de potencia y torque que hacen que su rendimiento sea superior a modelos más antiguos. Lo anterior redunda en ahorros en costos de operación que pueden hacer una operación más rentable con vehículos de última generación que con vehículos más antiguos.
Esta variable tiene un comportamiento principalmente creciente aunque con períodos de comportamiento contrario, debido a fenómenos en los cuales se realizan cambios de componentes mayores que permiten alargar la vida de las unidades

4.7 Costos de inventario

Si los repuestos e insumos necesarios para llevar a cabo reparaciones en los camiones se administran de forma eficiente, esta variable incidirá relativamente poco en el cálculo del ciclo de vida de una unidad vehicular.

Esta variable tiene un comportamiento creciente debido a la mayor necesidad de partes para enfrentar el deterioro normal por uso de los componentes de un camión.

4.8 Costo psicológico

El costo psicológico de la renovación del parque automotor se puede analizar desde varias perspectivas. Una es la sensación de pérdida o duelo por parte del propietario, al tener que cambiar un vehículo con el cual ha generado ingresos y experiencias laborales por una cantidad determinada de años; otra desde la perspectiva psicológica, teniendo en consideración el ataque en esta área que puede sufrir el propietario al ser llevado a una sensación, que puede ser objetiva o subjetiva, de que su vehículo efectivamente está obsoleto en cuanto a niveles de consumos de combustible, ergonomía, seguridad, medio ambiente y otros.

En la revisión de bases de datos indexadas no se encuentran referencias claras a la primera perspectiva planteada y con relación a la segunda se hace referencia tan solo al uso de la obsolescencia psicológica programada. Esta última está más focalizada al sector de consumo automotriz masivo, que no es el caso de los vehículos de carga, que se pueden considerar vehículos de aplicación industrial y que tienen connotaciones diferentes a los primeros (Granberg, 1997).

Para esta variable la determinación de su comportamiento no pareciera claro. El autor de este trabajo plantea, solo como hipótesis, que a medida que pasa el tiempo podría ser mayor la dependencia psicológica del camión, esto ocurriría sobre todo en pequeños propietarios debido a que se genera una relación afectiva entre el medio de subsistencia y quienes subsisten a través de él. Esta variable valdría la pena que fuese medida a través de herramientas como encuestas para determinar su comportamiento más cercano a la realidad.

4.9 Lucro cesante

El lucro cesante se define como “la ganancia o provecho que deja de reportarse a consecuencia de no haberse cumplido la obligación, o cumplido imperfectamente, o retardado su cumplimiento” (Código Civil Colombiano, 2006, pág. 382).

De acuerdo con la anterior definición legal, para el caso de este estudio se asumirá como válida dicha definición, pero desde una perspectiva que permita establecer dentro de la empresa las ganancias que se hayan dejado de percibir por los eventos atribuibles a la antigüedad de un parque automotor determinado, tales como reparaciones continuas, tiempo perdido por varadas en las vías a causa de daños de los vehículos, accidentes que pudiesen ocasionarse por fallas

mecánicas, etc., y que hayan impedido que se llevara a buen término el transporte de una carga determinada[38].

Esta variable tiende a ser creciente debido a que tiene que pasar un mayor tiempo la unidad en operaciones de mantenimiento y reparación. Esto lleva a un menor período de la unidad en operaciones de transporte efectivo.

4.10 Ergonomía y salud ocupacional

La ergonomía es un campo de estudio que nació en 1857, debido a que sus primeras formalizaciones datan de dicho año, a partir de la obra del polaco W. Jastrzebowski. Desde esa época se han presentado una serie de desarrollos en este campo en países como Estados Unidos, Inglaterra, Japón, la extinta Unión Soviética y Canadá (Zamalloa, 2013).

En ese sentido, la definición que da la *International Ergonomics Association* (*IEA)* sobre ergonomía es la siguiente:

> La ergonomía (factores humanos) es la disciplina científica que se preocupa del entendimiento de la interacción entre los humanos y otros elementos de un sistema, y también es la profesión que aplica teoría, principios, información y métodos para el diseño, con el fin de optimizar el bienestar humano y el desempeño general del sistema.
>
> Los practicantes de la ergonomía y ergonomistas contribuyen al diseño y evaluación de tareas, trabajos, productos, ambientes y sistemas para hacerlos compatibles con las necesidades, habilidades y limitaciones de la gente. (International Ergonomics Association, 2018, pág. 1)

[38] Reconocimiento del lucro cesante. El lucro cesante es el valor que recibe el sujeto afectado por el daño o destrucción de un bien, a razón de los recursos que dejó de recibir como consecuencia del daño causado. Si por ejemplo el vehículo implicado en el accidente al que nos hemos referido era un taxi que producía $2.000.000 mensuales y a causa del accidente estuvo 1 año sin generar recursos, lo más probable es que el juez ordene la realización de un pago de al menos $24.000.000 al afectado, que corresponden al dinero que este dejó de recibir por no poder hacer uso del activo implicado. En ese momento, cuando efectivamente se reciben los $24.000.000, se reconoce un ingreso por lucro cesante que no corresponde a un ingreso ordinario porque el objeto de la entidad o persona natural afectada no es accidentar vehículos para recibir dinero. Esa indemnización se convierte en una ganancia en el estado de resultados. (Actualícese.com, 2018, párr. 7).

Figura 46. Ergonomía. Diseño centrado en el humano

Fuente: (International Ergonomics Association, 2018, pág. 1)

La ergonomía en la industria del transporte de carga por carretera tiene los siguientes actores humanos: los conductores, los mecánicos y los estibadores. De estos tres actores, el foco habría de ser en el conductor, dado que es quien más tiempo de interacción tiene con la máquina que opera. De acuerdo con la Organización Mundial de La Salud: “La Salud Ocupacional se ocupa de todos aquellos aspectos que tienen que ver con la salud y la seguridad en el lugar de trabajo y tiene una fuerte focalización en la prevención primaria de peligros” (World Health Organization, 2018, pág. 1). Según esta misma organización, solo entre el 5% y el 10% de los trabajadores en los países en desarrollo y entre el 20% y el 50% en países industrializados tienen acceso a servicios adecuados de salud ocupacional. Aunado a ello, resulta inadecuada la promoción de la salud y la seguridad de los trabajadores en su lugar de trabajo (World Health Organization, 2018).

Vale destacar que en Colombia los estudios en cuanto a ergonomía y salud ocupacional en el sector del transporte de carga son recientes. Uno de estos fue realizado en el 2004 como una tesis del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Javeriana, el cual forma parte de una investigación más ambiciosa desarrollada por Colciencias y el Centro de Ergonomía de esta universidad que tenía como objetivo fundamental: “Evaluar el impacto de la intervención ergonómica en el comportamiento de los factores de riesgo en la población trabajadora de transporte de carga y pasajeros” (Sanchez & Forero, 2004, pág. 131).

Dicha tesis fundamentó su trabajo en el estudio de cuatro variables que inciden en la salud ocupacional de los conductores de carga, a saber: temperatura, gases, ruido, vibración y lugar de trabajo; así como en el planteamiento de una solución para mejorar la incidencia negativa de

tales variables en la salud de los conductores. No obstante, a pesar de que el estudio llevó a cabo un análisis estadístico riguroso de la muestra escogida, no incluyó una correlación profunda con la edad del parque automotor. Es bien sabido que los sistemas ergonómicos de los vehículos de reciente manufactura han involucrado aspectos que ayudan a mejorar las variables, lo que las ha hecho de mejor aceptación para los conductores e incidir de forma directa en su salud ocupacional.[39]

De esa manera, se establece que el comportamiento de la variable de ergonomía y salud ocupacional tiene una correlación positiva, si se utilizan los nuevos desarrollos en esta área, con la edad del parque automotor. Los vehículos nuevos tienen un mayor aislamiento térmico, a los gases, al ruido; una mejor amortiguación y un ambiente en la cabina mucho más confortable que la mayoría de los vehículos antiguos.

Por otro lado, en uno de los estudios de mayor envergadura realizados en Estados Unidos, en el cual se estudió la exposición de los conductores a las partículas de combustión del Diesel en la industria de camiones, se pudo determinar que, en efecto, entre mayor es la edad del vehículo existe una mayor exposición al carbón elemental (CE). Lo anterior se atribuye a la falla en los sellos de caucho a causa del envejecimiento de la unidad y a la consecuente filtración dentro de la cabina de los gases de combustión. Este efecto se puede evidenciar en la tabla gráfica tomada de los resultados del estudio (Davis, 2013, pág. 853); dicho comportamiento puede evidenciarse en la Figura 47.

Así pues, el comportamiento matemático de esta variable se podría resumir de la siguiente forma: entre más nuevo sea el vehículo, mejores características ergonómicas y de salud ocupacional reportará al usuario. Este comportamiento positivo en las variables ergonómicas y de salud ocupacional incide positivamente en el desempeño del trabajador y en la rentabilidad de la empresa, de modo que minimiza ausencias por enfermedades laborales.

[39] Esta afirmación se hace fundamentada en la experiencia del autor de más de veinte años en el sector del transporte, dentro de los cuales ocho años en el mercado de camiones pesados en Colombia y Latinoamérica. El autor, actualmente labora en una compañía multinacional fabricante de camiones de carga pesada y es el encargado de configurar las especificaciones de los vehículos en todos sus aspectos técnicos, entre ellos, los ergonómicos. Para mayor referencia pueden encontrarse múltiples páginas en internet y catálogos comerciales de fácil acceso, de todos los fabricantes de camiones a nivel global (Ej. International, Freightliner, Kenworth, Mack, Volvo, Iveco, DAF, Mercedes Benz, Volkswagen, Scania, etc.) en el cual se resaltan de manera importante las mejoras en ergonomía y bienestar del conductor para garantizar su productividad.

En general la ergonomía tiende a disminuir a medida que se envejece la unidad debido al deterioro normal de los componentes asociados a la comodidad del operador, como la amortiguación de las sillas, los sellos que aíslan las unidades del ruido y calor del motor, etc.

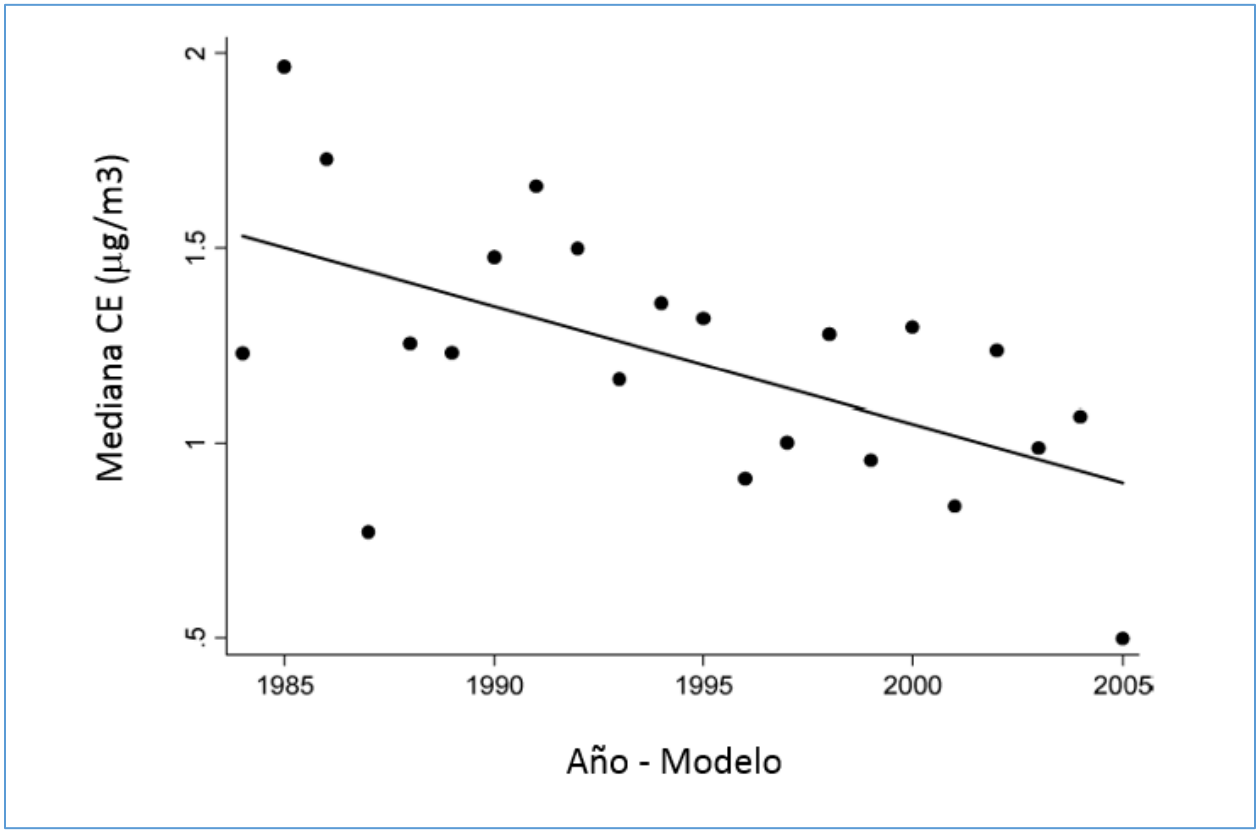

Figura 47. Mediana en aplicación recolección – entrega de carbón elemental (CE) por año modelo del camión

Fuente: (Davis, 2013, pág. 853)

4.11 Externalidades del modo carretero

Según el DNP (2013), entre las principales externalidades a considerar para la justificación de la importancia de la renovación del parque automotor en Colombia se hallan las emisiones de contaminantes atmosféricos, la congestión en los principales corredores de carga y la accidentalidad vial.

4.11.1 Emisiones de contaminantes atmosféricos

Las tecnologías de combustión en motores fabricados hasta finales de los años noventa son menos eficientes y por lo tanto, emiten una mayor cantidad de gases contaminantes al medio ambiente. Las nuevas tecnologías involucran sistemas de control de emisiones que pueden ser por recirculación de gases al motor (EGR)[40] o postratamiento de gases a la salida del escape (SCR)[41] o combinados, cuando el combustible disponible en cada país así lo permite[42]. En ese orden de ideas, el Gobierno colombiano, a través de su normatividad, estableció parámetros que solo permiten el uso de tecnologías que cumplen con la normatividad europea Euro.

Entonces, al renovar el parque automotor no solo se está obteniendo un beneficio económico[43] sino social. Lo anterior debido a que los contaminantes como el material particulado, los NOx y el CO2 son perjudiciales para la salud humana, principalmente para las vías respiratorias y la piel.

Esta variable tiene un comportamiento creciente a medida que la unidad se hace más antigua debido al deterioro normal de los componentes y una menor efectividad en la combustión. Algo importante a resaltar es que a través de los años las compañías fabricantes de camiones han mejorado los sistemas de emisiones para bajarlas a mínimos exigidos por la normatividad de los países.

4.11.2 Congestión en los principales corredores de carga

Esta externalidad se explica claramente en el Conpes 3759, tal como se muestra a continuación:

> Es frecuente que, por un accidente, o un desperfecto mecánico de un camión, sea necesario realizar cierres parciales de calzada o incluso, cerrar la vía durante varias horas. Se trata de una externalidad porque el evento no solo afecta al camión que lo genera, sino a todo el flujo de camiones (y en general, de vehículos) que ve su paso impedido. Estos eventos imponen una serie de costos económicos de magnitudes difíciles de cuantificar. Las constantes interrupciones del flujo vehicular generan impactos sobre el costo de oportunidad

[40] Engine Gas Recirculation (EGR): en este sistema de tratamiento de gases de escape, una parte de estos recircula de nuevo a la cámara de combustión del motor para que se quemen aún más y se cumpla con emisiones determinadas por cada reglamentación ya sea EPA o Euro.
[41] Selective Catalitic Reaction (SCR): es un sistema de tratamiento de gases que inyecta un componente basado en el grupo amonio a la salida de los gases de escape en un reactor catalítico para que, a través de reacciones químicas, catalizadores y temperatura, las emisiones al medio ambiente sean de gases más limpios.
[42] En Colombia el contenido de azufre en el diésel es de menos de 50 ppm, lo que permite que se puedan utilizar tecnologías Euro IV y V o EPA2004.
[43] Si se calcula el valor de venta de los bonos de carbono en el mercado internacional.

> de los vehículos inmovilizados transitoriamente, generan pérdidas de mercancía, incumplimiento de contratos comerciales con las sanciones pecuniarias que esto acarrea y la inconformidad de los actores de la cadena logística por el incumplimiento en las entregas de los bienes, sin contar con los perjuicios causados a otros usuarios de la infraestructura. De acuerdo con información del INVIAS, el 53% de los eventos de congestión originados por cierres totales o parciales en el paso de "La Línea" durante 2006 y 2007[44], se explicaron por accidentes, volcamientos y daños mecánicos, particularmente de camiones. (Departamento Nacional de Planeación, 2013, pág. 15).

Esta variable tiene un comportamiento incremental con relación al tiempo. En relación con la antigüedad de las unidades podría inferirse que a medida que la unidad va envejeciendo tiene mayores riesgos de vararse o desarrollar menores velocidades a las permitidas por las autoridades de tránsito. Lo anterior es evidente sobre todo en unidades que puedan tener más de 35, 40, 45 años o más de vida útil.

4.11.3 Accidentalidad vial

Esta externalidad debe tratarse con cuidado, puesto que no es fácil determinar su comportamiento y las explicaciones de esta, lo cual puede evidenciarse si se analiza la Figura 48. Esta información no está desagregada, aun así, sirve para un análisis preliminar que se podría profundizar en estudios posteriores. Basta por lo pronto anotar que los accidentes cayeron fuertemente de 2004 a 2006, para después volver a incrementar en años posteriores, entre 170 mil y 193 mil accidentes al año, con una tendencia a la baja a partir de 2012. Lo que realmente llama la atención del gráfico analizado es que los muertos en carreteras tienen un comportamiento ascendente desde 2004 hasta 2015, con un leve descenso en la mortalidad entre 2009 y 2011.

Lo anterior podría permitir formular la hipótesis de que una mejora en la edad del parque automotor podría provocar una menor accidentalidad, pero al mismo tiempo por ser vehículos que pueden transitar a una mayor velocidad, el resultado podría ser una mayor mortalidad en cada accidente. Esta hipótesis conllevaría al siguiente postulado: si se pretende que la renovación del parque automotor incida en que baje la mortalidad en accidentes viales, sería necesario que las nuevas tecnologías que se utilicen cuenten en su diseño con los mejores sistemas de seguridad vial disponibles en la industria de fabricación de camiones a nivel mundial.

[44] Ver evaluación Económica del Túnel de la Línea. Estudio contratado por Banco Andino de Fomento - CAF a Económica Consultores en 2008.

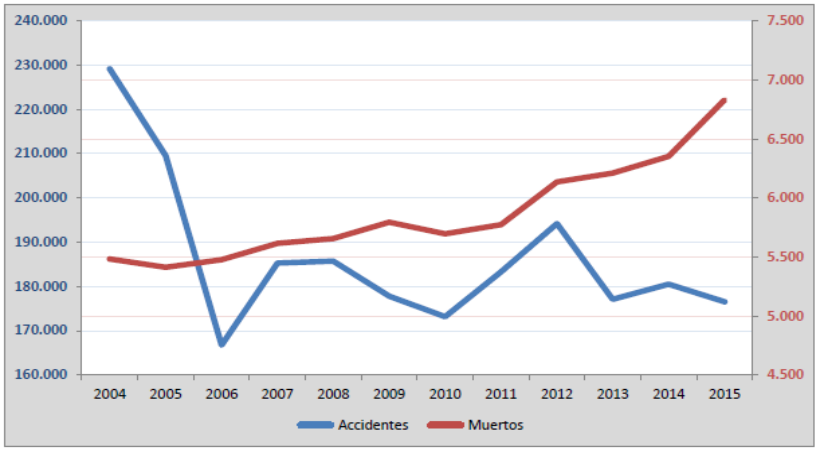

Figura 48. Accidentes y muertes en carreteras

Fuente: (Mintrasporte, 2016, pág. 85)

Esta variable tiende a aumentar con la edad de las unidades debido al deterioro normal por uso de componentes de seguridad como los frenos, las llantas, la dirección, etc. Algo interesante que valdría la pena analizar en detalle en futuras investigaciones es que las unidades más antiguas tienden a desarrollar una menor velocidad por lo que la accidentalidad por esta causa, podría tender a ser mayor en vehículos más modernos que permiten un mayor desempeño en este aspecto.

5 Modelo de renovación de flotas

Para fundamentar el modelo que se realiza en el presente trabajo se anexa una tabla construida por el autor, en la cual se resumen las principales variables de los modelos encontrados para renovación de flotas en Scopus; las ecuaciones de búsqueda y una muestra de los resultados se presentaron al inicio del documento en las Tablas 1 y 2 junto con el texto que justifica cada una. Además, se analizaron en detalle 15 artículos que tienen que ver con el fenómeno de la renovación de equipos. A continuación, se presentan los principales hallazgos:

En la Tabla 2 se presentó un resumen de artículos en los cuales predomina la resolución del problema de la renovación de equipos de transporte, a través de modelos de programación dinámica de manera primordial y también de modelos estocásticos.

Las variables más utilizadas de acuerdo con la revisión de modelos y artículos realizada tanto en la etapa exploratoria como en el desarrollo de la investigación son las que ya se han conceptualizado. Incluso, algunas de las que se conceptualizaron en este trabajo no son consideradas en esos artículos para el planteamiento de los diversos modelos analizados.

En Colombia, de acuerdo con la revisión de la literatura realizada por el autor en la etapa exploratoria, los resultados de la pregunta realizada por Exma (2019, pág. 28) y la experiencia del autor en el sector del transporte de carga pesada por más de 18 años, podría afirmarse que al parecer no existen modelos sencillos y abiertos que permitan a cualquier tipo de transportador de carga saber si debe o no debe renovar su equipo y cuál sería el momento más adecuado para hacerlo. En consecuencia, se plantea la necesidad de establecer un modelo desde sus fundamentos más sencillos para obtener una herramienta de cálculo en Excel o en un lenguaje de programación como *Visual Basic* para su utilización por parte de los transportadores y las empresas.

Por lo tanto, el modelo que se propone en esta tesis, que el autor ha denominado como nuclear, tiene como fundamento básico el comportamiento del costo, la operación y el mantenimiento de cada equipo dentro de la flota. Otras variables por considerar se deberían llevar a un modelo más general en futuras investigaciones y se sugiere que se haga en forma de índices de costo o valores, de acuerdo con su comportamiento, en función del tiempo de la operación de las unidades. Igualmente, se recomienda sea índices llevados al costo o que tengan valores, con el fin de que se puedan interpretar de forma matemática sus variaciones dentro del sistema planteado de renovación de equipos.

De tal modo, a continuación se presenta la propuesta de modelo de renovación de equipos, la cual se establece como modelo nuclear, puesto que deberá servir como una base sobre la cual se pueda establecer un acondicionamiento cultural en la administración de pequeñas, medianas y grandes flotas de transporte en Colombia que utilicen como vehículos aquellos con un Peso Bruto Vehicular mayor a 10.5 toneladas.

Una vez se haga uso de este modelo en futuras investigaciones, durante un tiempo determinado según las particularidades de cada flota, podrá utilizarse como fuente de información para validar las variables económicas en una primera fase, para con posterioridad ir agregando otras variables a un modelo con base en la dinámica de sistemas.

5.1 Modelo nuclear

En general, las políticas de reemplazo de vehículos en una flota se definen en términos de kilometraje recorrido, horas de operación y edad del vehículo, ya sea de forma independiente o en conjunto. Estas políticas a través del tiempo se complementan con la experiencia, el instinto (en cuanto a comportamiento del mercado), los análisis de costos, la emoción y los sentimientos de los propietarios. En los últimos tiempos, otras variables como la huella de carbono, la ergonomía y seguridad industrial pueden llegar a ser consideradas también.

5.1.1 ¿Qué es lo más importante para una empresa de transporte?

Un administrador de una flota de transporte debe responder dos preguntas: ¿Debo mantener funcionando un vehículo a pesar de que sus costos de operación y mantenimiento aumenten en función del tiempo?, o ¿es mejor que la vida del camión sea bien controlada económicamente? Múltiples flotas o dueños de camiones tienden a extender de forma indefinida la vida de sus unidades, dada la falta de conocimiento o seguimiento de los costos operativos.

Entre tanto, algunos empresarios del transporte planean el kilometraje que recorrerán los camiones por mes, programan las paradas para mantenimiento con estimaciones previas en cuanto a costos de repuestos y mano de obra, con lo cual mejoran la disponibilidad y la rentabilidad de los camiones. Aun así, es inevitable que se presenten desviaciones estadísticas por factores difíciles de controlar tales como modificación de rutas e itinerarios; también la variación en la forma de operar los vehículos que pueden ser causadas por la alta rotación de conductores.

Estos empresarios podrían llegar a encontrar los puntos fundamentales del reemplazo de la flota, mediante investigaciones al interior de su empresa, consultas, bitácoras y un seguimiento estadístico apropiado. Las empresas que tienen este modelo son una minoría,[45] puesto que en general los transportadores toman el costo operativo como un gasto irrecuperable, por lo cual con dificultad llevan una contabilidad detallada al respecto. Esta visión debe cambiarse debido a que el seguimiento a los costos operativos (consumo de combustible, llantas, frenos, filtros, etc.) es determinante para encontrar el punto exacto en el que se debe cambiar un vehículo, y para saber la función específica de cada unidad, lo cual impacta de manera directa en la rentabilidad de la empresa transportadora. Además de los costos operativos, en el análisis debe también incluirse la experiencia dentro de la industria y el comportamiento de otras empresas con similar comportamiento.

5.1.2 El reemplazo de equipo

Una programación adecuada para el reemplazo de equipos debería considerar una provisión del capital necesario, a fin de realizar la renovación cada determinado periodo de tiempo, ya sea anual, semestral o trimestral, dependiendo del tamaño de la flota. En muchas ocasiones, esta provisión se ve afectada por las condiciones del mercado, en las cuales se mueve la empresa transportadora debido a que si resultan inadecuadas, por ejemplo en bajos ingresos por el pago de fletes o baja generación de carga, pueden retrasar el cambio. Lo anterior puede ocasionar un envejecimiento de la flota más allá de lo que es rentable en términos económicos y sociales. Por lo tanto, un análisis detallado de los costos de operación y mantenimiento puede facilitar a los gerentes de flota realizar una argumentación a la alta gerencia sobre la inconveniencia de retrasar el reemplazo de equipos que ya hayan llegado a su límite de obsolescencia. La argumentación mejorará si los registros de los costos están disponibles y permiten hacer una proyección para los siguientes años.

Para hacer una comparación adecuada de los incrementos de los costos de mantenimiento de las unidades antiguas y los de las nuevas es necesario establecer una restricción: considerar que la flota es utilizada en su totalidad. Adicionalmente, se considera que para los camiones

[45] Esta afirmación se hace fundamentada en la experiencia del autor de más de veinte años en el sector del transporte, dentro de los cuales ocho años en el mercado de camiones pesados en Colombia y Latinoamérica. El autor, actualmente labora en una compañía multinacional fabricante de camiones de carga pesada y es el encargado de configurar las especificaciones de los vehículos en todos sus aspectos técnicos, entre ellos, los ergonómicos. Se sugiere su corroboración estadísticamente lo cual daría para un estudio del modelo de reemplazo vehicular en Colombia.

nuevos no hay gastos extraordinarios de mantenimiento (mano de obra y repuestos), mientras que en los antiguos sí puede haberlos, más aun si se está considerando dejar unidades que pudiesen estar listas para reemplazo, todavía en funcionamiento dentro de la flota.

Otras dos consideraciones son: en primer lugar, tener en cuenta aquellos camiones que tienen gastos excesivos y que se pueden vender para obtener un capital extra que apoye la renovación; y en segundo lugar, verificar si ajustando la utilización de rutas o aplicaciones marginales se puede reemplazar una cantidad determinada de unidades por una menor, por ejemplo, si para una ruta o un cliente específico se tienen que utilizar cuatro vehículos antiguos y los mismos podrían reemplazarse por solamente dos o tres vehículos nuevos con una mayor disponibilidad. Estas consideraciones contribuyen en el proceso para decidir la renovación vehicular, que debe estar fundamentada en información confiable de los costos de operación y mantenimiento.

Es importante anotar que dentro de la vida de un equipo los costos fluctúan, por lo que su análisis debe ser dinámico, integral y completo. Esto debe hacerse de la manera más rigurosa posible, para evitar que se presenten sesgos al concentrarse en algún costo determinado que influencie de forma errada la decisión de cambio del camión.

En las flotas de transporte se prefiere seguir manteniendo una unidad en funcionamiento, así sus costos de operación y mantenimiento sean altos, porque se considera mejor para el flujo de caja en el corto plazo, al ser más fácil conseguir los recursos de reparación que los de cambio de una unidad completa. Así pues, lo que puede ocurrir en algunas ocasiones es que al ser diluidos en el tiempo los altos costos de mantenimiento y operación, al hacer un análisis riguroso, estos en realidad pueden ser más altos que la consecución del capital para la adquisición de unidades nuevas.

Otros ítems para tener en cuenta en la decisión de renovación vehicular tienen que ver con la obsolescencia de la tecnología involucrada en cada unidad. Esto es más evidente en vehículos, puesto que las nuevas tecnologías tienden a tener motores más eficientes, por poner un ejemplo, en consumo de combustible, así como a ser menos pesados y generar emisiones más limpias que las producidas por tecnologías antiguas. De esa manera, es claro que el reemplazo a tiempo de una unidad es fundamental para la operación ecológica, eficiente y rentable de una flota vehicular.

Por ende, se sugieren, basado en la experiencia empírica del autor en el sector del transporte, considerar adicionalmente las siguientes características como insumos en un modelo completo de renovación vehicular:

1. Posible valor de recuperación de la unidad que se pretende reemplazar (valor de reventa).
2. Disposición del vendedor (concesionario) de la unidad nueva para retomar el equipo viejo como parte de pago.
3. Posibilidad de reemplazo de una cantidad mayor de unidades viejas por una menor cantidad de unidades nuevas.
4. Cantidad de unidades con costos superiores al promedio de la flota actual.
5. Capacidad del taller de mantenimiento de atención de unidades.
6. Cantidad de unidades con posibilidad de repotenciación[46], tiempo y lugar de ejecución de dicha actividad.
7. Tiempo de entrega de las nuevas unidades.
8. Posibilidad de arrendamiento de una unidad y modalidad de este.
9. Opciones y costos de financiamiento disponibles en el mercado.

Ahora bien, dos puntos adicionales a tener en cuenta son: en primer lugar, si cuando se está haciendo la renovación de una unidad, esta involucra una actualización tecnológica, caso en el cual sería una verdadera renovación o si se está solamente cambiando una unidad antigua por una nueva, pero con la misma tecnología, con lo cual la actividad estaría más cercana a un reemplazo; y en segundo lugar, el análisis que se debe realizar de toda la operación incluyendo los clientes actuales y futuros, los terminales y puertos de carga, las condiciones de la carga, los promedios de velocidad en las rutas definidas de operación, las pendientes, las condiciones de las vías, etc. Esto con el propósito de escoger el nuevo equipo que mejor se adapte a estas condiciones.

[46] Repotenciación: concepto que denota la posibilidad de tomar una unidad antigua y cambiar o reparar sus componentes mayores con el fin de ponerla en servicio y así extender su vida útil. “Se entiende por transformación o repotenciación de un vehículo destinado al servicio público de transporte terrestre automotor de carga el cambio y/o reparación de todas o algunas de las siguientes partes: sistemas de frenos, dirección, suspensión, motor, caja de velocidades, transmisión y cabina.” (Transporte, 2002, pág. 1)

5.1.3 Análisis del costo de vida del vehículo

Es importante determinar la vida útil económica del camión, la cual se obtendrá de forma primordial de tres factores principales: costo de mantenimiento, costo de operación y valor de recuperación. Las curvas del comportamiento económico tienen comportamientos diferentes en función del tiempo, mientras algunas tienen un carácter decreciente (ej. Depreciación del activo), otras tienen un carácter creciente (ej. Costos de mantenimiento de la unidad).

Entonces, para que el administrador de la flota pueda determinar el punto exacto de reemplazo de la unidad o de la flota es necesario que se mantenga el control sobre los factores mencionados. En términos generales, esto significa que los costos de mantenimiento y operación deben registrarse de forma exacta y oportuna. Un buen mantenimiento incidirá directamente en el valor de reventa o recuperación que se puede obtener de la unidad una vez se decida su cambio.

Es de mencionar que durante el tiempo de operación de la flota es importante evaluar la productividad, a través de una comparación interna entre prácticas o políticas vigentes y otras que pudiesen ser más eficientes. Estas podrían ser, entre otras: utilizar tecnologías de última generación, vehículos más modernos, cambios en las metodologías de asignación de rutas, carga, etc. Así mismo, es necesario comparar las prácticas comerciales propias con las de los colegas o competidores del sector.

Un ejemplo podría ser la identificación del costo del ciclo de vida con los equipos que pudiesen tener un promedio de vida útil inicial estimado de cinco a seis años[47] y proyectar su renovación a nueve o diez años. Esto significaría, duplicar la vida útil de los vehículos, con lo cual habría que ajustar los costos de mantenimiento, operación y el valor de salvamento a esta nueva realidad cuando el ciclo de vida se aumenta.

5.1.3.1 Fuentes de información para el análisis de ciclo de vida

En un modelo básico de análisis, las empresas cuentan con tres fuentes complementarias de información y datos que pueden alimentar un manejo administrativo de renovación de vehículos: en información contable se pueden obtener datos de capital y costos de operación de los vehículos, los sistemas de información gerencial que contengan la planeación y los programas

[47] En Estados Unidos y países de Europa, el promedio de renovación vehicular está en cinco a siete años.

de mantenimiento con sus costos detallados y el módulo electrónico de control interno de los vehículos, en los que se encuentran los datos de kilometraje, las horas de operación, los consumos de combustible, las temperaturas del motor, las velocidades, etc.

De ese modo, el análisis de la información permitirá encontrar el periodo de reemplazo de un vehículo antes de que se deba incurrir en gastos importantes a amortizar en un período más largo. Por ejemplo, si los costos de un camión están por encima del promedio de costos, este tendrá que ser reemplazado en la flota. Si se generaliza el análisis es posible encontrar una política para el reemplazo más económico de un vehículo o una determinada cantidad de estos.

5.1.4 Determinación del momento de reemplazo

De acuerdo con el núcleo del modelo general establecido hasta el momento, el punto de reemplazo ideal es aquel que tiene como resultado el menor costo promedio anual, es decir, la sumatoria de todos los costos divididos por el tiempo medido en años. En la Figura 49 se puede ver el comportamiento con relación al tiempo de los diferentes costos del núcleo central del modelo.

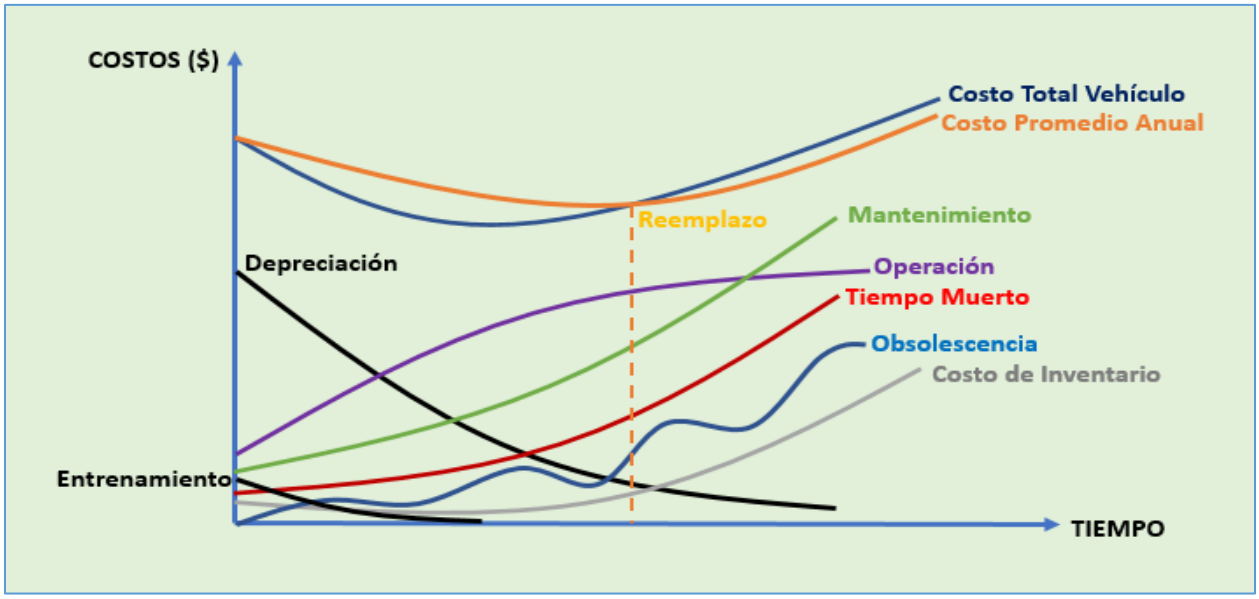

Figura 49. Relación entre todos los costos y el momento de reemplazo apropiado

Fuente: elaboración propia

Matemáticamente, el costo promedio anual se puede expresar de la siguiente forma:

$$CPA = \frac{DA + MA + COA + CTCA + CEA + CIA}{t}$$

En la que:

CPA = Costo promedio anual

DA= Depreciación acumulada

MA = Mantenimiento acumulado

COA=Costo de operación acumulada

CTCA = Costo de tiempos muertos o no productivos

CEA = Costo por obsolescencia o envejecimiento acumulados

CIA = Costo de inventario acumulado

t = Periodo en años

Según este modelo, el punto óptimo de reemplazo será aquel en el cual el costo total anual supere el costo promedio anual. Como una forma de hacer entendible con facilidad el modelo, se presenta un sencillo desarrollo matemático, teniendo en consideración solamente el costo de mantenimiento (CM) y el costo de depreciación (CD) que puede ampliarse a todos los costos contemplados en esta parte del modelo con posterioridad, así como ampliarse a la cantidad de vehículos que pueda tener una flota desde 1 unidad hasta n unidades.

Entonces, se plantea que la resolución de estas múltiples ecuaciones se podrá hacer a través de diversos métodos matemáticos de resolución de ecuaciones diferenciales que permiten encontrar la solución a este sistema.

Si se tiene que el costo promedio anual (CPA) es:

$$CPA = \frac{CT1 + CT2 + \ldots + CTn}{t} = 1/t \sum_{l=1}^{l=t} CTn = 1/t \int_1^t CT\, dt$$

Dado que CT (costo total) es igual al CM (costo de mantenimiento acumulado) más CD (costo de depreciación acumulado).

CT = CM + CD

Reemplazando se tiene:

$$1/t \int_1^t CT\, dt = 1/t \int_1^t (CM+CD)\, dt$$

De lo cual

$$1/t \int_1^t CT\, dt = 1/t \int_1^t CM\, dt + 1/t \int_1^t CD\, dt$$

Partiendo de la premisa de que el punto óptimo de reemplazo se da cuando el C.P.A. (costo promedio anual) es mínimo y que la curva de costo de promedio anual solo tiene un punto mínimo, se puede derivar la ecuación de CPA igualándola a cero para determinar ese punto mínimo. La anterior fórmula matemática es el fundamento de un modelo que se puede alimentar con los costos relacionados más las variables consideradas en el Capítulo 5, llevadas a un modelo complementario de costos económicos.

5.2 Modelo basado en dinámica de sistemas para la renovación de camiones

Una vez establecido el modelo nuclear que servirá como fundamento para obtener la información numérica necesaria para dar robustez al modelo general, se procede a establecer el modelo mental y de interacciones de retroalimentación a través del tiempo, utilizando el *software* de modelamiento llamado Vensim en su versión académica.

5.2.1 Modelo mental para la renovación de equipos

Como se pudo evidenciar en los dos capítulos anteriores, existe una cantidad considerable de variables que hacen que se requiera de varias fases, con el objetivo de alcanzar un modelamiento completo de la renovación del parque automotor. Esta investigación finalmente propuso utilizar una primera serie de estas para ser involucradas en un modelo nuclear. También se propuso el modelo nuclear fundamentado en el análisis del comportamiento en función del tiempo de las variables. Este modelo nuclear se propone que sea validado en campo, con el fin de refinar su comportamiento en un horizonte de tiempo determinado.

Vale la pena en este punto dilucidar que, para solucionar esta problemática, un solo modelo es insuficiente y se requerirán modelos adicionales dependiendo de la escala que se esté analizando. Esto es un modelo para la renovación de un solo equipo, un modelo para la renovación de equipos en flotas de más de un vehículo y un modelo para la renovación del parque automotor en una economía regional.

De tal manera, para el primer tipo de renovación (un equipo), el modelo que es posible usar es el denominado como “modelo nuclear”, para el segundo caso (flota vehicular) se debe utilizar el primer modelo adicionado con los efectos de la renovación de varios equipos, y para el tercero los efectos de la renovación vehicular general en una región económica.

Estas aproximaciones se pueden realizar por medio de modelamiento, usando la dinámica de sistemas, haciendo sucesivas integraciones de nuevas variables al análisis del sistema y complejizándolo cada vez más para tener una visión holística de las implicaciones de aplicar determinadas políticas de renovación.

En este punto final de la investigación, el autor recomienda para futuras investigaciones que una vez validado el modelo nuclear se tenga en consideración la adaptación al medio colombiano del modelo que se encuentra en el artículo de Mardin y Arai (2011) y cuya presentación gráfica se deja en este escrito, como sugerencia a otros investigadores en el futuro, en la Figura 50.

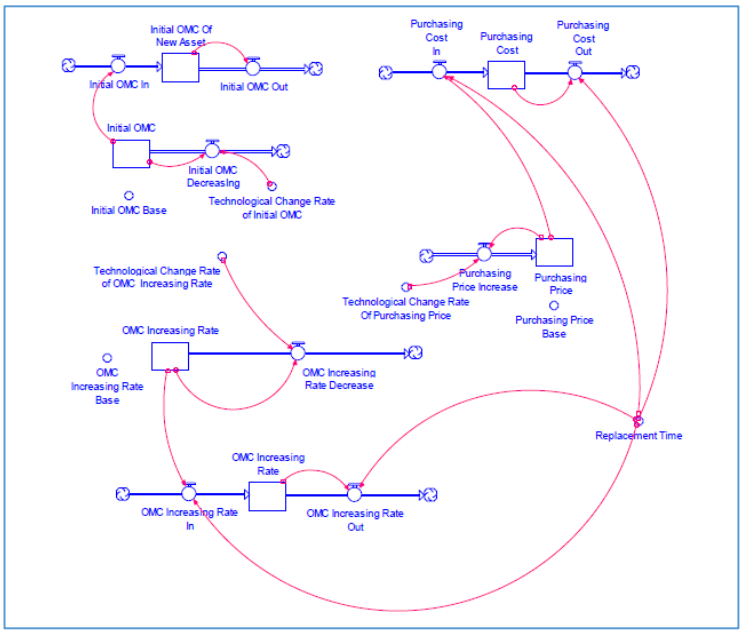

Figura 50. Sector de innovación del activo nuevo

Fuente: (Mardin & Arai, 2011, pág. 9)

6 Conclusiones, hallazgos, recomendaciones, aportes y futuras líneas de investigación

A continuación se presentan las conclusiones de esta investigación, las recomendaciones, los aportes y las futuras líneas de investigación. Las conclusiones estarán circunscritas a verificar el alcance del cumplimiento de los objetivos planteados y los hallazgos tanto de la fase exploratoria, la fase de construcción del marco contextual, el teórico y la propuesta de solución a la problemática. Las recomendaciones se fundamentan en la línea que se debería seguir para futuros desarrollos a partir de este primer acercamiento a la solución de un sistema complejo dentro del sector del transporte, con una mirada desde las ciencias de la complejidad y las herramientas de simulación dentro de ellas, como la dinámica de sistemas. Los aportes son aquellos soportados en hallazgos transversales a toda la investigación y la propuesta de un primer modelo nuclear abierto y accesible a cualquier tipo de empresa de transporte. Finalmente, se hacen dos sugerencias principales para posibles futuras líneas de investigación y colaboración con otras instituciones.

6.1 Conclusiones y hallazgos

En este apartado se transcriben los objetivos específicos para una mejor lectura y contrastación con las conclusiones:

6.1.1 Caracterizar los conceptos, identificar las características y estructurar las variables de los cuatro modelos clásicos y más relevantes que puedan ser usados para la renovación de flotas de carga en Colombia desde la teoría de la complejidad

Con relación al primer objetivo específico, el autor tomó de los modelos más usados en la industria las variables a considerar en un modelo, a partir de las ciencias de la complejidad, haciendo uso de la herramienta de dinámica de sistemas para solucionar el problema de renovación de equipos.

Cabe señalar que una limitación para el cumplimiento de este objetivo fue la cantidad de variables y agentes que se podrían llegar a considerar en los diferentes modelos, estas se presentan en la Tabla xxx con una ponderación de su posible aplicación dentro de cada modelo, donde 1 es su aplicabilidad y 0 es su no aplicabilidad. Esta ponderación inicial y luego la escogencia final del modelo y las variables estuvo basada en la revisión de la literatura en la fase exploratoria, en la

fase de construcción del marco contextual, del marco teórico y la experiencia del autor, tal como se dejó escrito a lo largo del documento. Asimismo, hubo la necesidad de acotar la investigación a una sola de las áreas de la complejidad con modelos de simulación, para así tener un punto de partida que permitiese plantear las bases de una serie de modelos en futuras investigaciones. Esta área es la dinámica de sistemas y se encontró que es una de las herramientas de mayor desarrollo y aplicación al campo de estudio escogido, el transporte y la investigación de operaciones a nivel mundial. Aun así, al parecer en Colombia todavía no ha sido considerada como herramienta de solución a una problemática compleja, como es la renovación del parque automotor en Colombia de vehículos de más de 10.5 toneladas de Peso Bruto Vehicular.

Tabla 17. *Matriz de modelos dentro de las ciencias de la complejidad, variables y agentes a considerar en un modelo de renovación del parque automotor*

TIPO DE FACTOR	VARIABLES-AGENTES/MODELOS COMPLEJOS	SISTEMAS DINÁMICOS	SISTEMAS ESTOCÁSTICOS	REDES NEURONALES	SISTEMAS AUTOORGANIZADOS	MODELOS BASADOS EN AGENTES
VARIABLE	Costos de Adquisición y financiamiento	1	1	0	0	0
VARIABLE	Costos de Operación	1	1	0	0	0
VARIABLE	Costos de Mantenimiento	1	1	0	0	0
VARIABLE	Costo Psicológico	1	1	0	0	0
VARIABLE	Lucro Cesante	1	1	0	0	0
VARIABLE	Salud Ocupacional	1	1	0	0	0
VARIABLE	Ergonomía	1	1	0	0	0
VARIABLE	Medio Ambiente	1	1	0	0	0
VARIABLE	Congestión en los principales corredores de carga	1	1	0	0	0
VARIABLE	Accidentalidad	1	1	0	0	0
VARIABLE	Huella de Carbono	1	1	0	0	0
VARIABLE	Rutas geográficas	1	1	0	0	0
VARIABLE	Varadas	1	1	0	0	0
AGENTE	Generador de Carga	1	1	1	1	1
AGENTE	Empresa de Transporte	1	1	1	1	1
AGENTE	Propietario del Vehículo	1	1	1	1	1
AGENTE	Conductor del Vehículo	1	1	1	1	1
AGENTE	Agremiaciones de Transportadores	1	1	1	1	1
AGENTE	Ministerio de Transporte	1	1	1	1	1
AGENTE	Ministerio de Medio Ambiente	1	1	1	1	1
AGENTE	Ministerio de Industria y Comercio	1	1	1	1	1
AGENTE	Agencia Nacional de Licencias Ambientales	1	1	1	1	1
AGENTE	Concesionarios	1	1	1	1	1
AGENTE	Fabricantes de Vehículos	1	1	1	1	1
AGENTE	Entidades Financieras	1	1	1	1	1
AGENTE	Banca Multilateral y de Desarrollo	1	1	1	1	1
		26	26	13	13	13

Fuente: elaboración propia

6.1.2 Identificar los factores a través de los cuales se evaluarán las variables del modelo desarrollado a partir de los modelos disponibles más relevantes que puedan ser usados para la renovación de flotas de carga en Colombia

Con relación al segundo objetivo, se conceptualizaron las variables más usadas en los diferentes modelos como fundamento para una validación posterior; también se conceptualizaron otro tipo de variables que se consideran pueden tener cabida en un modelo de dinámica se sistemas. Lo anterior se hizo también a partir de la revisión de la literatura en la fase exploratoria, en la fase de construcción del marco contextual, del marco teórico y la experiencia del autor, tal como se evidenció en todo el documento. Por ende, se incluye en este punto la Tabla 14, a fin de exponer esto con una mayor claridad.

Tabla 18. *Variables consideradas y que podrían usarse en el desarrollo de un modelo administrativo de flotas basado en la dinámica de sistemas*

Tipo	Variables	Modelo en que se usarían
Interna	Costos de adquisición y financiamiento	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Depreciación	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Costos de operación	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Costos de mantenimiento	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Costos de inventario	Nuclear y de Dinámica de Sistemas
Interna	Envejecimiento y obsolescencia	Dinámica de Sistemas
Interna	Tiempo muerto	Dinámica de Sistemas
Interna	Costo psicológico	Dinámica de Sistemas
Interna	Lucro cesante	Dinámica de Sistemas
Interna	Salud ocupacional	Dinámica de Sistemas
Interna	Ergonomía	Dinámica de Sistemas
Externa	Medio ambiente	Dinámica de Sistemas
Externa	Congestión en los principales corredores de carga	Dinámica de Sistemas
Externa	Accidentalidad	Dinámica de Sistemas
Externa	Huella de carbon	Dinámica de Sistemas
Externa	Rutas geográficas	Dinámica de Sistemas
Externa	Varadas	Dinámica de Sistemas

Fuente: elaboración propia

6.1.3 Establecer cuál es el modelo que bajo las condiciones colombianas puede usarse para la renovación de flotas de carga en Colombia

Con relación al tercer objetivo, el autor propuso un modelo nuclear al detectar que en Colombia es necesaria una adecuación cultural al manejo de información sistemática y continua que permita tomar decisiones fundamentadas en datos de campo confiables. Este modelo nuclear es el aporte del autor basado en la revisión de la literatura, tanto en la fase exploratoria como la fase de construcción del marco contextual y teórico. De esa forma, se deja como base fundante sobre la cual se puede construir un modelo mucho más complejo y utilizando la dinámica de sistemas, de la cual se dejan también sentadas las bases teóricas de su posible aplicación, en este texto. A continuación se presentan otras conclusiones y hallazgos de esta investigación:

El modo carretero en Colombia es el modo de transporte más importante para la movilización de mercancías y personas, puesto que constituye durante los últimos siete años un porcentaje superior al 69 %, en cuanto a servicios generales de transporte se refiere.

Con relación a los países de la región, en una muestra de catorce países, Colombia ocupa el puesto 11 con una edad promedio de 22 años, superando solamente a República Dominicana, Nicaragua y Belice, los países con la menor edad son Chile, Brasil, Panamá, Argentina y México. Todos ellos por debajo de quince años en la edad promedio de su parque automotor de carga. En Colombia la estructura de mercado que rige es de libre competencia, en provisión de servicios con regulación estatal solo en caso de fallos del mercado. La propiedad de la infraestructura del modo carretero (vías, puentes y túneles) en Colombia es del Estado.

En cuanto a la estructura empresarial este es uno de los sectores más democratizados, debido a que más del 62 % de los prestadores del servicio son personas naturales. Los costos del usuario se cruzan con los costos del productor en el caso de las empresas generadoras de carga, las cuales deciden comprar su propia flota de camiones y usarla para transportar sus propios productos. Existen incluso ocasiones en que hay exceso de oferta intraempresarial y estas empresas salen a competir con el transporte público.

La mayor cantidad de mercancía en Colombia es transportada por vehículos superiores a 10.5 toneladas de PBV. Con relación a otros países del mundo, Latinoamérica presenta en promedio una antigüedad de 13 años mientras que en Canadá es de 8 años, Estados Unidos es de 7 años y España de 10 años.

La situación vial del país presenta un rezago de más de 30 años. Por ello se puso en marcha un Plan maestro de transporte intermodal con visión al año 2032. El Estado ha avanzado en el sistema de regulación a través de la política de libertad de tarifas vigiladas para hacer transparentes los costos del productor y de esta forma, equilibrar las relaciones económicas y comerciales entre los actores de la cadena logística de este modo de transporte.

La función de producción en este modo de transporte no tiene en cuenta de forma directa el factor K (infraestructura) aunque sí ayuda a su pago y manutención, a través del costo de los peajes que tiene que pagar y que se constituye en un rubro importante en la estructura de costos del productor.

La demanda de transporte en Colombia es menor a la capacidad instalada de vehículos, debido a una falta de organización para aprovechar los recorridos vacíos de los vehículos de un punto de llegada al de retorno. Dada la sobreoferta actual de parque automotor de carga, el Gobierno, dentro de sus planes de “chatarrización”, ofrece la opción, a aquel que no quiere renovar el camión, de obtener un reconocimiento económico acorde al tipo de camión que se esté chatarrizando.

En el futuro, este modo de transporte debería verse afectado por una disminución de la demanda, a causa de una intermodalidad más contundente (mayor participación de otros medios de transporte de carga como el ferroviario y el fluvial). Una mayor utilización de medios diferentes al modo carretero debería ser el propósito del Estado para hacer más competitivo al país.

Vale resaltar que las externalidades más importantes en este modo de transporte son las emisiones de contaminantes atmosféricos, la congestión en los principales corredores de carga y la accidentalidad vial. Un parque automotor antiguo afecta directamente los costos del productor y produce externalidades negativas evidentes, por lo que se hace necesario propender por el hecho de que haya un plan que funcione para la renovación del parque automotor.

6.2 Recomendaciones

Existen una variedad de modelos para administrar y renovar flotas que se detectaron en la revisión de literatura realizada por el autor; estos se encuentran referenciados en el cuerpo del documento y podrían adecuarse a la industria del transporte en Colombia, para tal actividad se sugiere para futuras investigaciones elaborar un sistema de trabajo con diferentes empresas para validarlos al medio de este país.

El modelo Vehicle Operating Cost (VOC) - Highway Development and Managemente System (HDM)-4 (Chesher & Harrison, 1987; Nash, 1976) propuesto en el Conpes 3759 debería socializarse de manera amplia con los transportadores de todos los tamaños en Colombia y debería crearse una comisión liderada por el gobierno colombiano, con el fin de implementarlo a la mayor cantidad de empresas de transporte posibles a través de alianzas con universidades, centros de educación continuada, cooperativas de transportadores, etc.

Ahora bien, conviene que las variables fundamentales consideradas en el desarrollo de un modelo complejo para la renovación de flotas correspondan con aquellas que se han utilizado en los modelos de renovación basados en análisis de costos y conocidos en la ingeniería económica.

Las otras variables, como el costo psicológico, el lucro cesante, la huella de carbono, la salud ocupacional, la ergonomía, las rutas geográficas y las varadas, que son tomadas como indeterminadas en esta primera aproximación, se podrían tener en cuenta para futuros desarrollos del modelo fundamental.

En la investigación no se encontró referencia directa de las ciencias de la complejidad y al fenómeno de la renovación de flotas de transporte de carga. Dado lo anterior, la presente es una investigación exploratoria, para enmarcar la industria dentro de las ciencias de la complejidad, desde la perspectiva de la investigación de operaciones y el reemplazo de equipos. Sería conveniente pasar a una fase de validación de las variables, del modelo nuclear y empezar a trabajar en la adaptación de los modelos basados en dinámica de sistemas.

6.3 Aportes de la investigación

En este punto, se planteó una primera aproximación a la industria del transporte como un sistema autopoiético, de acuerdo con Maturana y Luhmann. Esta aproximación se deja planteada como punto de partida para posteriores desarrollos de esta posible línea de investigación.

Dentro de las ciencias de la complejidad existen múltiples herramientas de modelación para acercarse al entendimiento de los sistemas complejos; una de ellas es la dinámica de sistemas. Esta ha tenido un desarrollo consistente a nivel mundial en diversos ámbitos, entre ellos al análisis de sistemas de mantenimiento. Se deja una aproximación al uso de esta herramienta para futuras investigaciones o desarrollos en administración de flotas en Colombia.

En concordancia con la revisión de la literatura realizada por el autor, al parecer la dinámica de sistemas no ha sido utilizada en la academia colombiana desde el punto de vista de la gestión de operaciones, para entender la renovación de activos de transporte y de camiones de más de 10.5 toneladas de PBV.

La dinámica de sistemas puede convertirse en una herramienta de análisis estratégico y en un soporte a la toma de decisiones para la renovación vehicular en propietarios de camiones y empresas medianas y grandes, a nivel regional y nacional. Por tales razones, es necesario implementar el modelo nuclear en empresas de diversos tamaños para lograr una sistematización, a través de herramientas como Excel para posteriormente generar una forma de modelación que podría estar basada en lenguajes de programación como Visual Basic.

6.4 Futuras líneas de investigación

Sería recomendable ampliar la utilización de la dinámica de sistemas en el Departamento de Administración de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, pues constituye una herramienta para un entendimiento holístico de los sistemas de gestión a nivel general y de operaciones en particular. El proceso de investigación pudo constatar que los sistemas de transporte se estudian desde la perspectiva ingenieril, por lo que se requiere un enlace entre centros de investigación de la misma Universidad Nacional, como el SEPRO y la Maestría en Administración.

7 Referencias

Actualicese.com. (2018). *Daño emergente y lucro cesante. Reconocimiento según el estándar internacional.* Obtenido de actualicese.com: https://actualicese.com/actualidad/2016/09/02/dano-emergente-y-lucro-cesante-reconocimiento-segun-el-estandar-internacional/

Adams, T., & Aslan-Tutak, F. (2006). Math roots: Serving Up Sierpinski! *Mathematics Teaching in the Middle School, 11*(5), 248-251.

Allen, L. (2003). *An Introduction to Stochastic Processes with Appilications to Biology.* Upper Saddle River: Pearson Education.

ANDI. (2015). *Contexto del Transporte de Carga en Colombia.* Bogotá: ANDI.

Ansaripoor, A. H., Oliveira, F. S., & Liret, A. (2014). A risk management system for sustainable fleet replacement. (Elsevier, Ed.) *European Journal of Operational Research, 237*, 701-712.

Arnold, M., & Cadenas, H. (2013). Socio(auto)poiesis: re-especificación de la teoría biológica de la Autopoiesis. En P. Razeto Barry, & R. Ramos Jiliberto, *Cuarenta Años de autopoiesis y la tradición sistémica en Chile* (págs. 174-185). Santigo, Chile: Editorial Nueva Civilización.

Arroyo, J. A., & Aguerrebere, R. (2002). *Estado superficial y costos de operación en carreteras.* Sanfandila: Secretaría de comunicaciones y transportes - Instituto mexicano del transporte.

Ávila, G. (2013). *Caracterización del Transporte Terrestre Automotor de Carga en Colombia 2010 - 2012.* Ministerio de Transporte. Bogotá: Ministerio de Transporte. Recuperado el 13 de Marzo de 2016, de https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=11450

Azarang, M., & García, E. (1997). *Simulación y análisis de Modelos Estocásticos.* México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.

Banco de la República. (2019). Estadísticas del Producto Interno Bruto [PIB]. *Banco de la República.* Recuperado el 26 de octubre de 2019, de www.banrep.gov.co: https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/producto-interno-bruto-pib

Banco Mundial. (2006). *Infraestructura Logística y de Calidad para la Competitividad de Colombia.* Banco Mundial, Departamento de Finanzas, Sector Privado e Infraestructura Región de América Latina y el Caribe. Washington: Banco Mundial. Recuperado el 27 de 05 de 2017, de http://documents.worldbank.org/curated/en/558751468023043726/pdf/3506110paper.pdf

Barbero, J. A. (2014). El transporte de cargas en América Latina. En UNASUR (Ed.), *Taller Sobre Transporte de Carga y Logística* (pág. 28). Lima: IIRSA.

Bivona, E., & Montemaggiore, G. (2010). Understanding short- and long-term implications of "myopic" fleet aintenance policies: a system dynamics application to a city bus company. *System Dynamics Revies, 26*(3), 195-215. doi:10.1002/sdr.450

Bivona, E., & Montemaggiore, G. B. (2005). Evaluating Fleet and Maintenance Management Strategies through System Dynamics Model in a City Bus Company. *CED4 – System Dynamics Group*, 16. Recuperado el 2 de May de 2016, de http://www.systemdynamics.org/conferences/2005/proceed/papers/MONTE431.pdf

Bonavia, M. (1936). *Economía de los transportes. 3ra Ed.* México: Fondo de Cultura Económica.

Calvo, E. A., & Sierra, C. (2017). *Técnicas de mantenimiento en instalaciones mineras.* Santander: Universidad de Cantabria.

Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2012). *Evaluación de las Concesiones Sobre la Infraestructura Portuaria Pública en Colombia.* Bogotá: Cámara Colombiana de la Infraestructura.

Carrese, S., & Ottone, G. (2005). A model for the management of a tram fleet. *European Journal of Operational Research*, 1628-1651.

Castellani, B. (2018). 2018 Map of the Complexity Sciences. Recuperado el 2019 de Octubre de 2019, de https://sacswebsite.blogspot.com/2018/01/2018-map-of-complexity-sciences.html

Castellani, B., & Hafferty, F. W. (2009). *Sociology and Complexity Science. A New Field of Inquiry.* Verlag Berlin Heidelberg: Springer.

Chesher, A. D., & Harrison, R. (1987). Vehicle Operating Costs: Evidence from Developing Countries. *World Bank Publications*.

Chicaíza-Becerra, L. A., Riaño Casallas, M. I., Rojas-Berrio, S. P., & Garzón, C. (2017). Revisión sistemática de la literatura en adiministración. *Documentos Escuela de Administración y Contaduría Pública FCE - CID No 29*, 1 - 18.

Código Civil Colombiano. (2006). *Código Civil Colombiano.* Bogotá: República de Colombia.

Cotrasur. (2017). Home. *Cotrasur*. Obtenido de Cotrasur: http://www.cotrasur.com/site/index.php/cotrausr/quienes-somos.html

Daimler Trucks North America LLC. (7 de 11 de 2016). *www.scribd.com.* Obtenido de https://www.scribd.com/doc/39655018/Manual-de-Mantenimiento-de-Camiones-de-Servicio-Pesado

DANE. (2019). *Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera -ICTC-.* Bogotá: DANE. Recuperado el 6 de Junio de 2019, de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-costos-del-transporte-de-carga-por-carretera-ictc

De Rus, G., Campós, J., & Nombela, G. (2003). *Economía del Transporte.* Barcelona: Antoni Bush.

Departamento Nacional de Planeación. (2013). *Documento CONPES 3759. Lineamientos para la modernización del transporte automotor de carga y declaratoria de importancia estratégica del programa de reposición y renovación del parque automotor de carga.* BOGOTÁ: DNP – DIES, DIFP, OAJ.

Dhillon, B. (1989). *Life cycle costing Techniques, Models and Applications.* Ontario: GORDON AND BREACH SCIENCE PUBLISHERS.

Diccionario Etimológico Español en Línea. (2019). Obtenido de Diccionario Etimológico Español en Línea Web Site: http://etimologias.dechile.net/

DNP – DIES, DIFP, OAJ, Ministerio de Transporte, Ministerio de Hacienda y Crédito Público, & Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2013). *Documento Conpes 3759 Lineamientos de política para la modernización del transporte automotor de carga y declaratoria de importancia estratégica del programa de reposición y renovación del parque automotor de carga.* Bogotá D.C.: Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia Departamento Nacional de Planeación.

Educalingo. (2019). Homeostático [en línea]. Recuperado el 4 de Noviembre de 2019, de https://educalingo.com/es/dic-es/homeostatico

Ellram, L. (1995). Total cost of ownership. An analysis approach for purchasing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 25*, 4-23.

Exma Consulting. (2019). *Consultoría Posicionamiento de la marca International.* Bogotá: Intranet (No disponible al público).

Ferreira, P. (2001). Tracing Complexity Theory. *EDS.83 .* Boston: Massachusetts Institute of Technology.

Forrester, J. (1961). *Dinámica Industrial.* Buenos Aires: Artes Gráficas COLOR EFE.

Forrester, J. (1968). Industrial dynamics - after the first decade. *Management Science, 14*(7), 398-415. Recuperado el 04 de 04 de 2019, de https://www.jstor.org/stable/2628888

Forrester, J. (1980). Information Sources for Modeling the National Economy. (A. S. Association, Ed.) *Journal of the American Statistical Association, 75*(371), 555-566. Recuperado el 04 de 04 de 2019, de https://www.jstor.org/stable/2287644

Gad-el-Hak, M. (2003). A New Kind of Science Book review. *Applied Mechanics Reviews, 56*(2), B18-B19.

Gardner, M. (1970). Mathematical games - The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Scientific American*, 120-123.

Gershenson, C. (2012). ¿La complejidad implica un cambio de paradigma científico? México, México, México.

Gestalt (s/f). (2019). Sinificados. Obtenido de Significados.com: https://www.significados.com/gestalt/

Godfrey, G., & Powell, W. (2002). An Adaptive Dynamic Programming Algorithm for Dynamic Fleet Management, I: Single Period Travel Times. *Transportation Science, 36*, 21-39.

Granberg, B. (1997). *The quality re-evaluation process: Product obsolescence in a consumer – producer interaction framework.* Stockholm: University of Stockholm Department of Economic History.

GröBler, A., Thun, J.-H., & Milling, P. (2008). System Dynamics as a Structural Theory in Operations Management. *Production and Operations Management*, 373-384.

Groisman, P. (2019). El efecto mariposa. La certeza de no saber y la predicibilidad de lo impredecible. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Recuperado el 4 de Abril de 2019, de http://mate.dm.uba.ar/~pgroisma/santafe.pdf

Hagman, J., Ritzén, S., Stier, J. J., & Susilo, Y. (2016). Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion. *Research in Transportation Business & Management*, 7. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rtbm.2016.01.003

Instituto Nacional de Vías. (2018). *Estado de la red vial criterio técnico segundo semestre 2018.* Bogotá: INVIAS. Recuperado el 9 de Noviembre de 2019, de https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/informacion-institucional/8397-estado-de-la-red-vial-criterio-tecnico-segundo-semestre-2018

International Ergonomics Association. (2018). *International Ergonomics Association*. Obtenido de International Ergonomics Association Web site: https://www.iea.cc/whats/index.html

Jambekar, A. (2000). A system thinking perspective of maintenance, operations, and process quality. (M. U. Press, Ed.) *Journal of Quality in Maintenance Engineering, 6*(2), 123-132. Obtenido de https://www.emerald-library.com

Kim, D., Porter, J., Kriett, P., Mbugua, W., & Wagner, T. (2009). *Fleet replacement modeling.* Salem: Oregon Department of Transportation.

Kleindorfer, P., Singhal, K., & Wassenhove, L. (2005). Sustainable operations management. *Production and Operation Management*, 482-492.

Leal, A. (2019). Firmaron resolución que reglamenta inicio del nuevo plan de chatarrización para vehículos de carga en el país. Sección Economía. *La República.* Recuperado el 26 de Octubre de 2019, de www.larepublica.co: https://www.larepublica.co/economia/firmaron-resolucion-que-reglamenta-inicio-del-nuevo-plan-de-chatarrizacion-para-vehiculos-de-carga-en-el-pais-2924556

Lorenz, E. (1993). *The Essence of Chaos.* Seattle: University of Washington Press.

Luhmann, N. (2013). La economía de la sociedad como sistema autopoietico. *Revista Mad - Universidad de Chile*, págs. 1-25.

Davis, T. J. (2013). Driver Exposure to Combustion Particles in the U.S. Trucking Industry. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 4:11*, 848-854.

Maldonado, C. (2012). *Derivas de complejidad - fundamentos científicos y filosóficos.* Bogotá : Universidad del Rosario.

Maldonado, C. (2016). *Complejidad de las ciencias sociales. Y de otras ciencias y disciplinas.* Bogotá: Ediciones desde abajo.

Maldonado, C., & Gómez, N. (2010). *El mundo de las ciencias de la complejidad: Un estado del arte.* Bogotá: Editorial Universidad del Rosario.

Mandelbrot, B., & Blumen, A. (1989). Fractal geometry: what is it, and what does it do ? *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and PhysicalSciences, 423*, 3.

Mardin, F., & Arai, T. (2011). A System Dynamics Model For Replacement and Overhaul Policies On CApital Asset Subject To Technological Change. (T. U. Science, Ed.)

Maturana, H. R. (1975). The Organization of the Living: A Theory of the Living Organization. *Int. J. Man-Machine Studies, 7*, 313-332.

Meyers, R. (2009). *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (Vol. 9). (R. Meyers, Ed.) New York: SpringerScience+Business Media, LLC.

Ministerio de Transporte. (2007). *Documento Conpes 3489 Política Nacional de transporte público automotor de carga.* Bogotá, D.C.: Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia Departamento Nacional de Planeación.

Ministerio de Transporte. (2008). *Diagnóstico del sector del transporte.* Oficina Asesora de Planeación - Grupo de Planificación Sectorial. Bogotá: Ministerio de Transporte.

Ministerio de Transporte (2002). Resolución No. 002502 del 22 de febrero de 2002. *Resolución No. 002502 del 22 de febrero de 2002*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

Ministerio de Transporte. (2013). *Modelo de Oferta Vehicular.* Bogotá: Ministerio de Transporte.

Ministerio de Transporte (2013). *Caracterización del transporte terrestre automotor de carga por carretera en Colombia 2010-2012.* Bogotá: Ministerio de Transporte.

Ministerio de Transporte. (2014). *Matriz origen destino O-D de carga.* Bogotá: Ministerio de Transporte.

Ministerio de Transporte (2016). *Transporte en Cifras Estadísticas 2015.* Bogotá: Ministerio de Transporte. Recuperado el 7 de 11 de 2016, de https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/documentos_del_ministerio/Estadisticas

Ministerio de Transporte. (2018). *Transporte en Cifras Estadísticas 2018.* Bogotá: Ministerio de Colombia. Recuperado el 22 de Octubre de 2019, de https://www.mintransporte.gov.co/documentos/15/estadisticas/

Ministerio de Transporte, & EPYPSA. (2013). *Plan estratégico de infraestructura intermodal de transporte - PEIIT.* Bogotá: Ministerio de Transporte.

Miotti, M., Supran, G. J., Kim, E. J., & Trancik, J. E. (31 de May de 2016). Personal Vehicles Evaluated against Climate Mitigation Targets. (A. C. Society, Ed.) *Environmental Science & Technology*.

Monsalve, S., & Özak, Ö. (2018). *Optimización y Sistemas Dinámicos.* Bogotá: Universidad de Colombia, Sede Bogotá.

Mora, V. M. (2012). *Análisis de Modelos y Métodos de Renovación de Flotas de Vehículos por Carretera. Enfoque hacia la Renovación Eco-Eficiente.* Sevilla: Universidad de Sevilla.

Nash, C. A. (1976). The Replacement of Road Transport Vehicles. *Journal of Transport Economics and Policy*, 150-166.

Navistar. (2019). Matrículas de Camiones 2010 - 2019. Miami, Florida, Estados Unidos de Norteamérica.

Nemhauser, G. (1966). *Introduction to Dynamic Programming.* New York: John Wiley and Sons, INC.

Ñaupas, H., Valdivia, M. R., Palacios, J. J., & Romero, H. E. (2018). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis.* Bogotá: Ediciones de la U.

Pecha C., A. (2007). *Optimización Estática y Dinámica en Economía.* Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Rankin, B., & Nelson, R. (2018). *Encyclopædia Britannica, Inc.* Obtenido de Encyclopædia Britannica, Inc.: https://www.britannica.com/topic/automata-theory

Razeto, P. (2016). ¿Qué es esto de las ciencias de la complejidad? Chile: Instituto de Filosofía y Ciencias de la Complejidad. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=oij8MuKqD5A

Real Academia Española (s.f.). Significado de variable. Recuperado de http://dle.rae.es/?id=bNTTsak

Real Academia Española. (2019). Estocástico. Madrid, Madrid, España. Recuperado el 10 de Octubre de 2019, de https://dle.rae.es/?w=estoc%C3%A1stico

Richardson, G. (2009). The Basic Elements of System Dynamics. En R. Meyers, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (págs. 8967 - 8974). Larkspur: Springer Science+Buisiness Media, LLC.

Roda, P., Perdomo, F., & Sánchez, J. (2015). *Impacto de la infraestructura de transporte en el desempeño económico.* Bogotá: DNP Departamento Nacional de Planeación.

Rodríguez, J. M. (2002). Las organizaciones complejas. *Ingeniería e Investigación*, 90-103.

Salazar, J. M. (2015). *Introducción al estudio del transporte.* Bogotá: Universidad Externado de Colombia.

Sánchez, M., & Forero, S. (2004). *Estudio de las condiciones de trabajo de los conductores de vehículos de carga en Colombia para proponer mejoras en los puestos de trabajo.* Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Santa Fe Institute. (2017). *Santa Fe Institute*. Obtenido de Santa Fe Institute Corporation Web Site: https://www.santafe.edu

Schwaninger, M. (2009). System Dynamics in the Evolution of the Systems Approach. En R. Meyers, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science* (Vol. 9, págs. 8974-8987). New York: Springer Science.

Shepherd, S., & Emberger, G. (2010). Introduction to the special issue: system dynamics and transportation. (W. O. Library, Ed.) *System Dynamics Review, 26*(3), 193-194. doi:10.1002/sdr.454

Solano, M. A. (2014). Los camiones colombianos son 10 años más viejos que en Brasil y en Chile. *La República*. Recuperado el 13 de Marzo de 2016, de

http://www.larepublica.co/los-camiones-colombianos-son-10-a%C3%B1os-m%C3%A1s-viejos-que-en-brasil-y-en-chile_159281

Sterman, J. (2000). *Business Dynamics, Systems Thinking and Modeling for a Complex World.* Boston: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Stirzaker, D. (2005). *Stochastic Processes & Models.* New York: Oxford University Press Inc.

Thun, J.-H. (2004). Modelling Modern Maintenance - A System Dynamics Model Analyzing the Dynamic Implications of Implementing Total Productive Maintenance.

Umaña, L. (2014). ¡Urge implementarla vida útil de vehículos de carga! *Fasecolda Federación de Aseguradores Colombianos*, págs. 60-65.

Universidad de Chile. (2017). *Universidad de Chile*. Obtenido de Universidad de Chile Web site: http://www.uchile.cl/portal/presentacion/historia/grandes-figuras/premios-nacionales/ciencias-/6574/humberto-maturana-romecin

Victoria Transport Policy Institute. (2009). Vehicle Costs. En V. T. Institute, *Transportation Cost and Benefit Analysis II* (pág. 11). Victoria, Alberta: Victoria Transport Policy Institute. Recuperado el 03 de May de 2016, de http://www.vtpi.org/tca/

Von Bertalanffy, L. (1976). *Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones.* México: Fondo de Cultura Económica.

Weissmann, J., Weissmann, A., & Gona, S. (2003). Computerized Equipment Replacement Methodology. *Transportation Research Record*, 78.

Wolfram, S. (2002). *A New Kind Of Science.* Champaign: Wolfram Media, Inc.

World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our common future.* Oxford: Oxford University Press.

World Health Organization. (2018). *World Health Organization Western Pacific Region*. Obtenido de World Health Organization Western Pacific Region Web site: https://www.who.int/occupational_health/about/en/

Wyrick, D., & Erquicia, S. (2008). *Fleet Asset Life Cycle Costing with Intelligent Vehicles.* Minneapolis: Intelligent Transportation Systems Institute Center for Transportation Studies University of Minnesota.

Zamalloa, R. (2013). Estudio de riesgos disergonómicos del transporte de carga por carretera aplicado a una empresa de servicios ambientales. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Zill, D., & Wright, W. (2011). *Matemáticas Avanzadas para Ingeniería Cuarta Edicion.* México D.F.: McGraw Hill Education.