



**Dinámica de sistemas aplicada a la producción distribuida inteligente en el área de logística  
integrado a la sostenibilidad ambiental**

Elizabeth Eliana Herrera Morales

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Gestión Tecnológica

Director

Leonardo Betancur Agudelo López, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Maestría en Gestión Tecnológica

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

**Medellín 3 de diciembre de 2024**

Elizabeth Eliana Herrera Morales

Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad”.

Art. 92, párrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

Firma

Elizabeth Eliana Herrera Morales

---

## **Dedicatoria**

A mi prima Susana Andrea Zapata Morales que me ha ayudado en todo el proceso de formación, en especial a mi padre Jorge Luis Herrera Tovar que mientras estuvo con vida me enseñó valores para no abandonar y seguir adelante con mis proyectos.

## **Agradecimientos**

Mi especial gratitud primeramente a Dios por bendecirme con la oportunidad de haber realizado la Maestría en Gestión Tecnológica y luego a Diana Giraldo, Luciano Gallón y Leonardo Betancur por su ayuda profesional con la preparación de este trabajo de grado.

---

**Tabla de contenido**

Resumen .....	12
Abstract .....	13
Introducción .....	13
1 Planteamiento del problema .....	15
1.1.1 Evolución y definición del concepto de producción distribuida.....	17
1.1.2 Teorías sobre la producción distribuida en la industria .....	20
1.1.3 Aportes y vacíos respecto a la producción distribuida.....	21
1.1.4 Producción distribuida y su relación con la logística.....	22
1.1.5 Relación entre el transporte la logística y aumento de las emisiones de CO <sub>2</sub> .....	24
1.1.6 Descentralización como medida para la eficacia ecológica y económica .....	25
1.1.7 La producción distribuida inteligente en Colombia.....	28
1.1.8 La Dinámica de sistemas (DS) como una herramienta aliada en la industria.....	29
2 Justificación.....	30
3 Objetivos .....	31
3.1 Objetivo general .....	31
3.2 Objetivos específicos.....	32
4 Hipótesis.....	32
4.1 Hipótesis de trabajo.....	32
5 Marco teórico .....	34
5.1 Conceptos claves para la creación de un modelo con la metodología dinámica de sistemas .....	34
5.2 Demoras (delays) en los sistemas dinámicos .....	40
5.3 Distribuciones estadísticas aleatorias para transformar una variable determinística en estocástica.....	40

---

5.4 Simulación y comparación de escenarios.....	42
5.5 La ecuación de Haversine.....	43
6 Metodología .....	44
6.1 Etapas metodológicas .....	44
6.1.1 Revisión bibliográfica.....	45
6.1.2 Diseño del modelo de simulación .....	46
6.1.3 Creación de escenarios.....	47
6.1.4 Análisis estadístico.....	48
6.2 Tipo de investigación .....	49
6.3 Recursos empleados .....	50
7 Resultados .....	52
7.1 Sobre la búsqueda bibliográfica .....	53
7.2 Diagrama causal .....	54
7.2 Diagrama de Forrester .....	56
7.3 Explicación de las ecuaciones aplicadas en cada variable. Modelo centralizado. ....	61
7.4 Explicación de las ecuaciones aplicadas en cada variable. Modelo descentralizado. ....	76
7.5 Diseño de los escenarios. Validación de los modelos. ....	79
7.6 Comprobación estadística de la hipótesis.....	82
8 Discusión .....	87
9 Conclusiones .....	91
9.1 Con relación a las variables que deben estar presentes en el modelo dinámico .....	91
9.2 Con relación a la utilidad de establecer relaciones no lineales .....	93
9.3 Con relación a la generación de los escenarios .....	95
9.4 Con relación al análisis estadístico.....	97

---

10 Recomendaciones.....	101
10.1 Ampliar la complejidad del sistema dinámico .....	101
10.2 Uso de modelos en red más complejos: Vehicle Routing Problem (VRP).....	101
10.3 Integración de la gestión de inventarios .....	102
Referencias .....	103

### **Lista de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Descripción de las relaciones de causa-efecto. ....	54
<b>Tabla 2.</b> Valores para el análisis de robustez. ....	80
<b>Tabla 3.</b> ANOVA para la variable de nivel según los dos modelos .....	82
<b>Tabla 4.</b> Análisis post hoc por el método de Tukey .....	83
<b>Tabla 5.</b> Valores resultantes de la evaluación del desempeño del sistema.....	85

---

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Línea del tiempo de la evolución de la industria y la aparición del proceso de producción distribuida. ....	18
<b>Figura 2.</b> Causalidades entre mundo real y modelos mentales. ....	37
<b>Figura 3.</b> Etapas metodológicas ....	45
<b>Figura 4.</b> Diagrama de ciclos causales. ....	55
<b>Figura 5.</b> Mapa de Medellín-Colombia. Barrios y comunas.....	56
<b>Figura 6.</b> Esquema modelo centralizado ....	57
<b>Figura 7.</b> Esquema modelo descentralizado.....	57
<b>Figura 8.</b> Parametrización de la variable de nivel.....	61
<b>Figura 9.</b> Parametrización de la constante “Cantidad de ejes del camión”.....	62
<b>Figura 10.</b> Parametrización de la constante Demanda de paquetes, equipos, etc”.....	63
<b>Figura 11.</b> Parametrización de la constante “Volumen por paquete, equipo, etc.”.....	63
<b>Figura 12.</b> Parametrización de la variable “Capacidad de los camiones”.....	64
<b>Figura 13.</b> Parametrización de la variable “cantidad de camiones”.....	64
<b>Figura 14.</b> Parametrización de la variable “Distancia al centro de producción”.....	65
<b>Figura 15.</b> Parametrización del parqueadero de los camiones. Latitud.....	66
<b>Figura 16.</b> Parametrización del parqueadero de los camiones. Longitud. ....	66
<b>Figura 17.</b> Parametrización del centro de producción. Latitud. ....	67
<b>Figura 18.</b> Parametrización del centro de producción. Longitud.....	67
<b>Figura 19.</b> Tangente inversa de cuatro cuadrantes.....	69
<b>Figura 20.</b> Resultado gráfico para “Distancia a centro de producción”.....	71
<b>Figura 21.</b> Resultado gráfico para “Distancia a centro de distribución”.....	72
<b>Figura 22.</b> Parametrización de los clientes. Latitud. ....	73

---

<b>Figura 23.</b> Parametrización de los clientes. Longitud.....	73
<b>Figura 24.</b> Resultado gráfico para “Distancias a clientes”.....	74
<b>Figura 25.</b> Parametrización de la variable de flujo “Inputs de CO <sub>2</sub> ”.....	75
<b>Figura 26.</b> Parametrización de la variable “Distancias a clientes”.....	77
<b>Figura 27.</b> Resultado gráfico de la función lookup para “latitudes clientes”.....	77
<b>Figura 28.</b> Escenarios en la variable de nivel. Modelo centralizado.....	80
<b>Figura 29.</b> Escenarios en la variable de nivel. Modelo descentralizado.....	81
<b>Figura 30.</b> Escenarios en la variable de flujo. Modelo centralizado.....	81
<b>Figura 31.</b> Escenarios en la variable de flujo. Modelo descentralizado.....	81
<b>Figura 32.</b> Gráfica de intervalos para los dos modelos.....	83
<b>Figura 33.</b> Diagramación de las 4 configuraciones para el desempeño del sistema.....	84
<b>Figura 34.</b> Diagrama de líneas comparativo entre los dos modelos.....	86

### **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>DS</b>	Dinámica de Sistemas
<b>OCDE</b>	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
<b>PISA</b>	Programa para la Evaluación Internacional de Alumnos
<b>(I+D)</b>	Tecnologías de investigación y desarrollo
<b>MSc</b>	Magister Scientiae
<b>Párr.</b>	Párrafo
<b>PhD</b>	Philosophiae Doctor
<b>UPB</b>	Universidad Pontificia Bolivariana

## Resumen

El estudio investiga el impacto de la implementación de un modelo de producción distribuida inteligente en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector logístico, específicamente en un entorno urbano como Medellín. Para ello, se compararon dos modelos de producción: uno centralizado y otro descentralizado, utilizando la metodología de dinámica de sistemas. Se diseñaron simulaciones para evaluar las diferencias en la generación de emisiones bajo distintos escenarios (optimista, pesimista y tendencial).

La metodología incluyó una revisión exhaustiva de literatura y la creación de dos modelos en Vensim, empleando el método de integración de Euler para la simulación. Posteriormente, se realizó un análisis estadístico ANOVA y pruebas post hoc para validar los resultados.

Los hallazgos muestran que, aunque el modelo descentralizado parece generar menores emisiones en todos los escenarios, estas diferencias no son estadísticamente significativas, validando la hipótesis nula. Los resultados sugieren que, aunque la descentralización optimiza ciertos aspectos logísticos, su impacto en la reducción de emisiones debe complementarse con mejoras tecnológicas en la flota de transporte y la gestión de inventarios con ciclos de tipo *pull* por periodicidades superiores a la diaria.

*Palabras clave:* producción distribuida, fabricación inteligente, cadena de suministro, sostenibilidad,

### **Abstract**

The study investigates the impact of implementing a smart distributed production model on the reduction of CO<sub>2</sub> emissions in the logistics sector, specifically in an urban environment like Medellín. To do so, two production models were compared: one centralized and the other decentralized, using the system dynamics methodology. Simulations were designed to evaluate the differences in emissions generation under different scenarios (optimistic, pessimistic, and trend-based).

The methodology included a thorough literature review and the creation of two models in Vensim, using the Euler integration method for simulation. Subsequently, an ANOVA statistical analysis and post hoc tests were conducted to validate the results.

The findings show that although the decentralized model seems to generate fewer emissions in all scenarios, these differences are not statistically significant, validating H<sub>0</sub>. The results suggest that while decentralization optimizes certain logistical aspects, its impact on emission reduction must be complemented by technological improvements in the vehicle fleet and inventory management with pull-type cycles for periods longer than daily.

*Keywords:* distributed production, smart manufacturing, supply chain, sustainability.

## Introducción

En la actualidad, el calentamiento global y sus efectos adversos han impulsado la búsqueda de alternativas que permitan mitigar el impacto del efecto invernadero, originado por la acumulación de gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los clorofluorocarburos, entre otros. Según (Benavides Ballesteros & León Aristizabal , 2007) estos gases contribuyen significativamente al cambio climático.

En Colombia, más del 78% de las emisiones de partículas contaminantes que contribuyen al cambio climático y a la polución del aire provienen de los más de 15 millones de vehículos que circulan, incluyendo camiones, buses, automóviles y motocicletas, de acuerdo con (Céspedes, Greenpeace, 2022). Este contexto resalta la necesidad urgente de implementar estrategias innovadoras para reducir la huella de carbono generada por el sector transporte.

Este trabajo de grado tiene como objetivo estudiar si la implementación de un modelo de producción distribuida inteligente puede contribuir a la mitigación del cambio climático mediante la disminución del uso de camiones y, por ende, de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el transporte logístico. La producción distribuida inteligente es un concepto emergente que plantea un enfoque más eficiente y flexible para la gestión de recursos y procesos productivos.

En el contexto de las empresas logísticas, esta estrategia no solo responde a la necesidad de reducir el impacto ambiental, sino que, como señalan (Chang & Qian , 2024), se alinea con los principios de la responsabilidad social empresarial (RSE). Las empresas que adopten este modelo podrían beneficiarse no solo en términos de sostenibilidad ambiental, sino también en la optimización de costos operacionales, mejora en la eficiencia energética y fortalecimiento de su reputación corporativa, lo cual es fundamental en un entorno global donde la sostenibilidad se ha convertido en un criterio clave para la competitividad y el cumplimiento normativo.

Además, desde la perspectiva de la Gestión de la Tecnología y la Innovación (GTI), este trabajo aborda problemas clave relacionados con la “carencia de gestión para transformar e incorporar el

conocimiento científico y tecnológico en bienes y servicios que permitan una mayor sostenibilidad en el entorno empresarial”. Uno de los desafíos más relevantes en la gestión tecnológica actual es la subvaloración de los efectos e impactos de las políticas y dinámicas tecnológicas en los procesos de medición, planificación y toma de decisiones dentro de las organizaciones. Este análisis busca justamente demostrar cómo la producción distribuida inteligente puede romper con los modelos centralizados predominantes, aportando a la innovación en la gestión logística descentralizada.

El problema central de este trabajo se enmarca en esta familia de problemas de GTI, dado que se exploran las prácticas tecnológicas aplicadas a un modelo de gestión contextualizado a la realidad de los negocios, con el propósito de entender cómo las empresas pueden incrementar su capacidad de innovación tecnológica y mejorar su impacto ambiental. A través del uso de tecnologías disruptivas y distribuidas, este análisis tiene el potencial de transformar la forma en que las empresas logísticas gestionan sus operaciones, particularmente en el contexto de reducción de emisiones de carbono y la lucha contra el cambio climático.

Para analizar la viabilidad y el impacto de la producción distribuida inteligente en una empresa mediana de logística en un entorno urbano, se realizará un análisis teórico utilizando la metodología de dinámica de sistemas (DS). Esta herramienta, como explican (Andruetto, Stenemo, & Pernestål, 2024) permite modelar sistemas complejos y simular diferentes escenarios para identificar patrones de comportamiento que reflejen situaciones del mundo real.

Lo previo, sienta las bases para realizar un estudio explicativo utilizando inicialmente la revisión, comprensión y análisis cualitativo de literatura académica y científica disponible en el campo, para luego crear el modelo objeto de simulación encontrando las relaciones de causa – efecto entre las variables implicadas, hallando la respuesta a la pregunta: ¿La implementación de un modelo de dinámica de sistemas permite hallar diferencias claves entre los sistemas centralizados y los sistemas distribuidos con respecto al impacto ambiental dentro de una empresa de logística en un ambiente urbano como lo es la ciudad de Medellín - Colombia?

## 1 Planteamiento del problema

La transición de la producción centralizada a la producción distribuida plantea un desafío complejo desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental. Aunque se busca una mayor eficiencia operativa, (Velásquez Monroy, 2022) advierte que existe un riesgo inherente de aumentar la capacidad productiva, lo que podría tener un impacto ambiental negativo si no se gestionan adecuadamente los procesos y recursos. Actualmente, muchas empresas no integran criterios de sostenibilidad en sus operaciones de producción y distribución, lo que las convierte en una de las principales fuentes de contaminación, al generar y liberar cientos de elementos nocivos al medio ambiente.

En las últimas décadas, el problema de la sostenibilidad ambiental ha adquirido una importancia creciente. Según (Velásquez Monroy, 2022), inicialmente, muchos países en desarrollo priorizaron los beneficios del crecimiento económico acelerado, la creación masiva de empleos y la adopción de tecnologías avanzadas, sin prever los graves costos ambientales asociados a la industrialización. Esta situación llevó, en 2015, a la adopción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), cuyo propósito es reducir el impacto ambiental de la actividad económica.

En el contexto de la transición hacia una producción distribuida inteligente, las empresas enfrentan un desafío significativo en la optimización de sus procesos productivos y logísticos, con el objetivo de minimizar su huella ambiental. La cuestión central, como indica (Calatayud A. y., 2021), es el mejoramiento continuo e integral de sus operaciones a través de un proceso de toma de decisiones informado, que permita alcanzar una mayor eficiencia sin comprometer la sostenibilidad. Cada empresa deberá adoptar un enfoque personalizado para acunar sus procesos, tomando en cuenta factores específicos como la reducción de emisiones, la gestión eficiente de recursos y la minimización de desperdicios. En este sentido, la clave radica en implementar prácticas de producción que no solo mejoren la rentabilidad operativa, sino que también contribuyan activamente a la reducción del impacto ambiental.

El transporte, como parte fundamental de las cadenas de suministro, es uno de los principales generadores de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, para (Calatayud A. y., 2021), la logística, y particularmente la logística urbana, desempeña un papel significativo en la búsqueda de soluciones sostenibles para el transporte y distribución de mercancías, ya que las ciudades se han convertido en nodos esenciales en las cadenas globales de suministro. Por lo tanto, la optimización de las operaciones logísticas, incluyendo el transporte y almacenamiento de productos, es un elemento clave en los esfuerzos por reducir el impacto ambiental.

Entretanto, el núcleo de este proyecto radica en la falta de evidencia concreta que demuestre que la producción distribuida inteligente es realmente una alternativa sostenible en comparación con los modelos tradicionales de producción industrial. Aunque existen indicios basados en principios generales, aún no se ha evaluado de manera detallada y con un enfoque empírico, bajo la metodología de dinámica de sistemas (DS), en qué condiciones una iniciativa de este tipo podría ser viable y sostenible desde el punto de vista de empresas reales y complejas. Este trabajo, por lo tanto, busca proporcionar una respuesta fundamentada a esta cuestión mediante un análisis teórico y práctico que permita identificar los factores clave para la implementación exitosa de un modelo de producción distribuida optimizado y ambientalmente sostenible.

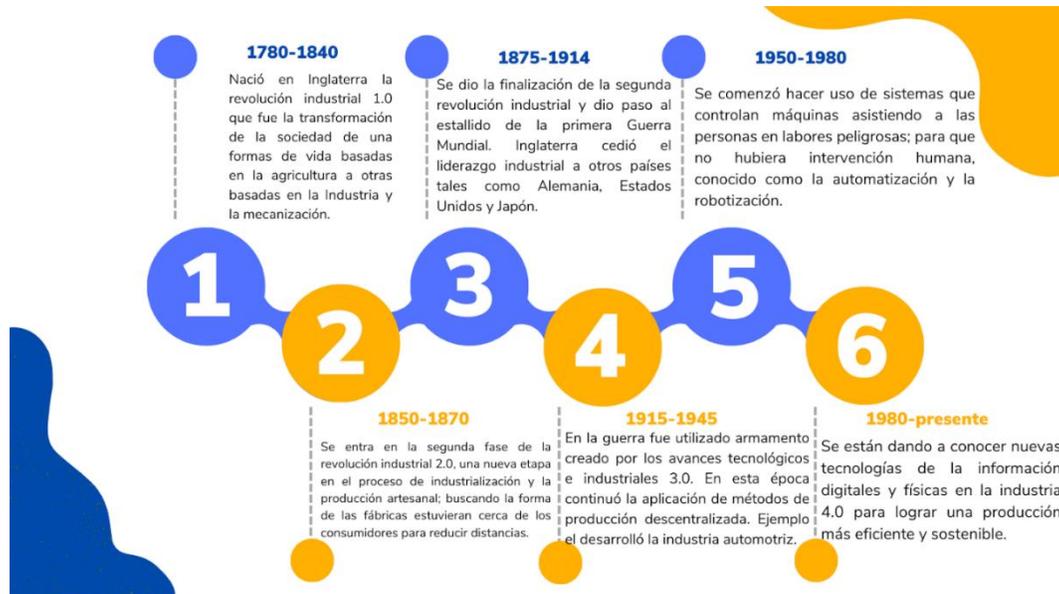
## **1.1 Antecedentes**

### ***1.1.1 Evolución y definición del concepto de producción distribuida***

El primer tipo de producción industrial corresponde a la modalidad centralizada. ( Kumar, Tsolakis, Anshul, & Jagjit Singh, 2020), corroboran que los sistemas de manufactura surgieron a partir de los primeros años del siglo XX y se han mantenido vigentes hasta el día de hoy. En los modelos de funcionamiento, la producción centralizada puede ser eficiente y rentable para las fábricas modernas, sin embargo las grandes cadenas de suministros y las necesidades de lograr una cobertura geográfica amplia cuando el negocio se expande, crea situaciones y problemas de ineficiencia y retrasos en los tiempos de fabricación, distribución y entrega de los productos y servicios, asociados a problemas de imagen y percepción negativa por parte de los clientes, así como manejo ineficiente de la energía y los recursos.

Asimismo ( Kumar, Tsolakis, Anshul, & Jagjit Singh, 2020) explican que los nuevos modelos de producción no convencionales (los que son diferentes a los modelos centralizados), apenas se empezaron a contemplar sino a mitad del siglo XX. Es por ello, que, durante las últimas tres décadas, las tendencias de la globalización han transformado aún más el panorama industrial con sitios de producción manufacturera individualizados y concentrados en mercados regionales, lo que ha permitido una fabricación a pequeña escala mucho más cercana al usuario final denominada como fabricación distribuida. La figura 1 muestra la línea del tiempo de la evolución de la industria y la aparición del proceso de producción distribuida.

**Figura 1.** Línea del tiempo de la evolución de la industria y la aparición del proceso de producción distribuida.



Nota. Elaboración propia.

La producción distribuida es un concepto emergente que aún carece de una definición consensuada debido a la fragmentación de la literatura al intentar demostrar su aplicabilidad en distintos sectores y contextos. (Bessière, D; Charnley, F; Tiwari, A & Moreno, MA, 2019) afirman que se le ha atribuido diversas denominaciones como sistemas distribuidos, fabricación distribuida, producción redistribuida, manufactura distribuida, personalización masiva y prosumo.

En términos más recientes, se ha entendido la producción distribuida como aquella que se enfoca en la fabricación local y a pequeña escala, caracterizada por flexibilidad de volumen y variedad de este, sumado a la capacidad de adaptarse a los requisitos de los consumidores locales. Es un modelo que busca la conexión entre la producción y el consumo, haciendo uso de tecnologías emergentes para satisfacer las demandas y permitir la participación del cliente en el proceso productivo tal como lo señala (Srai, JS, Kumar, M., Graham, G., Phillips, W., Tooze, J., Ford, S. y Ravi, B, 2016). También, (Kohtala, 2014) lo ha considerado como un modelo de producción localizado con los avances tecnológicos en ingeniería e informática brindan nuevas capacidades en términos de automatización, complejidad, flexibilidad y eficiencia.

En el contexto de este trabajo, se entenderá la producción distribuida como la gestión de operaciones planificada en red, es decir, en diferentes ubicaciones geográficas, donde se continúa la cadena de suministro a menor escala. Esto busca lograr flexibilidad, agilidad y una mayor orientación al cliente, permitiendo un resultado más beneficioso tanto para las empresas como para sus clientes, bajo un enfoque de desarrollo sostenible.

### ***1.1.2 Teorías sobre la producción distribuida en la industria***

Las teorías que respaldan la producción distribuida en la industria se enfocan en la descentralización, la colaboración, la innovación abierta y la resiliencia como ventajas clave de este enfoque. Estas teorías sugieren que la producción distribuida puede ofrecer beneficios como mayor flexibilidad, eficiencia, innovación y capacidad de recuperación en comparación con la producción centralizada.

Teoría de la descentralización: (Finot, 2001) argumenta que la producción distribuida permite una mayor flexibilidad y adaptabilidad a los cambios en el entorno empresarial. Al descentralizar la producción, las empresas pueden responder más rápidamente a las demandas del mercado y reducir los costos de transporte y logística.

Teoría de la colaboración: De otra parte, (Manrique Nugent , Teves Quispe, Taco Llave, & Flores Morales, 2019) aseguran que la producción distribuida fomenta la colaboración entre diferentes actores, como empresas, proveedores y clientes. Esta teoría sostiene que la colaboración puede generar sinergias y mejorar la eficiencia en la producción, al permitir el intercambio de conocimientos, habilidades y recursos.

Teoría de la innovación abierta: Además, (Innovación abierta Acelera tu innovación y consigue mejores resultados de negocio, 2023) sostiene que la producción distribuida promueve la apertura y la colaboración con actores externos, como startups, universidades y comunidades de usuarios. Esta teoría argumenta que, al involucrar a diferentes actores en el proceso de producción, se pueden generar ideas innovadoras y soluciones más creativas.

Teoría de la resiliencia: Finalmente, (Gestión de la cadena de suministro, 2020) afirma que la producción distribuida se considera más resiliente que la producción centralizada, ya que no depende de un solo punto de falla. Esta teoría sostiene que, al diversificar la producción en diferentes ubicaciones, se puede mitigar el impacto de desastres naturales, interrupciones en la cadena de suministro y otros eventos imprevistos.

### ***1.1.3 Aportes y vacíos respecto a la producción distribuida***

(Mangan, 2020) coincide en que las principales ventajas significativas de la producción distribuida apuntan a:

- Reducción del plazo de entrega de productos.
- Transparencia de la cadena de suministro gracias a tecnologías digitales emergentes.
- No requiere la misma inversión en apoyo de infraestructura física como las manufacturas centralizadas.
- Requiere una infraestructura física mucho más ligera.
- Promueve la longevidad del producto y los ciclos cerrados de materiales, así como la localización de los productos de manera eficiente.
- Reduce procesos intermedios contribuyendo a la disminución de los consumos energéticos y los costos de transporte. Se favorece la fidelización del cliente y la competitividad, al permitir solventar necesidades inmediatas de manera más rentable y viable para ambas partes.

Algunos desafíos identificados son:

- La adopción de nuevas tecnologías.
- La escasez de economías de escala.
- Mayor costo en la infraestructura y falta de recursos en una red de suministro geográficamente dispersa.
- La naturaleza emergente del tema que apunta una clara necesidad de más investigación empírica diversa.

- Hasta el momento las investigaciones sugieren que en un futuro próximo la fabricación aditiva solo se utilizará en la producción de algunos componentes del producto final debido a los costos.

#### ***1.1.4 Producción distribuida y su relación con la logística***

La producción distribuida tiene una relación estrecha con la logística, ya que implica la descentralización de los procesos de fabricación y distribución. La logística, por su parte, es un conjunto de procesos de planificación y control que aseguran un flujo eficiente de bienes, servicios e información a lo largo de la cadena de suministro. Juega un papel clave en la economía, ya que las actividades productivas se organizan en cadenas de suministro.

Asimismo, el transporte, uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero, también desempeña un papel importante en la desaceleración del cambio climático. Estudios como el de (Giacomo, Giuseppe, & Toshiya, 2015) han demostrado que el transporte de carga es responsable del 24% de las emisiones globales y se espera que estas cifras se dupliquen para el año 2050, lo que tendrá un impacto negativo en el cambio climático. La optimización de rutas puede reducir las emisiones generadas por el transporte y proporcionar una ventaja competitiva a las empresas.

A través de la producción distribuida inteligente, es posible utilizar servicios logísticos para reducir los tiempos de espera y simplificar y digitalizar los trámites administrativos, lo que a su vez reduce los costos, así como lo sostiene (Barbero, 2010). De tal manera, para lograr una logística eficiente, las empresas deben optar por la adopción de la producción distribuida inteligente y aplicar soluciones modernas a través de un transporte sostenible. Sin embargo, la falta de adopción de la producción distribuida inteligente por parte de las empresas, que a menudo se resisten a implementarla, debido a la falta de confianza en las nuevas herramientas, representa un desafío significativo para su implementación en la vida real. A continuación, se condensan algunos impactos positivos y negativos de la producción distribuida en la logística resaltados en la literatura:

Como impacto positivo se resalta en primera instancia la reducción de costos de transporte al tener múltiples centros de producción y distribución más cercanos a los consumidores, puede reducir los costos de transporte a larga distancia. De igual forma, (Behar, 2009) especifica que dicha relación genera mayor flexibilidad al adaptarse a la demanda cambiante y la capacidad de respuesta a los pedidos de manera más eficiente y rápida; Se suma la reducción de tiempos de entrega al tener centros de producción más cercanos a los consumidores, lo que mejora la satisfacción del cliente; finalmente al tener una red de producción y distribución más dispersa, se reduce la dependencia de un solo punto de falla, lo que mejora la resiliencia de la cadena de suministro ante posibles interrupciones.

En contraste, el impacto negativo se manifiesta en la mayor complejidad en la gestión de la cadena de suministro puesto que al tener múltiples centros de producción y distribución, se requiere una mayor coordinación y gestión de los flujos de materiales y productos, lo que puede aumentar la complejidad de la logística; también la implementación de la producción distribuida puede requerir inversiones significativas en infraestructura y tecnología para establecer y gestionar los centros de producción y distribución adicionales.

Como bien se dijo con anterioridad, y según (Calatayud, A., & Katz, R., 2019), aun no es claro que este modelo sea totalmente limpio y existe el riesgo de que si la producción distribuida no se gestiona correctamente, puede aumentar la huella de carbono debido a un mayor uso de transporte y logística; finalmente, al tener múltiples centros de producción y distribución, existe un mayor riesgo de falta de sincronización en la cadena de suministro, lo que puede resultar en retrasos en la entrega y una mayor complejidad en la planificación.

Hoy en día, las actividades productivas se organizan en cadenas de suministro. La logística, entendida como el almacenamiento y el transporte de insumos y bienes, cumple un papel clave para el funcionamiento adecuado de una cadena de suministro. Dado que los insumos, los nodos de producción y los mercados de consumo se encuentran distribuidos geográficamente, la logística permite superar la distancia entre ellos y crear convergencia espacial entre la oferta y la demanda, explica (Barbero, 2010). El transporte es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de

gases de efecto invernadero; por esto, la logística también tiene un rol protagónico en la desaceleración del cambio climático implementando modelos de transporte con baja huella de carbono.

Del mismo modo, en las cadenas de suministro intervienen un complejo entramado de actores, cuya coordinación es clave para que un producto llegue a los consumidores en el tiempo y lugar por ellos requeridos. Autores como (Calatayud, A., & Katz, R., 2019) y (Rietveld, 1994), deducen que la mejora de la infraestructura reduce costos y tiempos de transporte, que, a su vez, disminuye los costos de comercio y, en consecuencia, incrementa el potencial de acceso a mercados.

La producción distribuida ofrece una manera de gestionar recursos y procesos de forma autónoma, optimizando tanto el manejo de datos operativos como el control de maquinaria. Este enfoque permite un nivel de supervisión predictiva más avanzado para todo el sistema de producción. Al pasar de un modelo centralizado a uno descentralizado, se transforman las operaciones y funciones de muchos sistemas industriales, los cuales, aunque aún en desarrollo, buscan reducir la dependencia de los sistemas centrales. Esto facilita una mayor participación local en la gestión de la producción distribuida inteligente, con la transición de un control centralizado a múltiples nodos de control más pequeños. En este contexto, y como lo especifican (Elena G Popkova, Yulia V Ragulina Aleksei v Bogoviz, 2019), la logística desempeña un papel crucial al gestionar los inventarios y optimizar la planificación y coordinación de los procesos en diversas ubicaciones, adaptándose eficientemente a las fluctuaciones de la demanda para asegurar el suministro en el momento y lugar adecuados.

### ***1.1.5 Relación entre el transporte la logística y aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>***

El dióxido de carbono es uno de los principales contaminantes del aire, generado en gran parte por el uso intensivo de automóviles, lo que resulta en la emisión de grandes cantidades de este gas a la atmósfera acorde a la investigación de (Céspedes, Greenpeace, 2022). Durante la pandemia de COVID-19, la reducción del tráfico vehicular condujo a una disminución notable en la

contaminación del aire; sin embargo, tras el fin de las restricciones, los niveles de emisiones volvieron a sus cifras habituales, tal como lo señala (Kinver, 2021).

El efecto invernadero, provocado por gases como el dióxido de carbono, es esencial para mantener un equilibrio térmico en el planeta. No obstante, (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007) dice que el aumento de las emisiones provenientes, sobre todo, del transporte terrestre está agravando el calentamiento global y el cambio climático.

El Acuerdo de París, firmado en 2016, es un compromiso internacional para combatir el cambio climático mediante la reducción de gases de efecto invernadero. Colombia, por su parte, se comprometió a reducir un 20% de sus emisiones proyectadas para el año 2030 así como lo sustenta (Naciones Unidas, 2024). A pesar de este compromiso, (Datosmacro.com, 2022) revela un aumento continuo en las emisiones, lo que enfatiza la necesidad urgente de medidas correctivas.

En respuesta a esta situación, (QuadMinds, 2022) propone la adopción de la Logística Verde como una estrategia para mitigar el impacto ambiental asociado al transporte y las actividades logísticas. Este enfoque busca optimizar los procesos de suministro y producción mediante prácticas más sostenibles. Una adecuada gestión y planificación de la logística no solo permite a las empresas reducir costos y tiempos en la cadena de suministro, sino que también contribuye a la reducción de su huella ambiental, manteniendo su competitividad, tal como lo especifica (Serrano Escudero, 2019). De hecho, cada vez más compañías reconocen la importancia de implementar acciones para minimizar su impacto en el entorno, según lo que señala (GHAVAMI, 2020) en su escrito.

### ***1.1.6 Descentralización como medida para la eficacia ecológica y económica***

Mediante el análisis de la literatura existente acerca de la producción distribuida, se ha observado la presencia de diversos aspectos comunes asociados a este concepto. No obstante, es fundamental considerar que estos aspectos pueden diferir según el contexto y sector específico en el que se implemente la producción distribuida. A continuación, se abordan algunos de ellos:

**1. Localización:** Este aspecto se refiere a la cercanía entre las empresas y los clientes finales al descentralizar una o más actividades dentro de la cadena de valor. (Korner, M. E. H., Lambán, M. P., Albajez, J. A., Santolaria, J., Del Carmen Ng Corrales, L., & Royo, J., 2020) consideran que estar más cerca del cliente es un factor diferenciador y de competitividad al implementar modelos distribuidos. Sin embargo, la localización también plantea desafíos, como adaptar los procesos de manera flexible y eficiente, considerar las necesidades de proveedores y clientes finales, y cumplir con las regulaciones políticas.

**2. Personalización:** Esta tendencia implica ajustar los procesos de producción para satisfacer las necesidades específicas de los clientes. Autores como (Mizar Moreno & Munzón Pastran, 2017) indican que las empresas buscan aumentar sus ganancias a largo plazo al comprender mejor a sus consumidores, aumentar el valor de su marca y mejorar la relación con sus clientes. Un desafío que se aborda en esta tendencia es optimizar la producción para operar bajo demanda, evitando así el exceso de inventario de productos. Del mismo modo, (Korner, M. E. H., Lambán, M. P., Albajez, J. A., Santolaria, J., Del Carmen Ng Corrales, L., & Royo, J., 2020) fundamentan que esto requiere una planificación cuidadosa y una gestión eficiente de la cadena de suministro para garantizar la entrega oportuna y precisa de los productos personalizados.

**3. Desarrollo tecnológico:** La incorporación de tecnologías emergentes, como la automatización y la robótica, el análisis de Big Data, el Internet de las cosas, la fabricación aditiva, la computación en la nube, las tecnologías móviles, las redes sociales y el diseño modular, entre otras, desempeñan un papel fundamental en los procesos y tecnologías dentro de un sistema de producción distribuida. Estas tecnologías favorecen la integración y la conectividad en dicho sistema, tal como lo exponen (Gao, W., Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, C. C. L. Wang, Y. C. Shin, S. Zhang, 2015).

De acuerdo con (Korner, M. E. H., Lambán, M. P., Albajez, J. A., Santolaria, J., Del Carmen Ng Corrales, L., & Royo, J., 2020), la transformación digital trae consigo una serie de beneficios, tales como la mejora en la implementación de procesos y la gestión de recursos, lo que tiene un impacto positivo tanto a nivel ambiental como económico. Además, esto no solo aumenta los ingresos y la

competitividad en el sector de bienes y consumo, sino que también mejora las relaciones con los clientes finales al optimizar los procesos y garantizar entregas más rápidas.

Sin embargo, (Srai, JS, Kumar, M., Graham, G., Phillips, W., Tooze, J., Ford, S. y Ravi, B, 2016) objetan que para lograr una adaptación sostenible a largo plazo, se propone la implementación de nuevos sistemas de gestión de la producción, así como la aplicación de estas implementaciones en diferentes etapas de los procesos productivos, con el objetivo de automatizar de manera más eficiente las tareas. En este sentido, se propone la fabricación definida por software que busca que todo el proceso de producción sea adaptable mediante software. Esto permitirá una mayor flexibilidad y capacidad de respuesta ante los cambios en la demanda y los requisitos del mercado.

**4. Sostenibilidad:** La industria, al igual que cualquier otra actividad humana, tiene un impacto en el medio ambiente. Sin embargo, la industria presenta una dimensión mayor en términos de contaminación, ya que puede generar impactos en áreas como el aire, el agua, los residuos y la energía. Aunque las investigaciones de ( Mizar Moreno & Munzón Pastran, 2017) en esta área todavía no han logrado una comprensión general o un concepto unificado debido a las diferentes unidades de análisis utilizadas en diversos campos, se reconoce que la producción distribuida puede ser más, benigna para el medio ambiente en comparación con los métodos de fabricación convencionales en términos de residuos, energía, uso de materiales, emisiones, entre otros.

Varios estudios como el de (Bernal Figueroa, Béltran Parada, & Márquez Márquez, 2016) han considerado que las redes de fabricación flexible y a pequeña escala tienen un potencial de sostenibilidad, debido a las nuevas tecnologías y a la localización. Al acortar las distancias, se pueden lograr formas más sostenibles de producción y consumo, mejorando la gestión de recursos a través de una implementación eficiente, lo cual puede favorecer la reducción de emisiones y la recuperación de materiales.

Sin embargo, (Srai, JS, Kumar, M., Graham, G., Phillips, W., Tooze, J., Ford, S. y Ravi, B, 2016) también plantean la pregunta de si la proliferación de unidades de fabricación localizadas podría generar un mayor consumo de recursos, lo que constituye un nuevo paradigma en cuanto a la

sostenibilidad ambiental. Aunque aún no está claro si este tipo de producción es inherentemente más limpia, se reconoce su potencial para contribuir al desarrollo sostenible al combinar la producción distribuida con la preservación del medio ambiente.

El análisis realizado por (Srai, JS, Kumar, M., Graham, G., Phillips, W., Tooze, J., Ford, S. y Ravi, B, 2016) destaca soluciones para mejorar la eficiencia de los procesos y reducir las cargas contaminantes, así como el aumento de la longevidad de los productos, a través de métodos como la remanufactura o el reciclaje, como una forma de combatir la obsolescencia en el modelo de producción distribuida. Además, (Durach, C. F., Kurpjuweit, S., & Wagner, S. M., 2017) afirman que la producción local también puede ser aplicable en términos de sostenibilidad ambiental, especialmente en lo que respecta a la logística y el transporte, que tienen un impacto ambiental negativo debido a las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Al tener una construcción más personalizada, más pequeña y local, se espera que las cadenas de suministro puedan transformarse, lo que se traducirá en menos emisiones. Por último, pero no menos importante, la inclusión de tecnologías y la mejora de los diseños de productos pueden generar menos desperdicio y, por ende, un beneficio ambiental.

### ***1.1.7 La producción distribuida inteligente en Colombia***

La situación de las empresas nativas en Colombia, mayoritariamente constituidas por pequeñas y medianas empresas (pymes), plantea desafíos significativos en términos de recursos y capacidad tecnológica para mejorar la producción. Esta necesidad de crecimiento y adaptación en un mercado globalizado es imperativa, pero para las pymes, esto representa un desafío aún mayor debido a limitaciones financieras y técnicas, que dificultan la mejora de procesos y productos sin interrumpir la producción y afectar el flujo de efectivo. Sin embargo, (Díez & Neut, 2018) sostienen que es crucial explorar métodos para reducir costos, mejorar la calidad y aumentar el rendimiento en un entorno cada vez más competitivo.

De tal forma, la tecnología y la investigación para mejorar los distintos modelos operativos han sido un factor fundamental para aumentar la productividad en todo el mundo, permitiendo avances significativos en la distribución y la eficiencia de la producción, innovaciones como la electricidad, los computadores y el Internet de las cosas han marcado el camino hacia una era digital, donde las economías desarrolladas han cosechado importantes ventajas gracias a la innovación tecnológica. Dicha implementación y gestión de la producción distribuida inteligente requiere una visión prospectiva, algo que a menudo escasea en la sociedad colombiana debido a factores culturales, educativos, económicos y políticos.

Por ende, la sociedad colombiana enfrenta desafíos culturales, como una visión de corto plazo, falta de formación en trabajo en equipo, escasa previsión y limitada experimentación en herramientas que faciliten la toma de decisiones efectivas. Además, el bajo nivel educativo del país, evidenciado en mediciones internacionales como las de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), sitúa a Colombia en posiciones rezagadas en pruebas como el programa para la Evaluación Internacional de Alumnos (PISA). El investigador (Sánchez Gutiérrez, 2023) advierte que esta situación se agrava por la baja asignación de recursos en el presupuesto nacional para la educación y la implementación de tecnologías de investigación y desarrollo (I+D).

Nuevamente, (Sánchez Gutiérrez, 2023) deduce que el ciclo vicioso resultante de esta falta de inversión en innovación se traduce en una menor competitividad y productividad, lo que a su vez dificulta la mejora de la calidad de vida y el desarrollo económico sostenible en Colombia. Para superar estos desafíos, es necesario promover una cultura de innovación, invertir en educación, tecnología, y fomentar la colaboración entre el sector público y privado para impulsar la adopción de prácticas como la producción distribuida inteligente para que estimulen el crecimiento económico y la prosperidad en el país.

### ***1.1.8 La Dinámica de sistemas (DS) como una herramienta aliada en la industria***

Según (Suarez, R., 2023), la dinámica de sistemas (DS) se ha establecido como una herramienta metodológica relevante para abordar desafíos complejos en diversos ámbitos, incluyendo la sostenibilidad global y la gestión industrial. En los últimos años, su aplicación ha cobrado mayor importancia debido a la creciente interconexión de problemas ambientales, económicos y sociales que trascienden las fronteras nacionales.

En Colombia, la Asociación Colombiana de Dinámica de Sistemas ha desempeñado un papel fundamental desde el año 2003, actualizando continuamente los enfoques y aplicaciones de la DS en temas como el modelado de cadenas productivas. Ingenieros y economistas, como (Pineda Ballesteros, E., 2009), han abogado por la utilización de la DS en la elaboración de modelos, destacando su capacidad para representar los ciclos de retroalimentación en la cadena de suministro y servicio al cliente, lo que facilita la toma de decisiones empresariales sobre inventarios.

Uno de los desafíos actuales en la industria es la adaptación de las pequeñas y medianas empresas (pymes) a los cambios de la economía mundial. En este contexto, investigadores como (Wilfredo, G., 2009) han desarrollado modelos de simulación dinámica para evaluar políticas operacionales en cadenas de suministro organizaciones transformadoras. Estos modelos buscan optimizar la integración en las cadenas de suministro, garantizando una entrega rápida y confiable de pedidos para mejorar la competitividad en el mercado.

Además, se ha observado el uso de la DS en el sector textil-confección de Medellín, donde autores como (Alvarez Uribe, K., 2009) han empleado este enfoque como una herramienta de modelización, para reflejar la realidad de la cadena de suministro. Estos modelos dinámicos permiten identificar soluciones prácticas para mejorar la gestión, como la reducción de los tiempos de implementación, mediante la definición de metas organizativas que optimicen la cadena de información. En conjunto, estos ejemplos ilustran el valor de la DS como una herramienta aliada en la industria, proporcionando enfoques metodológicos rigurosos para comprender y abordar la complejidad de los desafíos empresariales contemporáneos.

## 2 Justificación

Este trabajo de grado se enfoca en comparar el funcionamiento de la producción centralizada frente a la producción distribuida a través de un modelo de simulación en el software Vensim. Se aplicarán los mismos criterios para ambos modelos, manteniendo una cantidad fija de clientes, sedes e insumos bajo lineamientos constantes en el entorno urbano de la ciudad de Medellín. El objetivo es identificar los puntos de quiebre en los que un modelo resulta más ventajoso que el otro en términos de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) generadas por el transporte. Esta comparación es clave para proponer alternativas empresariales que contribuyan al cuidado del medio ambiente.

En los sistemas de fabricación tradicionales, basados en la producción centralizada, todas las materias primas se transportan a una única ubicación. Si bien este enfoque puede ser eficiente para ciertas fábricas, se caracteriza por cadenas de suministro largas, donde las manufacturas están alejadas del punto de consumo. Esto implica un mayor uso del transporte, lo que incrementa significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por el contrario, la producción distribuida implica la dispersión de las materias primas hacia diferentes ubicaciones, formando pequeños núcleos de trabajo que operan en conjunto, como un sistema en red o "enjambre", permitiendo una optimización en la distribución.

A través de la revisión de diversas bases de datos, se constató que no existe un consenso claro en la literatura sobre la definición de producción distribuida. La mayoría de los estudios disponibles presentan una exploración conceptual sin un enfoque aplicado, y no existe unanimidad en su significado. Muchos autores coinciden en la necesidad de más investigaciones y experimentación práctica. Ante esta carencia, se propone abordar el concepto desde una definición fundamentada en la literatura existente y, posteriormente, aplicarlo mediante la metodología de dinámica de sistemas, evaluando su impacto ambiental en comparación con la producción centralizada.

En cuanto al aspecto ambiental, se consideró que la "sostenibilidad" debía ocupar un lugar central en el título o resumen de los estudios revisados, sin embargo, en muchos casos, este concepto

aparece de manera secundaria dentro del contenido de los documentos. Dado que la industria, al igual que cualquier actividad humana, tiene un impacto significativo en el medio ambiente, este proyecto busca analizar cómo la producción distribuida a gran escala podría reducir dicho impacto en comparación con los sistemas centralizados.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Examinar los resultados de una simulación sobre un sistema dinámico capaz de representar integralmente la arquitectura de una producción distribuida en una empresa mediana de logística, para una frontera temporal de 30 días y en el contexto urbano de la ciudad de Medellín.

#### **3.2 Objetivos específicos**

**3.2.1** Definir cuáles son los niveles, flujos y variables que deben estar presentes en un modelo de simulación de dinámica de sistemas aplicable a empresas medianas de logística que implementen la producción distribuida inteligente.

**3.2.2** Comprender la relevancia y la utilidad de las relaciones no lineales para la dinámica de sistemas y cómo representarla y aplicarla en el modelo a realizar.

**3.2.3** Analizar el comportamiento del modelo en tres escenarios (optimista, pesimista y tendencial) adaptado a la producción distribuida inteligente en empresas medianas de logística en el ambiente urbano de la ciudad de Medellín.

## 4 Hipótesis

### 4.1 Hipótesis de trabajo

Dado el impacto ambiental que generan las operaciones logísticas, especialmente por las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>, la transición hacia modelos de producción distribuida inteligente se presenta como una posible solución para mitigar este problema. La descentralización de la producción y la reducción de la dependencia de grandes instalaciones podrían tener efectos positivos sobre la sostenibilidad ambiental. En este contexto, la presente investigación busca evaluar si este cambio en el modelo productivo realmente contribuye a disminuir la huella de carbono en la logística urbana. A continuación, se plantean las hipótesis a contrastar:

Hipótesis nula (H<sub>0</sub>):

La implementación de la producción distribuida inteligente en la industria de la logística urbana no genera una reducción significativa de la huella de carbono en comparación con los modelos tradicionales de producción centralizada, manteniendo niveles similares de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Hipótesis alternativa (H<sub>1</sub>):

La implementación de la producción distribuida inteligente en la industria de la logística urbana contribuye a una reducción significativa de la huella de carbono al descentralizar la producción y disminuir la dependencia de grandes instalaciones, promoviendo soluciones más sostenibles y con menor impacto ambiental.

## 5 Marco teórico

### 5.1 Conceptos claves para la creación de un modelo con la metodología dinámica de sistemas

Vensim: Acorde a (Ventana Systems, 1988-2002), este es un software en donde se utiliza un lenguaje de simulación para representar sistemas dinámicos en tiempo real, dadas unas condiciones iniciales asignadas.

Diagrama causal: Según (Martín García, 2003), es una representación gráfica del sistema que muestra elementos claves y las relaciones entre ellos; representa el modelo mental de la estructura que induce al comportamiento donde hay variables conectadas por flechas que se pueden asociar a un signo.

Bucle: Los autores (Forrest, Jay Wright; Lane and, David C; Sterman, John D, 2011) lo definen como una secuencia de instrucciones de código, que se ejecuta repetidas veces, hasta que la condición asignada a dicho bucle deja de cumplirse.

Bucle de retroalimentación: Es una cadena cerrada de relaciones causales; que pueden ser positiva o negativa, que determinan el comportamiento del sistema; en donde si la causa incrementa, el efecto incrementa o si la causa decrece, el efecto decrece, tal como lo afirma (Forrester J. W., 31 Octubre 1971).

Bucle de retroalimentación negativa: (Forrester J. W., 31 Octubre 1971) lo describe como un bucle que tiende a crear equilibrio para estabilizar el sistema, y que contiene un número impar de relaciones negativas.

Bucle de retroalimentación positiva: Es un bucle caracterizado por un auto reforzamiento de las variaciones iniciales.

Modos de referencia: es una historia cuyo punto de partida lo integran los datos históricos.

Arquetipos sistémicos: (Forrester J. W., 31 Octubre 1971) lo explica cuando en un sistema hay situaciones que se repiten constantemente, que llevan a errores en el comportamiento en el ámbito donde se da.

Variables no lineales: se utilizan para referirse a cambios inesperados y difíciles de prever, es decir que no se basan en una relación proporcional entre causa y efecto.

Diagrama de Forrester: Según (Sterman, 2002), es una representación mediante un diagrama causal de las variables de nivel que son las que acumulan acciones tomadas en él pasado, que hacen parte de los pasos que componen el cálculo de la variable.

Adicionalmente, (Sterman, 2002) señala que la mayor parte de lo que se conoce del mundo es descriptivo, y generalmente es información que no se encuentra registrada. Esta información es decisiva para el entendimiento y la modelación de sistemas complejos.

Pruebas de la estructura: Evalúan la validez de la estructura de un modelo mediante una comparación directa con el conocimiento sobre la estructura del sistema real. (Barlas, 1996) indica tomar cada relación de forma individual (sea una ecuación matemática o cualquier forma de relación lógica), y compararla con el conocimiento disponible sobre el sistema real.

(Sterman, 2002) complementa que las pruebas de confirmación de la estructura, desde el punto de vista empírico, significan comparar la forma en que las ecuaciones se emplean para los niveles que son ecuaciones diferenciales aplicando la ecuación [1]

$$N(t) = N(0) + \int_0^T (FE - FS) dt \quad [1]$$

Donde:

$N(t)$  = Valor del nivel en el instante  $t$

$N(0)$  = Valor del nivel en el instante inicial  $t = 0$

FE = Flujo de entrada en función del tiempo

FS = Flujo de salida en función del tiempo

T = Período de integración.

Un modelo dinámico se compone de elementos que describen una situación específica mediante ecuaciones matemáticas, proporcionando soluciones a problemas o necesidades del mundo real, tal como lo explica (Unir la universidad en internet, 2021). En la creación de un modelo en dinámica de sistemas, hay tres grandes autores que dan a conocer sus perfectivas acerca del tema, estos son:

El primero de ellos es (Sterman, 2002) quien planteó para la construcción de un modelo en dinámica de sistemas los siguientes pasos.

Articulación del problema a resolver: identificar cuál y por qué es un problema dentro de los límites del marco teórico que se va a abordar.

Formulación de la hipótesis dinámica: desarrollar una teoría específica del tema elegido para poder analizar el comportamiento problemático y de paso a la creación de las relaciones causales que podrían existir entre los factores que condicionan la retroalimentación general de modelo.

Formulación de un modelo de simulación: elige las variables claves de la estructura general que se va a plantear en el modelo de simulación, para dar paso a la construcción de una representación del modelo mediante variables auxiliares, flujo y de nivel, llamado diagrama de Forresterer; que se relacionan de tal manera que se convierten en un paso intermedio en la creación de las ecuaciones diferenciales.

Pruebas: En el software de simulación designado se corre el modelo para experimentar el funcionamiento y analizar que se debe corregir en el modelo.

Los otros dos autores son (Aracil & Gordillo, 1997) quienes indican tres pasos a seguir en el proceso de modelado.

Conceptualización: hipótesis dinámica que conllevan a un diagrama causal.

Formulación: creación de diagramas de niveles, flujos y ecuaciones.

Evaluación: calibración y validación.

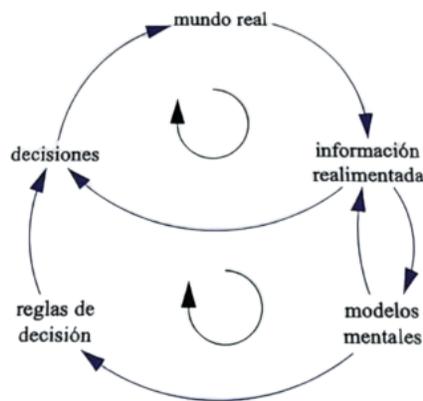
Observando las etapas propuestas por los anteriores autores, a partir de sus ideas más destacadas, podemos reconocer las siguientes etapas y sus características:

Conceptualización: es la etapa inicial, donde se selecciona el tema y se analiza por qué es un problema; con el propósito de comprender el comportamiento del problema en cuestión, se opta por situarlo en un contexto histórico que abarca tanto el pasado como el futuro, lo cual facilita la identificación de sus raíces y la formulación de posibles pronósticos, tal como lo complementa (Begoña González, 1998).

Una vez que se ha definido el tema y su problemática, se procede a identificar las variables y conceptos clave que deben ser considerados al momento de desarrollar el modelo de simulación causal. Estas variables son analizadas en relación unas con otras para determinar la influencia que cada una ejerce sobre las demás. En este contexto, (Aracil, 1995) destaca que las interacciones entre las variables de un modelo causal se representan a través de un diagrama de influencia o causalidad.

Este enfoque de causalidad también es abordado por (Stermán, 2000). En la figura 2, se subraya la existencia de un mundo real del cual se extrae información para la toma de decisiones, condicionado por modelos mentales que definen las reglas basadas en la realidad. Estas reglas se utilizan para la construcción de un mundo virtual interactivo, donde diversas variables interactúan bajo diferentes escenarios.

**Figura 2.** Causalidades entre mundo real y modelos mentales.



Nota. Sterman, J. (2000). Business dynamics. McGraw-Hill

La definición del problema implica la formulación de una hipótesis dinámica que permite al modelador desarrollar una teoría, la cual se valida utilizando herramientas que evidencian las relaciones entre dos o más variables, lo que contribuye a la estructuración del sistema. Durante el proceso de formación de la estructura, se observa la transmisión continua de información en forma circular, un comportamiento conocido como bucles de retroalimentación. Según (Forrester, Jay W., 1992), la retroalimentación se produce cuando una acción afecta la condición de un sistema, y esta condición modificada influye en una acción futura. Se distinguen dos tipos de retroalimentación: el bucle de retroalimentación positiva, donde todas las influencias son positivas o negativas, lo que tiende a desequilibrar el sistema en el ciclo de conexión; y el bucle de retroalimentación negativa, donde la presencia de influencias positivas y negativas tiende a equilibrar el sistema.

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo un diagrama de influencias se compone de flechas, donde la dirección de cada flecha lleva asociado un signo, lo cual es crucial para comprender la retroalimentación, secuencia y continuidad del ciclo propuesto:

Cuando la polaridad es positiva.

Si X es positiva Y incrementa:

X  $\longrightarrow$  +Y

Si X disminuye Y disminuye

Cuando la polaridad es negativa:

Si X se incrementa Y disminuye:

X  $\longrightarrow$  -Y

Si X disminuye Y se incrementa:

$$X \longrightarrow -Y$$

Ejemplo: A mayor calidad de producto  
mayores ventas.

Calidad de producto  $\longrightarrow$  + ventas

$$X \longrightarrow +Y$$

Ejemplo: A mayor precio de un  
producto menos ventas.

Precio producto  $\longrightarrow$  - ventas

Formulación y Formalización: se lleva a cabo después de haber construido el diagrama causal en la etapa de conceptualización. En este proceso, se realiza la transición del diagrama causal al conocido diagrama de flujo, también denominado diagrama de Forresterer. Este último es característico de la dinámica de sistemas, ya que representa una traducción del diagrama causal a través de una representación simbólica y el uso de ecuaciones diferenciales que permiten validar el modelo. Según (Stermán, 2002), para lograr esto, es necesario formular un modelo de simulación que especifique la estructura específica que se plasmará en el modelo. Con base en esta estructura, se muestra el comportamiento en software de simulación como Vesim, PowerSim, Professional DYNAMO, STELLA e i-think.

En el software de simulación, se realiza la asociación de variables de stock o nivel, las cuales son responsables de acumular información y se representan con un rectángulo o caja que contiene el nombre en su interior, y que dependen del tiempo. Por otro lado, las variables de flujo representan las variaciones y son las encargadas de producir la variación en el stock, tanto de entrada como de salida. Además, las variables auxiliares representan los pasos intermedios entre las variables de flujo y las variables de nivel o stock, siendo el resto de las variables que aparecen en el diagrama. A partir de esta estructura, (Aracil, Dinámica de Sistemas, 1995) muestra que se asignan valores a los parámetros, se establecen las condiciones iniciales y las relaciones de comportamiento para poder formular las ecuaciones matemáticas correspondientes.

Evaluación e implementación del modelo: En el escrito de (Perissé, 2020) se muestra que una vez identificado el problema que se va a simular expuesto en la hipótesis dinámica, con el modelo se busca hacer un rediseño que reproduzca el comportamiento del mismo, por medio de una simulación que exponga escenarios que permitan representar situaciones que contribuyan a hacer

un análisis del modelo, que se está estudiando para obtener resultados similares al comportamiento que se podría dar en la vida real cuando sea sometido a condiciones extremas y se pueda validar en el software elegido como pueden representarse en el modelo, sometiéndolo a iteraciones constantes para hacer pruebas y encontrar errores.

## **5.2 Demoras (delays) en los sistemas dinámicos**

Las demoras, también conocidas como "delays", son un fenómeno común en los sistemas dinámicos y ocurren cuando existe un desfase temporal entre una causa y su efecto. Este retardo puede ser el resultado de diversas limitaciones físicas, administrativas o de procesos dentro de un sistema. En términos de modelado de sistemas dinámicos, las demoras afectan tanto los flujos de información como los procesos de toma de decisiones, y pueden generar oscilaciones o inestabilidades si no se gestionan adecuadamente, acorde a (Anjapuli Panneer, Venkatesan, & Hijaz, 2024).

Las demoras se pueden clasificar en dos tipos principales: demoras materiales y demoras de información. Las demoras materiales se refieren al tiempo necesario para que los bienes o recursos se desplacen dentro del sistema, mientras que las demoras de información se relacionan con el tiempo que tarda la información en ser procesada o transmitida.

Modelar estos factores es esencial para entender el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, ya que pueden amplificar o atenuar las dinámicas de retroalimentación y, en algunos casos, generar efectos inesperados o indeseados en el desempeño general del sistema. Herramientas como Vensim permiten integrar estas demoras para estudiar sus efectos sobre el comportamiento del sistema a través de simulaciones dinámicas.

Entretanto, (Globuss Biogestión, 2021) explica que existen demoras que simplemente posponen el inicio de un evento conocidas como funciones DELAY FIXED en Vensim u otras que pueden llevar a un sistema estable hacia estados transitorios inesperados como las DELAY1 y DELAY3 que tienen efectos de suavización o amplificación de las variables, respectivamente.

### **5.3 Distribuciones estadísticas aleatorias para transformar una variable determinística en estocástica**

En los sistemas dinámicos, ( Rué & Wötzel, 2022) demuestran que las variables pueden ser determinísticas o estocásticas. Las variables determinísticas son aquellas que tienen valores predecibles y no varían en función del tiempo, mientras que las estocásticas son aquellas que presentan cierta incertidumbre o variabilidad. Para modelar situaciones más realistas, es común transformar variables determinísticas en estocásticas mediante el uso de distribuciones estadísticas aleatorias.

Las distribuciones estadísticas permiten representar la incertidumbre inherente a ciertos procesos o fenómenos dentro de un sistema. Algunas de las distribuciones más utilizadas son la distribución normal (o gaussiana), que es útil para modelar fenómenos que se distribuyen de manera simétrica alrededor de un promedio, y la distribución exponencial, que se emplea para modelar tiempos entre eventos en sistemas de colas o fallos de componentes. Otras distribuciones como la binomial, la Poisson y la uniforme también son frecuentes en la modelización de variables estocásticas, pero en este caso, con patrones discretos en vez de continuos.

Estas distribuciones se incorporan en el modelado de sistemas para analizar cómo las fluctuaciones aleatorias afectan el comportamiento del sistema y permiten explorar escenarios bajo condiciones de incertidumbre. El uso de estas técnicas es fundamental para la toma de decisiones informadas, ya que los resultados de las simulaciones pueden variar considerablemente dependiendo de la naturaleza y forma de la incertidumbre representada.

Aparte de las distribuciones discretas y continuas que ofrece Vensim, otra posibilidad, más aplicada al ámbito de las señales, es la agregación de ruido rosa. Así, este es un tipo de ruido cuya potencia disminuye de manera inversamente proporcional a la frecuencia, es decir, tiene más energía en las frecuencias bajas y menos en las frecuencias altas. En términos técnicos (Rijmen & Wiersema, 2024) muestran que el espectro de potencia del ruido rosa cae a razón de 3 decibelios (dB) por

octava. Esto significa que a medida que la frecuencia se duplica, la energía se reduce en esa proporción.

A diferencia del ruido blanco, que tiene una distribución uniforme de energía a lo largo de todas las frecuencias (lo que lo hace percibido como agudo y brillante), el ruido rosa tiene una caída progresiva en las frecuencias altas, lo que lo hace sonar más suave y equilibrado a oído humano. El ruido rosa es más "natural" en el sentido de que su distribución energética es similar a muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza, donde las frecuencias bajas tienden a dominar sobre las altas.

#### **5.4 Simulación y comparación de escenarios**

La simulación y comparación de escenarios es una técnica clave en el análisis de sistemas dinámicos, ya que permite evaluar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones. Autores como (Gao , y otros, 2024) afirman que existen tres tipos de escenarios comúnmente utilizados en la toma de decisiones y el análisis prospectivo: el escenario optimista, el escenario pesimista y el escenario tendencial.

**Escenario optimista:** Representa una visión favorable del futuro, en la que los factores internos y externos evolucionan de manera positiva. En este escenario, las condiciones económicas, tecnológicas y sociales favorecen el crecimiento y la sostenibilidad del sistema. La simulación bajo este escenario supone la implementación exitosa de estrategias eficaces que minimizan riesgos y maximizan beneficios, lo que permite alcanzar resultados por encima de la media esperada.

**Escenario pesimista:** Este escenario considera las peores condiciones posibles para el sistema. Factores como crisis económicas, fallos tecnológicos o inestabilidad social pueden afectar negativamente el rendimiento del sistema. La simulación bajo este escenario busca identificar los riesgos y vulnerabilidades más críticos, permitiendo a los tomadores de decisiones prepararse para situaciones desfavorables o diseñar estrategias de mitigación.

Escenario tendencial: También conocido como escenario base, es el que proyecta el comportamiento más probable del sistema si se mantienen las condiciones actuales sin grandes cambios. Este escenario refleja la evolución del sistema en función de los datos históricos y las tendencias observadas, sin considerar cambios disruptivos ni mejoras significativas.

Comparar estos tres escenarios a través de simulaciones permite a los tomadores de decisiones identificar estrategias robustas que sean efectivas en una amplia gama de posibles futuros. Las simulaciones de escenarios se utilizan para mejorar la planificación estratégica y optimizar el rendimiento del sistema bajo condiciones de incertidumbre.

### **5.5 La ecuación de Haversine**

La ecuación de Haversine es una herramienta matemática ampliamente utilizada para calcular la distancia entre dos puntos sobre la superficie de una esfera, considerando su curvatura. Este método es especialmente útil en el ámbito de la geografía y la navegación, donde se requiere medir distancias geodésicas entre coordenadas geográficas (latitud y longitud), como en el caso de la Tierra. A diferencia de las aproximaciones planas, la ecuación de Haversine tiene en cuenta la esfericidad del planeta, proporcionando una mayor precisión en las distancias, sobre todo en trayectos cortos y medianos, tal como lo especifican (Guo, Li, & Jiao, 2024).

La fórmula de Haversine se basa en funciones trigonométricas y utiliza los ángulos en radianes para calcular la distancia entre dos puntos. Esta ecuación requiere la conversión de las latitudes y longitudes de los puntos involucrados de grados a radianes, debido a que las funciones trigonométricas, como el seno y el coseno, operan en radianes. La ecuación toma la diferencia de las latitudes y las longitudes entre los dos puntos, denominadas  $\Delta\phi$  (diferencia de latitudes) y  $\Delta\lambda$  (diferencia de longitudes). Luego, aplica una serie de cálculos que incluyen la elevación al cuadrado del seno de la mitad de la diferencia de latitudes y longitudes, junto con los cosenos de las latitudes originales de los puntos.

El resultado de estos cálculos intermedios se introduce en la función  $\text{atan2}$ , que asegura que la distancia calculada se mantenga dentro del rango de valores esperados. Finalmente, el valor obtenido se multiplica por el radio de la Tierra (aproximadamente 6,371 kilómetros) para convertir los radianes en una distancia física real en la superficie terrestre.

En esencia, la ecuación de Haversine permite obtener una distancia precisa en línea recta (también conocida como la "distancia del círculo máximo") entre dos puntos en una esfera, lo que la hace fundamental en sistemas de posicionamiento global (GPS), aplicaciones de mapas y diversas herramientas de geolocalización. Su capacidad para tener en cuenta la curvatura del planeta la convierte en una opción más exacta que las simples proyecciones planas, especialmente en distancias cortas, donde la curvatura de la Tierra es más significativa.

Las ecuaciones [2] [3] y [4] muestran la lógica correspondiente:

$$a = \sin^2((\Delta\varphi) / 2) + \cos(\varphi_1) * \cos(\varphi_2) * \sin^2((\Delta\lambda) / 2) \quad [2]$$

$$c = 2 * \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad [3]$$

$$d = R * c \quad [4]$$

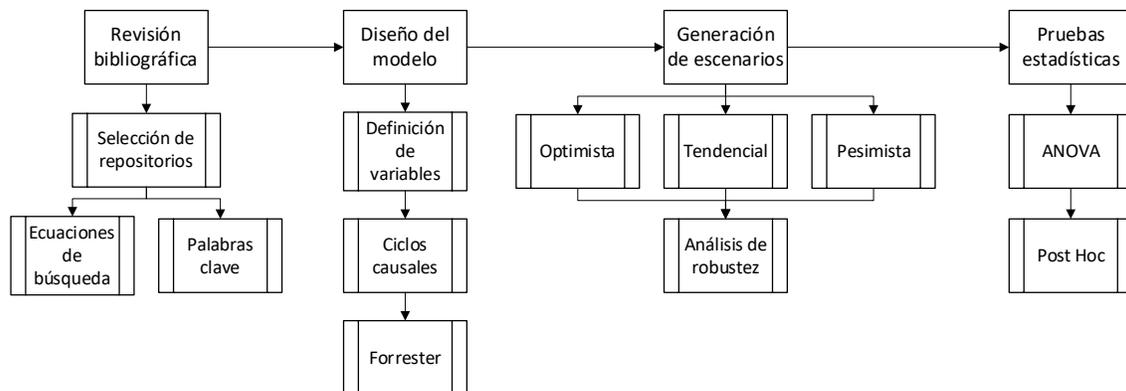
Donde:  $\varphi_1$  y  $\varphi_2$  son las latitudes de los dos puntos (en radianes).  $\Delta\varphi$  es la diferencia entre las latitudes ( $\varphi_2 - \varphi_1$ ).  $\Delta\lambda$  es la diferencia entre las longitudes ( $\lambda_2 - \lambda_1$ ).  $R$  es el radio de la Tierra (aproximadamente 6,371 km).  $d$  es la distancia entre los dos puntos en la superficie de la Tierra.

## 6 Metodología

### 6.1 Etapas metodológicas

Para llevar a cabo la investigación de forma estructurada, se estipularon una serie de pasos coherentes que van desde la revisión de fuentes secundarias, pasando por la creación de los modelos para simulación, hasta el análisis dinámico y estadístico de la información. La figura 3 muestra el resumen:

*Figura 3. Etapas metodológicas*



Nota: Elaboración propia usando Ms. Visio.

#### 6.1.1 Revisión bibliográfica

Inicialmente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con la producción distribuida y su aplicación en la industria logística. La búsqueda se concentró en bases de datos académicas como Web of Science y Scopus, accesibles a través de la biblioteca virtual de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB). Esta revisión permitió identificar las principales tendencias y hallazgos previos sobre la producción distribuida inteligente y su impacto en la

sostenibilidad ambiental. Se seleccionaron artículos relevantes que proporcionaron una base teórica sólida y ayudaron a contextualizar la investigación.

De tal manera, se examinaron los títulos, resúmenes y palabras clave de los manuscritos y el propio artículo completo cuando fue necesario, para determinar su relevancia para el tema, es decir, sinónimos y construcciones comparables, no simplemente palabras claves. El marco temporal para la recopilación de literatura fue de 1995 a 2023, ya que antes de ese tiempo había poca información. La proyección excluyó editoriales, comentarios y reseñas de libros. Los estudios relacionados con aplicaciones biomédicas, automotrices y aeroespaciales, al igual que los concernientes a alimentos, vivienda y la construcción fueron excluidos, por está fuera del alcance de este trabajo. Para garantizar que se hubieran identificado todos los artículos relevantes al tema al final de la etapa de búsqueda de literatura, se realizó un nuevo filtro con nuevas palabras claves las cuales se ingresaron en la base de datos y se examinaron las listas de referencias de los artículos relevantes. Estos procedimientos no produjeron nuevas fuentes críticas.

### ***6.1.2 Diseño del modelo de simulación***

Inicialmente, se procedió a definir las variables intervinientes en el fenómeno objeto de estudio: modelos de producción centralizados y descentralizados y su repercusión en la producción de emisiones atmosféricas cuantificadas en gramos de CO<sub>2</sub> al día. Para ello, se estructuró un diagrama de ciclos causales encontrando las polaridades (correlaciones positivas y negativas) entre los ítems identificados. Lo previo, para refinar el conocimiento de causa / efecto.

Posteriormente, se crearon dos modelos de dinámica de sistemas usando el software Vensim y siguiendo la lógica de los diagramas de Forrester (compuestos por variables de nivel, flujo, auxiliares y constantes modulables): uno para la distribución centralizada y otro para la distribución descentralizada. Ello teniendo en cuenta como contexto espacial la ciudad de Medellín y como parámetro temporal una frontera de 30 días.

Se optó por el método de integración de Euler en lugar del método de Runge-Kutta de cuarto orden por varias razones:

**Simplicidad computacional:** El método de Euler es más simple y requiere menos recursos computacionales, lo cual es ventajoso cuando se trabaja con modelos que no son excesivamente complejos o no requieren una alta precisión en cada paso de integración. Dado que el objetivo del modelo era evaluar tendencias a corto plazo en un período de 30 días, Euler proporcionó una solución adecuada sin sobrecargar el sistema con cálculos innecesarios.

**Velocidad de simulación:** En modelos de dinámica de sistemas donde se prioriza la rapidez en la simulación sobre la exactitud numérica extrema, Euler es más eficiente. En este caso, la diferencia en precisión entre Euler y Runge-Kutta no representaba un problema significativo, ya que el objetivo era obtener un análisis cualitativo más que un cálculo detallado al nivel cuantitativo.

**Facilidad de interpretación:** Al ser un método sencillo y directo, Euler facilita la interpretación de los resultados intermedios del modelo. Esto fue útil para observar rápidamente cómo los cambios en las variables afectaban la producción de CO<sub>2</sub> y permitía hacer ajustes más ágiles en las simulaciones sin la necesidad de lidiar con la complejidad técnica que introduce Runge-Kutta de cuarto orden.

### ***6.1.3 Creación de escenarios***

Una vez construidos los modelos, se desarrollaron tres escenarios distintos para cada tipo de distribución (centralizada y descentralizada):

**Tendencial:** Partiendo de la situación más probable, con una demanda mensual de paquetes, equipos, etc. cómodamente respaldada por la capacidad de producción de la organización, unas dimensiones que no implican condiciones de manejo especiales durante el transporte, empleando vehículos de carga de tamaño estándar, y con distancias razonables entre los puntos de interés.

**Optimista:** Contando con una baja demanda (acudiendo al criterio de reducción de emisiones como algo positivo), elementos de volumen pequeño y camiones grandes, manteniendo la distancia adecuada entre los puntos de referencia.

**Pesimista:** Asignando una alta demanda (lo que en términos ambientales de contaminación atmosférica es desfavorable), artículos sobredimensionados difíciles de llevar y contando con vehículos pequeños (presionando al uso de una flota de transporte numerosa); sin modificación sobre las coordenadas de los puntos de referencia.

La creación de estos escenarios pertenece al proceso de validación del modelo de dinámica de sistemas mediante un análisis de robustez. Este tipo de análisis tiene como objetivo evaluar la consistencia y la capacidad del modelo para generar resultados fiables bajo diferentes condiciones. Al someter el modelo a escenarios variados, como los planteados (tendencial, optimista y pesimista), se verifica si las simulaciones son capaces de capturar las dinámicas esenciales del sistema real en situaciones extremas y plausibles.

El análisis de robustez sirve para:

**Evaluar la capacidad predictiva del modelo:** El objetivo es asegurarse de que el modelo puede predecir comportamientos coherentes frente a variaciones significativas en las condiciones del sistema, como la demanda, el tamaño de los productos o la flota disponible. Un modelo robusto debe poder adaptarse a estos cambios sin generar resultados incoherentes o implausibles.

**Detectar sensibilidades:** Este proceso ayuda a identificar las variables clave que tienen un impacto significativo en el sistema. Si, por ejemplo, el cambio de tamaño de los vehículos tiene un impacto desproporcionado en las emisiones, el modelo debería capturar esta sensibilidad y reflejar cómo las decisiones en esa área podrían influir en los resultados.

**Establecer la fiabilidad del modelo:** A través de la simulación de escenarios extremos como el optimista o el pesimista, se puede determinar si el modelo sigue siendo útil y confiable incluso

cuando se enfrenta a situaciones que se alejan del escenario tendencial. Esto refuerza la confianza en la aplicabilidad del modelo para la toma de decisiones bajo incertidumbre.

#### **6.1.4 Análisis estadístico**

Con el fin de validar los resultados obtenidos de la simulación, se realizó un análisis estadístico utilizando el método ANOVA (Análisis de Varianza) para evaluar si existen diferencias significativas entre los modelos de distribución centralizada y descentralizada en términos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Los análisis se enfocaron en la variable de nivel dentro de Vensim, que representaba la cantidad de gramos de CO<sub>2</sub> producidos diariamente por la flota de transporte de la empresa.

El ANOVA permitió comprobar si existían diferencias estadísticas entre los distintos escenarios simulados para cada tipo de distribución. En particular, se buscaba validar la hipótesis nula ( $H_0$ ), que plantea que la distribución descentralizada no genera cambios significativos en los niveles de contaminación atmosférica en comparación con la distribución centralizada. En contraste, la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) sostiene que la distribución descentralizada sí genera una reducción significativa de las emisiones respecto al modelo centralizado.

Sin embargo, para profundizar en las diferencias entre los distintos escenarios y verificar en qué casos se observaban cambios específicos en las emisiones, fue necesario complementar el análisis con un procedimiento post hoc. En este caso, se utilizó el método de Tukey, que permitió realizar comparaciones por pares entre los escenarios de distribución centralizada y descentralizada.

#### **6.2 Tipo de investigación**

La investigación fue de tipo aplicada, ya que se utilizó el conocimiento teórico para resolver un problema práctico: el análisis de la producción distribuida inteligente en un entorno urbano. Para lograrlo, se recurrió al estudio profundo de múltiples bases de datos, incluyendo no solo el contenido explícito de los datos, sino también los significados ocultos que podrían estar presentes.

El propósito fue construir un marco teórico sólido que permitiera una comprensión detallada del comportamiento de la producción distribuida. Este marco se desarrolló utilizando herramientas como diagramas causales, que identificaron las relaciones entre las diferentes variables involucradas en el fenómeno, y un diagrama de Forrester, que facilitó la modelización en el software Vensim. Este enfoque permitió estructurar y analizar el comportamiento dinámico del sistema, representando cómo diversos factores afectaban el comportamiento global de las emisiones en la producción distribuida.

Asimismo, el enfoque de esta investigación fue mixto, combinando análisis cualitativo y cuantitativo. Esto permitió abordar la complejidad inherente al fenómeno de la producción distribuida inteligente. Desde el análisis cualitativo, se exploraron las realidades subjetivas del sistema, tales como las percepciones y decisiones de las empresas sobre la descentralización de la producción, así como las implicaciones sociales y económicas de estas decisiones. A nivel cuantitativo, se realizó una modelización matemática de las variables involucradas, como las emisiones de CO<sub>2</sub>, para evaluar su comportamiento en diferentes escenarios. Este enfoque mixto fue adecuado para la investigación, ya que permitió una comprensión holística del problema, contextualizando tanto los aspectos teóricos como prácticos y proporcionando un análisis más robusto y aplicable.

Entretanto, el alcance de la investigación fue explicativo, ya que se buscó determinar y analizar las relaciones de causa y efecto entre la forma de producción (centralizada o descentralizada) y la contaminación atmosférica generada por las emisiones de CO<sub>2</sub>. A través de este enfoque explicativo, se intentó comprender cómo diferentes configuraciones de producción y distribución afectaban el impacto ambiental, específicamente en términos de emisiones. Adicionalmente, se consideró cuasi experimental porque, aunque no se controlaron todas las variables del sistema, se tomaron en cuenta ciertos elementos clave, como la ubicación de los puntos de referencia para la producción y distribución.

### **6.3 Recursos empleados**

Hojas de cálculo: Microsoft Excel donde se registró la información clave sobre fuentes bibliográficas, como autor, título, año de publicación.

Herramientas de citación: Para la gestión de citas y referencias bibliográficas, como Sci-hub.se.

Dispositivos de backup: Para realizar el control y almacenamiento de la información recolectada fue necesario para implementar sistemas de respaldo y almacenamiento automático de información en dos o más medios de almacenamiento, tales como la nube y discos externos.

Microsoft Visio: Para la generación de diagramas de forma rápida y eficaz con posibilidad de exportación a archivos de imagen en formatos convencionales.

Vensim: Para el diseño de los modelos y ejecución de las simulaciones correspondientes sobre los mismos.

Minitab: Para la realización de los análisis estadísticos como las tablas ANOVA y la comparación por pares de Tukey.

## 7 Resultados

La metodología empleada en este estudio fue diseñada para abordar la problemática central vinculada a la Gestión de la Tecnología y la Innovación (GTI), específicamente la falta de gestión para transformar e incorporar el conocimiento científico y tecnológico en bienes y servicios que promuevan la sostenibilidad empresarial. Este enfoque permitió analizar cómo las empresas pueden innovar tecnológicamente, al tiempo que contribuyen a la sostenibilidad ambiental.

La primera fase consistió en una revisión bibliográfica exhaustiva, que facilitó la identificación de dinámicas tecnológicas y estrategias de innovación aplicadas en distintos sectores. Se seleccionaron repositorios y ecuaciones de búsqueda relevantes, utilizando palabras clave que ayudaron a encontrar estudios significativos en el ámbito de la innovación tecnológica enfocada en la sostenibilidad empresarial. Esta revisión teórica fue fundamental para comprender cómo se puede gestionar y transformar el conocimiento tecnológico en valor empresarial.

Con base en la revisión bibliográfica, se pasó al diseño del modelo, que involucró la definición de variables clave dentro del ecosistema de la innovación tecnológica. Se emplearon ciclos causales para representar las interacciones entre dichas variables, siguiendo la metodología de Forrester, lo que permitió identificar los factores que influyen en la transferencia tecnológica hacia un modelo empresarial más sostenible. Este enfoque sistémico fue crucial para captar las interrelaciones entre políticas tecnológicas, dinámicas organizacionales e impactos ambientales.

En la fase de generación de escenarios, se simularon diferentes futuros: un escenario optimista, en el que las empresas adoptan eficientemente tecnologías disruptivas; un escenario tendencial, que refleja la continuidad de las prácticas actuales; y un escenario pesimista, donde las barreras a la innovación limitan el uso de tecnologías sostenibles. Estos escenarios permitieron evaluar el efecto de distintos niveles de gestión del conocimiento tecnológico en la sostenibilidad y el impacto ambiental de las empresas. Adicionalmente, se realizó un análisis de robustez para asegurar la consistencia y validez de los resultados en diversos contextos.

Finalmente, se aplicaron pruebas estadísticas como el ANOVA para determinar la significancia de las diferencias entre los escenarios, midiendo el impacto potencial en términos de innovación y sostenibilidad. Las pruebas Post Hoc detallaron las diferencias específicas entre los escenarios, subrayando cómo la implementación eficaz de estrategias de GTI puede facilitar la conversión del conocimiento científico en soluciones tecnológicas que agreguen valor económico y ambiental.

### **7.1 Sobre la búsqueda bibliográfica**

Previo a llevar a cabo la modelización se hizo uso de publicaciones académicas y científicas; como las que se encuentran en la biblioteca virtual de la UPB, donde se pudo obtener información de bases de datos como Web of Science y Scopus para acceder a la literatura científica y rastrear documentos relacionado con el aporte de la producción distribuida inteligente en la industria tradicional y la sostenibilidad ambiental. Se implementaron las siguientes ecuaciones de búsqueda:

("Smart Distributed ") AND ("Review")

("literature review" )AND ("environmental) AND ("distributed production")

("integrative review") AND ("sustainability") AND ("distributed manufacturing" )

("review") AND ("prosumption") AND ("distributed production")

("literature review") AND ("environmental") AND ("distributed production")

("review") AND ("prosumption") AND ("distributed production")

También por medio de las siguientes palabras claves:

- Automatización de procesos industriales
- Automatización de procesos logísticos

Los resultados fueron los siguientes:

Total de referencias: 36

Referencias en inglés: 18, referencias en español: 18

1970-1979: 1 referencia

1980-1989: 0 referencias

1990-1999: 2 referencias

2000-2009: 5 referencias

2010-2019: 17 referencias

2020-2024: 11 referencias

Repositorios con DOI: 22 referencias, páginas web: 10 referencias, redes sociales y otros:  
4 referencias

## 7.2 Diagrama causal

Con el objetivo de analizar las relaciones de causa-efecto entre las variables intervinientes, se parte de una estructuración de ciclos causales que muestran las polaridades y reacciones en cadena perceptibles. Primero se enlistan los ítems, luego en la tabla 1 se desglosan las dinámicas resultantes y finalmente, en la figura 4 se exhibe el resultado del proceso.

### **Variables:**

Logística.

Contaminación

Cantidad de Camiones en desplazamiento.

Tiempo Administrativo para realizar despacho.

Cantidad de ejes de cada camión.

Capacidad de almacenamiento de cada camión.

Demanda de paquetes, equipos, etc.

Volumen por paquete, equipo, etc.

Ventas

# de despacho de paquetes, equipos, etc.

# de camiones que entran a movimiento.

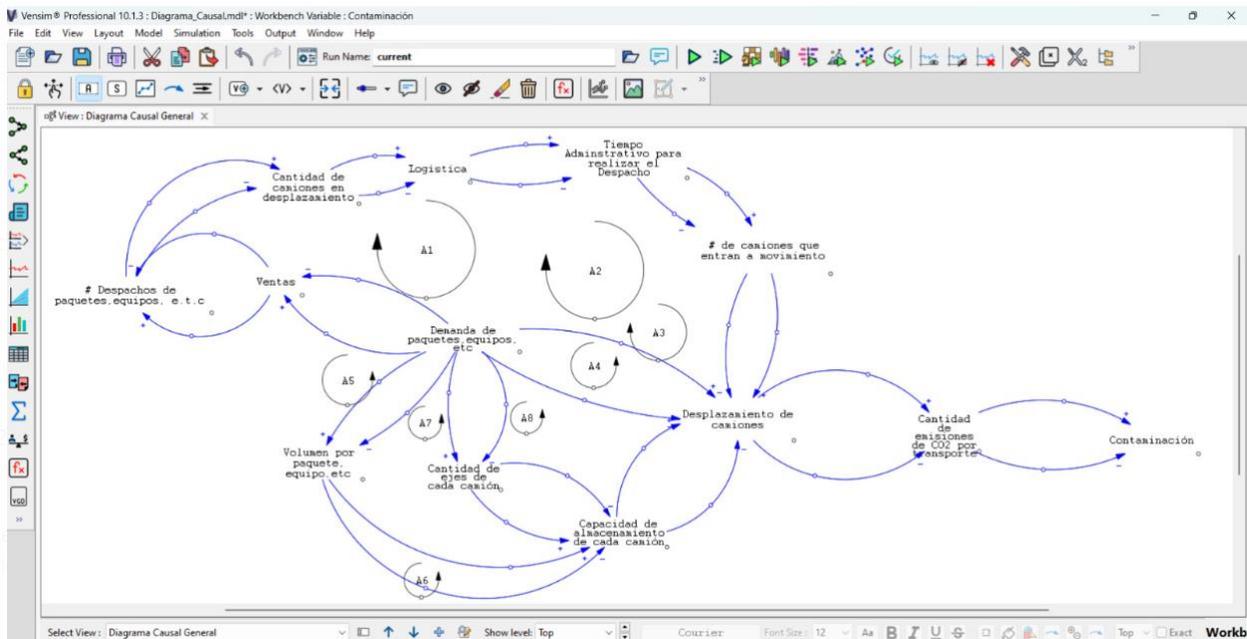
Desplazamiento de camiones.

Cantidad de emisiones de CO2 por transporte

**Tabla 1.** Descripción de las relaciones de causa-efecto.

Relación	Polaridad	Descripción
A1	+	A mayor “Demanda de paquetes, equipos, etc.” va a generar que se requiera utilizar más recursos que mediante una serie de sucesos a llevar a mayor “Cantidad de emisiones de CO2 por transporte” lo que va a generar más “Contaminación”.
A2	-	A menor “Demanda de paquetes, equipos, etc.” va a generar menos desplazamientos de camiones lo que llevara a menos “Cantidad de emisiones de CO2 por transporte” lo que va a generar menos “Contaminación”
A3	+	A mayor “Demanda de paquetes, equipos, etc.” va a generar que se requiera utilizar más “Desplazamiento de camiones” y esto va a llevar a que haya más “Cantidad de emisiones de CO2 por transporte” lo que va a generar más “Contaminación”
A4	-	A menor “Demanda de paquetes, equipos, etc.” va a generar que se requieran menos “Desplazamiento de camiones” y esto va a llevar a que haya menos “Cantidad de emisiones de CO2 por transporte” lo que va a generar menos “Contaminación”.
A5	+	Suponiendo que se tiene mayor “volumen por paquete, equipo, etc.”, esto va a indicar que se requiere mayor “Capacidad de almacenamiento en cada camión” se va a requerir más “Desplazamiento de camiones” y a mayor “Cantidad de emisiones de CO2 por transporte” lo que va a generar más “Contaminación”.
A6	-	Suponiendo que se tiene menor “volumen por paquete, equipo, etc.”, esto va a indicar que se requiere menor “Capacidad de almacenamiento en cada camión” se va a requerir menos “Desplazamiento de camiones” y a menor “Cantidad de emisiones de CO2 por transporte” lo que va a generar menos “Contaminación”.
A7	+	Suponiendo que se tiene mayor “Cantidad de ejes de cada camión”, esto va a indicar que a mayor “Capacidad de almacenamiento en cada camión” se va a requerir menos “Desplazamiento de camiones” y a mayor “Cantidad de emisiones de CO2 por transporte” lo que va a generar más “Contaminación”.
A8	-	Suponiendo que se tiene menor “Cantidad de ejes de cada camión”, esto va a indicar que a menor “Capacidad de almacenamiento en cada camión” se va a requerir más “Desplazamiento de camiones” y a más “Cantidad de emisiones de CO2 por transporte” lo que va a generar más “Contaminación”.

Nota. Elaboración propia.

**Figura 4.** Diagrama de ciclos causales.

Nota: Realizado en Vensim, elaboración propia.

## 7.2 Diagrama de Forrester

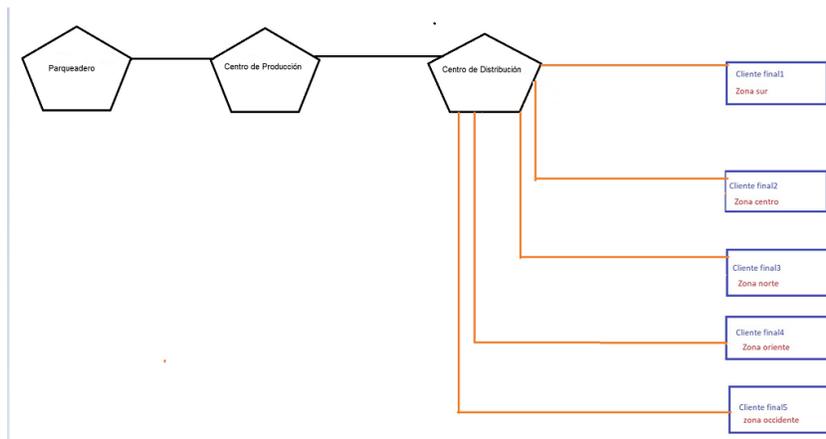
También conocido como diagrama de flujos, es una traducción del diagrama de causalidad, pero no es secuencial; opera de manera diferente. Permite crear un esquema de los modelos dinámicos para la distribución centralizada y descentralizada, con el objetivo de determinar cuál de los dos genera una menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte. Para ello, se comenzó con una representación de las variables auxiliares, las relaciones, las variables de flujo y las variables de nivel de cada modelo. Todas las variables están interconectadas, ya que se trata de un sistema en red, donde ninguna variable queda aislada; todo está relacionado con todo. En el diagrama de Forrester, las jerarquías se organizan de manera que las constantes se dirigen hacia las auxiliares, estas últimas hacia las variables de flujo, y secuencialmente ellas hacia las variables de nivel. Antes de la creación del modelo, la figura 5 muestra un esquema mental que refleja el contexto geográfico del mismo. De igual manera, las figuras 6 y 7 especifican la lógica en red de los dos modelos de producción trabajados (centralizado y descentralizado, respectivamente).

**Figura 5.** Mapa de Medellín-Colombia. Barrios y comunas



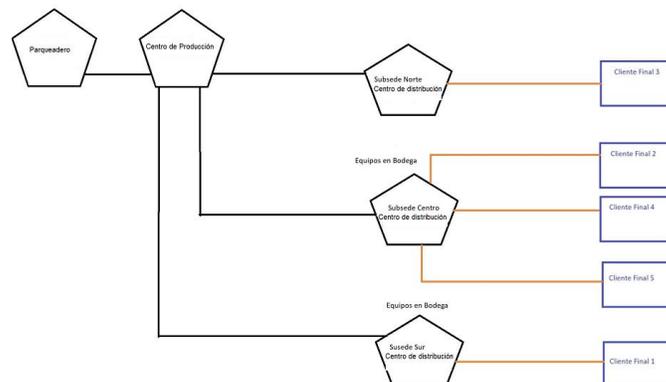
Nota. Fuente: (Medellín te espera, 2024).

**Figura 6.** Esquema modelo centralizado



Nota. Elaboración propia.

**Figura 7.** Esquema modelo descentralizado



Nota. Elaboración propia.

En ambos modelos, la variable de nivel se denominó “emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte” y la de flujo “entradas de CO<sub>2</sub>”. Vale la pena aclarar que se prescindió de crear flujos de salida pues ello implicaría rebosar el alcance de la presente investigación, dado que, tendría que demostrarse los mecanismos o acontecimientos que redujesen los niveles de contaminación.

Puntualmente, se detectó que los trayectos que propician las emisiones atmosféricas por parte de la flota de transporte son:

Desde el parqueadero hasta el centro de producción.

Desde el centro de producción hasta el centro de distribución.

Desde el centro de distribución hasta los clientes.

Las variables de flujo se modelaron mediante ecuaciones diferenciales de la forma  $dx/dt$ , considerando siempre la variación de una variable respecto al tiempo debido a la naturaleza dinámica de los sistemas. Las variables de nivel, por su parte, constituyeron la razón de acumulación de estos flujos.

De otra parte, se especificaron las siguientes variables auxiliares:

La variable “Demanda de paquetes, equipos, etc.” determinó cuántos paquetes, equipos, etc., debían distribuirse.

La variable “Volumen por paquete, equipo, etc.” se asumió como una constante que se podía modular, es decir, aumentar o disminuir según el tipo de empresa, dado que el volumen de los paquetes y equipos variaba entre empresas.

La variable “Cantidad de ejes del camión” se determinó a partir de la información de (Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), 2024) sobre la capacidad en metros cúbicos de camiones de 2, 3 y 4 ejes. Esta información, disponible en toneladas y metros cúbicos, se utilizó en el modelo en metros cúbicos.

La variable “Capacidad de los camiones” se calculó analizando la carga por camión y estudiando la conversión de ejes a metros cúbicos.

La variable “Cantidad de camiones” se determinó dividiendo el volumen total del inventario entre la capacidad de cada camión, lo que permitió calcular el número necesario de camiones.

La variable “CO<sub>2</sub> por km” fue una constante obtenida de la (European Environment Agency, 2024), que indicó que un camión de tamaño medio genera aproximadamente 200 gramos de CO<sub>2</sub> por kilómetro recorrido.

La variable “Distancia al centro de producción” se calculó como la distancia entre el parqueadero de los camiones y el centro de producción.

La variable “Distancia al centro de distribución” representó la distancia entre el centro de producción y el centro de distribución.

La variable “Distancia desde el centro de distribución hasta el cliente final” se refirió a la distancia entre el centro de distribución y el cliente final.

Consecuentemente, las siguientes variables sirvieron de insumo para determinar las distancias entre pares de coordenadas implementando la ecuación de Haversine:

Variable “latitud Parqueadero de camiones”

Variable “Longitud Parqueadero de camiones”

Variable “latitud Centro Producción”

Variable “Longitud Centro Producción”

Variable “latitud Centro Distribución”

Variable “Longitud Centro Distribución”

Para calcular las distancias, se utilizó la latitud y la longitud de puntos específicos, ya que el problema consistía en determinar cuántos camiones eran necesarios y qué trayectos debían

recorrerse. Esto se convirtió en un problema de georreferenciación, por lo que se obtuvieron las coordenadas de la salida del camión y del centro de producción a través de Google Maps. Se decidió modular las latitudes desde -90 hasta 90 con un incremento de 0.01 para obtener valores con dos decimales, donde X representaba la latitud. Se realizó lo mismo con un rango de -180 a 180 para la variable Y estimada como la longitud.

En el modelo, cada punto geográfico, como en un plano cartesiano, estaba definido por una coordenada X (latitud) y una Y (longitud), lo que permitía ubicar un punto en el espacio. Se determinaron las coordenadas XY de los camiones, del centro de producción, del centro de distribución y de cada cliente final. Las variables asociadas a latitud y longitud se utilizaron para calcular distancias empleando la fórmula de Haversine, que calcula la distancia más corta entre dos puntos sobre la superficie de una esfera, como la Tierra, y luego convierte el resultado en kilómetros. El anterior, es un proceso que es propuesto por autores como (LlocationIQ, 2022).

Las latitudes y longitudes obtenidas de Google Maps se expresaron en grados, y la fórmula de Haversine se aplicó para calcular los kilómetros recorridos. Para las variables "Latitudes de los centros de distribución" y "Longitudes de los centros de distribución", se aplicó la función lookup a las tres ubicaciones, obteniendo información específica de latitud y longitud para cada uno de los tres centros de distribución que se ubicarían en la zona urbana de Medellín.

La variable "Distancias a centros de distribución" representó la distancia entre el centro de producción y los tres centros de distribución en la zona urbana de Medellín.

De manera similar, las variables "Latitudes de los clientes" y "Longitudes de los clientes" también aplicaron la función lookup a las 12 coordenadas correspondientes a la ubicación de cada cliente, obteniendo la información específica de latitud y longitud para cada uno de los 12 puntos.

Finalmente, la variable "Distancia a los clientes" midió las distancias desde cada uno de los centros de distribución hacia los clientes más cercanos, de la siguiente manera:

Desde el centro de distribución 1 hasta los 4 clientes más cercanos.

Desde el centro de distribución 2 hasta los 4 clientes más cercanos.

Desde el centro de distribución 3 hasta los 4 clientes más cercanos.

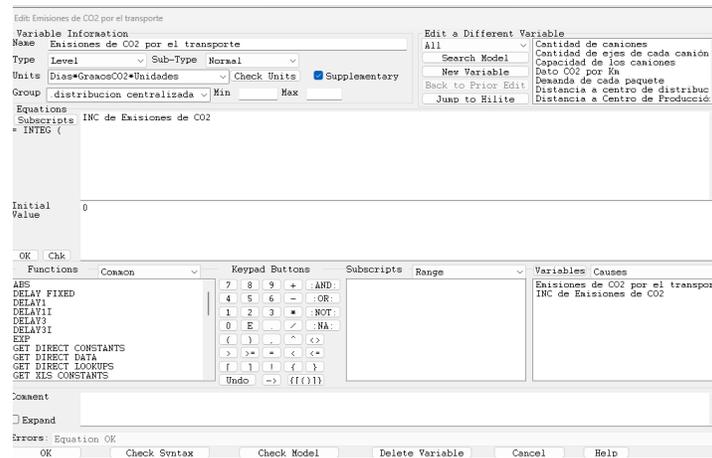
### **7.3 Explicación de las ecuaciones aplicadas en cada variable. Modelo centralizado.**

En los sistemas dinámicos, el movimiento de las variables en el tiempo se representa en el eje X al realizar gráficas, y en este caso se trabajó en días. Lo que varió fue la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte, a la cual se le aplicó una función que permitiera la variabilidad, dado que factores como el semáforo en rojo o el tráfico intenso, que puede generar congestiones, influyeron en las emisiones. Las distancias permanecieron constantes, pero las emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte fluctuaron.

La variable de nivel "Emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte" se encargó de acumular este contaminante desde cero, contabilizando las entradas diarias durante un periodo de 30 días, con un paso de tiempo de un día. Se estableció un valor inicial de cero, ya que no se tenía un punto de partida previo. Esta variable mostró la acumulación diaria, dado que, al integrar una ecuación diferencial, se obtiene la razón de acumulación o desacumulación en el tiempo.

En el modelo, la variable de nivel se creó como suplementaria, lo que significa que no dependía de variables previas ni de conexiones con otras variables. El resto de las variables del sistema fueron endógenas, es decir, controlables dentro del modelo centralizado y descentralizado. Lo que se manejó entre ambos modelos fueron los desplazamientos que generaron los diferentes escenarios en la variable de nivel "Emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte". La figura 8 muestra la parametrización.

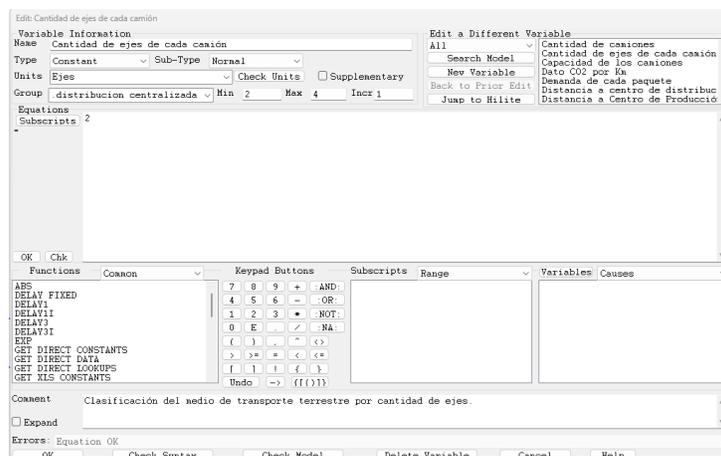
Figura 8. Parametrización de la variable de nivel



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Constante “Cantidad de ejes del camión”: En Vensim, cuando se configura una variable como constante, automáticamente sale la barra slider, que será la que denotará las condiciones iniciales para generar un escenario a través de su modulación respectiva. De tal manera, se estipularon camiones de 2 (valor inicial), 3 y máximo 4 ejes, con un incremento de 1 en 1, que es la clasificación del medio de transporte terrestre. La figura 9 evidencia su parametrización.

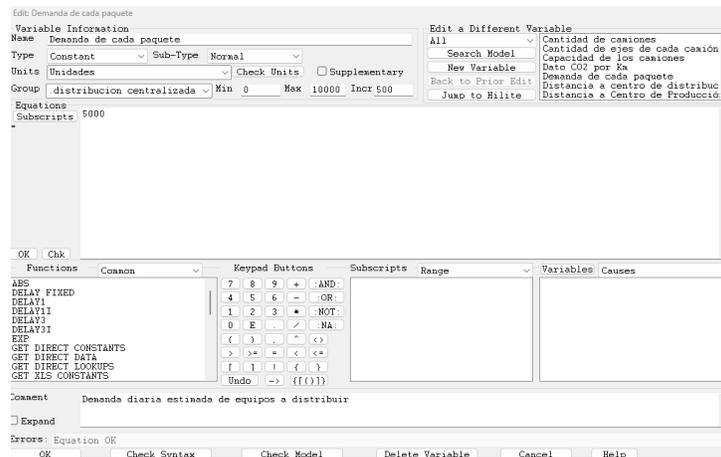
Figura 9. Parametrización de la constante “Cantidad de ejes del camión”



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Constante “Demanda de paquetes, equipos, etc.”: empieza en 0 y va máximo hasta 10000 paquetes, equipos, etc. con un incremento de 500 en 500, que es la demanda diaria estimada a distribuir, iniciando con 5000 unidades. La figura 10 enseña su parametrización.

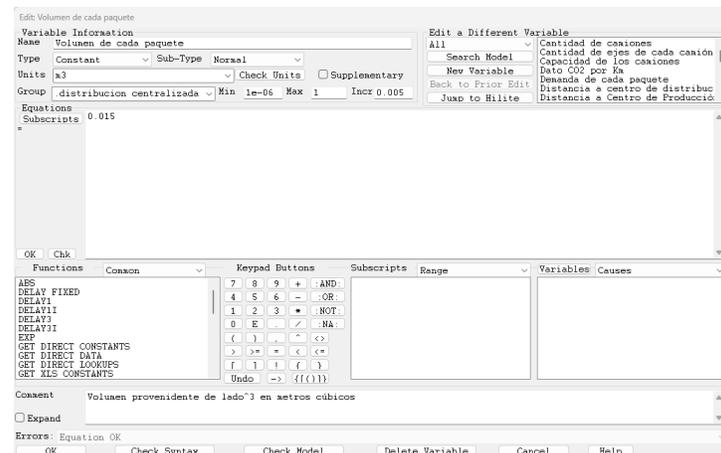
**Figura 10.** Parametrización de la constante *Demanda de paquetes, equipos, etc.”*



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Constante “Volumen por paquete, equipo, etc.”: empieza en 0.000001 y va máximo hasta 1 m3 con un incremento de 0.005 en 0.005, que es el volumen proveniente de lado<sup>3</sup> en metros cúbicos, iniciando con 0.015 metros cúbicos. La figura 11 muestra su parametrización.

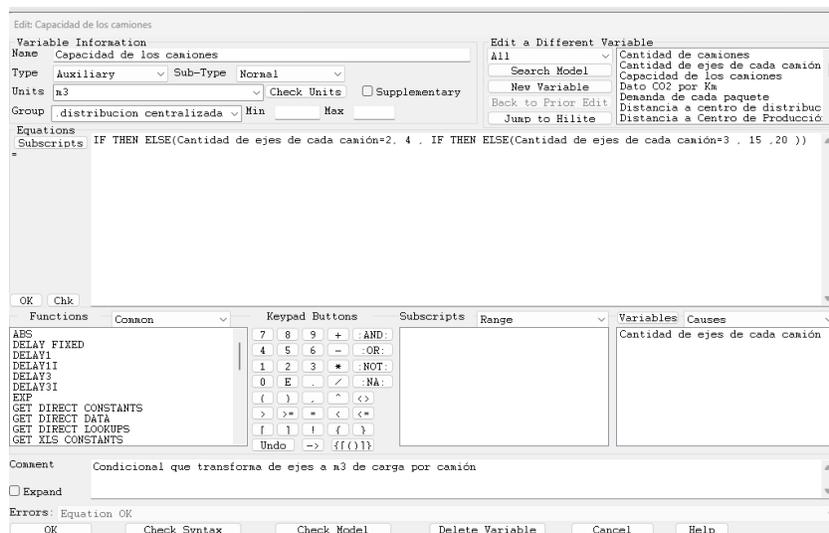
**Figura 11.** Parametrización de la constante *“Volumen por paquete, equipo, etc.”*



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

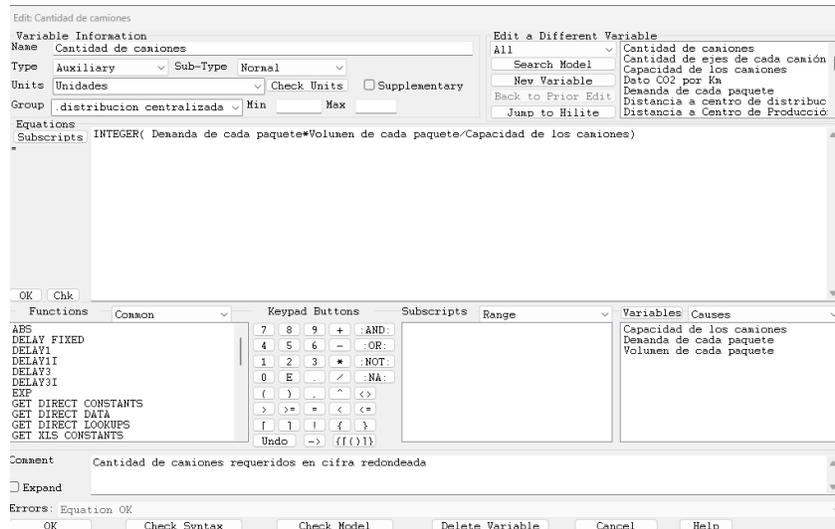
Variable “Capacidad de los camiones”: para la creación de esta variable se aplicó la función IF THEN ELSE. Si el vehículo es de 2 ejes va a tener una capacidad de 4 metros cúbicos, si el vehículo es de 3 ejes va a tener una capacidad de 15 metros cúbicos, y si el vehículo es de 4 ejes va a tener una capacidad de 20 metros cúbicos. La figura 12 explica su parametrización.

**Figura 12.** Parametrización de la variable “Capacidad de los camiones”



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Variable “cantidad de camiones” se aplicó la función de redondeo INTEGER a la ecuación demanda de equipos multiplicado por el volumen individual para luego dividirlo entre la capacidad de los equipos, paquetes, etc. es decir metros cúbicos “m<sup>3</sup>” sobre “m<sup>3</sup>” para obtener las unidades de camiones. Por ejemplo, la ecuación se obtuvo de validar si un equipo mide 1 m<sup>3</sup> y hay que llevar 10 equipos entonces serian 10m<sup>3</sup>, este valor se divide entre la capacidad de cada uno de los camiones, para saber cuántos camiones se requieren en cifras de redondeo. La figura 13 muestra el procedimiento realizado.

**Figura 13.** Parametrización de la variable “cantidad de camiones”

Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

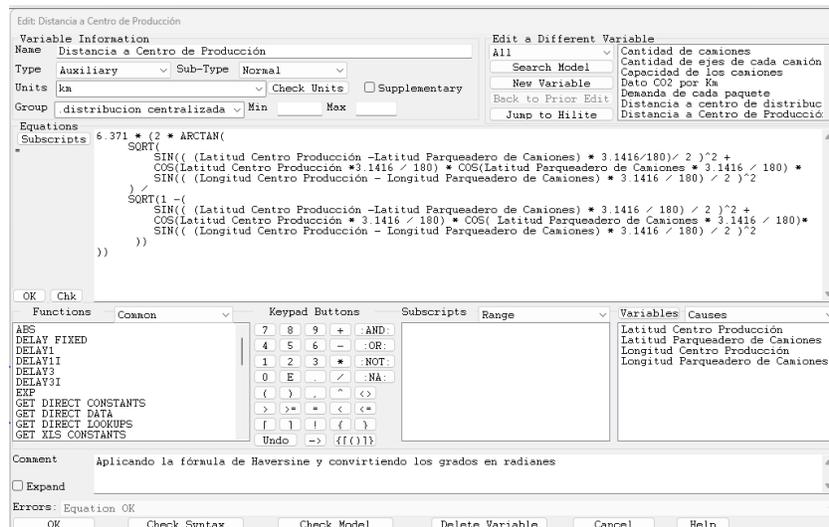
Variable "Distancia al centro de producción": Representó la primera distancia a calcular, entre el parqueadero de camiones y el centro de producción. Para determinarla, fue necesario obtener las coordenadas de latitud y longitud de cada punto específico. Se utilizó Google Maps para identificar las ubicaciones estratégicas del parqueadero y del centro de producción. Además, se moduló la latitud de las siguientes variables, las cuales se escogieron para estar en proximidad:

Latitud del centro de producción

Latitud del parqueadero de camiones

La figura 14 señala lo realizado.

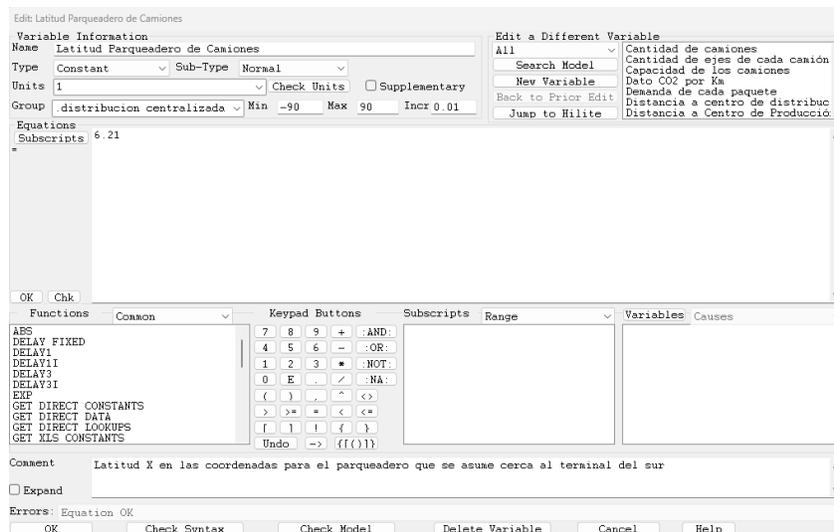
**Figura 14.** Parametrización de la variable “Distancia al centro de producción”



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

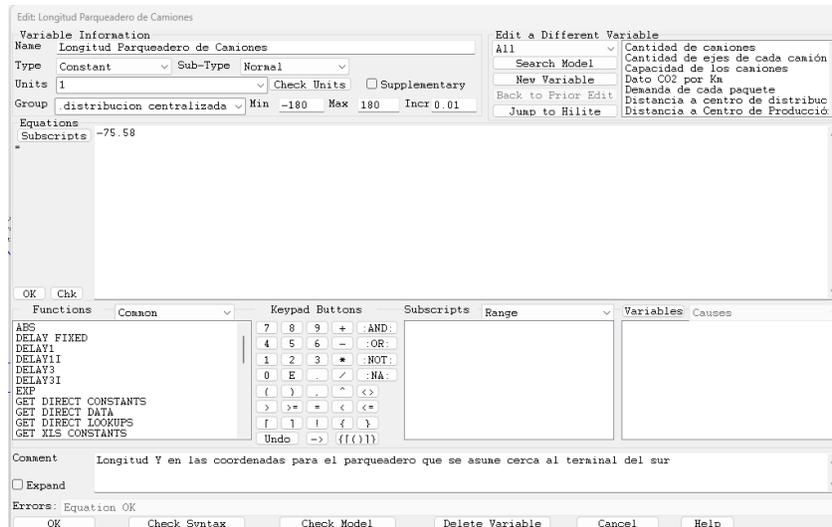
**El parqueadero de los camiones** se ubicó cerca de la terminal del sur de forma que le fuera fácil llegar a la avenida Guayabal, tal como se muestra en las figuras 15 y 16.

**Figura 15.** Parametrización del parqueadero de los camiones. Latitud.



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

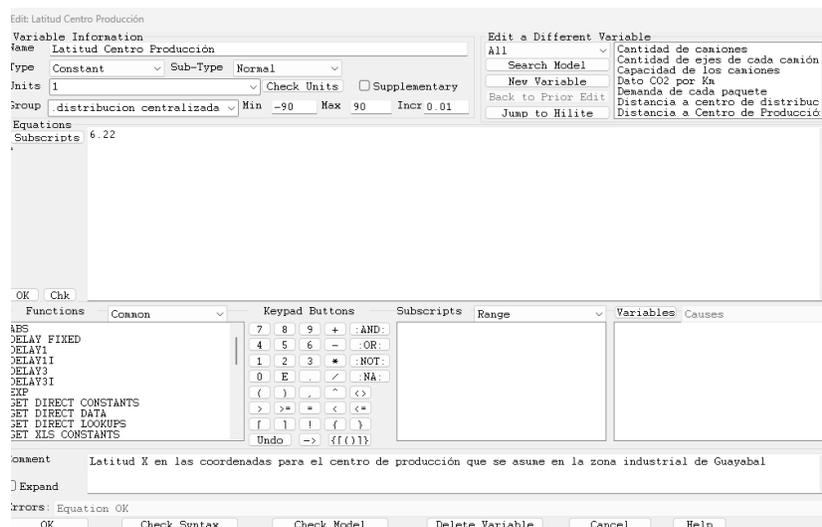
**Figura 16. Parametrización del parqueadero de los camiones. Longitud.**



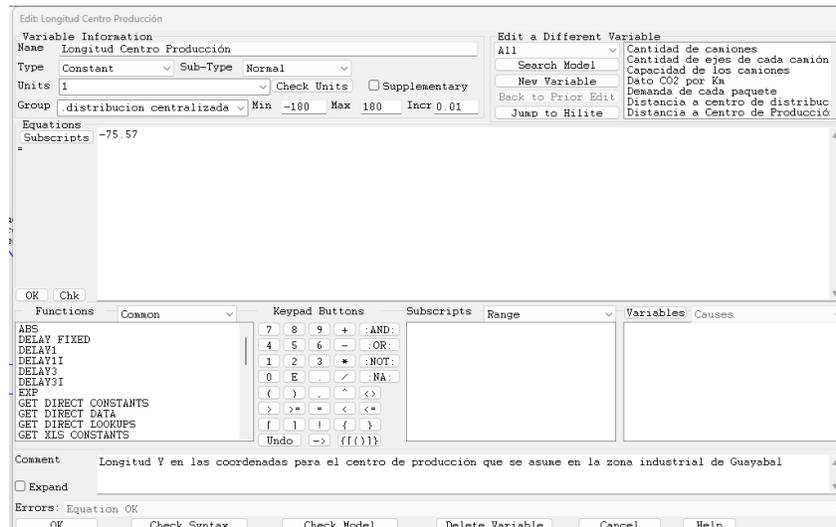
Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

**El centro de producción** se asumió en la zona industrial de Guayabal porque es relativamente cerca al centro. Las figuras 17 y 18 especifican como se hizo.

**Figura 17. Parametrización del centro de producción. Latitud.**



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

**Figura 18.** Parametrización del centro de producción. Longitud

Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Para hallar la distancia al centro de producción aplicó la fórmula de Haversine:

Ubicación del parqueadero de camiones:

Latitud: 6.21 grados

Longitud: -75.58 grados

Ubicación del centro de producción:

Latitud: 6.22 grados

Longitud: -75.57 grados

Sin embargo, para aplicar la fórmula de Haversine es necesario que tanto la latitud como la longitud de cada una de las ubicaciones estén en radianes de la manera que lo muestra la ecuación [5].

$$1 \text{ Radian} = \frac{\pi}{180 \text{ grados}} \quad [5]$$

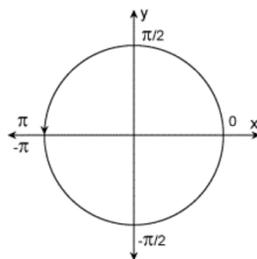
A continuación, se describe el proceso matemático ejecutado:

$$A = \sin^2 \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\left( ( \text{latitud Centro Producción} - \text{latitud Parqueadero de camiones} \right) * \left( \frac{3.1416}{180} \right) \right)}{2} \right) * \cos \left( \text{latitud Centro Producción} \right) * \left( \frac{3.1416}{180} \right) * \cos \left( \text{latitud Parqueadero de camiones} \right) * \left( \frac{3.1416}{180} \right) * \sin^2 \left( \frac{\left( \text{Longitud Centro Producción} - \text{Longitud Parqueadero de camiones} \right) * \left( \frac{3.1416}{180} \right)}{2} \right) \right)$$

$$C = 2 * \text{atan2}(\sqrt{A}, \sqrt{1-A})$$

C se convierte en el ángulo central en radianes entre dos puntos en la superficie de una esfera, la tierra tiene la forma de una esfera, esta se puede dividir en 4 cuadrantes como lo evidencia la figura 19:

**Figura 19.** Tangente inversa de cuatro cuadrantes



Nota. Fuente: (MathWorks, 2024)

Lo que se toma por defecto es el cuadrante dividido quedando  $\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{1-A}}$  está expresado como una serie de intervalo que tiene varias soluciones dependiendo del cuadrante en el que se encuentre el ángulo, porque este afecta el signo de la función según (Cecep Nurul, Khaerul, Aldy Rialdy, & Digital Khrisna, 2016).

Cuadrante I (0° a 90°)

Cuadrante II (90° a 180°)

Cuadrante III (180° a 270°)

Cuadrante IV (270° a 360°)

**Solución 1:** Cuando  $\text{atan2}(x, y)$  tiene en cuenta los signos de cada coordenada determina en qué cuadrante se encuentra el ángulo, donde tanto  $x$  como  $y$  son mayores que cero. Cuando el ángulo está en el primer cuadrante es decir entre  $0$  y  $\frac{\pi}{2}$

$$\text{atan2}(x, y) = \text{atan}\left(\frac{x}{y}\right) \quad [6]$$

**Solución 2:** Cuando el ángulo está en el segundo cuadrante es decir entre  $\frac{\pi}{2}$  y  $\pi$  donde  $x$  es menor que cero mientras que  $y$  es mayor que cero.

$$\text{atan2}(x, y) = \pi + \text{atan}\left(\frac{x}{y}\right) \quad [7]$$

**Solución 3:** Cuando el ángulo está en el tercer cuadrante es decir entre  $-\pi$  y  $-\frac{\pi}{2}$  donde tanto  $x$  como  $y$  son menores que cero.

$$\text{atan2}(x, y) = -\pi + \text{atan}\left(\frac{x}{y}\right) \quad [8]$$

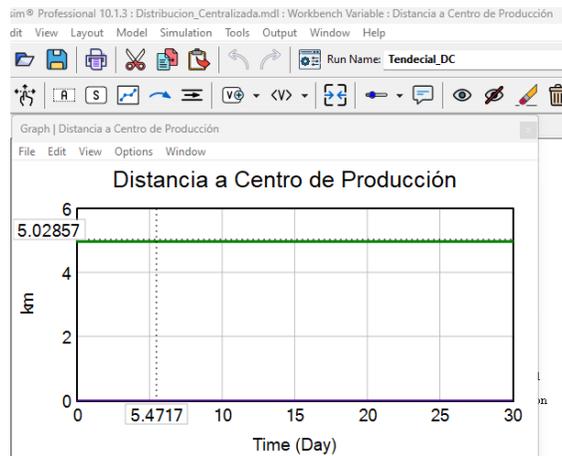
**Solución 4:** Cuando el ángulo está en el cuarto cuadrante es decir entre  $-\frac{\pi}{2}$  y  $0$  donde  $x$  es mayor que cero por lo contrario  $y$  es negativo.

$$\text{atan2}(x, y) = \text{atan}\left(\frac{x}{y}\right) \quad [9]$$

Como las coordenadas elegidas de los corregimientos en Medellín están en el cuarto cuadrante se aplicó la solución 4. A continuación se muestra la formulación en el entorno de Vensim, seguida de la figura 20 que manifiesta el resultado gráfico:

$$\begin{aligned}
 &6371 * (2 * \text{ARCTAN}(\text{SQRT}(\text{SIN}(((\text{Lat centro produccion} - \text{Lat salida camiones}) * 3.1416 / 180) / 2)^2 + \\
 &\text{COS}(\text{Lat centro produccion} * 3.1416 / 180) * \text{COS}(\text{Lat salida camiones} * 3.1416 / \\
 180) * \\
 &\text{SIN}(((\text{Long centro produccion} - \text{Long salida camiones}) * 3.1416 / 180) / 2)^2 \\
 &)/ \\
 &\text{SQRT}(1 - (\text{SIN}(((\text{Lat centro produccion} - \text{Lat salida camiones}) * 3.1416 / 180) / 2)^2 + \\
 &\text{COS}(\text{Lat centro produccion} * 3.1416 / 180) * \text{COS}(\text{Lat salida camiones} * 3.1416 / \\
 180) * \\
 &\text{SIN}(((\text{Long centro produccion} - \text{Long salida camiones}) * 3.1416 / 180) / 2)^2 \\
 &)) \\
 &))
 \end{aligned}$$

**Figura 20.** Resultado gráfico para “Distancia a centro de producción”



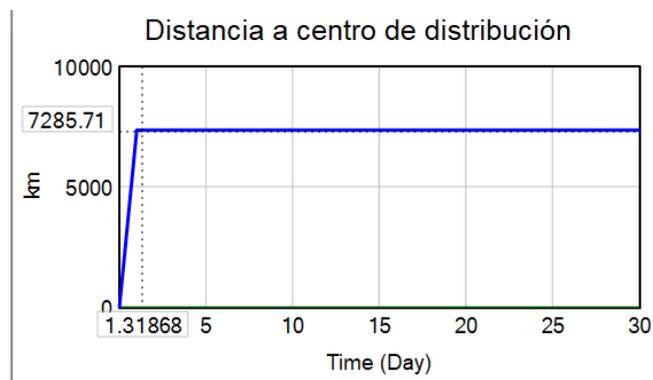
Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Variable “Distancia a centro de distribución”: Para determinar la distancia entre el centro de producción y el centro de distribución se replicó el proceso de extraer las coordenadas desde Google Maps, para luego hallar el resultado con la fórmula Haversine. La figura 21 muestra la gráfica resultante. Vale la pena aclarar que el centro de distribución se ubicó cerca al edificio Coltejer.

Latitud: 6.25 grados

Longitud: -75.56 grados

**Figura 21.** Resultado gráfico para “Distancia a centro de distribución”



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

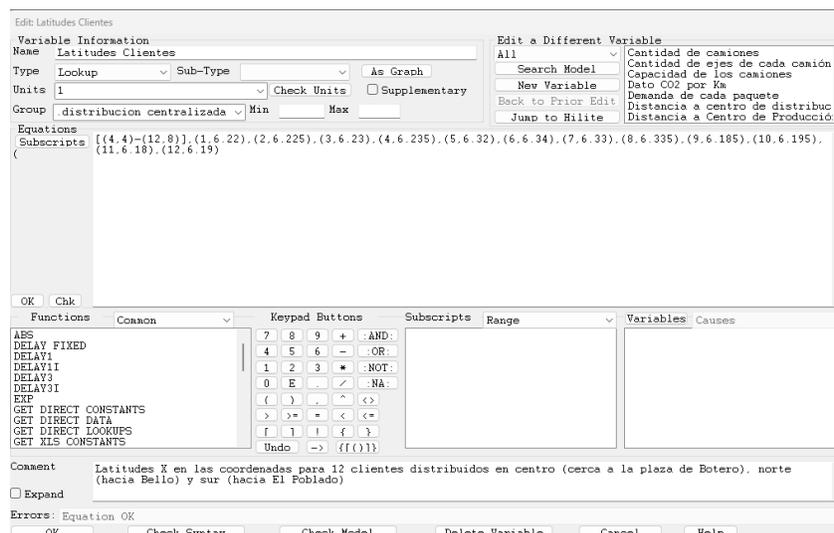
A la variable centro de distribución se le aplicó la función Delay Fixed dada la presunción que la llegada del paquete, equipo, etc. al cliente final son enviados al siguiente día. El Delay no genera periodicidad, sino una demora en un intervalo, que para el caso específico es de 1 día. Gráficamente, esta lógica se expresa con dos líneas perpendiculares a las flechas azules de relación entre las variables. A continuación se expresa la parametrización de esta función:

DELAY FIXED ( {in= el valor de los que entra} , {dtime=valor en x= es un día de retraso es decir que todos los valores se van a ir un día hacia el futuro} , {init=y= es valor en Y que se puso en cero} )

Variable “CO2 por km” es un valor constante que va a estar en unidades grCO2/Km, cifra estandarizada acorde a los datos de (European Environment Agency, 2024).

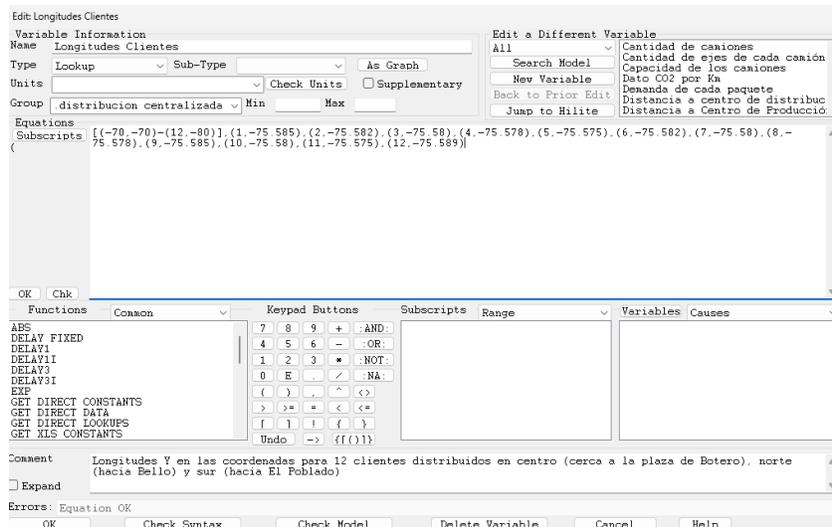
Variable "Distancias a clientes": Para calcular las distancias a los clientes, se utilizó el mismo procedimiento mediante la fórmula de Haversine, tomando las coordenadas de latitud y longitud de cada cliente con respecto al centro de distribución, y luego convirtiendo de grados a kilómetros. En este caso, la fórmula de Haversine permitió obtener la distancia entre el centro de distribución y cada uno de los doce clientes. Para asignar la ubicación correcta a cada cliente, se empleó la función extrapolar de las variables de tipo lookup, que en este caso representaban las latitudes y longitudes de los clientes. Así, por ejemplo, al solicitar la ubicación con  $X = 3$ , se obtenía la latitud o longitud  $Y$  correspondiente al cliente 3, y este mismo procedimiento se repitió hasta obtener toda la información. La latitud y longitud del centro de distribución se mantuvieron constantes, ya que se utilizó el mismo punto de referencia para todos los clientes. Las figuras 22 y 23 señalan la parametrización de las variables lookup “latitud clientes” y “longitud clientes” y la figura 24 evidencia el resultado gráfico del cálculo de distancia.

**Figura 22.** Parametrización de los clientes. Latitud.



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Figura 23. Parametrización de los clientes. Longitud.



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Figura 24. Resultado gráfico para “Distancias a clientes”



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

$d(\text{Centro de Distribución, Distancias Clientes})$

$$= 2 * r * \sin^{-1}(\sqrt{Hav(\text{Latitud Distancias Clientes} - \text{latitud Centro de distribución})} + \cos(\text{latitud Distancias Clientes}) * \cos(\text{latitud Centro de Distribución}) * Hav(\text{Longitud Distancias Clientes} - \text{Longitud Centro de Distribución}))$$

$$d(\text{Centro de Distribución, Distancias Clientes}) = 80.7692 \text{ Km}$$

Variable "input de emisiones de CO<sub>2</sub>": Todo lo que entra en esta variable de flujo debe estar en kilómetros. Además, la cantidad de camiones se debe multiplicar por la suma de las distancias:

Distancia al centro de producción

Distancia al centro de distribución

Distancia a los clientes

La cantidad de camiones se expresa en unidades. Una vez determinado el factor de conversión, que se estableció en gramos de CO<sub>2</sub>, estos gramos deben multiplicarse por la cantidad de camiones, ya que las emisiones de dióxido de carbono se calculan en función de la distancia recorrida. Por ejemplo, si 20 camiones recorren las tres distancias totales, el resultado debe multiplicarse por esos 20 camiones. En conclusión, se multiplica por el factor de conversión de 200 gramos de CO<sub>2</sub> por kilómetro. Al realizar la operación, los kilómetros se anulan, quedando finalmente en gramos de CO<sub>2</sub>. Esta variable de flujo actúa como una tasa de alimentación del sistema, es decir, cuando el modelo se ejecuta, la variable mostrará la razón de alimentación.

A la variable "Input de emisiones de CO<sub>2</sub>" se le aplicó la función Random Normal para evitar un valor constante que implicaría una emisión fija de CO<sub>2</sub>, poco realista dadas las condiciones cambiantes en el tránsito de los camiones. Con esta variabilidad, se introduce "ruido", lo que permite aleatorizar la variable continua de flujo. La figura 25 refleja la parametrización hecha.

```
RANDOM NORMAL ({valor mínimo=0.8}, {valor máximo=1.2}, {mean=1},  
{stdev=desviación estándar=0.1}, {seed=semilla aleatoria=1})
```

**Figura 25.** Parametrización de la variable de flujo “Inputs de CO<sub>2</sub>”

Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

## 7.4 Explicación de las ecuaciones aplicadas en cada variable. Modelo descentralizado.

Para configurar las variables:

Latitudes de los clientes

Longitudes de los clientes

Longitudes de los centros de distribución

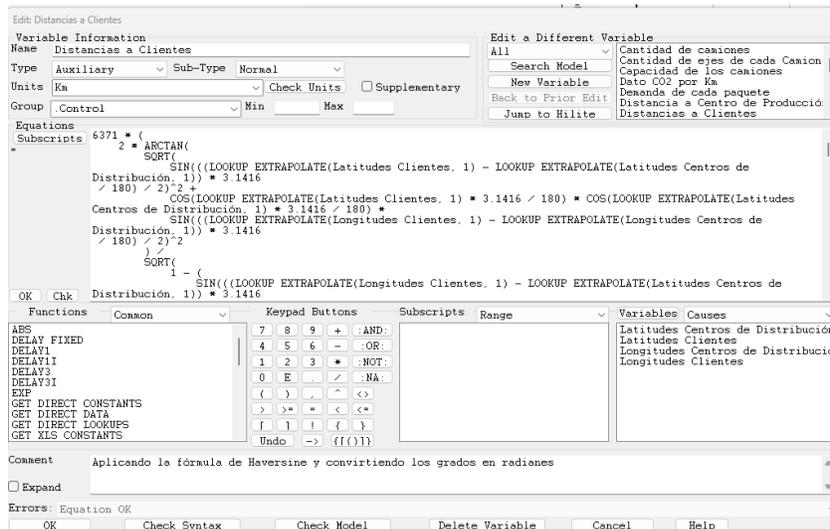
Latitudes de los centros de distribución

Se aplicó la función lookup estableciendo un patrón no lineal. En esta función, el eje X corresponde al número de cliente (input) y el eje Y representa la coordenada específica (output) obtenida de Google Maps, tanto para las latitudes como para las longitudes. Esto permite llamar las posiciones de la matriz creada, seleccionando la ubicación de cada cliente de forma individual. Por ejemplo, se puede extraer la coordenada del cliente uno, del cliente dos, o del cliente doce. El valor X es el número de cliente, mientras que el valor Y corresponde a la coordenada de cada centro de distribución.

Antes de establecer esta relación, se consideró la escala. En el eje X, se definió un intervalo de 1 a 12, ya que se están evaluando 12 clientes en total. Para el eje Y, se estableció un rango de latitudes

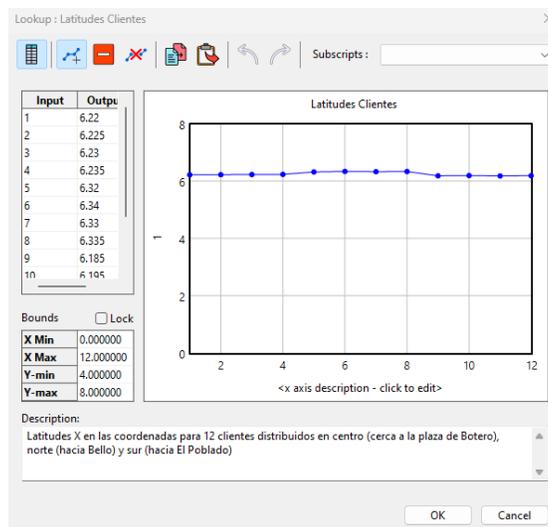
entre 4 y 8, y de longitudes entre -70 y -80. Estos valores no afectan los cálculos directamente, pero permiten visualizar gráficamente el rango de puntos que se están utilizando. La función lookup extrapolate simplemente extrae los datos de la matriz de forma individual, tal como lo muestran las figuras 26 y 27.

**Figura 26.** Parametrización de la variable “Distancias a clientes”.



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

**Figura 27.** Resultado gráfico de la función lookup para “latitudes clientes”.



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Para el modelo descentralizado se asignaron 3 centros distribución abarcando la zona urbana aledaña a los 12 clientes:

- 1) Centro de distribución centro, ubicado cerca de la Plaza de Botero para clientes próximos al edificio Coltejer con coordenadas (6.22, -75.582), (6.225, -75.582), (6.23, -75.58) y (6.235, -75.578).
- 2) Centro de distribución norte, ubicado cerca del Municipio de Bello para clientes próximos al centro Comercial Fabricato con coordenadas (6.32, -75.575), (6.34, -75.582), (6.33, -75.58), (6.335, -75.578).
- 3) Centro de distribución sur, ubicado cerca del Municipio de Sabaneta y El Poblado para clientes próximos a dichas localizaciones con coordenadas (6.185, -75.585), (6.195, -75.58), (6.18, -75.575), (6.19, -75.589).

Además, para la variable “Distancias clientes”, se aplicó un procedimiento similar al modelo centralizado, pero en este caso, al haber tres centros de distribución, cada cliente fue ubicado estratégicamente con relación al centro de distribución más cercano. Las coordenadas resultantes también se organizaron en un arreglo. En el modelo centralizado, solo se consideraba la distancia a un único centro de distribución con su latitud y longitud específicas. Sin embargo, en el modelo descentralizado, el arreglo incluye las coordenadas de los tres centros de distribución.

Se vuelve a aplicar la fórmula de Haversine, pero ahora la ecuación es más extensa, ya que considera los tres centros de distribución. Cada uno de los 12 clientes se asigna a uno de los centros, con cuatro clientes por cada centro de distribución. En el modelo centralizado, se realizaba la comparación trayendo un valor único de una matriz. En cambio, en el modelo descentralizado, se toman en cuenta dos valores provenientes de dos matrices diferentes.

Se aplica la función lookup extrapolate, que extrae los valores necesarios de ambas matrices. Por ejemplo, se obtiene la latitud del cliente 1 y se le resta la latitud del centro de distribución 1. Este proceso se repite para las coordenadas de cada centro de distribución respecto al cliente más cercano.

#### Variable "Distancias a Centros de Distribución"

1 Centro de Distribución Centro Coordenas: (6.25, -75.56)

2 Centro de Distribución Norte Coordenas:( 6.32, -75.55)

3 Centro de Distribución Sur Coordenas: (6.19, -75.58)

$d(\text{Distancia Clientes, Distancias Centros de Distribución,})$

$$= (6371\text{km})(2$$

$$* \sin^{-1} \left( \sqrt{\sin^2 \left( \left( \frac{(\text{latitud Centros de Distribución} - \text{latitud Distancias Clientes})}{2} \right) * \left( \frac{3.1416}{180} \right)} \right)$$

$$* + \cos((\text{latitud Centros de distribución}) * \left( \frac{3.1416}{180} \right))$$

$$* \cos((\text{latitud Distancias Clientes}) * \left( \frac{3.1416}{180} \right)) *$$

$$* \sin^2 \left( \left( \frac{(\text{Longitud Centros de Distribución} - \text{Longitud Distancias Clientes})}{2} \right) * \left( \frac{3.1416}{180} \right) \right)$$

$$d(\text{parqueadero de camiones, centro de producción}) = 5.02857 \text{ km}$$

### 7.5 Diseño de los escenarios. Validación de los modelos.

En el contexto de simulaciones de sistemas dinámicos utilizando Vensim, es fundamental generar diferentes escenarios para anticipar el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones. Estos escenarios permiten evaluar cómo las variables clave, como las emisiones de CO2 en el transporte, pueden cambiar dependiendo de factores como la demanda de equipos, paquetes, etc la capacidad de los camiones o el volumen de carga. Mediante la creación de escenarios optimistas, tendenciales y pesimistas, es posible identificar patrones, prever riesgos y tomar decisiones más informadas para optimizar los recursos y reducir el impacto ambiental.

Escenario optimista: A medida que aumenta el número de ejes en un camión, se incrementa su tamaño y capacidad de carga. Un camión más grande puede transportar más equipos, paquetes, etc lo que reduce el número de desplazamientos necesarios. Si la demanda de equipos aumenta, pero se utilizan camiones de cuatro ejes, las emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte disminuirán, ya que se necesitarán menos camiones para cubrir la demanda.

Escenario tendencial: Este escenario representa la situación más probable y se utiliza como referencia, ya que refleja la tendencia actual. Es el punto de partida para observar cómo evoluciona el sistema sin cambios significativos en las variables.

Escenario pesimista: En este caso, si se aumenta el volumen por equipo, será necesario utilizar más camiones, ya que menos equipos podrán caber en cada camión. Un mayor volumen implica más desplazamientos y, por lo tanto, un incremento en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Si el slider del volumen se ajusta al valor máximo, significa que un solo equipo ocuparía un metro cúbico de espacio, lo que generaría un aumento considerable en la cantidad de camiones necesarios y, en consecuencia, en las emisiones.

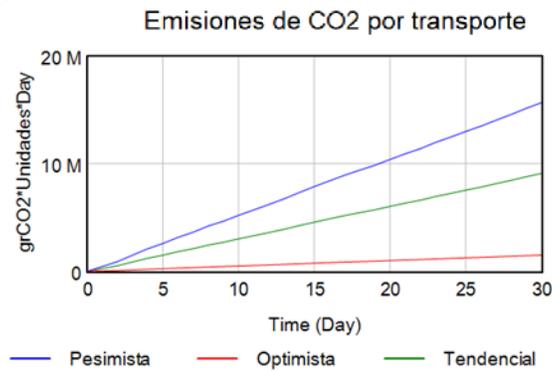
Todo lo previo, fue insumo para realizar el análisis de robustez. Por ende, la tabla 2 muestra la configuración de los valores y las figuras 28 a la 31 exhiben las variables de flujo y nivel para los dos modelos.

**Tabla 2.** Valores para el análisis de robustez.

<b>Constante</b>	<b>Pesimista</b>	<b>Tendencial</b>	<b>Optimista</b>
Demanda de equipos (unidades)	5000	5000	5000
Volumen por equipo (m <sup>3</sup> )	0,025	1,00E-06	1,00E-06
Cantidad ejes vehículo (unidades)	2	2	4
<b>Flujo</b>			
Promedio Inputs CO <sub>2</sub> centralizado (grCO <sub>2</sub> )	524000	304258	50710
Promedio Inputs CO <sub>2</sub> descentralizado (grCO <sub>2</sub> )	310910	180528	30088
<b>Nivel</b>			
Rango acumulación emisiones por transporte centralizado (M grCO <sub>2</sub> al mes)	15,66	9,09	1,51
Rango acumulación emisiones por transporte descentralizado (M grCO <sub>2</sub> al mes)	9,29	5,39	0,89

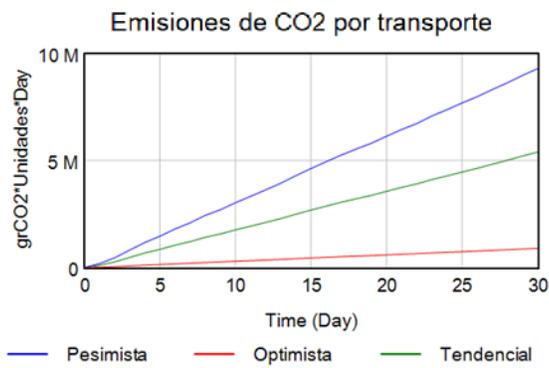
Nota. Elaboración propia.

**Figura 28.** Escenarios en la variable de nivel. Modelo centralizado.



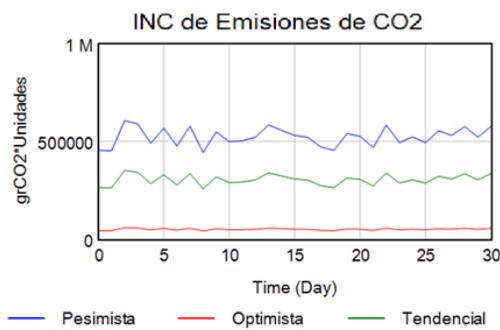
Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

**Figura 29.** Escenarios en la variable de nivel. Modelo descentralizado

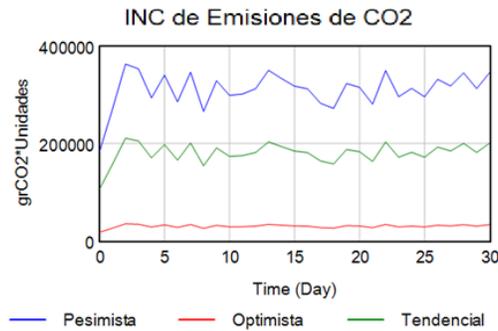


Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

**Figura 30.** Escenarios en la variable de flujo. Modelo centralizado.



Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

**Figura 31.** Escenarios en la variable de flujo. Modelo descentralizado.

Nota. Creada en Vensim PRO (Imagen propia).

Es importante, en este punto, resaltar las siguientes consideraciones: la demanda de equipos en unidades no fue modulada pues el límite inferior es de cero (no hay demanda) con lo cual las variables de flujo y nivel serán también de cero, para el escenario pesimista se mantuvo todo constante y se especificó el volumen de cada equipo en 0,025 metros cúbicos (para mantener cercanía gráfica y numérica con los demás), para el escenario optimista se mantuvo todo constante y se aumentó la cantidad de ejes de los camiones de 2 a 4.

## 7.6 Comprobación estadística de la hipótesis

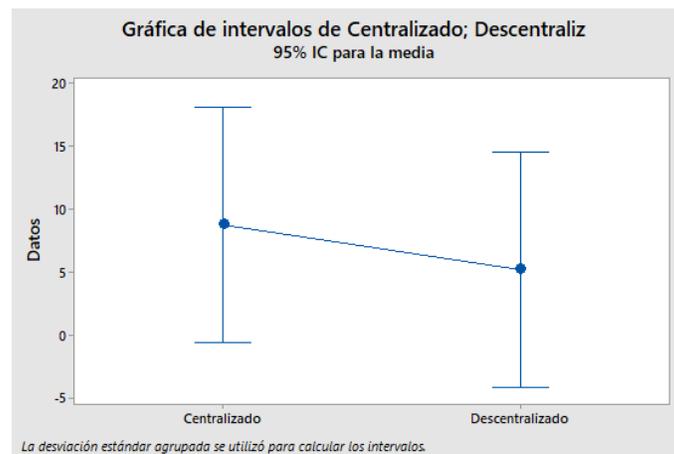
Luego de generados los dos modelos, cada uno con sus tres escenarios, se procedió a la comprobación de la hipótesis que enmarca a esta investigación donde: H0 la distribución descentralizada no presenta un cambio significativo en la reducción de emisiones atmosféricas y H1 la distribución descentralizada constituye un cambio significativo en la reducción de emisiones atmosféricas respecto al método tradicional. Por tal motivo, se inició por ejecutar una ANOVA en el entorno de Minitab 18 (asumiendo un IC del 95% bilateral, varianzas iguales, el tipo de modelo como tratamiento y los escenarios como resultados) tal como lo muestra la tabla 3 y la figura 32.

**Tabla 3.** ANOVA para la variable de nivel según los dos modelos

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	1	19,05	19,05	0,56	0,495
Error	4	135,62	33,91		
Total	5	154,67			

Nota. Creada en Minitab 18 con los datos provenientes de Vensim

**Figura 32.** Gráfica de intervalos para los dos modelos



Nota. Creada en Minitab 18 con los datos provenientes de Vensim

El p valor de  $0.495 > 0.05$  sugiere que la diferencia estadística no es significativa como para desvirtuar la hipótesis nula. Para cerciorarse con mayor veracidad de los resultados, se procedió a generar un análisis post hoc por el método de Tukey, lo que originó la tabla 4.

**Tabla 4.** Análisis post hoc por el método de Tukey

Factor	N	Media	Agrupación
Centralizado	3	8,75	A
Descentralizado	3	5,19	A

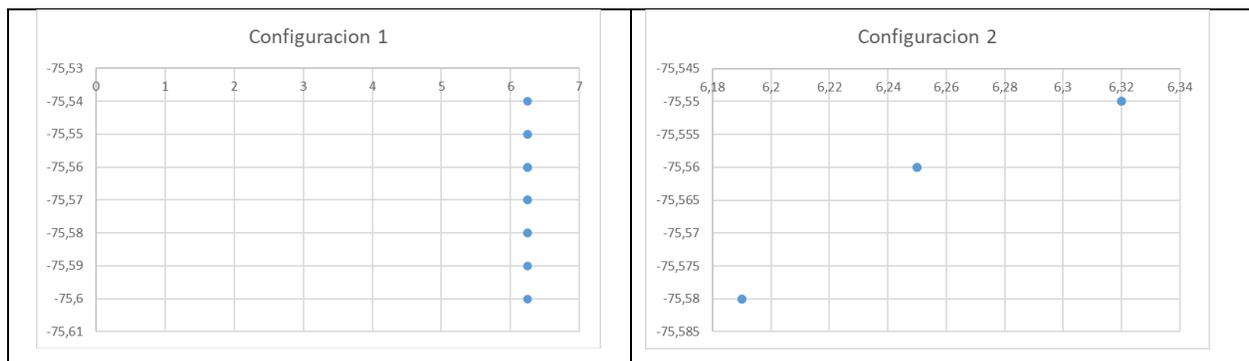
Nota. Creada en Minitab 18 con los datos provenientes de Vensim

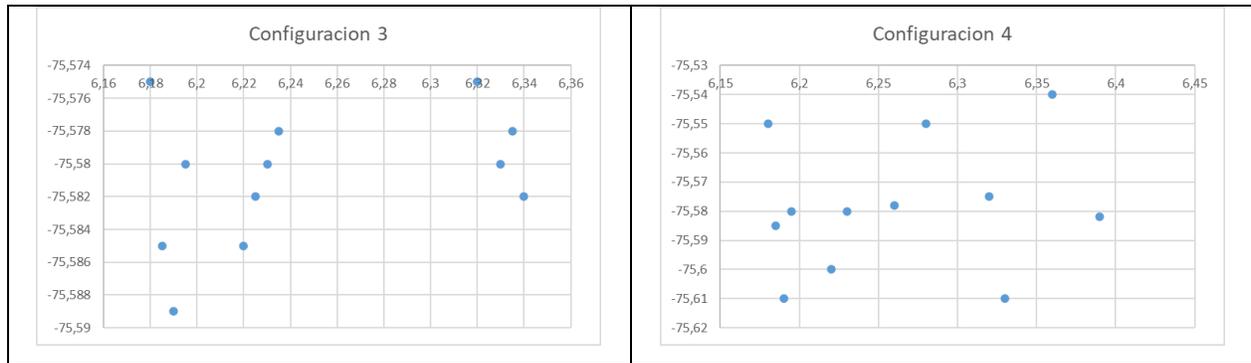
La columna de agrupación, con ambos valores en A, indican que los dos modelos se pueden considerar muy similares. En definitiva, para esta investigación se valida la hipótesis H0.

Acto seguido, se procede a evaluar el desempeño comparativo del sistema entre los dos modelos, es decir, determinar bajo cuales condiciones específicas conviene utilizar el centralizado o el descentralizado, respectivamente. Teniendo en cuenta que las constantes modulables que pueden dar un comportamiento disímil son las relativas a las coordenadas en latitud y longitud (pues las demás expresan las mismas correlaciones), se generaron cuatro configuraciones diferentes “moviendo” la ubicación de los clientes en patrones bien específicos de interés, tal como lo muestra la figura 33.

- Configuración 1: Dejando los nodos muy juntos mediante la parametrización de todas las latitudes en un mismo valor de 6.25, o sea una separación únicamente en Y.
- Configuración 2: Agrupando los nodos en clústeres para lo que se alternaron las coordenadas con referencia a las de los tres centros de distribución del modelo descentralizado.
- Configuración 4: Teniendo en cuenta el escenario tendencial trabajado anteriormente.
- Configuración 5: Aleatorizando el escenario tendencial para incrementar la distancia y dispersión entre los clientes.

**Figura 33.** Diagramación de las 4 configuraciones para el desempeño del sistema





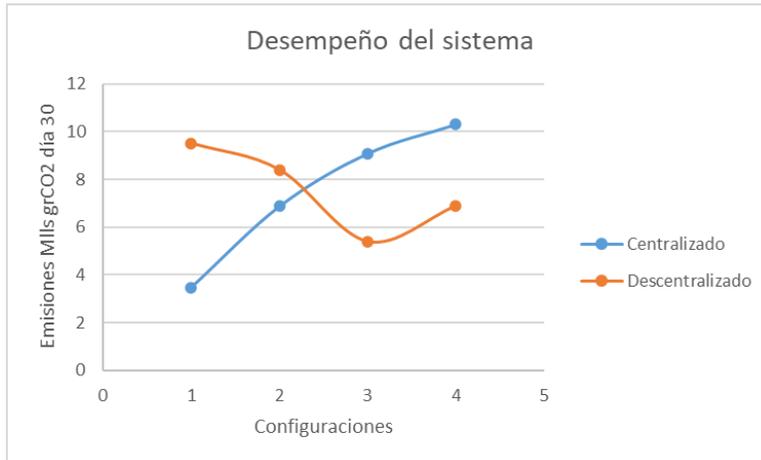
Nota. Elaborado en Excel. Fuente propia.

Una vez determinadas las coordenadas de cada configuración para cada uno de los 12 clientes, se elabora una gráfica comparativa para los dos modelos, donde el eje x representa la configuración y el eje y el dato para el día 30 de la variable de nivel de Vensim, es decir, la cantidad de gramos de dióxido de carbono acumulada para dicho momento. La tabla 5 y la figura 34 muestra el resultado.

**Tabla 5.** Valores resultantes de la evaluación del desempeño del sistema

Modelo	Emisiones Mills grCO2 día 30			
	Conf 1 (Todas las latitudes a 6.25)	Conf 2 (Latitudes y longitudes intercaladas a centros descentralizados)	Conf 3 (Inicial)	Conf 4 (Inicial con aleatorización +/- 0,2)
Centralizado	3,46	6,87	9,09	10,31
Descentralizado	9,50	8,39	5,39	6,88

Nota. Elaborado en Excel. Fuente propia.

**Figura 34.** Diagrama de líneas comparativo entre los dos modelos

Nota. Elaborado en Excel. Fuente propia.

Es posible analizar que entre más agrupados se encuentren los clientes, conviene usar un modelo centralizado (incluso cuando existen clústeres pero entre ellos no hay una distancia significativa). No obstante, en la medida que se empieza a percibir una mayor dispersión entre los nodos a visitar, es mejor recurrir al modelo descentralizado. Entretanto, la curvatura ascendente al final de la línea naranja señala que si la dispersión no gravita alrededor de los centros de distribución igual se generan mayores desplazamientos y, por lo tanto, mayor contaminación. En este último caso, si se supera cierto umbral se requeriría agregar un cuarto centro de distribución.

## 8 Discusión

A primera vista, los datos sugieren que el modelo descentralizado genera menos emisiones de CO<sub>2</sub> en los tres escenarios. En el escenario optimista, por ejemplo, la acumulación de emisiones mensuales por transporte es significativamente menor (0,89 M grCO<sub>2</sub>) en comparación con (1,51 M grCO<sub>2</sub>). Esto se podría interpretar como una clara ventaja del sistema descentralizado. Sin embargo, esta reducción no es suficiente para considerarse estadísticamente significativa según los resultados del ANOVA, donde el valor p es mayor a 0.05 ( $p = 0.495$ ), lo que implica que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ).

Una posible interpretación de estos resultados es que, si bien el modelo descentralizado muestra una tendencia hacia la reducción de emisiones, las diferencias observadas no son lo suficientemente grandes o consistentes como para considerarse un cambio significativo desde un punto de vista estadístico. Esto podría deberse a que, aunque el sistema descentralizado optimiza la distribución de los camiones y reduce desplazamientos, el impacto ambiental de estas mejoras no es dramático cuando se consideran las variaciones en la demanda o el volumen de los equipos transportados.

Correlacionar estos hallazgos con investigaciones previas es clave. Estudios similares sobre la eficiencia de los sistemas logísticos descentralizados muestran resultados mixtos. Por un lado, se ha demostrado que los sistemas distribuidos tienden a ser más flexibles y eficientes en términos de tiempos de respuesta y reducción de costos operacionales. Sin embargo, el impacto ambiental depende en gran medida de factores específicos como el tamaño de la flota, la tecnología de los camiones y la optimización de las entregas e inventarios, lo que podría explicar por qué los resultados en esta investigación no muestran una ventaja estadísticamente significativa.

Desde un punto de vista crítico, estos resultados resaltan la importancia de considerar no solo el tipo de sistema (centralizado vs. descentralizado), sino también cómo se implementa en la práctica. Por ejemplo, el escenario optimista con camiones de cuatro ejes en el modelo descentralizado muestra una mejora significativa en la reducción de emisiones (30088 grCO<sub>2</sub> en el flujo

descentralizado frente a 50710 grCO<sub>2</sub> en el centralizado). Esto sugiere que, con vehículos más eficientes y una mejor gestión de la demanda, el sistema descentralizado tiene el potencial de ser más amigable con el medio ambiente. No obstante, si las condiciones del sistema no son óptimas, como en el escenario pesimista, los beneficios del modelo descentralizado pueden no materializarse del todo.

Otro dilema especialmente relevante considera la disposición geográfica de los clientes. La logística centralizada es más conveniente en escenarios donde los clientes están agrupados, mientras que un enfoque descentralizado tiende a ser más eficiente cuando existe una mayor dispersión entre los nodos de distribución.

La lógica detrás de esta afirmación radica en cómo se gestionan las rutas y los recursos en cada modelo. En un sistema centralizado, las entregas se realizan desde un único punto de distribución. Esto puede resultar en menores costos y emisiones de CO<sub>2</sub> cuando los clientes están próximos entre sí. Al agrupar las entregas en una misma ruta, se minimizan las distancias recorridas y se optimizan los recursos utilizados. En contraposición, en un modelo descentralizado, donde hay múltiples puntos de distribución, la cobertura es mayor, permitiendo una respuesta ambiental en casos que se requieran recorridos muy diversos.

Esta dinámica resuena con la hipótesis nula (H<sub>0</sub>), que postula que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los dos modelos logísticos en función de su rendimiento ambiental. Los puntos de inflexión cruzados al generar las cuatro configuraciones de prueba señalan que existe una alta sensibilidad de la arquitectura de la red logística respecto a los puntos a ser atendidos, por lo que no se puede decir que simplemente una alternativa es mejor que la otra.

En consideración, para abordar el problema de determinar un punto de distribución óptimo que minimice las distancias hacia todos los clientes, es esencial considerar un enfoque tanto matemático como basado en teoría de grafos. Desde una perspectiva matemática, la estimación de un punto de distribución óptimo a menudo se asocia con la búsqueda del centroide de un conjunto de puntos, que en este caso serían las ubicaciones de los clientes. El método de K-means es uno de los

algoritmos más utilizados para este propósito. Este método agrupa los nodos en clústeres y posteriormente identifica el centroide de cada clúster, proporcionando una ubicación que minimiza la suma de las distancias entre los nodos y el centro. Este enfoque permite no solo la optimización de las rutas de entrega, sino también la posibilidad de identificar un número reducido de centros de distribución que pueden atender de manera más eficiente a los clientes.

Desde el ángulo de la teoría de grafos, se puede abordar la determinación de un punto de distribución óptimo utilizando el algoritmo de Steiner. El mismo, se centra en encontrar el árbol de recubrimiento mínimo que conecta todos los nodos (clientes). A diferencia de un enfoque que solo se basa en la distancia entre puntos individuales, el algoritmo de Steiner permite la introducción de nodos adicionales (centros de distribución) que pueden mejorar la conectividad y la eficiencia del sistema.

La ubicación de los clientes en una red logística, especialmente en el contexto de una empresa de retail, debe considerarse una variable dinámica debido a diversos factores que pueden influir en la movilidad y redistribución de la demanda. Este enfoque dinámico es crucial para la optimización de la logística y la eficiencia operativa, ya que la ubicación de los clientes no es estática, sino que puede variar en función de múltiples circunstancias.

Así, uno de los factores más significativos que afectan la ubicación de los clientes es el comportamiento del consumidor. En el sector retail, los patrones de compra pueden cambiar rápidamente debido a tendencias de mercado, promociones o cambios en la preferencia del consumidor. Por ejemplo, durante temporadas festivas o eventos especiales, la demanda puede concentrarse en áreas geográficas específicas, lo que requerirá ajustes en la red de distribución para garantizar que los productos estén disponibles donde más se necesitan. Esto implica que la ubicación de los clientes puede experimentar variaciones significativas a lo largo del tiempo.

Además, las condiciones demográficas y socioeconómicas también juegan un papel importante en la movilidad de los clientes. Cambios en la población, como la migración hacia áreas urbanas o suburbanas, pueden afectar la distribución geográfica de la base de clientes de una empresa de

retail. Por ejemplo, si una ciudad experimenta un crecimiento demográfico, la ubicación de los clientes puede extenderse a nuevas áreas que antes no eran parte del mercado objetivo de la empresa. Esto resalta la necesidad de que las empresas mantengan actualizados sus modelos de localización y distribución, adaptándose a la evolución de la población y la demanda.

Para abordar esta variabilidad dinámica, las empresas de retail pueden implementar sistemas de gestión logística que utilicen datos en tiempo real para monitorear la ubicación de los clientes y ajustar las estrategias de distribución en consecuencia. Por ejemplo, mediante el uso de herramientas de análisis de datos y modelos predictivos, las empresas pueden identificar tendencias emergentes en la ubicación de los clientes y adaptar su red de distribución para satisfacer esas demandas cambiantes. Además, la integración de tecnologías como GPS y sistemas de seguimiento puede proporcionar información valiosa sobre el comportamiento de los clientes y su movilidad, permitiendo a las empresas optimizar sus rutas de entrega y puntos de distribución.

Por otra parte, en el contexto de las empresas que no operan en el sector retail, los lugares de entrega suelen ser más fijos y predecibles, pues los clientes tienen ubicaciones establecidas, tales como las bodegas o puntos de venta. Sin embargo, incluso en estos casos, las prácticas logísticas pueden adaptarse y evolucionar para optimizar la eficiencia y reducir costos.

Una tendencia relevante en la logística moderna es la gestión de la cadena de abastecimiento, que busca maximizar la eficiencia del transporte y la entrega de productos mediante la reducción de tiempos de tránsito y la optimización de recursos. Esto implica diseñar procesos que minimicen las manipulaciones intermedias y permitan que los productos se muevan rápidamente desde su origen hasta su destino final, ya sea un punto de venta, un almacén regional o directamente al cliente.

Este enfoque pone énfasis en la planificación y coordinación de cada etapa de la cadena de abastecimiento, desde la producción hasta la entrega final. Las empresas pueden lograr mayores niveles de eficiencia al optimizar rutas de transporte, sincronizar las entregas con la demanda dinámica y aprovechar tecnologías avanzadas para gestionar inventarios en tiempo real. Esto es especialmente valioso en sectores donde el tiempo es un factor crítico, como en la distribución de

bienes perecederos o en escenarios donde los productos son esenciales para procesos de fabricación just-in-time.

En definitiva, todos los argumentos previamente mencionados inciden en la aceptación de la hipótesis nula dado que, es posible que incluso una empresa deba alternarse entre usar el modelo centralizado o descentralizado por periodicidades específicas; haciendo que no se pueda desestimar alguno de los dos.

Redondeando, el análisis y modelado en Vensim de un sistema logístico centralizado y uno descentralizado no solo ilustra las diferencias en el rendimiento ambiental, sino que también pone de manifiesto un desafío fundamental en la Gestión de la Tecnología y la Innovación (GTI). Al haber llevado a cabo una evaluación comparativa entre estos modelos, se evidencia cómo las decisiones logísticas pueden influir en el desempeño ambiental y, al mismo tiempo, reflejar la capacidad de las empresas para integrar avances tecnológicos en sus operaciones.

Un modelo centralizado, aunque eficiente en términos de emisiones cuando los clientes están agrupados, puede carecer de la flexibilidad necesaria para adaptarse a cambios en la demanda o en la ubicación de los clientes. Esto resalta una gestión deficiente del conocimiento, ya que las empresas pueden no estar utilizando tecnologías de la información para optimizar sus operaciones en función de datos dinámicos, como la ubicación de los clientes o las condiciones del tráfico. Por otro lado, el modelo descentralizado, que muestra potencial para mejorar la sostenibilidad en escenarios de dispersión de clientes, implica poseer un conocimiento avanzado sobre la optimización de rutas y la gestión de flotas, lo que puede estar implícito en el uso de algoritmos de inteligencia artificial. Omitir este rubro no solo afecta la competitividad a corto plazo, sino que también impide la creación de valor a largo plazo, lo que es esencial en un entorno empresarial que cada vez más prioriza la sostenibilidad.

## 9 Conclusiones

### 9.1 Con relación a las variables que deben estar presentes en el modelo dinámico

Cantidad de camiones: Esta variable fue fundamental para estimar los recursos logísticos necesarios para cumplir con la entrega de los equipos, paquetes, etc teniendo en cuenta tanto la capacidad de carga de cada camión (dada por la cantidad de ejes), como la demanda y volumen diario. La fórmula implementada permitió calcular la cantidad óptima de camiones redondeada, asegurando que el modelo sea práctico y adaptable a diferentes escenarios de demanda.

Cantidad de ejes y capacidad de los camiones: La clasificación de los camiones por número de ejes y su capacidad de carga asociada (en m<sup>3</sup>) proporcionó una base sólida para evaluar la eficiencia del transporte. La implementación de una condición que ajusta la capacidad de carga según el tipo de camión permitió al modelo adaptarse dinámicamente a la configuración de la flota, logrando mayor precisión en las simulaciones de carga y distribución.

Emisiones de CO<sub>2</sub>: La incorporación de una estimación estándar de CO<sub>2</sub> emitido por kilómetro para cada camión (200 grCO<sub>2</sub>/km) permitió cuantificar el impacto ambiental del transporte. Esto proporciona una visión integrada de sostenibilidad, lo que es crucial para evaluar no solo la eficiencia operativa, sino también el cumplimiento de normativas ambientales.

Distancias calculadas por la fórmula de Haversine: Las distancias calculadas entre los centros de producción, distribución y los clientes mediante la fórmula de Haversine ofrecieron una aproximación precisa de los trayectos. Esto resultó en una mayor exactitud al estimar tanto el tiempo de transporte como las emisiones de CO<sub>2</sub>. El uso de esta fórmula permitió obtener distancias geodésicas, fundamentales en la logística de distribución y en la optimización de rutas.

Demora por configuración de equipos y logística: Al tener en cuenta la demora asociada con la configuración de los equipos, el modelo es más realista y representa mejor las condiciones operativas reales. Este ajuste permite planificar mejor los tiempos y recursos necesarios para las

actividades logísticas, asegurando que los tiempos de entrega reflejen los desafíos reales del proceso.

Aparte de la inclusión de las variables, es relevante mencionar que la agregación de ruido usando la función RANDOM NORMAL (ya que el software no cuenta con t student para  $n < 30$ ) al flujo repercutió en la precisión del modelo, pues aunque las distancias se mantengan constantes, la cantidad de emisiones generadas no (dados factores dinámicos como el tráfico, los semáforos, las paradas, el clima, las pendientes en el terreno, etc., que afectan tanto los tiempos de trayecto como la fuerza requerida en los motores y con ello la cantidad de CO<sub>2</sub>). Cabe destacar que en Vensim existen otras funciones random como:

Random Binomial y Negative Binomial: es discreta, no se puede aplicar.

Random Exponencial: se puede aplicar, pero envuelve en tendencia completamente creciente o decreciente.

Random Gamma: se puede aplicar, pero con parámetros más complejos de forma y escala.

Random Lookup: no se puede aplicar, pues la predecesora tiene que ser estrictamente una variable de este tipo.

Random Pink Noise: se puede aplicar, pero su uso se extiende mayormente a las señales biológicas o eléctricas.

Random Poisson: es discreta, no se puede aplicar.

Random Triangular: se puede aplicar, pero solo en contextos de optimista, pesimista y más probable.

Random Uniform: es discreta, no se puede aplicar.

Random Weibull: se puede aplicar, pero se asocia más con fenómenos de resistencia de materiales a lo largo del tiempo.

## 9.2 Con relación a la utilidad de establecer relaciones no lineales

Las relaciones no lineales permiten capturar la naturaleza compleja de muchos sistemas, donde los cambios en las variables no se comportan de manera proporcional. En el ámbito de las redes logísticas, los incrementos en la cantidad de clientes o en las distancias entre nodos no siempre generan un aumento lineal en los costos o en las emisiones de CO<sub>2</sub>, sino que pueden seguir patrones mucho más complejos. La introducción de funciones no lineales refleja mejor este comportamiento, permitiendo una mayor precisión en la modelización.

Cálculo de distancias y limitaciones: Aunque el modelo aplica la fórmula de Haversine, esta técnica se limita a calcular el trayecto más corto entre dos puntos en la superficie curva de la Tierra, ignorando factores como pendientes o las calles y rutas alternativas. Esta simplificación introduce una distorsión en los resultados, ya que no se modelan los trayectos reales que los vehículos pueden recorrer. Esto afecta la precisión del análisis, especialmente en entornos urbanos complejos donde las calles y carreteras rara vez siguen una línea recta, obligando a los vehículos a tomar rutas más largas o menos eficientes. Así, aunque la distancia Haversine proporciona una buena aproximación para distancias directas, las condiciones reales pueden generar discrepancias considerables en los tiempos de viaje y las emisiones.

Complejidad algorítmica y notación asintótica: La complejidad algorítmica también es un factor clave en el desempeño del modelo. A medida que se incrementa el número de nodos o la cantidad de variables que el sistema debe procesar, se requiere mayor poder computacional. La complejidad de un algoritmo se puede expresar mediante la notación asintótica, que describe cómo se comporta el tiempo de ejecución o el uso de recursos conforme crece el tamaño del problema. Por ejemplo, un algoritmo con complejidad  $O(n^2)$  implica que el tiempo de procesamiento se cuadruplica cuando se duplican las entradas, lo que puede volverse insostenible en sistemas a gran escala. Un buen diseño del modelo debe optimizar estas relaciones para evitar que la ejecución se vuelva prohibitiva a medida que aumentan las variables o la cantidad de nodos, optando por algoritmos más eficientes (por ejemplo, con complejidades  $O(n \log n)$  o  $O(n)$ ). La identificación de estos

patrones ayuda a garantizar que el modelo no solo sea preciso, sino también escalable y manejable en términos de tiempo y recursos.

**Entropía y otras métricas:** Al introducir relaciones no lineales, también surgen nuevas métricas para medir la complejidad de la red. La entropía es una de ellas, ya que mide el grado de incertidumbre o dispersión en la distribución de los nodos. Una alta entropía indica una mayor dispersión de los puntos en el espacio, lo que dificulta la optimización de las rutas. Además, otras métricas como el coeficiente de variación permiten cuantificar la variabilidad relativa en el sistema, lo que es crucial cuando las condiciones externas, como el tráfico o las condiciones climáticas, afectan de manera desigual a los distintos nodos. Este tipo de análisis proporciona un marco para entender cómo la dispersión y la incertidumbre en los datos impactan en la eficiencia de los modelos centralizados y descentralizados, ayudando a identificar el tipo de estrategia logística más adecuada.

### **9.3 Con relación a la generación de los escenarios**

**Demanda de equipos y variables asociadas:** La demanda de equipos se mantuvo constante en todos los escenarios, ya que el límite inferior es cero, lo que implicó que la salida daría también cero. Esto indica que las diferencias observadas en las emisiones y acumulaciones de CO<sub>2</sub> no fueron causadas por variaciones en la demanda de equipos, sino por otros factores.

**Escenario Pesimista:** En el escenario pesimista, se mantuvieron constantes todos los parámetros, excepto el volumen por equipo, que se estableció en 0,025 metros cúbicos para mantener la cercanía gráfica y numérica con los otros escenarios. Este valor, aunque bajo comparado con el escenario optimista, resultó en una acumulación considerable de emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que reflejó una huella de carbono más alta que en el escenario optimista.

**Escenario Optimista:** En el escenario optimista, se mantuvieron constantes todos los parámetros y se incrementó la cantidad de ejes de los camiones de 2 a 4. Este ajuste permitió una reducción significativa en las emisiones de CO<sub>2</sub>, tanto en el flujo centralizado como descentralizado. La

mayor cantidad de ejes, significó camiones con mayor capacidad lo que contribuyó a una mayor eficiencia en el transporte y, por lo tanto, a una disminución de las emisiones acumuladas.

De otra parte, los modelos mostraron mayor sensibilidad al cambio en el volumen de los equipos que a la cantidad de ejes. Ese fue el motivo por el cual solo se moduló el valor inicial de 0,000001 m<sup>3</sup> a 0.025 m<sup>3</sup>, pues de lo contrario, el escenario pesimista se alejaría demasiado de los otros dos impidiendo una buena interpretación gráfica y numérica en los resultados.

En contraste, uno de los métodos más comunes para generar múltiples escenarios y medir la incertidumbre es la simulación de Montecarlo. Esta práctica permite realizar variadas simulaciones aleatorias basadas en la variabilidad de los parámetros de entrada, proporcionando así una imagen clara de los posibles resultados.

Al generar un gran número de escenarios simulados, cada uno basado en diferentes combinaciones de valores para las variables inciertas, es posible calcular probabilidades para una variedad de resultados. Esto permite identificar no solo el resultado más probable, sino también un rango de posibles resultados y la probabilidad asociada con cada uno de ellos. Por ejemplo, en el contexto logístico, Montecarlo podría generar escenarios donde las coordenadas de los clientes o las capacidades logísticas de los camiones varíen ligeramente debido a cambios estacionales, alteraciones en la infraestructura vial o configuraciones de diseño e ingeniería. Al realizar miles de iteraciones, se puede identificar el rango de emisiones de CO<sub>2</sub> más probable para diferentes configuraciones y, además, evaluar el nivel de certeza con el que se pueden esperar esos resultados.

Complementariamente, la distribución estadística triangular, proporciona un marco útil para describir los escenarios optimista, pesimista y tendencial, pero también permite generar una gama de escenarios intermedios. Estos escenarios intermedios pueden ayudar a representar condiciones más realistas que no son ni extremadamente buenas ni extremadamente malas. Por ejemplo, mediante Montecarlo es posible obtener una estimación más refinada del comportamiento del sistema bajo circunstancias moderadas o con ligeras desviaciones del escenario tendencial. Esto

proporciona una visión más equilibrada y precisa del sistema bajo incertidumbre, ayudando a los gestores a tomar decisiones mejor informadas.

La distribución triangular y Montecarlo, en conjunto, facilitan un análisis estocástico que permite visualizar cómo diferentes configuraciones geográficas y decisiones logísticas pueden influir en el resultado final. Vale la pena aclarar que para aumentar la eficacia de este proceso se recomienda hacer un análisis de distribución de los datos para verificar que se comporten bajo dicha distribución estadística, o si es necesario hacer una transformada, para lo que hay herramientas como la gráfica Q-Q y los estimadores de precisión Anderson – Darling.

El análisis probabilístico mejora la planificación estratégica, al permitir que los tomadores de decisiones comprendan no solo los resultados más probables, sino también las variaciones posibles dentro de un rango de confianza, dado que, una mínima variación en un nodo de un sistema complejo puede tener un efecto expansivo sobre el resto de la red. Eso bajo la lógica de los atractores de refuerzo que se puedan presentar.

#### **9.4 Con relación al análisis estadístico**

El análisis estadístico fue indispensable para evaluar el impacto de los modelos centralizado y descentralizado en la reducción de emisiones atmosféricas. La hipótesis de esta investigación planteaba que un modelo descentralizado podría generar una disminución significativa en las emisiones en comparación con el modelo tradicional centralizado. Sin embargo, los resultados no respaldaron esta afirmación.

El ANOVA fue el método utilizado para comparar las emisiones atmosféricas entre los dos modelos. Esta técnica es especialmente útil cuando se busca determinar si hay diferencias significativas entre las medias de diferentes grupos o tratamientos. En este caso, los grupos eran las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por ambos modelos con valores acorde a los escenarios optimista, tendencial y pesimista.

El ANOVA produjo un valor  $p$  de 0.495, lo que indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambos modelos. El valor  $p$  representa la probabilidad de obtener los resultados observados si la hipótesis nula es verdadera, es decir, si no existe ninguna diferencia entre los dos métodos en términos de emisiones. Un valor  $p$  mayor que el umbral convencional de 0.05 indica que no podemos rechazar la hipótesis nula. Es decir, los datos no proporcionan suficiente evidencia para concluir que la descentralización reduce significativamente las emisiones en comparación con el modelo centralizado.

Específicamente se hallaron las siguientes métricas:

GL (Grados de Libertad): Indica cuántos valores son libres de variar en el cálculo. En este caso, el factor tiene 1 grado de libertad (relacionado con los dos métodos: centralizado y descentralizado), mientras que el error tiene 4 grados de libertad (número total de observaciones menos los grupos).

SC Ajustada (Suma de Cuadrados Ajustada): Con un valor de 19.05 para los factores dentro de los grupos y 135.62 para el error entre los grupos, es una medida de la variabilidad explicada por el modelo (en este caso, las diferencias en las emisiones entre los métodos) y la variabilidad no explicada (el error).

MC Ajustada (Media Cuadrática Ajustada): Con un valor de 19.05 para los factores dentro de los grupos y 33.31 para el error entre los grupos, es el cociente entre la suma de cuadrados ajustada y los grados de libertad, proporcionando una estimación de la variabilidad media.

Valor F: Es la razón entre la varianza explicada por el modelo y la varianza no explicada. El valor F obtenido de 0.56 es menor que el tabular F de 7.709 para un nivel de significancia del 5% y grados de libertad  $v_1 = 1$  y  $v_2 = 4$ , lo que denota una validación de  $H_0$ .

Valor  $p$ : Es el indicador de si las diferencias entre los grupos son significativas. Aquí, un valor de 0.495 muestra claramente que no hay una diferencia estadísticamente significativa.

Dado que el análisis ANOVA no reveló diferencias significativas, se llevó a cabo un análisis post hoc para explorar más a fondo si los grupos de emisiones entre los modelos se comportaban de manera similar. El análisis post hoc se realiza cuando el ANOVA muestra diferencias entre los grupos, pero no especifica qué pares de grupos son diferentes. Entre los métodos disponibles para el análisis post hoc se encuentran el test de Tukey, el LSD de Fisher y el MCB de Hsu, entre otros menos conocidos.

**Prueba de Tukey:** La prueba de Tukey es uno de los métodos más comunes para comparar pares de medias. Es particularmente útil cuando se tienen más de dos grupos (aunque también se aplica en este caso con dos grupos). Este método controla la tasa de error familiar, asegurando que el riesgo de obtener resultados falsos positivos (rechazar una hipótesis nula que es verdadera) se mantenga bajo, independientemente del número de comparaciones que se realicen. En este caso, la prueba de Tukey corroboró los resultados del ANOVA, evidenciando que las emisiones medias de ambos métodos (centralizado y descentralizado) se agrupan de manera similar, sin mostrar diferencias significativas.

**LSD de Fisher (Diferencia Mínima Significativa):** Este es un método más simple que compara pares de medias sin ajustar tanto el nivel de error como la prueba de Tukey. Aunque es menos conservador, puede ser útil en casos donde se espera que las diferencias sean claras y evidentes. En este análisis no se consideró necesario aplicar el LSD de Fisher, ya que los resultados de ANOVA y Tukey no indicaban diferencias significativas, y el uso de este método, más propenso a falsos positivos, no proporcionaría un valor adicional significativo.

**MCB de Hsu (Mejor de los Comportamientos Competitivos):** Este es otro método post hoc que compara cada grupo con el mejor comportamiento observado, en lugar de comparar todos los pares de medias. Se suele utilizar cuando se busca identificar el mejor rendimiento entre varios tratamientos o grupos. Sin embargo, dado que los datos no mostraban diferencias significativas, y el objetivo no era necesariamente identificar un “ganador” absoluto, no se consideró necesario aplicar este método.

En definitiva, no se emplearon los métodos de LSD de Fisher ni MCB de Hsu, ya que la prueba de Tukey y los resultados del ANOVA no justificaban la búsqueda de conclusiones diferentes. Aplicar estos métodos adicionales habría aumentado el riesgo de errores tipo I (falsos positivos), sin proporcionar beneficios claros en términos de comprensión.

Aunque el análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre los dos métodos en términos de emisiones, se observó que la variabilidad dinámica de las condiciones logísticas podría influir en la decisión sobre qué modelo utilizar (centralizado o descentralizado). En condiciones estáticas, donde las ubicaciones de los clientes y las rutas de transporte permanecen constantes, los resultados muestran que ambos métodos son comparables. Sin embargo, en condiciones dinámicas, donde las ubicaciones de los nodos pueden variar debido a factores como el tráfico, la disponibilidad de infraestructuras o cambios en las rutas, es posible que se deba optar por uno u otro modelo, dependiendo de las circunstancias.

En cuanto al análisis de desempeño del sistema como argumentación anexa al estadístico, ninguno de los dos modelos se presentó como significativamente superior en todas las situaciones. Los resultados obtenidos muestran que, cuando los clientes están altamente agrupados, el modelo centralizado es más eficiente en términos de emisiones. Sin embargo, cuando aumenta la dispersión entre los nodos, el modelo descentralizado toma la delantera. Es en esta variabilidad donde reside la clave para pasar de un modelo al otro, dependiendo de las circunstancias del entorno. Además, los resultados sugirieron que, en algunos casos, sería beneficioso agregar más centros de distribución cuando la dispersión alcanza cierto umbral, para optimizar aún más las rutas y reducir las emisiones.

En condiciones altamente dinámicas, donde los nodos o clientes se dispersan de manera significativa o donde las rutas se ven afectadas por cambios externos (tráfico, condiciones climáticas, etc.), el modelo descentralizado tiende a ser más flexible y a generar mejores resultados en términos de emisiones. Esto se debe a que la proximidad entre los centros de distribución y los puntos de entrega facilita la adaptación a las variaciones.

En condiciones más estáticas o cuando los clientes se agrupan en áreas geográficas más definidas, el modelo centralizado puede ser igual de eficiente, aprovechando las economías de escala que ofrece tener un solo centro de distribución principal.

Este hallazgo refuerza el enfoque de optimización mediante la flexibilidad del modelo de negocio para ajustarse a un entorno cambiante, basado en decisiones informadas que, en muchos casos, puede implicar la toma de datos en tiempo real. De esto se deriva la pertinencia de la presente investigación en las problemáticas de la GTI que propenden por la inclusión de la tecnología y la innovación a los modelos de negocio haciéndolos más sostenibles.

Por ende, es imprescindible no solo implementar tecnologías adecuadas para el modelamiento, procesamiento y simulación de redes complejas, como en cierta instancia lo puede ser Vensim, sino que también se adecue la arquitectura de la organización y se alineen los conocimientos de los colaboradores con ello. En otras palabras, una simbiosis entre investigación y desarrollo I+D y una apropiación colectiva de ese conocimiento.

## **10 Recomendaciones**

A partir de los resultados obtenidos, es fundamental formular una serie de recomendaciones que permitan mejorar la precisión y aplicabilidad de los modelos utilizados en la investigación. Estas recomendaciones no solo buscan optimizar el análisis del impacto ambiental en los sistemas centralizados y descentralizados, sino también ofrecer enfoques más sofisticados y ajustados a la realidad logística en un entorno urbano como Medellín.

### **10.1 Ampliar la complejidad del sistema dinámico**

Una de las primeras acciones recomendadas es ampliar la complejidad del modelo dinámico, incorporando más constantes y variables a modular en las condiciones iniciales. El modelo actual, aunque efectivo en la simulación básica, se limita a un número reducido de variables clave, como la demanda y volumen de los equipos y el número de ejes de los camiones. Sin embargo, en un

sistema logístico real, factores como las condiciones del tráfico, las variaciones en los tiempos de carga y descarga, el estado de las vías y las fluctuaciones en la demanda de equipos juegan un papel crucial.

Incluir estas constantes adicionales permitiría reducir la incertidumbre en los resultados, generando simulaciones más robustas y cercanas a la realidad. Variables como la velocidad promedio de los vehículos, los tiempos de espera en los centros de distribución, las condiciones climáticas y el estado de las rutas podrían ser moduladas para ofrecer una visión más detallada y precisa del comportamiento del sistema. Asimismo, estas constantes pueden interactuar entre sí, lo que aportaría mayor realismo al modelo y ayudaría a identificar interdependencias críticas que podrían estar afectando el rendimiento ambiental de los modelos.

## **10.2 Uso de modelos en red más complejos: Vehicle Routing Problem (VRP)**

Una recomendación clave es incorporar problemas de optimización más complejos como el Vehicle Routing Problem (VRP), que está diseñado para encontrar rutas óptimas en sistemas logísticos con múltiples restricciones. El VRP no solo optimiza la asignación de vehículos a rutas, sino que también permite considerar diversas penalidades y restricciones, como límites de capacidad, ventanas de tiempo de entrega, costos asociados a cada ruta y las características específicas del entorno.

Al integrar modelos VRP en el análisis, se lograría una optimización más acorde a la vida real, considerando la diversidad de rutas y penalidades que enfrenta una empresa de logística en un entorno urbano. Esto es particularmente relevante en una ciudad como Medellín, donde la topografía y el diseño vial pueden generar penalizaciones específicas en ciertas rutas (como cuestas pronunciadas o zonas con congestión frecuente). El uso de estos modelos no solo mejoraría la eficiencia de los desplazamientos, sino que también permitiría reducir aún más las emisiones de CO<sub>2</sub>, optimizando tanto las rutas como la asignación de recursos.

### **10.3 Integración de la gestión de inventarios**

En lugar de realizar una distribución diaria, se sugiere establecer periodos de entrega cada "x" cantidad de días, lo que podría reducir significativamente la frecuencia de los desplazamientos y, por ende, las emisiones de CO<sub>2</sub>. Al gestionar los inventarios de manera más eficiente, acumulando stock suficiente para cubrir varios días, se lograría una reducción en la cantidad de viajes, disminuyendo los costos operativos y el impacto ambiental. Además, este enfoque alinearía la distribución con prácticas logísticas más sostenibles y flexibles, adaptándose mejor a las variaciones en la demanda y permitiendo una optimización en la utilización de los recursos.

## Referencias

- Andruetto, C., Stenemo, E., & Pernestål, A. (2024). Towards sustainable urban logistics: Exploring the implementation of city hubs through system dynamics. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 27, 101204.  
<https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101204>
- Velásquez Monroy, X. (19 de Agosto de 2022). *Logistec*. Obtenido de EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL Y LA INDUSTRIA 4.0: <https://www.revistalogistec.com/scm/estrategia-logistica-2/4423-el-cambio-climatico-global-y-la-industria-4-0>
- Calatayud, A., & Montes, L. (2021). *publications.iadb.org*. Obtenido de Logística en América Latina y el Caribe: oportunidades, desafíos y líneas de acción : <https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Logistica-en-America-Latina-y-el-Caribe-Oportunidades-desafios-y-lineas-de-accion.pdf>
- Calatayud, A., & Montes, L. (2019). *Logística en América Latina y el Caribe: oportunidades, desafíos y líneas de acción*. Obtenido de *publications.iadb*: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Logistica-en-America-Latina-y-el-Caribe-Oportunidades-desafios-y-lineas-de-accion.pdf>
- Velásquez Monroy, X. (19 de Agosto de 2022). *Logistec*. Obtenido de *www.revistalogistec.com*: <https://www.revistalogistec.com/scm/estrategia-logistica-2/4423-el-cambio-climatico-global-y-la-industria-4-0>
- Srai, JS, Kumar, M., Graham, G., Phillips, W., Tooze, J., Ford, S. y Ravi, B. (2016). Distribuido Manufactura: alcance, desafíos y oportunidades. *Revista internacional de investigación de producción*, 54 N° 23, 6917-6935. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/599333258/Industry-4-0-and-digital-suppl-en-es>

Kohtala, C. (2014). Abordar la sostenibilidad en la investigación sobre producción distribuida. *una revisión integrada de la literatura*, *Journal of Cleaner Production*.  
[doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro](http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro)

*Innovación abierta Acelera tu innovación y consigue mejores resultados de negocio*. (25 de Septiembre de 2023). Obtenido de ennomotive:  
<https://www.ennomotive.com/es/innovacion-abierta/>

Mark Kinver. (2 de Junio de 2021). *Cómo la pandemia reveló lo rápido que se reduce la contaminación una vez se dejan de hacer tantos viajes en auto (y la impactante imagen que lo refleja)*. Obtenido de Reportero de medio ambiente, BBC:  
<https://www.bbc.com/mundo/noticias-57317830>

Díez, L., Neut, A., (2018). Empleo y productividad en la era digital. BBVA Research, 1-3. Obtenido de <https://www.bbvarsearch.com/wp->

*Gestión de la cadena de suministro*. (2020). Obtenido de Sap:  
<https://www.sap.com/latinamerica/products/scm/integrated-business-planning/what-is-a-resilient-supply-chain.html>

Finot, I. (2001). *Descentralización en América Latina: teoría y práctica*. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas. Obtenido de  
<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/8183e413-2eaf-4cdb-9068-95a95e05275a/content>

Behar, A. M. (2009). *Exports and Logistics*. Social Research,, 439. Obtenido de:  
[https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=2180&context=all\\_dissertations](https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=2180&context=all_dissertations)

Calatayud, A., & Montes , L. (2021). *Logística en América Latina y el Caribe: oportunidades, desafíos y líneas de acción*. Obtenido de publications.iadb:

<https://publications.iadb.org/publications/spanish/viewer/Logistica-en-America-Latina-y-el-Caribe-Oportunidades-desafios-y-lineas-de-accion.pdf>

Velásquez Monroy, X. (19 de Agosto de 2022). *Logistec*. Obtenido de [www.revistalogistec.com](http://www.revistalogistec.com):  
<https://www.revistalogistec.com/scm/estrategia-logistica-2/4423-el-cambio-climatico-global-y-la-industria-4-0>

Aracil, J. (1995). Dinámica de Sistemas. En J. Aracil, Dinámica de Sistemas (pág. 88). Sevilla, España: Isdefe. Obtenido de  
[https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/dinsist-dinamica\\_sistemas.pdf](https://www.academia.utp.ac.pa/sites/default/files/docente/51/dinsist-dinamica_sistemas.pdf)

Aracil, J., y Gordillo, F. (1997). Dinámica de sistemas. Madrid, España: Editorial Alianza Universidad Textos. Obtenido de  
<https://revistas.poligran.edu.co/index.php/libros/article/view/2363>

Assad, Arjang A., & Gass, Saul I. (2011). Profiles in Operations Research Pioneers and Innovators (Vol. 147). New York, NY USA: Springer Science + Business Media. [doi: 10.1007/978-1-4419-6281-2](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6281-2)

Azdy, R., & Darnis, F. (2020). Use of Haversine Formula in Finding Distance Between Temporary Shelter and Waste End Processing Sites. *Journal of Physics: Conference Series*, 1500, 012104. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012104>

Banco de la República. (2023). Deuda externa de Colombia. Subgerencia de política monetaria e información económica, 1-3. Obtenido de  
<https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/deuda-externa-publica-y-privada-dolares>

- Benavides Ballesteros, Henry Oswaldo, G. E. (2007). INFORMACIÓN TECNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Obtenido de <http://ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- Bernal Figueroa, A. A., Béltran Parada, C. J., & Márquez Márquez, A. F. (2016). Producción Más Limpia: una revisión de aspectos generales. *I3+*, 66-84. Obtenido de <file:///C:/Users/US12864/Downloads/ojsub,+Produccio%CC%81n+Ma%CC%81s+Limpia+una+revisio%CC%81n+de+aspectos+generales.pdf>
- Bessièrre, D., Charnley, F., Tiwari, A., & Moreno, M. A. (2019). Una visión de la fabricación redistribuida para la industria de bienes de consumo del Reino Unido. *Planificación y control de la producción*, 555-567. [doi:10.1080/09537287.2018.154005](https://doi.org/10.1080/09537287.2018.154005)
- Céspedes, Tatiana (19 de septiembre de 2022). Greenpeace. Obtenido de El transporte en Colombia es responsable del 78% de las emisiones causantes del cambio climático y de la contaminación de aire: <https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/issues/climayenergia/el-transporte-en-colombia-es-responsable-del-78-de-las-emisiones-causantes-del-cambio-climatico-y-de-la-contaminacion-de-aire/>
- Chang, L., & Yu, Q. (2024). Sustainability-oriented social responsibility and corporate innovation. *China Journal of Accounting Research*, 17(2), 100359. <https://doi.org/10.1016/j.cjar.2024.100359>
- Durach, C. F., Kurpjuweit, S., & Wagner, S. M. (2017). The impact of additive manufacturing on supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 954-971. doi: <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-11-2016-0332>

Elaborado por la oficina asesora de planeación y estudios sectoriales del Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones. (2019). Aspectos básicos de la industria 4.0. El futuro digital es de todos MinTic, 23-30.

Forrester, Jay W. (31 de octubre de 1971). World dynamics. Estados Unidos: Wright-Allen Press.

Obtenido de <https://www.amazon.com/-/es/Jay-Wright-Forresterer/dp/B0006C0PZM>

Forrester, Jay W. (1992). System dynamics, systems thinking, and soft OR. North America: System Dynamics Review. Obtenido de

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sdr.4260100211>

Gao, H., Song, X., Xu, H., Li, X., Tang, J., & Zhao, G. (2024). Promoting sustainable development by mitigation of natural habitat quality decline through multifunctional urban land use: Insights from a multi-scenario simulation. Sustainable Cities and Society, 110, 105563. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105563>

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., & Zhang, S. (2015). The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering. Computer-Aided, 69, 65-89.

[doi:10.1016/j.cad.2015.04.001](https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001)

Barbero, J. A. (2010). La logística de cargas en América Latina y el Caribe: Una agenda para mejorar su desempeño. Obtenido de: [file:///C:/Users/US12864/Downloads/La-log%C3%ADstica-de-cargas-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-Una-agenda-para-mejorar-su-desempe%C3%B1o%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/US12864/Downloads/La-log%C3%ADstica-de-cargas-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-Una-agenda-para-mejorar-su-desempe%C3%B1o%20(1).pdf)

Globuss Biogestión (Director). (2021, febrero 7). DEMORAS/DELAYS en Vensim (Paso a paso y con EJEMPLOS!!!) 🙌 [Video recording].

<https://www.youtube.com/watch?v=1wz23d50NtI>

Guo, J., Li, C., & Jiao, W. (2024). Corporate Social Responsibility disclosure and market value: The mediating role of investor attention. *Finance Research Letters*, 67, 105863.

<https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.105863>

Kiss, T. (15 de mayo de 2024). *Revolución Industrial*. Obtenido de Concepto:

<https://concepto.de/revolucion-industrial/>

Korner, M. E. H., Lambán, M. P., Albajez, J. A., Santolaria, J., Del Carmen Ng Corrales, L., & Royo, J. (2020). Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0. *Metals*, 10(8), 1061. [doi:10.3390/machines11070712](https://doi.org/10.3390/machines11070712)

Kumar, M., Tsolakis, N., Anshul, A., & Jagjit Singh, S. (2020). Developing distributed manufacturing strategies from the perspective of a product-process matrix. *International Journal of Production Economics*, 219, 1-17. [doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.05.005](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.05.005)

Giacomo, L., Giuseppe, S., & Toshiya, K. (2015). Optimisation of freight flows and sourcing in sustainable production and transportation networks. *International Journal of Production Economics*, 164, 351-365. [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.016](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.016)

Manrique Nugent, M. A., Teves Quispe, J., Taco Llave, A. M., & Flores Morales, J. A. (2019).

Gestión de cadena de suministro: una mirada desde la perspectiva teórica. *Revista Venezolana de Gerencia*, 24, 1136-1146. Obtenido de

<https://www.redalyc.org/journal/290/29062051009/html/>

Mangan, J. C. (2020). *Global Logistics and Supply Chain Management* (4th ed.). New York, United States: Business & Economics. Obtenido de

[https://books.google.com.co/books/about/Global\\_Logistics\\_and\\_Supply\\_Chain\\_Manage.html?id=O7CazQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.co/books/about/Global_Logistics_and_Supply_Chain_Manage.html?id=O7CazQEACAAJ&redir_esc=y)

- 
- Martín Garcia, J. (2003). Teoría y Ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Huntsville, Texas: Independently published. Obtenido de <https://themys.sid.uncu.edu.ar/Industrial/DinamicaSistemas/Semana%203/Dinamica%20de%20sistemas.pdf>
- Mizar Moreno, D., & Munzón Pastran, C. (2017). Impacto ambiental de los procesos de producción. Una revisión de su evolución y tendencias. *Revista I+D en TIC*, 8, 15-20. Obtenido de <https://revistas.unisimon.edu.co/index.php/identific/article/view/2941/3429>
- Perissé, M. C. (2020). Dinámica de sistemas: sus enunciados básicos. Buenos Aires, Argentina: Ciencia y Técnica Administrativa CyTA. Obtenido de [http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/dinamica\\_sistemas/dinamica\\_sistemas.htm](http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/dinamica_sistemas/dinamica_sistemas.htm)
- Elena G Popkova, Yulia V Ragulina Aleksei v Bogoviz. (2019). *Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century*. Warsaw: Poland: Springer.
- Toyota Forklifts. (8 de septiembre de 2023). *toyota-forklifts.es Blog*. Obtenido de Toyota: <https://blog.toyota-forklifts.es/industria-4.0-que-es-caracteristicas>
- Rietveld, P. (1994). Spatial economic impacts of transport infrastructure supply. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 329–341. [doi:https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)90007-8)
- Rijmen, J., & Wiersema, J. R. (2024). Stochastic resonance is not required for pink noise to have beneficial effects on ADHD-related performance? The moderate brain arousal model challenged. *Neuropsychologia*, 202, 108961. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2024.108961>
- Rué, J., & Wötzel, M. (2022). Normal limiting distributions for systems of linear equations in random sets. *Linear Algebra and its Applications*, 649, 122-151. <https://doi.org/10.1016/j.laa.2022.05.003>

Sánchez Gutiérrez, V. (2 de enero de 2023). Colombia se ha mantenido en últimos lugares de prueba Pisa en recientes ediciones. Obtenido de larepublica.co:

<https://www.larepublica.co/globoeconomia/colombia-se-ha-mantenido-en-los-ultimos-puestos-de-la-prueba-pisa-durante-ultimas-ediciones-3517806>

Sterman, J. (2000). Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World (Vol. 19). Boston, United States: McGraw-Hill. Obtenido de

<https://www.amazon.com/Business-Dynamics-Systems-Thinking-Modeling/dp/007238915X>

Toyota Forklifts. (8 de septiembre de 2023). Industria 4.0: ¿Qué es y características? Obtenido de

Toyota-forklifts.es Blog: <https://blog.toyota-forklifts.es/industria-4.0-que-es-caracteristicas>

Unir la universidad en internet. (12 de agosto de 2021). Los sistemas dinámicos en Matemáticas, ¿qué son? Obtenido de UNIR REVISTA:

<https://www.unir.net/ingenieria/revista/sistemas-dinamicos-matematicas/#:~:text=Los%20sistemas%20dinámicos%20no%20son,mucho%20más%20ceranos%20de%20lo%20a%20que%20pensamos.>

Vargas, H., & Arenas, J. (2023). El impacto del Internet de las Cosas en las cadenas de suministro. Revista de Ingeniería Industrial, 35(2), 110-120. [doi:10.4067/S0718-](https://doi.org/10.4067/S0718-27242023000200110)

[27242023000200110](https://doi.org/10.4067/S0718-27242023000200110)

Venkatesh, V., Thong, J. Y. L., & Xu, X. (2016). Unified Theory of Acceptance and Use of Technology: A Synthesis and the Road Ahead. Journal of the Association for Information Systems, 17(5), 328-376. Obtenido de <https://aisel.aisnet.org/jais/vol17/iss5/1/>

Waller, M. A., & Fawcett, S. E. (2013). Click here to print a maker movement supply chain: How invention and entrepreneurship are revolutionizing supply chain design and management. *Journal of Business Logistics*, 34(2), 139-144. [doi:10.1111/jbl.12019](https://doi.org/10.1111/jbl.12019)

Xu, X., Xu, Y., & Li, L. (2018). Industry 4.0: Research Trends and Commercialization Perspectives. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2945-2962. [doi:10.1080/00207543.2018.1444826](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444826)

Youssef, M. A., & Abou-Elhassan, A. (2019). Additive manufacturing and the future of industrial supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(7), 1025-1042. [doi:10.1108/JMTM-12-2018-0420](https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2018-0420)

Henry Oswaldo Benavides Ballesteros, Gloria Esperanza León Aristizabal. (2007). INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM*, 34. Obtenido de <http://ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>

*Datosmacro.com*. (2022). Obtenido de Colombia - Emisiones de CO2: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/colombia>

GHAVAMI, S. (2020). La Logística Verde y el impacto de las nuevas tecnologías en el ámbito de transporte de las mercancías en ello. *U. d. Barcelona*. Obtenido de <https://www.comercioexterior.ub.edu/tesina/tesinasaprobadas/1920/TFMGhavamiSetareh.pdf>

*QuadMinds*. (12 de Julio de 2022). Obtenido de ¿Qué es la logística verde y por qué implementarla?: <https://www.quadminds.com/blog/que-es-la-logistica-verde-y-por-que-implementarla/>

Serrano Escudero, M. J. (2019). *Logística de almacenamiento 2*. Madrid España: Ediciones paraninfo S.A. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=vcSPDwAAQBAJ&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>

Suarez, R. (12 de Diciembre de 2023). *Asociación Colombiana de Dinámica de Sistemas*. Obtenido de [https://comunidadcolombianads.com/importantes/perspectivas-en-dinamica-de-sistemas-y-pensamiento-sistemico-colaboracion-internacional-para-un-mundo-sostenible/](https://comunidadcolombianads.com/comunidadcolombianads:https://comunidadcolombianads.com/importantes/perspectivas-en-dinamica-de-sistemas-y-pensamiento-sistemico-colaboracion-internacional-para-un-mundo-sostenible/)

Pineda Ballesteros, E. (2009). Modelado de cadenas productivas con dinámica de sistemas. *Revista De Investigaciones UNAD*, 151-168. doi:<https://doi.org/10.22490/25391887.640>

Wilfredo, G. ( 2-4 de Septiembre de 2009). Desarrollo de un modelo de simulación dinámica para ensayar políticas operacionales en cadenas de suministros genéricas de pymes transformadoras. *XIII Congreso de Ingeniería de Organización*., págs. 976-985. doi:<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.5874>.

Alvarez Uribe, K. (2009). Modelo empírico de gestión para la cadena de suministro en el sector textil-confección de Medellín. *Tesis*, 687-96. Obtenido de [https://comunidadcolombianads.com/wp-content/uploads/2017/07/ECDS2009\\_Memorias.pdf](https://comunidadcolombianads.com/wp-content/uploads/2017/07/ECDS2009_Memorias.pdf)

Ventana Systems, I. S. (1988-2002). Vensim® Ambiente de simulación Ventana DSS Professional Standard PLE Plus PLE . Estados Unidos: © Copyright 1988-2002 Ventana Systems, Inc. Obtenido de [:https://www.academia.edu/4649515/Vensim\\_Ambiente\\_de\\_simulaci%C3%B3n\\_Ventana\\_DSS\\_Professional\\_Standard\\_PLE\\_Plus\\_PLE\\_con\\_Causal\\_Tracing\\_Reality\\_Check](https://www.academia.edu/4649515/Vensim_Ambiente_de_simulaci%C3%B3n_Ventana_DSS_Professional_Standard_PLE_Plus_PLE_con_Causal_Tracing_Reality_Check)

Forrest, Jay Wright; Lane and, David C; Sterman, John D. (2011). *Profiles in Operations Research Pioneers and Innovators*. New York, NY USA: Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA. [doi:10.1007/978-1-4419-6281-2](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6281-2)

Sterman, J. D. (2002). All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*,, 501–531. Obtenido de <https://studylib.net/doc/18375305/all-models-are-wrong--reflections-on-becoming-a-systems>

Barlas, Yaman. (1996). *Formal aspects of model validity and validation in system dynamics* (Vol. 3). New York: WILEY Online Library. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/%28SICI%291099-1727%28199623%2912%3A3%3C183%3A%3AAID-SDR103%3E3.0.CO%3B2-4>

Begoña González, B. M. (1998). La Dinámica de Sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación. Universidad de Oviedo, Madrid. Obtenido de [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/45726/d168\\_99.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/45726/d168_99.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sterman, J. (2000). *Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World* (Vol. 19). Boston, United States of America: McGraw-Hill. Obtenido de: <https://www.amazon.com/Business-Dynamics-Systems-Thinking-Modeling/dp/007238915X>

FANDOM, W. c. (Disponible de Fundación Wikimedia de licencia 3.0 (Unported) (CC-BY-SA)). Dinámica de Sistemas Wiki comunidad FANDOM en Estilo de vida. Obtenido de Fandom: [https://dinasis.fandom.com/es/wiki/Din%C3%A1mica\\_de\\_Sistemas](https://dinasis.fandom.com/es/wiki/Din%C3%A1mica_de_Sistemas)

Sterman, J. D. (2002). All models are wrong: reflections on becoming a systems scientist. *System Dynamics Review*, 501–531. Obtenido de <https://studylib.net/doc/18375305/all-models-are-wrong--reflections-on-becoming-a-systems>

Anjapuli Panneer, S., Venkatesan, G., & Hijaz, A. (2024). Examining reachability criteria for fractional dynamical systems with mixed delays in control utilizing  $\psi$ -Hilfer pseudo-fractional derivative. *Chaos, Solitons & Fractals*, 181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.114702>

Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). (15 de Febrero de 2024). *mintransporte.gov.co*. Obtenido de Gobierno nacional garantiza recursos para proyectos de infraestructura de la ANI y el Inviás: <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/11597/gobierno-nacional-garantiza-recursos-para-proyectos-de-infraestructura-de-la-ani-y-el-invias/>

European Environment Agency. (18 de March de 2024). *eea.europa.eu*. Obtenido de CO2 emissions performance of new vans in Europe: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/co2-performance-emissions-of-new>

LlocationIQ. (2022). *es.locationiq*. Obtenido de Affordable Google Maps alternative for your website or app: <https://es.locationiq.com/>

MathWorks. (2024). *Centro de ayuda*. Obtenido de help/matlab: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2.html>

Cecep Nurul, A., Khaerul, M., Aldy Rialdy, A., & Digital Khrisna, A. (26 de Septiembre de 2016). Implementation of haversine formula for counting event visitor in the radius based on Android application. *IEEE*, 10-12. doi:[10.1109/CITSM.2016.7577575](https://doi.org/10.1109/CITSM.2016.7577575)