



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Diseño de una cadena de suministro de
biocombustible a partir de residuos de
café, integrando decisiones de
instalaciones, ruteo e inventario, bajo un
enfoque de sostenibilidad**

Marcela María Morales Chávez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial

Manizales, Colombia

2022

Diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, integrando decisiones de instalaciones, ruteo e inventario, bajo un enfoque de sostenibilidad

Marcela María Morales Chávez

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Doctora en Ingeniería

Director:

Ph.D. William Ariel Sarache Castro

Codirector:

Ph.D. Yasel J. Costa Salas

Línea de Investigación:

Métodos y modelos de optimización y estadística en ingeniería industrial y administrativa

Grupo de Investigación:

Innovación y Desarrollo Tecnológico

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial

Manizales, Colombia

2022

“Aunque este Universo poseo, nada poseo, pues no puedo conocer lo desconocido, si me aferro a lo conocido”.

Robert Fisher

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Marcela María Morales Chávez
15/07/2022

Agradecimientos

Como dijo John F. Kennedy “*Debemos encontrar tiempo para detenernos y agradecer a las personas que hacen la diferencia en nuestras vidas*”. Primero que todo al gran arquitecto del universo que me permite descubrir cada día las grandezas de su creación. A mi familia y amigos por su paciencia ante mi ausencia y por creer en mí. A la universidad Libre por su apoyo y confianza. A la Universidad de Ciencias Aplicadas de Austria y al MIT- *Zaragoza Logistics Center* por acogerme en las instancias investigativas y compartir su saber. A Colciencias por financiar gran parte de este proceso de investigación.

Mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Colombia por haberme permitido adquirir tantos conocimientos en sus espacios, es un gran honor ser parte de esta extraordinaria casa de estudios. A mis tutores Yasel Costa y William Sarache por las infinitas horas de atención y contribución a mi formación. Un agradecimiento especial al doctor José Soto por su desinteresado apoyo y oportunos consejos. Gracias a mi semillero de investigación SEIO por ser mi soporte en el proceso, son todos un soplo de aire fresco, en especial a la ingeniera Daniela Ramírez por su dedicación, compromiso y ayuda incondicional.

Resumen

Los biocombustibles surgen como alternativa a la crisis energética y ambiental que afecta al planeta. No obstante, integrar decisiones estratégicas, tácticas y operativas, desde un enfoque sostenible, plantea grandes desafíos para el diseño de su cadena de suministro (*SCND: Supply Chain Network Design*). La revisión de la literatura relacionada con el *SCND* considerando decisiones de localización, ruteo e inventario (*ILRP: Inventory Location Routing Problem*) evidencia que las contribuciones sobre biocombustibles son limitadas, la mayoría de los modelos matemáticos no consideran métricas sostenibles y la estrategia de configuración dinámica (*DCS: Dynamic Configuration Strategy*) ha sido totalmente ignorada.

De acuerdo con los vacíos de conocimiento identificados, esta tesis doctoral presenta un conjunto de modelos matemáticos altamente novedosos para el *SCND* de biocombustible a partir de residuos agrícolas, integrando decisiones de localización, ruteo e inventario bajo un enfoque sostenible y estocástico. Esta investigación es la primera en abordar dentro de la formulación *ILRP* la *DCS*, lo cual constituye un avance relevante en el campo de estudio. Adicionalmente, se diseñó una heurística para resolver el modelo de optimización *NP-hard* utilizando la metaheurística de recocido simulado.

Se analiza un caso de estudio en Colombia y 15 conjuntos de datos de la literatura. Los resultados demuestran la eficiencia de la heurística comparada con el método exacto. Se observan las ventajas de la integración sostenible del *ILRP* en contraste con la optimización de un solo objetivo. Adicionalmente, se evidencia que la *DCS* alcanza mejor desempeño económico, ambiental y social comparada con la estrategia de configuración estática en el *SCND*.

Palabras clave: Problema de inventario localización y ruteamiento, estrategia de configuración dinámica, cadena de suministro sostenible, algoritmo de recocido simulado.

Abstract

Design of a biofuel supply chain from coffee waste, integrating facility, routing and inventory decisions, under a sustainable approach

Biofuels arise as an alternative to the energy and environmental crisis that affects the entire planet. However, integrating strategic, tactical and operational decisions, from a sustainable approach, poses great challenges for the design of its supply chain (*SCND: Supply Chain Network Design*). Reviewing the state of the art related to the *SCND* considering location, routing and inventory decisions (*ILRP: Inventory Location Routing Problem*) shows that contributions on biofuels are limited, most mathematical models don't consider sustainable metrics and the dynamic configuration strategy (*DCS: Dynamic Configuration Strategy*) has been totally ignored.

According to the knowledge gaps identified, this doctoral thesis presents a set of highly novel mathematical models for the *SCND* of biofuel from agricultural waste, integrating location, routing and inventory decisions under a sustainable and stochastic approach. This research is the first one addressing *DCS* within the *ILRP* formulation, which is a relevant advance in the field of study. In addition, a heuristic was designed to solve the *NP-hard* optimization model using simulated annealing metaheuristics.

A case study in Colombia and 15 data sets from the literature are analyzed. The results demonstrate the efficiency of heuristics compared to the exact method. Also, the advantages of the sustainable integration of the *ILRP* formulation are observed in contrast to the optimization of a single objective. Thus, it is evident that the *CSD* achieves better economic, environmental and social performance compared to the static configuration strategy in the *SCND*.

Keywords: Inventory location routing problem, Dynamic configuration strategy, sustainable supply chain, simulated annealing algorithm.

Contenido

	Pág.
1. Marco teórico y contextual.....	11
1.1 Cadena de suministro	12
1.1.1 Generalidades de la cadena de suministro	12
1.1.2 Enfoque de sostenibilidad en la cadena de suministro.....	18
1.1.3 El problema de la incertidumbre de la cadena de suministro.....	20
1.1.4 Diseño y optimización de la Cadena de Suministro	22
1.2 Los biocombustibles como alternativa de solución a la crisis energética	26
1.2.1 Importancia de los biocombustibles	26
1.2.2 Residuos de café: Una biomasa factible para la producción de biocombustible	27
1.2.3 Cadena de suministro para la producción de biocombustible a partir de residuos de café	29
1.3 Estado del arte.....	31
1.3.1 Recopilación del material.....	32
1.3.2 Filtrado.....	33
1.3.3 Codificación.....	36
1.3.4 Clasificación y análisis de material	36
1.3.5 Identificación y discusión del vacío de conocimiento	47
1.4 Conclusiones parciales	51
2. Modelo de optimización propuesto	54
2.1 Modelo matemático base.....	56
2.1.1 Variables de decisión	59
2.1.2 Funciones objetivo	62
2.1.3 Restricciones	67
2.2 Estrategia de configuración dinámica (<i>DCS</i>).....	69
2.2.1 Variables de decisión siguiendo la estrategia <i>DCS</i>	69
2.2.2 Función objetivo siguiendo la estrategia <i>DCS</i>	71
2.2.3 Restricciones para la estrategia <i>DCS</i>	76
2.2.4 Linealización.....	79
2.3 Decisiones de ruteo de vehículos	82
2.3.1 Variables de decisión siguiendo la formulación <i>ILRP</i>	82
2.3.2 Función objetivo siguiendo la formulación <i>ILRP</i>	84
2.3.3 Restricciones siguiendo la formulación <i>ILRP</i>	86
2.4 Incertidumbre del suministro.....	88
2.4.1 Variables de decisión enfoque estocástico.....	88
2.4.2 Funciones objetivo enfoque estocástico	89
2.4.3 Restricciones enfoque estocástico	93
2.5 Conclusiones parciales	94
3. Metodología de solución propuesta.....	97

3.1	Métodos exactos	98
3.1.1	Método de las restricciones	99
3.1.2	Programación compromiso	99
3.2	Método aproximado	101
3.2.1	Fase constructiva	101
3.2.2	Fase de mejora	115
3.3	Conclusiones parciales	120
4.	Resultados computacionales	122
4.1	Conjunto de datos de prueba	122
4.2	Caso de estudio: Región cafetera de Colombia.....	131
4.3	Discusión de resultados	140
4.3.1	Discusión conjuntos de datos de prueba	141
4.3.2	Discusión caso de estudio región cafetera de Colombia	150
4.4	Conclusiones parciales	152
5.	Conclusiones finales y recomendaciones.....	155
5.1	Conclusiones finales.....	155
5.2	Recomendaciones.....	159
6.	Anexos.....	162

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Hilo conductor marco teórico y contextual	12
Figura 1-2: Esquema simplificado de una cadena de abastecimiento	13
Figura 1-3: Configuraciones de la red de la cadena de suministro agrícola	17
Figura 1-4: Marco para el desarrollo sostenible.....	19
Figura 1-5: Relación entre decisiones de instalaciones, transporte e inventario	24
Figura 1-6: Características de la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café	31
Figura 1-7: Perspectivas para abordar el estado del arte	32
Figura 1-8: Decisiones consideradas en los documentos con relación indirecta	34
Figura 1-9: Sectores en los que se han aplicado el <i>ILRP</i>	38
Figura 1-10: Funciones objetivo-consideradas en el <i>ILRP</i>	39
Figura 1-11: Métricas para las funciones objetivo	41
Figura 1-12: Incertidumbre consideradas en el <i>ILRP</i>	41
Figura 1-13: Metodologías de solución consideradas en el <i>ILRP</i>	42
Figura 1-14: Líneas de investigación futura identificadas en la literatura	43
Figura 1-15: Decisiones incorporadas en las 4 perspectivas	48
Figura 1-16: Pilares de la sostenibilidad incorporados en las 4 perspectivas	50
Figura 1-17: Resumen estado del arte.....	51
Figura 2-1: Metodología de la investigación	54
Figura 2-2: Ciclo investigativo	56
Figura 2-3: Evolución modelo matemático propuesto	57
Figura 2-4: Configuración cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café ..	58
Figura 2-5: Enfoque para asignación de capacidad en instalaciones.....	59
Figura 2-6: Variables de decisión modelo matemático base	62
Figura 2-7: Configuración cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café considerando ruteo de vehículos para recolección de biomasa.....	83
Figura 2-8: Etapas modelo estocástico.....	89
Figura 3-1: Representación gráfica conjunto compromiso.....	101
Figura 3-2: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura y asignación de biorrefinerías	103
Figura 3-3: Ejemplo gráfico de asignación de biorrefinerías	104
Figura 3-4: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura y asignación de centros de acopio	105
Figura 3-5: Fragmento de cromosoma de la asignación de centros de acopio	106

Figura 3-6: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de proveedores a centros de acopio.....	107
Figura 3-7: Fragmento de cromosoma de la asignación de proveedores a centros de acopio	108
Figura 3-8: Ejemplo gráfico de asignación de rutas para recolección de residuos	108
Figura 3-9: Fragmento de cromosoma de la asignación de rutas para recolección de residuos ...	108
Figura 3-10: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de flujo final de materiales	110
Figura 3-11: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura, expansión y cierre de biorrefinerías para $t \geq 2$	112
Figura 3-12: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de biorrefinerías para $t \geq 2$	113
Figura 3-13: Fragmento de cromosoma - configuración de instalaciones dinámicas $t \geq 2$	115
Figura 3-14: Pseudocódigo de SA propuesto utilizado en la fase de mejora	116
Figura 3-15: Cálculo del valor de $L1$ en el Procedimiento 1.	117
Figura 3-16: Fragmento de cromosoma solución inicial - configuración de biorrefinerías	119
Figura 3-17: Fragmento de cromosoma – mecanismo de inserción Pasos 1- 4	119
Figura 3-18: Fragmento de cromosoma – mecanismo de inserción Paso 5	120
Figura 4-1: Comparaciones de tiempos de cómputo en los conjuntos de tamaño pequeño	127
Figura 4-2: Efecto de la incertidumbre sobre los indicadores de desempeño	129
Figura 4-3: Análisis funciones objetivo vs incertidumbre	130
Figura 4-4: Tiempos de cómputo en conjuntos de datos de mediana y gran escala	130
Figura 4-5: Mapa de cosecha de café en Colombia	132
Figura 4-6: Contexto geográfico del caso de estudio de la región cafetera de Colombia	133
Figura 4-7: Resultados de soluciones no dominadas	134
Figura 4-8: Comparación funciones objetivo caso de estudio región cafetera de Colombia	134
Figura 4-9: Evolución de la configuración de la cadena de suministro para los periodos 1, 2 y 3	135
Figura 4-10: Configuración de la cadena de suministro en los periodos 6, 7, 51, 57, 60	136
Figura 4-11: Costo de producción de bioetanol (soluciones no dominadas)	138
Figura 4-12: Porcentaje de costo de impactos ambientales (solución no dominada 5)	138
Figura 4-13: Análisis de sensibilidad para escenarios 1, 2 y 3	139
Figura 4-14: Análisis de sensibilidad para escenario 4 - Precio de bioetanol	140
Figura 4-15: Hipótesis general de investigación	141
Figura 4-16: Transporte directo vs ruteo de vehículo	142
Figura 4-17: Asignación de transporte para la recolección del residuo 1 en el periodo de tiempo 1 para el conjunto 3	143
Figura 4-18: Optimización dimensión económica vs enfoque multicriterio	144
Figura 4-19: Resultados de la comparación mono objetivo (minimizando costo) vs enfoque multiobjetivo (CP)	145
Figura 4-20: Comparación estrategias de configuración Dinámica vs Estática	147
Figura 4-21: Comparación modelación matemática determinística vs estocástica	149
Figura 4-22: Comparación de la configuración de la cadena de suministro con <i>DCS</i> y <i>SCS</i>	151
Figura 6-1: Regiones para proveedores/ Centros de acopio/ Biorrefinerías	220
Figura 6-2: Alternativas de cierre para dos biorrefinerías	229

Figura 6-3: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura, expansión y cierre de centros de acopio para $(t \geq 2)$	232
Figura 6-4: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de centros de acopio para $(t \geq 2)$	233
Figura 6-5: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de proveedores a centros de acopio para $(t \geq 2)$	235
Figura 6-6: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de flujo final de materiales para $(t \geq 2)$	236

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Decisiones en la gestión de la cadena de suministro	14
Tabla 1-2: Fuentes de complejidad de la cadena de suministro agrícola	18
Tabla 1-3: Estimado de disponibilidad de residuos de café y producción de bioetanol	29
Tabla 1-4: Contribuciones encontradas a partir de las ecuaciones de búsqueda	33
Tabla 1-5: Filtrado de contribuciones para cada perspectiva	33
Tabla 1-6: Categorías para codificación de documentos	37
Tabla 1-7: Contribuciones <i>ILRP</i> con enfoque sostenible.....	40
Tabla 1-8: Documentos con relación directa perspectiva 2*	44
Tabla 1-9: Documentos con relación directa perspectiva 4	47
Tabla 1-10: Estrategia de establecimiento de instalaciones	48
Tabla 1-11: Incertidumbre incorporada en las 4 perspectivas	50
Tabla 2-1: Variables de localización de instalaciones	60
Tabla 2-2: Variables de inventario	60
Tabla 2-3: Variables de flujo.....	61
Tabla 2-4: Variables de apertura de instalaciones siguiendo la estrategia <i>DCS</i>	70
Tabla 2-5: Variables de expansión de capacidad de instalaciones siguiendo la estrategia <i>DCS</i>	70
Tabla 2-6: Variables de cierre de instalaciones siguiendo la estrategia <i>DCS</i>	70
Tabla 2-7: Variables de operación de instalaciones siguiendo la estrategia <i>DCS</i>	72
Tabla 2-8: Variables auxiliares para linealización de la formulación original de la estrategia <i>DCS</i>	80
Tabla 2-9: Variables de flujo - ruteo de vehículos.....	83
Tabla 2-10: Variables de decisión con componente estocástico	90
Tabla 4-1: Dimensión de los conjuntos de datos de prueba.....	123
Tabla 4-2: Resultados computacionales alcanzados por el software comercial y la heurística propuesta.....	124
Tabla 4-3: Comparación de rendimiento mediante pruebas paramétricas y no paramétricas	125
Tabla 4-4: Matriz de pago del caso de estudio de la región cafetera de Colombia	133
Tabla 4-5: Promedio de <i>trade-off</i> para las funciones objetivo del caso de estudio	135
Tabla 4-6: Plan de inversión para la quinta solución no dominada	137
Tabla 4-7: Descripción de escenarios para el análisis de sensibilidad	139
Tabla 4-8: Comparación de costos de transporte para recolección de residuos - transporte directo vs ruteo de vehículos.....	143
Tabla 4-9: Comparación de los promedios de los resultados obtenidos (Max <i>NPV</i> vs Min L_1)... 146	146

Tabla 4-10: Prueba de hipótesis comparación entre estrategias <i>DCS</i> y <i>SCS</i>	148
Tabla 4-11: Estrategia <i>DCS</i> vs estrategia <i>SCS</i>	152
Tabla 6-1: Resumen componentes modelo matemático base	183
Tabla 6-2: Parámetros de entrada modelo matemático base.....	184
Tabla 6-3: Variables de decisión modelo matemático base.....	186
Tabla 6-4: Resumen componentes modelo matemático bajo un enfoque <i>DCS</i>	187
Tabla 6-5: Parámetros de entrada modelo matemático bajo un enfoque <i>DCS</i>	188
Tabla 6-6: Variables de decisión modelo matemático bajo un enfoque <i>DCS</i>	192
Tabla 6-7: Resumen componentes modelo matemático bajo una formulación <i>ILRP</i>	194
Tabla 6-8: Parámetros de entrada modelo matemático bajo una formulación <i>ILRP</i>	195
Tabla 6-9: Variables de decisión modelo matemático bajo una formulación <i>ILRP</i>	199
Tabla 6-10: Resumen componentes modelo matemático <i>DCS – ILRP</i> bajo un enfoque estocástico y sostenible	201
Tabla 6-11: Parámetros de entrada modelo matemático <i>DCS – ILRP</i> bajo un enfoque estocástico y sostenible	202
Tabla 6-12: Variables de decisión modelo matemático <i>DCS – ILRP</i> bajo un enfoque estocástico y sostenible	206
Tabla 6-13: Fuentes de información para la aplicación del modelo	219
Tabla 6-14: Producción de residuos por hectárea de café cultivada.....	219
Tabla 6-15: Zonas de demanda	221
Tabla 6-16: Parámetros de entrada caso de estudio Región cafetera de Colombia.....	222
Tabla 6-17: Costos para centros de acopio en el periodo de tiempo 1 [USD]	222
Tabla 6-18: Costo Variable de centros de acopio en el periodo de tiempo 1 [USD/ton]	223
Tabla 6-19: Costos de transporte de los residuos desde proveedores hasta centros de acopio en el periodo de tiempo 1 [USD/ton].....	223
Tabla 6-20: Costo de Inventario en centros de acopio en el periodo de tiempo 1 [USD/ton].....	224
Tabla 6-21: Costos para biorrefinerías en el periodo de tiempo 1 [USD]	224
Tabla 6-22: Costos de transporte de los residuos desde centros de acopio a biorrefinerías en el periodo de tiempo 1 [USD/ton].....	225
Tabla 6-23: Costos de transporte desde biorrefinerías a centrales de mezcla en el periodo de tiempo 1 [USD/litros]	225
Tabla 6-24: Impactos ambientales en los centros de acopio.....	225
Tabla 6-25: CO ₂ generado por el transporte de los residuos desde proveedores hasta centros de acopio [ton CO ₂ /ton residuo]	226
Tabla 6-26: CO ₂ generado por el transporte de los residuos desde los centros de acopio a las biorrefinerías [ton CO ₂ /ton residuo].....	226
Tabla 6-27: CO ₂ generado por el transporte desde las biorrefinerías hasta las centrales de mezcla [ton CO ₂ /litro bioetanol]	226
Tabla 6-28: Índice de desempleo ubicaciones en el periodo de tiempo 1	227
Tabla 6-29: Disponibilidad de suministro	227
Tabla 6-30: Capacidades centros de acopio	228
Tabla 6-31: Demanda de centrales de mezcla [Litros]	228
Tabla 6-32: Ejemplo de asignación de probabilidades a lista de opciones de cierre de instalaciones	230

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ACO</i>	Algoritmo de colonia de hormigas
<i>ASC</i>	Cadena de Suministro Agrícola
<i>BSC-CW</i>	Cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café
<i>BSCND</i>	Diseño de cadena de suministro de biocombustible
<i>CP</i>	Programación Compromiso
<i>DCS</i>	Estrategia de configuración dinámica
<i>DCS-ILRP</i>	Problema de localización con una estrategia de configuración dinámica, ruteo e inventario
<i>SCS</i>	Estrategia de configuración estática
<i>GA</i>	Algoritmo genético
<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero
<i>GRI</i>	Iniciativa de reporte global
<i>GSCM</i>	Gestión cadena de suministro verde
<i>ICP</i>	Problema de Control de Inventario
<i>ILRP</i>	Problema de localización, ruteo e inventario
<i>LAP</i>	Problema de Localización/Asignación
<i>LIP</i>	Problema de Localización e inventario
<i>LRP</i>	Problema de Localización y enrutamiento
<i>Em</i>	Método exacto
<i>MOSMILP</i>	Programación estocástica lineal entera mixta de objetivos múltiples
<i>PSO</i>	Optimización de enjambre de partículas
<i>RL</i>	Logística inversa
<i>SA</i>	Algoritmo de recocido simulado
<i>SCND</i>	Diseño de cadena de abastecimiento
<i>SST</i>	Sólidos Suspendidos Totales
<i>TS</i>	Algoritmo de búsqueda tabú
<i>NPV</i>	Valor Presente Neto
<i>VRP</i>	Problema de enrutamiento de vehículos
<i>WRSC</i>	Cadena de suministro inversa de residuos

Introducción

La preocupación por el cambio climático, la seguridad energética y la menor oferta de combustibles fósiles, han motivado que diversos países centren su atención en los biocombustibles (Habibi et al., 2018a). Dado su potencial para reducir la dependencia de combustibles tradicionales, emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y mejorar la seguridad energética (Escobar et al., 2009; Ghani & Gheewala, 2021; IPCC, 2019).

Dependiendo de las materias primas que se utilizan en el proceso, los biocombustibles se clasifican en cuatro generaciones. El biocombustible de primera generación se obtiene a partir de biomasa con valor nutricional como la caña de azúcar y el maíz. Sin embargo, su sostenibilidad es debatida debido a las amenazas potenciales sobre los suministros de alimentos, biodiversidad e impactos del cambio indirecto en el uso de la tierra sobre las emisiones totales de GEI (Nguyen et al., 2019). Por otra parte, los biocombustibles de segunda generación se producen a partir de residuos agrícolas y forestales, que no afectan la seguridad alimentaria ni la alternancia de cultivos (Nur et al., 2020). De otro modo, la tercera y cuarta generación de biocombustibles centra su producción en microalgas que tampoco afecta la tierra cultivable (Shanmugam et al., 2021).

En el contexto de la producción de biocombustibles de segunda generación, los residuos de café se han identificado como una fuente importante de materia prima dado su potencial orgánico y rentabilidad (Bonilla-Hermosa et al., 2014). En particular, los tallos, pulpa y mucílago por su alto contenido de azúcares son biomasas potenciales para la producción de bioetanol (Duarte et al., 2014). Adicionalmente, se obtiene no sólo las ventajas de la bioenergía sin el uso adicional de la tierra, sino también, la eliminación de desechos sólidos y problemas de contaminación asociados a los residuos del cultivo (Summers et al., 2014).

Múltiples estudios han considerado la utilización de los residuos de café para la producción de bioalcoholes, en donde se han analizado las diferentes configuraciones del proceso de producción y tecnología por utilizar (Duarte, 2015; Pandey et al., 2000; Rodríguez & Zambrano, 2014). En especial, Duarte (2016) realizó el diseño de una planta multipropósito para la producción de

biocombustibles a partir de tallos, pulpa y mucílago de café. Sin embargo, dichos estudios sugieren la necesidad de superar retos logísticos como: capacidad de las instalaciones (centros de acopio y biorrefinerías), la recolección in situ, disponibilidad continua de la materia prima, almacenamiento y transporte (Duarte, 2015; Triana, et al., 2011).

Teniendo en cuenta que los residuos provienen de campos agrícolas, factores como la estacionalidad del cultivo, perecibilidad de la biomasa, variaciones climáticas, calidad del suelo y plagas generan una alta variabilidad en la disponibilidad del suministro (Yao & Askin, 2019). Esta característica requiere flexibilidad en la toma de decisiones con relación a la localización y asignación de capacidad de las instalaciones. Para tal fin, se debe implementar una estrategia de configuración dinámica (*DCS: Dynamic Configuration Strategy*) que determine el momento óptimo para abrir una instalación, la capacidad con la que operará y si a lo largo del periodo de planificación es necesario expandir la capacidad o tomar la decisión de cierre de la instalación (Morales-Chavez et al., 2018).

Adicionalmente, se deben considerar de manera simultánea decisiones de inventario, que garanticen en los periodos de baja cosecha un suministro constante de materia prima a las biorrefinerías, evitando costos de parada en los procesos de producción (Ng & Maravelias, 2016). Mas aún, debido a los efectos de la incertidumbre en las decisiones de planificación, la disponibilidad de suministro se debe incorporar como un parámetro estocástico, puesto que no prestar atención a la naturaleza incierta del problema puede generar soluciones de diseño subóptimas o incluso inviables (Rabbani et al., 2019). Por otro lado, los proveedores de biomasa son un conjunto de granjas geográficamente dispersas, en donde la cantidad de biomasa generada es inferior a la capacidad de los vehículos, esto implica que la recolección de los residuos no se realice por envíos directos, sino a través de vehículos que visitan a varios proveedores en una misma ruta.

Bajo esta perspectiva, el diseño integral de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café exige abordar tres subproblemas fundamentales: el problema de localización/asignación (*LAP: Location Allocation Problem*), el problema de control de inventario (*ICP: Inventory Control Problem*) y el problema de enrutamiento de vehículos (*VRP: Vehicle Routing Problem*). El objetivo del LAP es elegir las mejores ubicaciones y capacidades para las instalaciones de un determinado conjunto de sitios candidatos, con miras a minimizar la suma de los costos de apertura y el costo de la asignación de clientes. En el ICP se determina la cantidad y frecuencia de entrega de cada cliente para satisfacer su demanda y garantizar que no se produzca

desabastecimiento. Finalmente, el VRP determina las rutas de entrega desde una instalación dada, a clientes geográficamente dispersos (Ahmadi-Javid & Seddighi, 2012).

Por otra parte, las crecientes preocupaciones relacionadas con las condiciones sociales y ambientales motivaron la dinámica actual de la sociedad, en donde las empresas deben invertir en decisiones que contribuyan a las tres dimensiones de la sostenibilidad (da Silva et al., 2020). Por esta razón, avanzar hacia el desarrollo sostenible es un objetivo estratégico primario para las cadenas de suministro, en el cual garanticen la rentabilidad económica sin comprometer los objetivos ambientales y sociales (Babagolzadeh et al., 2020). No obstante, el equilibrio de los tres pilares de la sostenibilidad genera retos en el diseño de la red de abastecimiento. Por ejemplo, incrementar la capacidad del sistema redundaría en un mejoramiento económico y en el impacto social por la generación de empleo. Sin embargo, tendría un efecto ambiental negativo al elevar la generación de CO₂.

Bajo este marco, un adecuado diseño de la cadena de abastecimiento (*SCND: Supply Chain Network Design*) de biocombustible debe establecer la combinación adecuada de decisiones de localización de instalaciones, control de inventario y enrutamiento de vehículos (*ILRP: Inventory Location Routing Problem*) (Asadi et al., 2018), considerando la incertidumbre en la disponibilidad de la materia prima y las tres dimensiones de sostenibilidad, que permitan obtener procesos económicamente viables, ambientalmente benignos y socialmente justos (Čuček et al., 2012).

Sin embargo, diversas investigaciones han demostrado que el *ILRP* es un problema *NP-hard* (Habibi et al., 2018). Teniendo en cuenta que este tipo de problemas se solucionan mediante búsqueda exhaustiva en tiempos no polinomiales, su aplicación en la modelación de cadenas de abastecimiento se torna altamente compleja desde el punto de vista computacional. En consecuencia, el *SCND* de biocombustible enfrenta retos desde la modelación matemática, no solo al incorporar el desarrollo sostenible en la toma de decisiones de orden estratégico (localización), táctico (inventario) y operativo (ruteo) considerando un comportamiento estocástico; sino también desde la metodología de solución que permita resolver el problema *NP-hard*.

Después del análisis de la literatura sobre el *SCND* siguiendo una formulación *ILRP*, se identificaron algunos vacíos de investigación importantes:

- Existen pocos trabajos que aborden el *SCND* integrando decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios, más aún en el contexto de biocombustibles. Solo se encontraron dos contribuciones,

las cuales resuelven el *ILRP* en un entorno menos realista, ya que se trabajaron en un horizonte de planeación de período único y para un solo residuo en lo que respecta al flujo de materiales.

- La localización de instalaciones siguiendo una estrategia de configuración estática (*SCS*) es el único enfoque utilizado para abordar el problema del diseño de cadenas de suministro que integren las decisiones de localización, ruteo e inventario. La configuración dinámica (apertura, expansión y cierre en cualquier periodo de tiempo) de las instalaciones es un tema que ha sido totalmente ignorado. Por otra parte, las contribuciones que emplean una formulación que sigue una estrategia de configuración dinámica (*DCS*) son escasas y solo abarcan las decisiones de localización de instalaciones. El inventario y enrutamiento de vehículos no son considerados.
- La mayoría de los modelos matemáticos propuestos no consideran el estudio del *ILRP* vinculados a la optimización de métricas de desempeño sostenible. Solo siete contribuciones, abordaron simultáneamente los tres pilares de la sostenibilidad (económico, ambiental y social). Por otro lado, no se encontró ningún aporte que incorpore las tres dimensiones de sostenibilidad en los artículos que resuelven el *ILRP* en el contexto de biocombustibles, ni en los que desarrollan el diseño de cadenas de suministro de biocombustibles a partir de residuos de café, tampoco en los que consideran la estrategia de configuración dinámica.
- El tratamiento de la incertidumbre más común es desarrollado en el análisis de post-optimalidad. Por lo general en las contribuciones se hace una variación numérica de los parámetros de entrada para observar que influencia tienen sobre los indicadores de desempeño que se están optimizando. Sin embargo, pocas contribuciones incorporan el tratamiento de la incertidumbre desde la formulación del problema en el modelo matemático que proponen. En particular, la demanda es el parámetro estocástico más estudiado, dejando a un lado la variabilidad de la disponibilidad del suministro y su impacto en el rendimiento de la cadena de abastecimiento.
- Los modelos propuestos relacionados con el diseño de la cadena de suministro de biocombustibles (*BSCND: Biofuel Supply Chain Network Design*), basados en residuos de cultivos de café, solo asumen la utilización de una materia prima y no la reutilización de múltiples residuos de café. Así mismo, ninguna contribución ha abordado dicho problema integrando múltiples decisiones (*ILRP*) ni optimizando simultáneamente las tres dimensiones que componen el enfoque de sostenibilidad.

De acuerdo con los planteamientos anteriores, y los vacíos de conocimiento identificados en la revisión sistemática de la literatura, se formuló la pregunta de investigación, el sistema de objetivos y las hipótesis de investigación que guiaron el desarrollo de la presente tesis doctoral:

Pregunta de investigación: ¿Cómo estructurar una cadena de suministro de biocombustible de residuos de café, a partir de un diseño que integre decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios, bajo un enfoque de sostenibilidad, que resulte viable desde el punto de vista de la complejidad computacional?

Sistematización del problema de investigación:

- Desde el punto de vista conceptual ¿Cómo debe estructurarse una cadena de suministro que integre las decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios?
- ¿Qué implicaciones exige el diseño de una cadena de suministro que involucre las exigencias de sostenibilidad?
- ¿Cuáles son los objetivos, variables, parámetros y restricciones que debe incorporar el diseño de la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café?
- ¿Cómo se debe estructurar el modelo matemático para abordar el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café?
- ¿Cuál es la metodología de solución apropiada para diseñar una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, que permita hacer frente a la complejidad computacional?

Para resolver las preguntas de investigación, se definieron los siguientes objetivos:

Objetivo general: Diseñar una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, que integre decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios, bajo un enfoque sostenible, que resulte viable desde el punto de vista de la complejidad computacional.

Objetivos específicos:

- Identificar, desde el punto de vista conceptual, los aspectos que deben ser incorporados en el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, integrando decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios, además de las exigencias de sostenibilidad.
- Determinar los objetivos, variables, parámetros y restricciones que debe incorporar el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café.

- Diseñar un modelo matemático para el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, con base en las características identificadas.
- Definir una metodología de solución que se ajuste a las limitaciones impuestas por la complejidad computacional derivada del modelo.
- Validar el desempeño del modelo matemático mediante su aplicación y contextualización en las particularidades de la región cafetera de Colombia.

En consonancia con las preguntas y los objetivos de la presente investigación, la hipótesis formulada originalmente fue la siguiente:

Hipótesis de investigación:

“El diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, mediante la integración sostenible de las decisiones de instalaciones, ruteo e inventario, permite lograr un desempeño equilibrado entre la eficiencia económica, la eficiencia ambiental y la eficiencia social”.

No obstante, teniendo en cuenta que el conjunto de modelos formulados a lo largo del proceso de investigación abrió nuevas posibilidades de experimentación y aportación al campo de conocimiento, se planteó una hipótesis de investigación adicional así:

“Una estrategia de configuración dinámica de instalaciones (apertura, expansión y cierre en cualquier período de tiempo), aplicada al diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos agrícolas, permite obtener mejor desempeño económico, ambiental y social en comparación con una estrategia de configuración estática”.

Esta investigación aporta un conjunto de resultados y hallazgos teórico, metodológicos y prácticos que se describen a continuación:

Desde el punto de vista del aporte teórico; esta investigación es la primera en abordar una *DCS* en el *SCND* que integra las decisiones de localización, ruteo e inventario (*DCS-ILRP*) bajo un enfoque sostenible y estocástico. Esta formulación se utiliza en el diseño de la cadena suministro de biocombustible a partir de residuos de café. Esta novedosa formulación (*DCS-ILRP*) permite una configuración flexible de las instalaciones dentro del horizonte de planificación de la cadena de suministro. Los resultados muestran claramente que la implementación de la *DCS* genera una solución más eficiente con relación a una estrategia de configuración estática, haciendo posible una

mayor producción de biocombustible, una cadena de suministro más rentable, menores impactos ambientales y una mayor utilización de la tierra para la producción de alimentos, lo cual constituye un avance relevante en el campo de estudio. El planteamiento del modelo original incluye algunas ecuaciones no lineales, para lo cual se propuso una estrategia de linealización.

Con relación a la contribución metodológica, se diseña un método heurístico personalizado de dos fases. En la primera fase se genera una solución inicial factible, que se mejora iterativamente en la segunda etapa utilizando una adaptación de la técnica metaheurística de recocido simulado (*SA: Simulated annealing*). Aunque el SA se ha utilizado en la solución de modelos matemáticos que siguen una formulación *ILRP* (Rahbari et al., 2022; Wu et al., 2021), teniendo en cuenta que es la primera vez que se propone abordar este problema bajo una *DCS*, fue necesaria una adaptación del algoritmo para generar una solución considerando: 1) las decisiones de ubicación, apertura, expansión de capacidad y cierre de las instalaciones en cualquier periodo dentro del horizonte de planeación; 2) la medición de las tres funciones objetivo relacionadas con la sostenibilidad y 3) la generación de escenarios para la utilización de la programación estocástica de dos etapas. Adicionalmente, se garantiza la factibilidad de las soluciones iniciales y de las que se generen al aplicar el mecanismo de inserción.

Se analiza un caso de estudio en Colombia y 15 conjuntos de datos adaptados de la literatura. Los resultados demuestran la eficiencia de la heurística propuesta en términos de la calidad de la solución y tiempo computacional en comparación con el método exacto. De igual manera, se observan las ventajas de la integración de los tres objetivos del enfoque sostenible (económico, ambiental y social) en la formulación *ILRP* en contraste con la optimización tradicional de un solo objetivo. Adicionalmente, se evidencia que la *DCS* contribuye a un mejor desempeño económico, ambiental y social en comparación con la estrategia de configuración estática en el *SCND*.

Como contribución práctica de esta tesis doctoral, se resalta la versatilidad de resultados que ofrece el modelo y la metodología de solución en la toma de decisiones en escenarios de tipo empresarial y gubernamental, al generar soluciones que consideran las incertidumbres del sector y los pilares de sostenibilidad que demanda la sociedad. Así mismo, este tipo de proyectos de inversión promueven la transición hacia una economía circular, en donde los residuos son utilizados como materia prima para un nuevo proceso industrial, contribuyendo a la gestión adecuada de residuos que redunde en beneficios para la salud humana y del planeta, además de la generación de empleos y desarrollo económico.

Por otra parte, teniendo en cuenta los retos que enfrentan los países después de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2021, en donde se comprometen a reducir los gases de efecto invernadero, acelerar la producción de energía renovable y reducir el calentamiento global «muy por debajo» de los 2°C, promover iniciativas que aborden la generación de biocombustible es una alternativa que aporta al cumplimiento de las metas establecidas. Adicionalmente, es importante que el cumplimiento de estas metas no lleve a agudizar la situación de la seguridad alimentaria. Por tanto, es esencial fomentar la producción de biocombustible de segunda generación (residuos agrícolas y forestales) evitando el uso de biomásas que se utilizan para el consumo humano y animal (biocombustibles de primera generación).

Como resultado en los esfuerzos de difusión de conocimiento llevados a cabo en la presente investigación, se relacionan los siguientes: 1) cuatro artículos científicos publicados en revistas reconocidas y de alta circulación internacional (tres de ellas en cuartil 1, Q1): *Computers & Industrial Engineering*, *Journal of Cleaner Production*, *Transportation Research Part E* y *DYNA*; 2) un libro de investigación publicado bajo el sello editorial de la Universidad Nacional de Colombia; 3) dos capítulos de libro publicados en libros de investigación financiados con recursos de convocatorias de investigación. Así mismo, se presentaron 8 ponencias internacionales y 5 nacionales en eventos de categoría en el campo de la investigación de operaciones, tales como *ALIO*, *MIT SCALE*, *CLAIO*, entre otros. De igual manera se realizaron estancias investigativas en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Austria y en el *MIT-ZLC* en España. Adicionalmente se participó en calidad de coinvestigadora en el proyecto financiado por Colciencias “*Modelamiento del eslabón de abastecimiento para una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, integrando decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios, bajo un enfoque económico-ambiental. Aplicaciones en el eje cafetero colombiano*”. Toda esta información se detalla en el Anexo A.

El desarrollo de la tesis doctoral se dividió en cinco etapas, que se reflejan en la estructura de este documento de la siguiente manera: El Capítulo 1 presenta un marco de las bases teóricas y contextuales para el *BSCND* a partir de residuos de café, además de una revisión sistemática de la literatura que evidencia el estado del arte del problema de investigación y los vacíos de conocimientos identificados. En el Capítulo 2 se detalla la construcción de los modelos matemáticos para los cuales se diseña una metodología de solución que se describe en el Capítulo 3. Los resultados computacionales y la comprobación de las hipótesis de investigación se presentan en el

Capítulo 4. Finalmente, en el Capítulo 5 se enumeran algunas conclusiones importantes y futuras líneas de investigación.

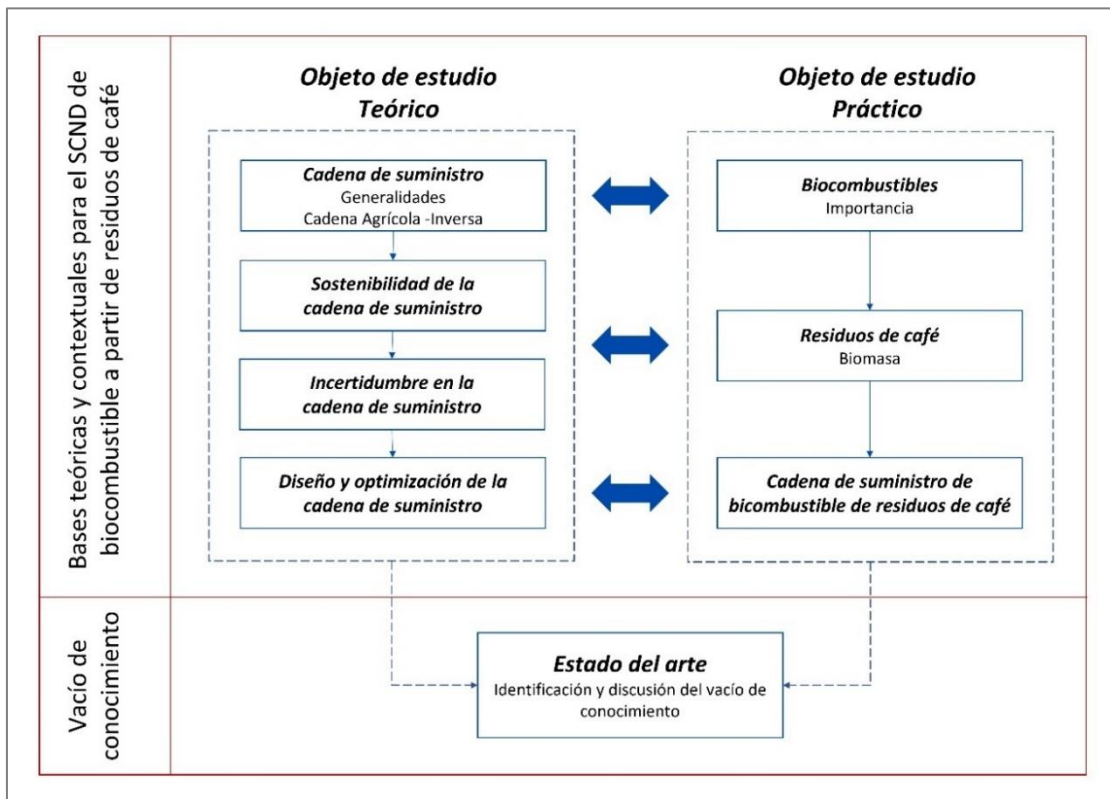
1. Marco teórico y contextual

La producción de combustibles a partir de biomasa lignocelulósica se ha identificado como una estrategia de energía prometedoras. No obstante, el abastecimiento, la producción y la comercialización como una cadena de suministro integrada y sostenible, implica serios desafíos (O'Neill & Maravelias, 2021). En este sentido, este capítulo tiene como objetivo identificar las bases teóricas y contextuales del diseño de la cadena de suministro de bicomcombustible a partir de residuos de café, que permitan establecer sus características y complejidades con relación a la integración de decisiones de localización, ruteo e inventario bajo un enfoque sostenible. Así mismo, además de determinar los aspectos que conforman el dominio teórico de esta tesis, se establece hasta dónde han llegado las investigaciones que han abordado desde la perspectiva de la optimización matemática, el diseño de cadenas de abastecimiento (*SCND: Supply Chain Network Design*) considerando la conjunción de las tres decisiones. Para posteriormente identificar los vacíos de conocimiento como resultado de una discusión profunda de la literatura.

Para su estructuración, el hilo conductor del marco teórico y contextual en el que se fundamenta esta tesis doctoral se construyó en función de dos ejes fundamentales (Figura 1-1). El eje teórico se centra en la cadena de abastecimiento. Se inicia con el concepto y generalidades, detallando las características de la cadena de suministro inversa y agrícola por ser las que enmarcan el objeto de estudio de esta investigación. Enseguida, se presentan los enfoques de sostenibilidad e incertidumbre en el diseño y gestión de la cadena de abastecimiento, para finalmente abordar la optimización en el *SCND*. Por otro lado, para describir el objeto de estudio práctico de esta investigación, se brinda un panorama global de los biocombustibles, su importancia en la mitigación del cambio climático y el papel que juegan como alternativa de solución a la crisis ambiental y energética que afecta el planeta. Dentro de este contexto surgen los residuos de café como una fuente atractiva para este tipo de combustible orgánico y se enfatiza en las particularidades de su cadena de suministro.

A partir de este marco teórico y con el fin de identificar los vacíos de conocimiento, se realizó una revisión sistemática de la literatura utilizando la técnica análisis de contenido (Seuring & Gold, 2012), que relaciona los avances en el *SCND* bajo el enfoque del problema de inventario, localización y ruteamiento (*ILRP: Inventory Location Routing Problem*) en cadenas de abastecimiento en general y en el sector de biocombustibles en particular. Adicionalmente, se incluyen los aportes en el diseño de la cadena de suministro de biocombustible (*BSCND: Biofuel Supply Chain Network Design*) a partir de residuos de café, como también la integración de la estrategia de configuración dinámica (*DCS: Dynamic Configuration Strategy*) en el diseño de cadenas de suministro. Por último, se presentan las conclusiones parciales del capítulo.

Figura 1-1: Hilo conductor marco teórico y contextual



Fuente: Elaboración propia

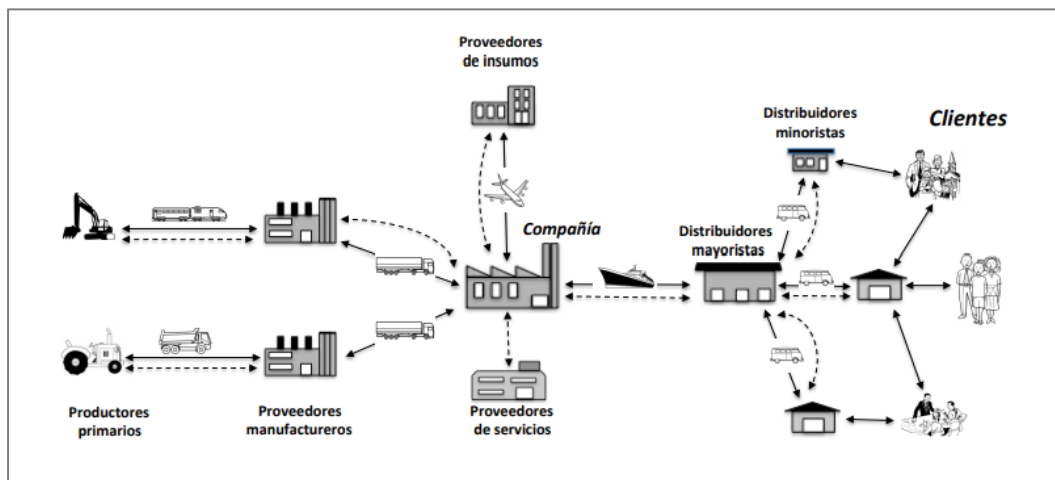
1.1 Cadena de suministro

1.1.1 Generalidades de la cadena de suministro

En el entorno competitivo actual, la capacidad de una empresa para tener éxito dependerá de la habilidad que tenga para integrarse con los múltiples actores de la red de suministro. Christopher

(2007) define la Cadena de Suministro como una red de empresas independientes e interconectadas que trabajan de forma cooperativa para administrar y mejorar el flujo de materiales e información desde los proveedores hasta los consumidores finales. Posteriormente Jiménez et al. (2002) ampliaron la definición como el conjunto de empresas integradas por proveedores, fabricantes, distribuidores y vendedores (mayoristas o detallistas) coordinados eficientemente por medio de relaciones de colaboración en sus procesos clave para colocar los requerimientos de insumos o productos en cada eslabón de la cadena en el tiempo preciso al menor costo, buscando el mayor impacto en la cadena de valor de los integrantes con el propósito de satisfacer los requerimientos de los consumidores finales (Figura 1-2).

Figura 1-2: Esquema simplificado de una cadena de abastecimiento



Fuente: (Sarache & Morales-Chavez, 2016)

Las decisiones de instalaciones, transporte e inventario conforman los tres elementos clave que afectan el desempeño de una cadena de abastecimiento; estas se mueven en los niveles estratégicos, tácticos y operativos (Tabla 1-1). Las decisiones estratégicas consideran el diseño y la gestión en el largo plazo como las relacionadas con la configuración de la cadena de suministro, la asignación de recursos y los procesos que debe desarrollar cada nodo. En el nivel estratégico las decisiones de instalaciones se encargan de elegir las mejores ubicaciones de un determinado conjunto de sitios candidatos, con miras a minimizar la suma de los costos de apertura y el costo de la asignación de clientes. Adicionalmente se determina el momento óptimo para abrir cada instalación, la capacidad con la que operará y si a lo largo del periodo de planificación es necesario expandir la capacidad o tomar la decisión de cierre de la instalación (Morales-Chavez et al., 2018). Por otro lado, es necesario

seleccionar la tecnología y configuración del proceso de producción, de tal manera que se garantice la calidad del producto considerando los impactos ambientales que el proceso genera.

Tabla 1-1: Decisiones en la gestión de la cadena de suministro

Nivel	Instalaciones	Abastecimiento e inventarios	Transporte
Estratégico	Localización de instalaciones.	Definición de la política de inventarios	Selección de modos y medios de transporte
	Selección de capacidad, tecnología y configuración del proceso	Selección de la base de proveedores	Selección de rutas
	Selección de tecnologías de información para la planeación y control	Diseño de producto	Tecnologías de información para la gestión del transporte
		Selección de tecnologías de información	
		Diseño de almacenes	
		Selección del sistema de manejo de materiales	
Táctico	Planeación de la capacidad a mediano plazo	Planeación de compras	Planeación de la capacidad del sistema de transporte
		Definición de surtidos	
		Planeación de los niveles de inventario	Selección de rutas
		Definición de los niveles de seguridad	Programación del transporte a mediano plazo
Operativo	Programación y secuencia de pedidos	Preparación de despachos.	Programación de entregas.
	Ejecución	Empaquetado	Programación de rutas
	Control de pedidos	Programación de requerimientos	Control de operaciones de transporte
	Mantenimiento	Control de compras	
		Control de existencias	
		Cargue y descargue	

Fuente: Sarache & Morales-Chávez (2016)

A su vez, las decisiones de transporte se centran en la selección de los modos, medios y rutas de entrega desde una instalación dada, a clientes geográficamente dispersos (Ahmadi-Javid & Seddighi, 2012). Así mismo, las decisiones de inventario se ocupan de la definición de políticas, diseño de almacenes y selección de proveedores con el fin de satisfacer la demanda y garantizar que no se produzca desabastecimiento (Sarache & Morales-Chavez, 2016). Existe una alta interdependencia entre estas tres decisiones, ya que la eficiencia de un sistema de distribución dependerá de la ubicación de las instalaciones. A su vez la gestión de inventarios está íntimamente ligada a los planes de envío (Max Shen & Qi, 2007). Sin embargo, la alta complejidad computacional del problema de

optimización conjunta ha ocasionado que se consideren de forma independiente en el diseño de la cadena de suministro, ocasionando soluciones subóptimas y aumento del costo total del sistema (Guerrero et al., 2013).

Teniendo en cuenta que la materia prima de la cadena de suministro objeto de estudio son residuos agrícolas, se presenta a continuación dos apartados para ilustrar en términos generales las características y complejidades de la Cadena de Suministro Inversa y la Cadena de Suministro Agrícola.

▪ Cadena de Suministro Inversa

A medida que las preocupaciones ambientales se volvieron importantes durante el siglo XX, se establecieron regulaciones más estrictas, en las cuales los consumidores y autoridades demandan que los fabricantes reduzcan los desechos generados por sus productos y proporcionen actividades respetuosas con el medio ambiente (Van Engeland et al., 2020). Con este fin, la gestión de la cadena de suministro verde (*GSCM: Green Supply Chain Management*) considera los efectos ambientales de todas las actividades de la cadena de suministro, desde la obtención de materias primas hasta la entrega final de los productos terminados (Bag et al., 2022). La *GSCM* incluye principalmente diseño verde, adquisición verde, fabricación verde, inventario y reciclaje verdes (Hu & Li, 2022).

Uno de los principales elementos para promover el desempeño ambiental en la *GSCM* es el reciclaje a través de redes de logística inversa (*RL: Reverse Logistics*). La *RL* se refiere a las operaciones de recolección de bienes usados para su reutilización, reparación y reciclaje que permitan producir nuevos productos o garantizar una eliminación adecuada (Van Engeland et al., 2020). *RL* ayuda a las empresas a obtener una ventaja competitiva mediante la creación de valor económico a través de la reutilización y recuperación. Al ser el paso principal en las iniciativas de la *GSCM*, en *RL* los materiales utilizados pueden transformarse en nuevos productos que podrían regresar al mismo mercado (dentro de las denominadas cadenas de suministro de ciclo cerrado) o a otros mercados (Tavana et al., 2021).

Un área que está estrechamente ligada a la *RL* es la gestión de residuos, que en los últimos años ha pasado de la eliminación segura a opciones atractivas para el medio ambiente y la economía, como residuos para energía (*Waste to Energy*) y residuos para materiales (*Waste to Materials*). Inspirado por el creciente enfoque en la gestión de materiales en una economía circular en la que el valor de los productos, materiales y recursos se mantiene en la economía durante el mayor tiempo posible.

Utilizar los residuos como recurso es uno de los elementos clave que implica opciones de recuperación de nivel superior. Una cadena de suministro inversa diseñada para el procesamiento de residuos (*WRSC: Waste Reverse Supply Chain*) consiste en una red que consta de todas las entidades involucradas en el flujo de productos desechados. Incluye recolección, transporte, recuperación y disposición de residuos. Su propósito es recapturar o crear valor y / o disposición adecuada. Como tal, una cadena de suministro inversa de residuos es un caso especial de una cadena de suministro inversa (Van Engeland et al., 2020).

Un aspecto importante en una *WRSC* es el grado de incertidumbre en términos de cantidad y calidad de residuos para su posterior tratamiento y creación de valor. Ambos son determinantes para una estructura adecuada de la red (Sasikumar & Kannan, 2008b). Adicionalmente, la gestión de la recolección y adquisición de estos productos representa una parte significativa de los costos totales de cualquier cadena de suministro inversa (Sasikumar & Kannan, 2008a). Estos procesos son complejos debido a la cantidad de actores involucrados (clientes, recolectores, recicladores, etc.) y de recursos requeridos. Por tanto, es crucial administrar de manera eficiente este tipo de cadena (Kumar et al., 2014).

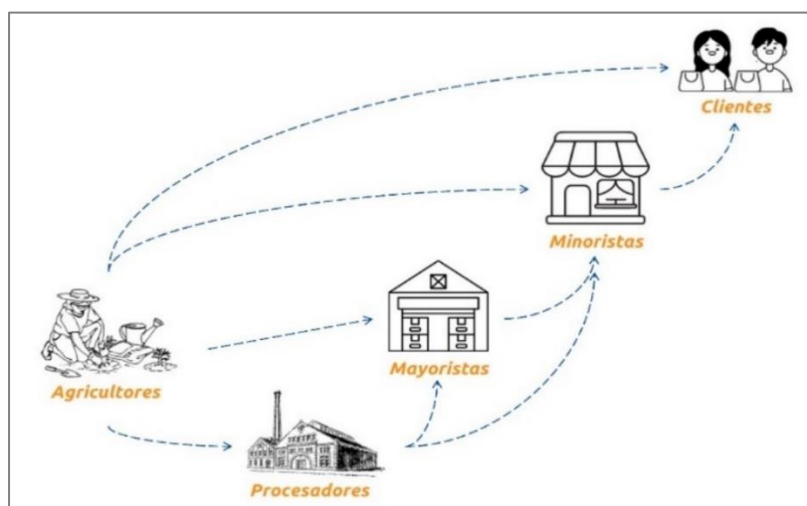
▪ **Cadena de Suministro Agrícola**

La agricultura es el término más amplio para denotar las diversas formas en que las plantas de cultivo y los animales domésticos sostienen a la población humana proporcionando alimentos, bioenergía y productos para materiales industriales (Borodin et al., 2016). En consecuencia, la Cadena de Suministro Agrícola (*ASC: Agricultural Supply Chain*) tiene importancia tanto en términos de consumo como de valor monetario (Amaruchkul, 2021). Existen variantes en la configuración de la red de la *ASC* puesto que los agricultores pueden vender sus productos frescos directamente a los clientes en las plazas de mercado o a distribuidores ya sean mayorista o minorista, sin pasar por el eslabón industrial. Por otro lado, cuando los productos requieren una transformación se incluirá en la red de suministro las plantas procesadoras (Figura 1-3).

La gestión eficiente de la *ASC* implica serios desafíos teniendo en cuenta las diferentes fuentes de complejidad que entraña (Tabla 1-2). La principal diferencia entre una cadena de suministro convencional y una *ASC* es que las materias primas de esta última se cultivan utilizando diferentes prácticas agrícolas, lo que genera características específicas que hacen que la gestión de riesgos sea compleja porque contiene más fuentes de incertidumbre (Kamble et al., 2020). Estas características son estacionalidad, variabilidad climática, plagas y perecibilidad; factores que implican que tanto

los niveles como los tiempos de cosecha están sujetos a incertidumbres. Hacer frente a la estacionalidad requiere planificación, ya que el suministro es estacional, mientras que el consumo se mantiene durante todo el año. Adicionalmente, dado que la mayoría de los productos agrícolas son perecederos requieren de manipulación, almacenamiento y gestión de inventario específicos. Estas incertidumbres hacen que las ASC sean más vulnerables que las cadenas de suministro convencionales (Behzadi et al., 2018).

Figura 1-3: Configuraciones de la red de la cadena de suministro agrícola



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la ASC es de particular interés en el contexto de la sostenibilidad, dado que se debe aumentar la producción para evitar una escasez en el suministro alimentario. Sin embargo, un aumento en la producción y distribución de alimentos podría resultar en niveles más altos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y continuar convirtiendo los bosques en tierras agrícolas, con la consecuencia de causar erosión y una severa deforestación. En efecto, el sector agrícola es el segundo mayor emisor de GEI. Por tanto, es esencial garantizar la seguridad alimentaria mediante un equilibrio entre el crecimiento económico, la protección ambiental y el desarrollo social (Kamble et al., 2020; Nematollahi & Tajbakhsh, 2020).

Adicionalmente, el desperdicio de alimentos surge principalmente al inicio y en la etapa final de la ASC, es decir, la producción agrícola, el manejo y almacenamiento poscosecha y la fase de consumo (FAO, 2013). Los residuos agrícolas se pueden utilizar en una amplia gama de aplicaciones industriales, incluida la producción de energía, de alimentos para animales, aplicaciones químicas o farmacéuticas. En particular, la producción de biocombustibles puede verse como una cadena de

suministro inversa para los productos alimenticios, ya que ofrece información sobre posibles formas de valorizar su desperdicio (Banasik et al., 2017).

Tabla 1-2: Fuentes de complejidad de la cadena de suministro agrícola

Fuentes	Impacto
Asimetría tecnológica: cosechas manual- tecnificada	Disminución en el rendimiento global de la ACS.
Asimetría información: costos, demanda, calidad, interrupción	Procesos deficientes de sincronización entre eslabones de la cadena
Fragmentación de tierras en proveedores	Aumento de costo/tiempo de operaciones logísticas de transporte
Ubicación de predios de proveedores en zonas rurales	Vías de acceso restringidas a vehículos de baja capacidad impidiendo obtener beneficios de economías de escala
Condiciones climáticas / plagas en el eslabón agrícola	Cosecha por temporada - estacionalidad del suministro Alto nivel de incertidumbre con relación a la cantidad de suministro disponible
Perecibilidad del producto	Deterioro de la calidad del producto Incertidumbre con relación a la cantidad de producto disponible Necesidad de optimizar el tiempo de transporte y de espera de la ASC, además de diseño de cadena de frío que implica aumento de costos
Sostenibilidad	Alto volumen de desperdicio Niveles elevados de emisiones de GEI, erosión y deforestación

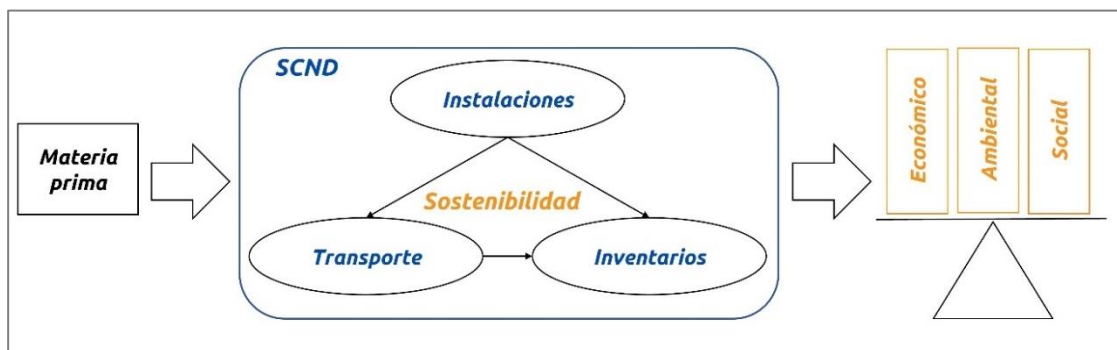
Fuente: Elaboración propia con base en Kamble et al.(2020), Behzadi et al.(2018), Nematollahi et al.(2020)

1.1.2 Enfoque de sostenibilidad en la cadena de suministro

La necesidad de conservación del medio ambiente, el aumento de la conciencia de los clientes y la introducción de estrictas políticas de los gobiernos han cambiado el enfoque de las organizaciones hacia un objetivo que equilibra los aspectos económicos con sus implicaciones sociales y ambientales (Waltho et al., 2019). Estudios han revelado que las cadenas de suministro convencionales representan aproximadamente el 50-70% de las emisiones de carbono (Lahri et al., 2021). Esta problemática, unida al cambio de paradigma, conduce a las empresas a adoptar prácticas de sostenibilidad en las operaciones de su cadena de abastecimiento. Según Seuring et al. (2008) en las cadenas de suministro sostenibles, los miembros deben cumplir los criterios ambientales y sociales para permanecer dentro de la cadena, mientras que se espera que la competitividad se mantenga al satisfacer las necesidades de los clientes y los criterios económicos relacionados.

Las decisiones estratégicas de la cadena de suministro tienen efectos considerables a largo plazo y un gran impacto en la sostenibilidad, que limita el campo de acción en contextos tácticos y operativos (Moreno-Camacho et al., 2019). Una de estas decisiones es el diseño de la red de suministro que implica la toma de decisiones de instalaciones, inventario y transporte teniendo en cuenta los tres pilares de la sostenibilidad, que permita obtener un equilibrio entre el crecimiento económico, desempeño ambiental y responsabilidad social como se muestra en la Figura 1-4. La búsqueda del equilibrio de estas tres dimensiones genera retos en el diseño de la red. Por ejemplo, incrementar la capacidad del sistema redundaría en un mejoramiento económico y en el impacto social por la generación de empleo. Sin embargo, tendría un efecto ambiental negativo al elevar la generación de CO₂. Por tanto, el SCND debe buscar un equilibrio entre asignación óptima (eficiencia económica), previendo y reduciendo el deterioro medioambiental (eficiencia ambiental y social).

Figura 1-4: Marco para el desarrollo sostenible



Fuente: Elaboración propia

El aspecto económico, está relacionado con la rentabilidad y el uso eficiente de recursos e inversiones, maximizando la competitividad, productividad y especialmente el crecimiento de los ingresos (Serageldin & Steer, 1994). En este sentido, la eficiencia económica se entiende como la relación existente entre las salidas útiles (o beneficios) y los recursos utilizados (Huysman et al., 2015). Generalmente las métricas utilizadas se relacionan con costos (apertura, fijos, variables, inventario, transporte) y ventas.

Mientras tanto, la sostenibilidad ambiental se centra en una condición de equilibrio, resiliencia e interconexión que permite a la sociedad satisfacer sus necesidades sin exceder la capacidad regenerativa de los ecosistemas de apoyo (Hajirasouli & Kumarasuriyar, 2016). La mayoría de las cadenas de suministro se enfocan en la reducción de emisiones de GEI como respuesta ambiental única. Sin embargo, a medida que los límites del sistema se expanden, se incluyen otras métricas

como el secuestro de carbono del suelo, nitrificación, calidad del agua, erosión del suelo y servicios de los ecosistemas (O'Neill & Maravelias, 2021). En consecuencia, la eficiencia ambiental se define como la relación entre los beneficios esperados y los impactos ambientales negativos (Huysman et al., 2015).

A su vez, la sostenibilidad social es el desarrollo de un entorno que mejora los niveles de vida y el bienestar al atender las necesidades de las personas donde viven y trabajan. En las organizaciones empresariales, la sostenibilidad social se puede medir a través de las condiciones laborales, salud y seguridad, derechos humanos, salarios laborales justos, generación de empleo, equilibrio entre la vida laboral y personal, igualdad de género, empoderamiento (Lahri et al., 2021). La eficiencia social implica la maximización de los impactos sociales positivos en relación con el valor agregado para las empresas. No obstante, aunque existe un paquete de indicadores que miden esta dimensión de la sostenibilidad, la mayoría son de tipo cualitativo, por tanto, es compleja su incorporación en un proceso de modelación matemática para el *SCND* (Schaffel & La Rovere, 2010).

1.1.3 El problema de la incertidumbre de la cadena de suministro

De acuerdo con Behzadi et al. (2018) en las últimas dos décadas, la gestión de riesgos de la cadena de suministro se ha convertido en un tema de investigación importante debido a varias razones, entre ellas; (1) la globalización ha hecho que las cadenas de suministro sean más largas y complejas; en consecuencia, están expuestas a más riesgos y se han vuelto más vulnerables. (2) la filosofía "*just in time*" se ha implementado en muchas industrias; la cual propone la eliminación / minimización de residuos y adopta la producción / logística justo a tiempo; que aunque mejora la eficiencia de la cadena de suministro, genera una mayor vulnerabilidad ante eventos adversos. Finalmente, (3) el mundo presta cada vez más atención a las interrupciones de la cadena de suministro que han sido causadas por eventos catastróficos.

Las interrupciones de la cadena de suministro influyen considerablemente en el desempeño de las organizaciones. Por tanto, se deben utilizar estrategias para que el *SCND* sea confiable con costo y riesgo mínimos (Zhao & Ke, 2017). La gestión de riesgos de la cadena de suministro considera básicamente dos fuentes principales de incertidumbre: los riesgos operativos y de interrupción (Feitó-Cespón et al., 2021). Los operativos cubren incertidumbres como demanda, oferta, costos inciertos, que se esperan ocurran con frecuencia. A su vez, los riesgos de interrupción se originan en eventos disruptivos naturales o provocados por el hombre, tienen baja probabilidad, pero altos

impactos y pueden considerar que algunos arcos y / o nodos en la red de la cadena no están disponibles (Alikhani et al., 2021). Estos riesgos crean perturbaciones en la cadena de suministro como:

- **Riesgo en producción y distribución:**

Se produce por la falla del producto en calidad y/o cantidad deseada en el momento adecuado. La configuración óptima de la red y la asignación de producción pueden funcionar incorrectamente debido a estos riesgos (Singh et al., 2012; Zhao & Ke, 2017).

- **Riesgo en demanda:**

El *SCND* depende principalmente de un pronóstico confiable de la demanda. Si el valor estimado es mayor que la demanda real, el inventario se acumula, lo que aumenta el costo del sistema. Si, por el contrario, la demanda es mayor, la cadena de suministro disminuye su rentabilidad en términos de pérdida de buena voluntad de los clientes. En ambos casos se reduce la eficiencia de la cadena de abastecimiento (Singh et al., 2012).

- **Riesgo en suministro:**

Este riesgo se produce debido al suministro incompleto. Las fallas en el flujo de mercancías ocurren cuando el material no se proporciona dentro del plazo máximo permitido y con la calidad requerida (Singh et al., 2012).

- **Riesgo en interacción:**

Este riesgo surge debido a la interacción entre la cadena de suministro y su entorno. El componente físico, social, legal, económico, la fluctuación de los tipos de cambio y el factor político gobierna el riesgo en interacción (Singh et al., 2012).

Los importantes efectos de la incertidumbre en la estructura de la red requieren que las decisiones de diseño incluyan estas características (Jonkman et al., 2019). No prestar atención a la naturaleza incierta del problema puede generar decisiones de planificación subóptimas o incluso inviables (Rabbani et al., 2019). En contraste, tener en cuenta las diferentes incertidumbres en la toma de decisiones puede abrir multitud de oportunidades para lograr un aumento de la eficiencia, capacidad de respuesta, integración empresarial y, en última instancia, la competitividad del mercado (Borodin et al., 2016; Ghelichi et al., 2018).

1.1.4 Diseño y optimización de la Cadena de Suministro

El diseño de la cadena de abastecimiento como decisión estratégica apunta principalmente a la estructuración óptima de la red de suministro; bajo una perspectiva de *trade-off* que conlleva a un equilibrio en términos de instalaciones (cantidad, capacidad y ubicación), inventario (tamaño de lote, frecuencias de entrega, portafolio de productos por almacenar y sistemas de control) y transporte (modos y medios de transporte y selección de rutas de entrega) para atender a los clientes de manera rápida y eficiente (Zandkarimkhani et al., 2020). Teniendo en cuenta que el *SCND* afecta la gestión del sistema, debe considerar implicaciones de tipo táctico (planeación de mediano plazo) y operativo (programación y control de operaciones) que aseguren un adecuado nivel de integración, así como el cumplimiento de metas de mediano y corto plazo (Ahmadi Javid & Azad, 2010; Guerrero et al., 2013; Melo et al., 2009).

Teniendo en cuenta lo anterior, el diseño integral de una cadena de suministro exige abordar tres subproblemas fundamentales: el Problema de Localización/Asignación (*LAP: Location Allocation Problem*), el Problema de Control de Inventario (*ICP: Inventory Control Problem*) y el Problema de Enrutamiento de Vehículos (*VRP: Vehicle Routing Problem*) (Yaghoubi & Akrami, 2019; Zhang et al., 2014). El objetivo del *LAP* es elegir las mejores ubicaciones y capacidades para las instalaciones de un determinado conjunto de sitios potenciales, con miras a minimizar la suma de costos de apertura y de asignación de clientes. En el *ICP* se determina cantidad y frecuencia de entrega de cada cliente para satisfacer su demanda y garantizar que no se produzca desabastecimiento. Finalmente, el *VRP* determina rutas de entrega desde una instalación dada, a clientes geográficamente dispersos (Ahmadi-Javid & Seddighi, 2012; Zheng et al., 2019).

En particular, los modelos tradicionales de localización (*LAP*) emplean una formulación donde la configuración de las instalaciones permanece estática durante el periodo de planeación (a lo que se llamará estrategia de configuración estática – *SCS Static Configuration Strategy*). Bajo una *SCS*, los modelos matemáticos asumen que la ubicación de la instalación y las decisiones de asignación de capacidad ocurren en el período de tiempo inicial, permaneciendo sin cambios durante el horizonte de planeación, adicionalmente, no se tiene la opción de cierre de la instalación (Biuki et al., 2020; Govindan et al., 2020; Kaya & Ozkok, 2020). Sin embargo, debido a la incertidumbre inherente de la cadena de abastecimiento, las *SCS* conducen a soluciones poco realistas para la toma de decisiones de inversiones a largo plazo (Morales-Chavez et al., 2018).

Por el contrario, la capacidad dinámica sugiere la habilidad de una organización para crear, ampliar o modificar intencionalmente su base de recursos (Beske et al., 2014). Por tanto, el objetivo de una estrategia de configuración dinámica (*DCS*) es determinar el mejor momento para abrir una instalación, la capacidad con la que operará y, adicionalmente, si a lo largo del periodo de planificación es necesario expandir esta capacidad o tomar la decisión del cierre de la instalación (Morales-Chavez et al., 2018). Bajo una *DCS*, la planeación a largo plazo y la estructura de la cadena de suministro se pueden ajustar a las variaciones inesperadas en la demanda y en el suministro de materias prima, lo que genera una ventaja competitiva y mejor desempeño en mercados de alta velocidad y dinámicamente cambiantes (Borodin et al., 2016).

Dado que los modelos tradicionales de localización no tienen en cuenta la flexibilidad de la capacidad (expansión, contracción), existe una exclusión de los costos asociados y, por ende, imprecisiones en la estimación en los costos totales de las instalaciones, transporte e inventario (Maass et al., 2016). En efecto, aunque existe una alta interdependencia entre estas tres decisiones, históricamente la planificación de la cadena de suministro se ha llevado a cabo de manera secuencial o jerárquica. Este enfoque trata cada decisión por separado. Según Zheng et al. (2019), “... *el principio fundamental del método secuencial es imponer la solución obtenida de un nivel al siguiente en la jerarquía de decisión*”. Este método es fácil de aplicar, pero estudios han demostrado que conduce a soluciones subóptimas y aumento del costo total del sistema (Karakostas et al., 2020).

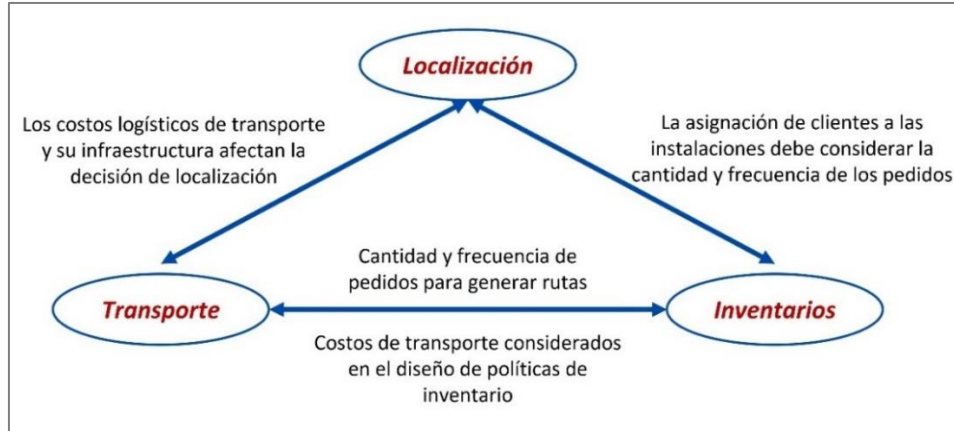
Por ejemplo, los modelos de localización que han sido ampliamente estudiados no consideran costos de inventario y abordan la distribución por rutas exclusivas, es decir, un vehículo visita a un solo cliente. Sin embargo, en el caso donde las órdenes son menores que la capacidad del vehículo, este supuesto no aplica. De este modo, cuando los vehículos no están realizando recorridos de una sola visita, la localización de instalaciones basada en reducir la suma de distancias entre éstas y demás actores de la red, no conlleva a una solución óptima (Guerrero et al., 2013). En efecto, investigaciones recientes han demostrado que el costo de distribución global puede ser excesivo si las decisiones de ruteo de vehículos se ignoran cuando se localizan las instalaciones (Fatemi Ghomi & Asgarian, 2019).

Por otra parte, en cuanto a la relación instalaciones e inventario, la asignación de los clientes a instalaciones debe considerar cantidad y frecuencia de pedidos, ya que esta decisión impacta de forma directa los costos de operación de instalaciones debido al número de pedidos y al mantenimiento del inventario. Por su parte, las decisiones de ruteo e inventario afectan

significativamente las de localización, en la búsqueda de sitios estratégicos que permitan aumentar la eficiencia en la respuesta al cliente y en los costos (Liu & Lee, 2003; Zhang et al., 2014). Modelos apropiados serían los representados por el Problema de Localización-Enrutamiento (*LRP: Location Routing Problem*) y el Problema de Localización-Inventario (*LIP: Location Inventory Problem*), que pretenden optimizar las decisiones de localización de manera simultánea con las de enrutamiento (*LRP*) o las de inventario (*LIP*) (Zhao & Ke, 2017).

A su vez, las decisiones de inventario y ruteo de vehículos son fuertemente interdependientes. En primer lugar, el conjunto de rutas de costo mínimo se construye en función de las cantidades a entregar por período, que están determinadas por las políticas de inventario. En segundo lugar, los costos de pedidos necesarios para diseñar políticas de inventario incluirán, entre otros, los gastos de transporte como resultado de la elección de la secuencia en la que se atenderán las instalaciones (Zheng et al., 2019). El equilibrio óptimo entre costo de inventario y distribución se conoce como el Problema de Inventario-Ruteamiento (*IRP: Inventory Routing Problem*) (Sarache & Morales-Chavez, 2016). La Figura 1-5. resume las interrelaciones de las tres decisiones.

Figura 1-5:Relación entre decisiones de instalaciones, transporte e inventario



Fuente: Sarache & Morales-Chávez (2016)

Es así como las fuertes relaciones existentes en el trinomio instalaciones, inventario y transporte, se convierten en un elemento clave por considerar en el diseño de la cadena de abastecimiento, toda vez que el desempeño global de la misma depende en gran medida de la manera como se combinen estas tres decisiones (Pourhejazy et al., 2019; Saif-Eddine et al., 2019; Sarache & Morales-Chavez, 2016). De este modo, se han desarrollado modelos matemáticos integrados bajo el enfoque del Problema Inventario-Localización-Ruteamiento (*ILRP: Inventory Location Routing Problem*) que

permiten optimizar el rendimiento general del sistema, incrementando la posibilidad de éxito en el logro de los objetivos de la cadena de suministro (Gholipour et al., 2020; Nakhjirkan et al., 2019; Pourhejazy et al., 2019; Yaghoubi & Akrami, 2019).

No obstante, el *ILRP* es uno de los problemas de optimización integrada más desafiantes. El principal obstáculo de la optimización conjunta es la complejidad que entraña su modelación al clasificarse en la categoría de problemas *NP-hard* (Biuki et al., 2020; Saif-Eddine et al., 2019; Tavana et al., 2018). Debido a que este tipo de problemas típicamente se solucionan mediante búsqueda exhaustiva en tiempos no polinomiales, su aplicación en la modelación de cadenas de abastecimiento se torna altamente compleja desde el punto de vista computacional (Sarache & Morales-Chavez, 2016).

Sin embargo, como respuesta a esta problemática se han desarrollado métodos aproximados que solo examinan inteligentemente partes del espacio de solución. Aunque este enfoque no conlleva al óptimo global del problema, tiene su bondad en una reducción importante de la complejidad computacional que aumenta la velocidad de respuesta (Habibi et al., 2018; Huang & Goetschalckx, 2014). En lo que respecta al *SCND* considerando simultáneamente las tres decisiones clave, el uso de soluciones aproximadas presenta una tendencia creciente, a través de los denominados enfoques heurísticos y metaheurísticos (Aravendan & Panneerselvam, 2014; Biuki et al., 2020; Sarache & Morales-Chavez, 2016).

Sin lugar a duda, se puede lograr una estructura de red más realista al incorporar una estrategia de configuración dinámica al *ILRP* (denominado en este documento como *DCS-ILRP*). Sin embargo, como se mencionó el *ILRP* es un problema *NP-hard* (Biuki et al., 2020); entonces el *DCS-ILRP* será sin duda un problema más difícil y desafiante de resolver debido a la incorporación de un conjunto adicional de variables de decisión y restricciones. No obstante, *DCS-ILRP* tiene grandes efectos positivos no solo en las decisiones estratégicas, tácticas y operativas, sino también en el desempeño de toda la cadena de suministro (Morales-Chavez et al., 2018).

1.2 Los biocombustibles como alternativa de solución a la crisis energética

1.2.1 Importancia de los biocombustibles

Una de las principales causas del cambio climático es el aumento de Gases de Efecto Invernadero (GEI), lo que conlleva a un incremento del calentamiento atmosférico, generando impactos adversos en los recursos hídricos, ecosistemas, seguridad alimentaria y salud humana (IPCC, 2011, 2018). El crecimiento de las emisiones de GEI se debe, principalmente, al uso de combustibles de origen fósil, los cuales se han convertido en el suministro de energía predominante (Habibi et al., 2018; IPCC, 2007). En efecto, si continúan las tendencias actuales de consumo, es probable que el mundo enfrente una escasez de petróleo y gas durante los próximos 40 a 60 años (Asadi et al., 2018).

Entre las diversas opciones para afrontar el aumento dramático de la demanda de energía, la creciente preocupación por la seguridad energética y los impactos ambientales causados por el uso de combustibles fósiles, se destacan los biocombustibles (Mottaghi et al., 2022). Dado su potencial para reducir la dependencia de los combustibles tradicionales, además de ofrecer una oportunidad de diversificar la producción agrícola, aumentar ingresos, generar empleos y mejorar la calidad de vida en las comunidades rurales (IPCC, 2019; OCDE & FAO, 2017).

No obstante, la producción de biocombustibles ha generado un intenso debate acerca del uso responsable de la tierra y sus implicaciones sociales y ambientales (Gamborg et al., 2012; Nguyen et al., 2019). En el caso de los biocombustibles de primera generación, al obtenerse de materias primas destinadas a la alimentación humana y animal (por ejemplo, el maíz, caña de azúcar), importantes afectaciones se han señalado en términos de aumento de precios para los consumidores y otros efectos nocivos relacionados con el uso de la tierra (Correa et al., 2021; Sharma et al., 2013).

La problemática descrita anteriormente ha impulsado la investigación sobre la producción eficiente de biocombustibles a partir de biomásas, sin afectar la seguridad alimentaria ni la alternancia de cultivos. Como resultado, hoy es posible obtener este tipo de producto mediante tecnologías de segunda generación que operan con biomásas lignocelulósicas tales como residuos agrícolas y forestales (Bera et al., 2021). Los estudios de Awudu et al. (2012) y Ho et al. (2014), han resaltado su fácil acceso y bajo costo. Otra tendencia, que no afecta las tierras cultivables, son los biocombustibles de tercera y cuarta generación, los cuales se centran en la utilización de microalgas (Shanmugam et al., 2021).

En consecuencia, el estudio de biomásas rentables para la producción de biocombustibles se ha convertido en una línea de investigación de alta relevancia (Awudu & Zhang, 2012; Habibi et al., 2018). Sin embargo, se ha identificado que los principales obstáculos para su producción y comercialización están relacionados con la estructuración y sostenibilidad de la cadena de abastecimiento (Duarte et al., 2014; Morales-Chavez et al., 2018; Nguyen et al., 2019).

1.2.2 Residuos de café: Una biomasa factible para la producción de biocombustible

El café es el segundo producto más comercializado a nivel mundial, solamente en los Estados Unidos, la industria del café se valora en USD 19 mil millones por año. Se estima que en un día se toman aproximadamente 400 mil millones de tazas, lo que convierte al café en la bebida más popular del mundo, que genera al mismo tiempo grandes cantidades de desechos agrícolas debido a su proceso de producción (ICO, 2020).

De acuerdo con la Organización Internacional del Café, solo el 5% del grano se utiliza en la elaboración de la bebida, el resto queda en forma residual, representado en materiales fibrosos como hojas, ramas y tallos, debido al proceso de renovación de los cafetales. Adicionalmente, frutos verdes que se caen durante la recolección y pulpa y mucílago producidos en el proceso de beneficio del fruto. Finalmente, la cascarilla que se obtiene en la etapa de trilla, y la borra o ripio que se genera en las fábricas de producción de café soluble o cuando se prepara la bebida a partir del grano tostado y molido.

En particular, los tallos, pulpa y mucílago son biomásas potenciales para la producción de bioetanol dentro de los denominados biocombustibles de segunda generación (Duarte et al., 2014). Bonilla-Hermosa et al. (2014), Rocha et al. (2014) y Triana et al. (2011), señalan que estos residuos son una alternativa viable dado su enorme potencial orgánico, además de ser rentables y seguros para el medio ambiente. Los tallos de café, provenientes de la práctica de zoqueo¹, son utilizados por los productores para la cocción de alimentos y el secado del grano, contribuyendo a la conservación del bosque nativo, lo cual tiene una influencia directa en beneficio del ciclo hidrológico y en la regulación del calentamiento global (Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010).

¹ El zoqueo es una práctica de renovación de cafetales, es una forma de poda en donde todo el árbol se corta hasta un nivel de 30 cm por encima del suelo. Se puede dejar una o dos ramas o tallos para estimular el nuevo crecimiento (FNC, 2013).

En contraste, la pulpa y el mucílago que se obtienen en el procesamiento del fruto de café representan, en base húmeda, alrededor del 43,58% y 14.85% del peso del fruto fresco respectivamente. A su vez, por cada millón de sacos de 60 kg de café, se generan aproximadamente 162.900 ton de pulpa fresca y 55.500 ton de mucílago, que si no se utilizan adecuadamente producirían una contaminación equivalente a la generada durante un año, en excretas y orina, por una población de 868.736 habitantes en el caso de la pulpa y 310.000 habitantes para el mucílago (Rodríguez Valencia & Zambrano Franco, 2010).

Todo este material vegetal, si no se maneja y dispone de forma apropiada, se convierte en fuente de contaminación de los recursos naturales dentro de las zonas cafeteras (Cenicafé, 2016). No obstante, como se mencionó, es una biomasa con potencial significativo para la producción de biocombustible (Choi et al., 2012). Por tanto, el uso de residuos de café con fines energéticos contribuye, no solo a la disminución del consumo de combustibles fósiles, sino que también ayuda a la eliminación de desechos sólidos y la reducción de emisiones de GEI² (Williams et al., 2009).

Con respecto al caso de estudio, Colombia aprovechando su enorme biodiversidad y consciente de las ventajas que tienen en su posición geográfica preferencial y riqueza hídrica, que le generan una ventaja comparativa con respecto a otros países en la producción de biomasa, ha generado políticas que promueven el mercado de biocombustible, no sólo para el consumo interno, sino también con fines de exportación (Conpes, 2008). Adicionalmente, el país al ocupar el cuarto puesto de producción de café a nivel mundial, con un área de cultivo de 840,11 miles de hectáreas a lo largo del territorio nacional, con presencia en 23 de los 32 departamentos que la conforman (FNC, 2022), es una fuente potencial de estos residuos.

De acuerdo con los rendimientos reportados en estudios previos (Rodríguez Valencia et al., 2010; Duarte, 2016), se ha calculado la disponibilidad posible de tallos, pulpa y mucílago, así como un estimado de producción de bioetanol para cada uno de los residuos (Tabla 1-3). Existe, empero consideraciones adicionales relacionadas con el contexto del café en Colombia que deben ser tenidas en cuenta, ya que una de las grandes restricciones que afectan el desempeño logístico de las empresas colombianas son las cadenas logísticas poco competitivas, en donde muchos de los cuellos de botella

² Los residuos agrícolas que se quedan en el campo en su proceso de descomposición generan cantidades significativas de CO₂.

son específicos de determinadas cadenas productivas y en algunos casos del contexto geográfico donde se ubica el sector (de Competitividad, 2021).

Tabla 1-3: Estimado de disponibilidad de residuos de café y producción de bioetanol

Fuente	Residuo (ton/año)	Bioetanol (l/año)
Tallos	564.555,14	164.364.155,57
Pulpa	1.896.972,49	47.424.312,24
Mucílago	645.205,88	25.808.235,11

Fuente: Elaboración propia con base en Rodríguez Valencia et al. (2010) y Duarte (2016)

Por ejemplo, la zona cafetera colombiana está compuesta en su mayoría por fincas menores a 5 hectáreas cultivadas, esta fragmentación en la posesión de tierras sumado a que su localización se encuentra en las laderas de las cordilleras que atraviesan el país de sur a norte, con terreno muy erosionable, suelos arenosos y pedregosos, con tendencia a la formación de zanjas, derrumbes, deslizamientos y hundimientos; con pendientes fuertemente inclinadas (FNC, 2022), implicarán decisiones cruciales en el diseño y gestión de la cadena de suministro.

1.2.3 Cadena de suministro para la producción de biocombustible a partir de residuos de café

Debido a la naturaleza de su materia prima, la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café (*BSC-CW: Biofuel supply chains from coffee waste*) hace parte de dos grandes áreas. En primer lugar, utilizar residuos como recurso es un campo de importancia creciente en la gestión de la cadena de suministro inversa. Adicionalmente, dado que estos residuos provienen de campos de cultivo, se clasifica como una cadena de suministro agrícola. Behzadi et al. (2018) afirman que una ASC es compleja debido a factores como la estacionalidad de los cultivos, perecibilidad de la biomasa, variaciones climáticas, calidad del suelo y plagas. Estos factores generan un escenario de riesgo en la disponibilidad del suministro que unido a la incertidumbre propia del residuo (en una WRSC) afecta fuertemente el diseño de la red de abastecimiento (Behzadi et al., 2018; Borodin et al., 2016).

En el primer eslabón de esta red están los proveedores de residuos. Un conjunto de granjas geográficamente dispersas, en donde la cantidad de biomasa generada es inferior a la capacidad de los vehículos, esto implica que la recolección de los residuos no se realice por envíos directos, sino

a través de vehículos que visitan a varias granjas en una misma ruta. Esta situación conlleva a la localización de centros de acopio como segundo eslabón de la cadena. Estos centros de acopio permiten consolidar carga, realizar pretratamiento a los residuos que lo requieran y almacenar inventario. El inventario de residuos garantiza un suministro constante de materia prima a las biorrefinerías, evitando costos de parada en los procesos de producción (Ng & Maravelias, 2016).

El siguiente actor en la configuración de la cadena lo conforman las biorrefinerías, en donde se lleva a cabo el proceso de producción del biocombustible. En particular, en la *BSC-CW*, la cantidad de flujo de materiales e incertidumbre en la generación de residuos exige la utilización de varios tipos de biomasa (ejemplo: tallos, pulpa, mucílago), que genere el volumen necesario para no interrumpir el proceso de producción. La utilización de diferentes tipos de biomasa requiere el diseño de una planta multipropósito.

Finalmente, en el último eslabón de la cadena están las centrales de mezcla en donde se combina el biocombustible con combustible fósil de acuerdo con las regulaciones gubernamentales. En la actualidad la demanda de biocombustible supera la capacidad de producción, en efecto según Mirhashemi et al. (2018); los biocombustibles cubren solo el 10% de la demanda mundial total de energía, y están catalogados como de "máxima prioridad" en el desarrollo de combustibles alternativos para el transporte. Se prevé que para 2050 los recursos de biomasa ocupen una cuota considerable (entre 40% y 50%) de fuentes de energía renovables y limpias (Mottaghi et al., 2022).

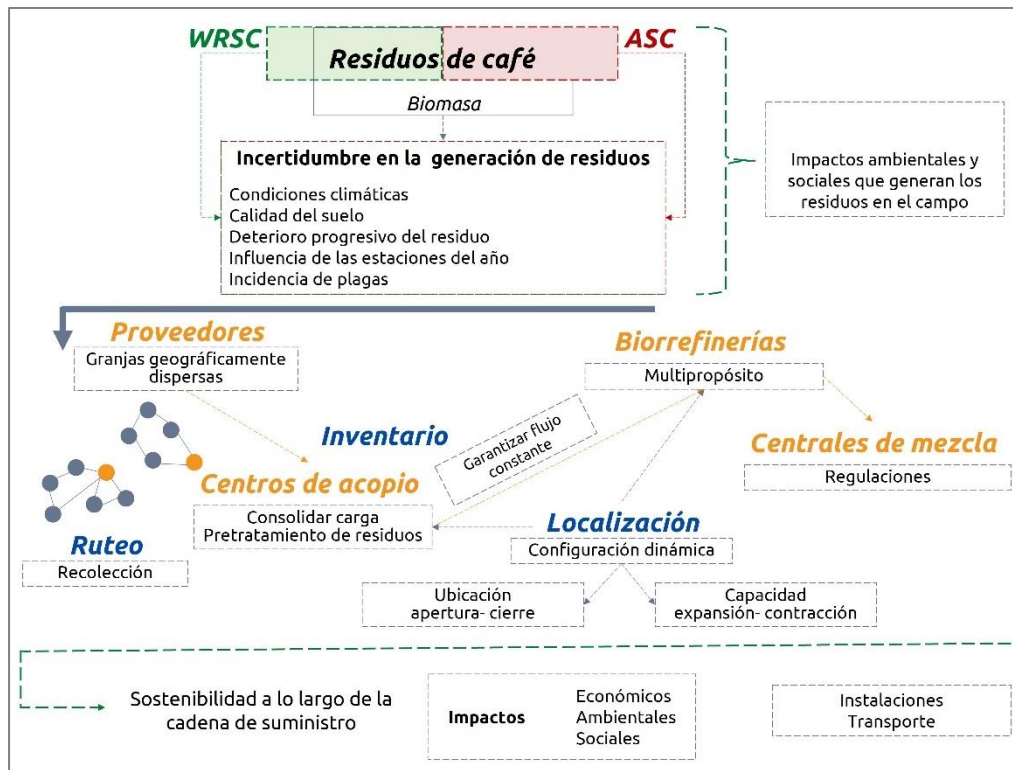
En el caso de las instalaciones de la red de abastecimiento (centros de acopio y biorrefinerías), la asignación de capacidad y ubicación son dos decisiones estratégicas dinámicas que deben analizarse cuidadosamente a largo plazo, porque dependen de la fluctuación de la demanda y las limitaciones de la oferta (Ivanov & Stoyanov, 2016). Por tanto, en el *SCND*, se debe evaluar simultáneamente las decisiones de ubicación que requieren la apertura y cierre de instalaciones en diferentes regiones y periodos de tiempo; y además la estrategia de capacidad (expansión y contracción) para proporcionar un plan de inversión realista (Lee et al., 2017).

Por otro lado, como se mencionó en la Sección 1.2.2, el uso de residuos de café con fines energéticos disminuye el uso de combustibles fósiles y la cantidad de desechos de cultivo que quedan en las zonas cafeteras, los cuales son fuente de contaminación para los recursos naturales y el bienestar humano. No obstante, es necesario que el ciclo de vida de producción del biocombustible sea consecuente con su objetivo principal, por tanto, cada proceso de la cadena de abastecimiento debe

cuidar que los efectos que genere sean mínimos en comparación con el beneficio que se espera de estos. Para tal fin, se deben considerar a lo largo de la red de suministro los impactos económicos, ambientales y sociales.

En resumen, la Figura 1-6 presenta las características de la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, para la cual se requiere tomar no solo las decisiones estratégicas de localización sino también tácticas y operativas como el inventario y ruteo de vehículos. Considerando la incertidumbre en la disponibilidad de la materia prima y las tres dimensiones de sostenibilidad, que permitan obtener procesos económicamente viables, ambientalmente benignos y socialmente justos (Čuček et al., 2012).

Figura 1-6: Características de la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café



Fuente: Elaboración propia

1.3 Estado del arte

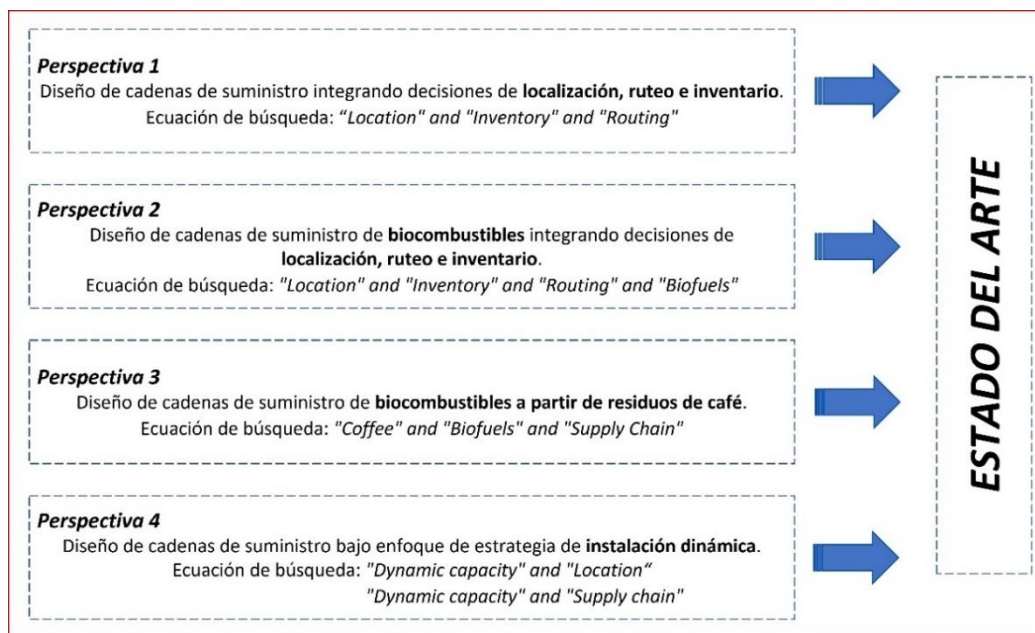
Como se planteó al inicio de este capítulo, el objetivo de esta revisión de literatura es identificar investigaciones que hayan aportado desde la perspectiva de la optimización al diseño de cadenas de abastecimiento considerando la integración de decisiones de instalaciones, inventario y ruteo de

vehículos bajo un enfoque de sostenibilidad. La revisión del estado del arte se desarrolló empleando un análisis sistemático de contenido que, de acuerdo con Seuring et al. (2012), es una metodología que ofrece revisiones de literatura rigurosas y reproducibles. El enfoque de análisis de contenido de cuatro pasos adoptado aquí, integra las fases de 1) recopilación, 2) filtrado y análisis descriptivo, 3) codificación con un enfoque deductivo, 4) clasificación y análisis del material.

1.3.1 Recopilación del material

Para mantener una calidad confiable de las contribuciones, se tomó como unidad de análisis artículos publicados en idioma inglés, en revistas revisadas por pares (*peer-review journals*). Se realizó una búsqueda estructurada de palabras clave en las principales bases de datos: Scopus, *Web of Science* y *Academic Search Complete*. Para la construcción de las ecuaciones de búsqueda se definieron cuatro *Perspectivas* (P); las dos primeras consideran las contribuciones en *SCND* que integran decisiones de localización, ruteo e inventario. Pero mientras la primera se orientó hacia el estudio de la cadena de suministro en general, la segunda se centra en el contexto de biocombustibles (*BSCND: Biofuel Supply Chain Network Design*). Por su parte, la tercera relaciona los aportes realizados en cadenas de suministro de biocombustibles a partir de residuos de café, por ser este el objeto de estudio práctico seleccionado. Finalmente, la *Perspectiva 4* examina los aportes en estrategias de configuración dinámica (*DCS*) en el diseño de cadenas de abastecimiento (Figura 1-7).

Figura 1-7: Perspectivas para abordar el estado del arte



Fuente: Elaboración propia

1.3.2 Filtrado

Al aplicar las ecuaciones de búsqueda se obtuvieron 456 documentos en total. La Tabla 1-4 presenta el número de registros para cada perspectiva, base de datos y ecuación de búsqueda.

Tabla 1-4: Contribuciones encontradas a partir de las ecuaciones de búsqueda

P	Ecuación de búsqueda	No. Artículos encontrados por base de datos			
		Scopus	Web of Science	Academic Search Complete	Total
1	"Location" and "inventory" and "routing"	182	192	30	404
2	"Location" and "inventory" and "routing" and "Biofuels"	2	3	1	6
3	"Coffee" and "Biofuels" and "Supply Chain"	3	1	0	4
	"Dynamic capacity" and "Location"	14	9	3	
4	"Dynamic capacity" and "Supply Chain"	9	6	1	42

Fuente: Elaboración y actualización³ propia

Sobre la base de estos 456 registros, se realizó la revisión inicial (revisión del resumen), de la cual se identifican 310 documentos diferentes, es decir 146 de estos se encuentran en dos o tres bases de datos o ecuaciones de búsqueda. Continuando con el proceso de filtrado, se clasificaron según la pertinencia para la investigación: "Relación directa" (RD), "Relación indirecta" (RI) y "Sin relación" (SR). Estas categorías se exponen en la Tabla 1-5, junto con el número de registros obtenidos.

Tabla 1-5: Filtrado de contribuciones para cada perspectiva

P	Relación directa	Relación indirecta	Sin Relación	RD	RI	SR	Total
1	SCND bajo una formulación ILRP	SCND integrando una o dos decisiones del ILRP	Ningún modelo de interés	75	143	58	276
2	BSCND bajo una formulación ILRP	BSCND integrando una o dos decisiones del ILRP	Ningún modelo de interés	2	1	0	3
3	BSC-CW		Ningún modelo de interés	3	0	1	4
4	SCND con algún componente de DCS	Algún componente de DCS	Ningún modelo de interés	3	7	17	27

Fuente: Elaboración propia

³ Fecha de última revisión 30/06/2021

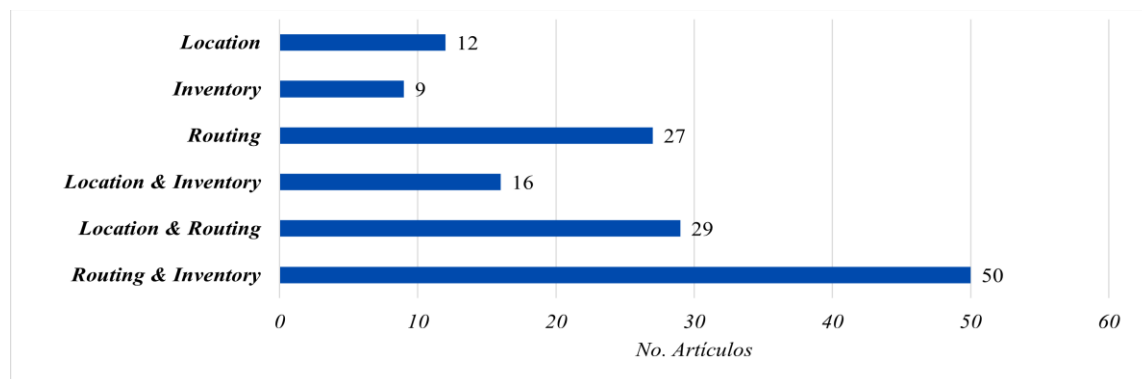
A partir de la revisión inicial se realiza un análisis descriptivo de los documentos con relación directa de cada una de las perspectivas:

▪ ***Perspectiva 1***

Previo al análisis descriptivo de los documentos con relación directa, se realiza una breve exploración de los artículos con relación indirecta. Pese a que no es concluyente puesto que la ecuación de búsqueda estaba orientada a encontrar la integración de las tres decisiones, ofrecen un panorama sobre las contribuciones en el diseño de cadenas de suministro a partir de decisiones claves como localización, inventario y ruteo de vehículos.

Como se observa en la Tabla 1-5, el 51,8% de los documentos encontrados en la *Perspectiva 1*, están dentro de la clasificación de relación indirecta, el cual representa el porcentaje más alto de las 3 categorías. De los 143 documentos, 48 consideran una sola de las decisiones, y los 95 restantes desarrollan de manera simultánea dos de estas (ver Figura 1-8). También es evidente que la combinación que más contribuciones tiene es la de ruteamiento e inventario (50 registros), lo que implica que la ubicación de las instalaciones ya está dada. En otras palabras, al ser estas decisiones de tipo operacional, la investigación no está enfocada en el diseño de la cadena de suministro, si no en la gestión de esta.

Figura 1-8: Decisiones consideradas en los documentos con relación indirecta



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, enfatizando en los documentos con relación directa, solo 75 artículos (27.2%) abordaron el diseño de una cadena de suministro integrando decisiones de localización, inventarios y ruteo de vehículos (Anexo B). Este resultado es coherente con lo expuesto por Zandkarimkhani et al. (2020) sobre la necesidad de más investigación en esta temática.

Con relación a la línea de tiempo, el primer documento que se registra a partir de la búsqueda sistemática se emitió en el año 2003. La línea temporal presenta una tendencia creciente a partir del año 2013 (Anexo C). El lapso entre el 2006 y el 2009 representa el período más largo de ausencia de contribuciones en las bases de datos consultadas. El 83,1% de las investigaciones se realizaron en los últimos 5 años.

Por otra parte, los 75 artículos se distribuyen en 55 revistas científicas internacionales, el número mayor de contribuciones por revista es de 4 y solo sucede en el caso de *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Con respecto al país de procedencia de los autores, Irán, China y Francia son los que tienen una representación más alta con 93, 53 y 12 autores respectivamente.

▪ **Perspectiva 2**

Fueron escasos los artículos encontrados en la perspectiva 2 (Anexo B). Dos de los tres artículos fueron categorizados como relación directa y el tercero con relación indirecta (*BSCND* integrando una o dos decisiones del *ILRP*). Este último, incorporaba las decisiones de localización e inventario, no obstante, las de ruteo no las incluía. Por su parte, los clasificados con relación directa; es decir que realizaban el diseño de la cadena de suministro bajo la formulación *ILRP* para la producción de biocombustible, fueron publicados en el año 2018; los autores Habibi y Asadi participan en ambas contribuciones. Los países de donde provienen estas publicaciones son Irán (3 autores) y Alemania (2 autores).

▪ **Perspectiva 3**

La búsqueda de artículos científicos según el enfoque descrito para la *Perspectiva 3* arrojó muy pocas contribuciones (Anexo D). Solamente se encontraron tres artículos que consideran el *BSCND* a partir de residuos de café y uno sin relación con el objeto de estudio de esta investigación. Las contribuciones con relación directa se publicaron en los años 2014, 2016 y 2018. De los cuatro autores identificados, Sarache, W. y Costa, Y participan en los tres documentos. Los países de donde provienen estas publicaciones son Colombia (3 autores) y Austria (1 autor).

▪ **Perspectiva 4**

La revisión de la *Perspectiva 4* incluía dos ecuaciones de búsqueda, de las cuales se obtuvieron 27 documentos. Las contribuciones que se clasificaron con relación indirecta fueron siete 7, que en su mayoría se centran en el análisis de la capacidad dinámica de instalaciones establecidas. Tan solo

tres documentos desarrollaban el diseño de cadena incluyendo alguna de las características de la estrategia de configuración dinámica (apertura, expansión de capacidad y cierre de instalaciones en cualquier periodo de tiempo) (Anexo E). Estas publicaciones se realizaron en los años 2014, 2016 y 2018. Participaron en total 8 autores de Francia (3 autores), Canadá (3 autores) e Irán (2 autores).

1.3.3 Codificación

Uno de los mayores retos en el análisis de contenido es codificar apropiadamente los artículos, de tal manera que se garantice la repetibilidad (Beske et al., 2014). Por tanto, las categorías en las que se clasificaron los documentos se toman deductivamente de la literatura relacionada. La Tabla 1-6 presenta las categorías establecidas y su respectiva descripción.

1.3.4 Clasificación y análisis de material

Se revisó y clasificó el acervo bibliográfico en función de las categorías seleccionadas (Anexo B). A continuación, se presentan los aportes encontrados de acuerdo con las dimensiones descritas para cada una de las perspectivas.

- **Análisis Perspectiva 1**

Como se puede observar en el Anexo B, el *ILRP* ha ganado gran interés en los últimos años. Este problema de optimización integral se ha aplicado en diferentes sectores, tales como: productos perecederos (Liu et al., 2021; Rahbari et al., 2021; Zarrat Dakhely Parast et al., 2021), redes humanitarias y salud (Ghorashi et al., 2020; Zandkarimkhani et al., 2020), componentes automotrices (Forouzanfar et al., 2018; Govindan et al., 2020), materiales peligrosos y explosivos (Lerhlaly et al., 2016; Zhao & Ke, 2017), entre otros. Solo dos contribuciones presentaron un modelo *ILRP* aplicado en el sector de biocombustibles (Asadi et al., 2018; Habibi et al., 2018), los cuales se discutirán a fondo en la perspectiva 2. Adicionalmente, se encuentran aportes significativos en cadenas de suministro en general, utilizando casos generados aleatoriamente (Figura 1-9). Dentro de estos contextos de aplicación, el 79% de los casos son en cadenas de abastecimiento directas, 4% inversas y 17% de ciclo cerrado. Rabbani et al. (2019- 2020), Zhao & Ke (2017) resaltan la importancia de avanzar en la integración de decisiones en el *SCND* en las cadenas de suministro inversas.

Tabla 1-6: Categorías para codificación de documentos

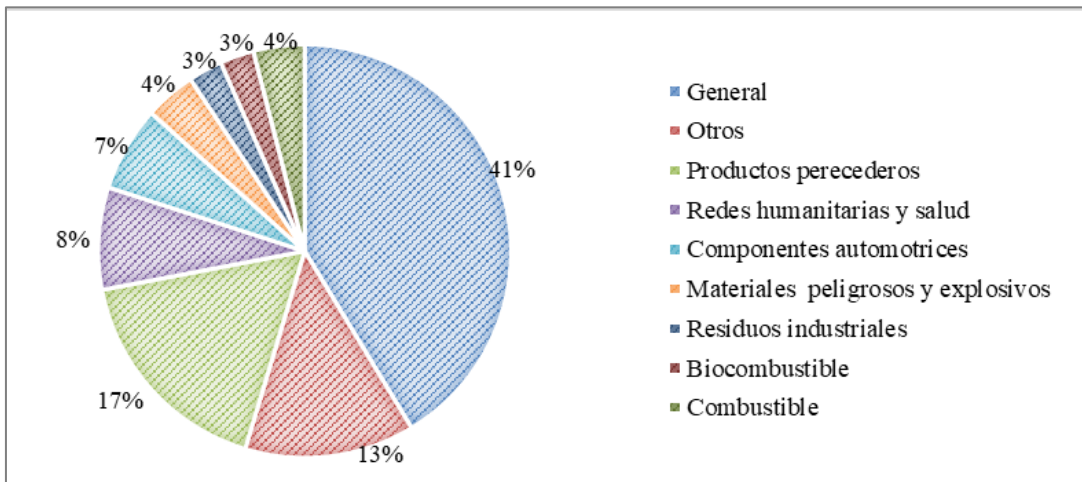
Categoría	Descripción
Decisiones incorporadas en el modelo	Localización (L), inventario (I), ruteo de vehículos (R)
Sector industrial	General, productos perecederos, redes humanitarias y salud, componentes automotrices, materiales peligrosos y explosivos, biocombustibles, combustible, residuos industriales, otros sectores
Tipo de cadena de suministro	Directa (F), inversa (Re), ciclo cerrado (CI)
Número de productos gestionados en la cadena de suministro	Multiproducto (M), producto único (S)
Número de períodos de tiempo en el horizonte de planificación	Período múltiple (M), período único (S)
Funciones objetivo	Económicas (Eco), ambientales (Env), sociales (Soc)
Métricas económicas	Costos (apertura, inventario, transporte, suministro, operación, producción, escases, otros)
Métricas ambientales	Emisiones de GEI, riesgo ambiental, otros
Métricas sociales	Empleo, confiabilidad de la ruta, escasez de productos, riesgos, otros
Estrategia de establecimiento de instalaciones	($T = 0$) si las instalaciones se abren en el período inicial, ($T = t$) si las instalaciones se abren en cualquier momento, asignación de capacidad (Ca), expansión de capacidad (Ce), cierre de instalaciones (Cf)
Composición de la flota de vehículos (FV)	Homogénea (Ho), heterogénea (He)
Actividad para la que se toman decisiones de ruteo (DRV)	Recolección (R), distribución (Di)
Parámetros inciertos considerados	en Suministro (S), en demanda (D), otro (O)
Metodología de solución	Método exacto (Em), algoritmo genético (GA), recocido simulado (SA), colonia de hormigas (ACO), búsqueda tabú (TS), enjambre de partículas (PSO), otros (O)
Aplicación del modelo	Caso de estudio, experimentos generados aleatoriamente, tamaños del problema tomados de la literatura, no presenta
Análisis de post-optimalidad	Parámetros de entrada, eficiencia entre modelos, comparación de dimensiones del problema
Investigaciones futuras	Múltiples (eslabones, periodos de tiempo, productos), ventanas de tiempo, flota heterogénea, enfoque de sostenibilidad, tratamiento de la incertidumbre, metodologías de solución

Fuente: Elaboración propia

Con relación a las decisiones de localización, el 64% de las contribuciones manejan instalaciones en donde la capacidad está definida previamente. Mientras un 13% abordan el problema de localización con capacidad no restringida. A su vez, solo un 23% de los trabajos científicos utilizan variables de decisión para definir qué nivel debe tener la capacidad de las instalaciones. Sin embargo, estas variables de decisión no incluyen una dimensión temporal, lo que significa que se define la capacidad de las instalaciones en el periodo de tiempo inicial y permanece sin cambios durante todo el horizonte de planeación. Lo que conduce a uno de los vacíos de investigación más notables; la ausencia de contribuciones que incorporen la *DCS* (apertura, ampliación de capacidad y cierre de instalaciones en cualquier período de tiempo) a los modelos matemáticos que siguen una formulación *ILRP*. De hecho, todos los artículos revisados asumen una estrategia de configuración estática (*SCS*) (ver columnas T, Ce y Cf del Anexo B). Adicionalmente, el 43% de los documentos se desarrollan en escenarios de un solo periodo.

En cuanto a las decisiones de ruteo, se evidencia que la mayoría de las contribuciones se centran en tareas de distribución de productos. Solo dos están vinculadas al contexto de recolección de residuos. En el 44% de los artículos se hace gestión de una flota de composición heterogénea (los vehículos tienen capacidad diferente) y para el 56% restante de las investigaciones consultadas se maneja una flota donde los vehículos tienen la capacidad similar (homogénea). El ruteo de vehículos se utiliza principalmente el transporte de un solo tipo de flujo de material (*single commodity*) (61%).

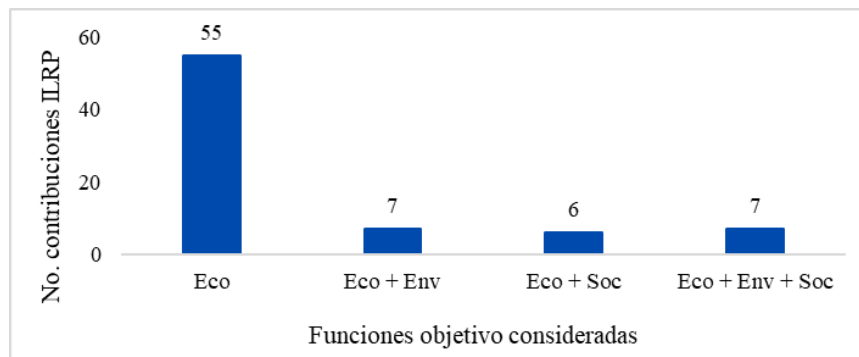
Figura 1-9: Sectores en los que se han aplicado el *ILRP*



Fuente: Elaboración propia

Con relación al uso de enfoques sostenibles en cadenas de suministro, la dimensión económica prevalece en la formulación de la función objetivo, 11 de cada 15 artículos buscan solo optimizar este tipo de función. Algunas contribuciones propusieron modelos matemáticos que integran métricas económicas y ambientales, pero dejando de lado la dimensión social. En contraste, autores como Fallah-Tafti et al. (2019) y Ghorashi et al. (2020), consideran objetivos económicos y sociales, sin considerar los impactos ambientales (ver Figura 1-10). Esta tendencia revela una falta de modelos matemáticos que sigan una formulación *ILRP* que incorporen un enfoque integral sostenible (económico + ambiental + social). Solo siete contribuciones han abordado los tres pilares de la sostenibilidad en las funciones objetivo para los *ILRP* (Tabla 1-7).

Figura 1-10: Funciones objetivo-consideradas en el *ILRP*



Fuente: Elaboración propia

Por ser las más cercanas al objeto de estudio de la presente tesis doctoral, estas siete contribuciones se describen más a fondo. Como se puede observar en la Tabla 1-7, la dimensión económica se concentra en la minimización de costos, el impacto ambiental más utilizado es la generación de GEI y el pilar social se miden en su mayoría con la generación de empleo. Las siete contribuciones manejan múltiples productos, con relación al horizonte de planificación; la propuesta de Govindan et al. (2020) es la única que considera un solo periodo de tiempo. En cuanto a las instalaciones, todos los artículos establecen la apertura en el periodo de tiempo inicial y solo Biuki et al. (2020) y Zhalechian et al. (2016) plantean la capacidad como una variable de decisión. En ninguno de los casos el *SCND* considera expansión de la capacidad o cierre de las instalaciones. Siendo estos los trabajos más cercanos a la presente tesis doctoral, se corrobora una vez más que existen oportunidades de investigación en el sentido de abordar el *SCND* desde una perspectiva integral que considere la estrategia de configuración dinámica.

Tabla 1-7: Contribuciones *ILRP* con enfoque sostenible

Autores	Sector industrial	Función objetivo				Estrategia Instalación					Ruteo	No. de productos	No. de periodos	Parámetro incierto
		<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	<i>FV</i>	<i>DRV</i>				
Liu et al.(2021)	Perecederos	Costo	GEI	Otro	0					Ho	Di	M	M	
Biuki et al.(2020)	Productos perecederos	Costo	GEI	Empleo	0	✓				He	Di	M	M	D
Govindan et al. (2020)	Componentes automotrices	Costo	GEI	Escasez producto	0					He	Di	M	S	D
Ayoughi et al.(2020)	General	Costo	Otro	Empleo Otro	0					Ho	R Di	M	M	D O
Nasr et al.(2021)	Prendas de vestir	Costo	GEI	Empleo	0					He	Di	M	M	
Rahbari et al.(2022)	Materiales peligrosos y explosivos	Costo	GEI	Riesgos	0					He	Di	M	M	
Zhalechian et al.(2016)	Televisores	Costo	GEI Otro	Empleo Otro	0	✓				He	Di	M	M	D O

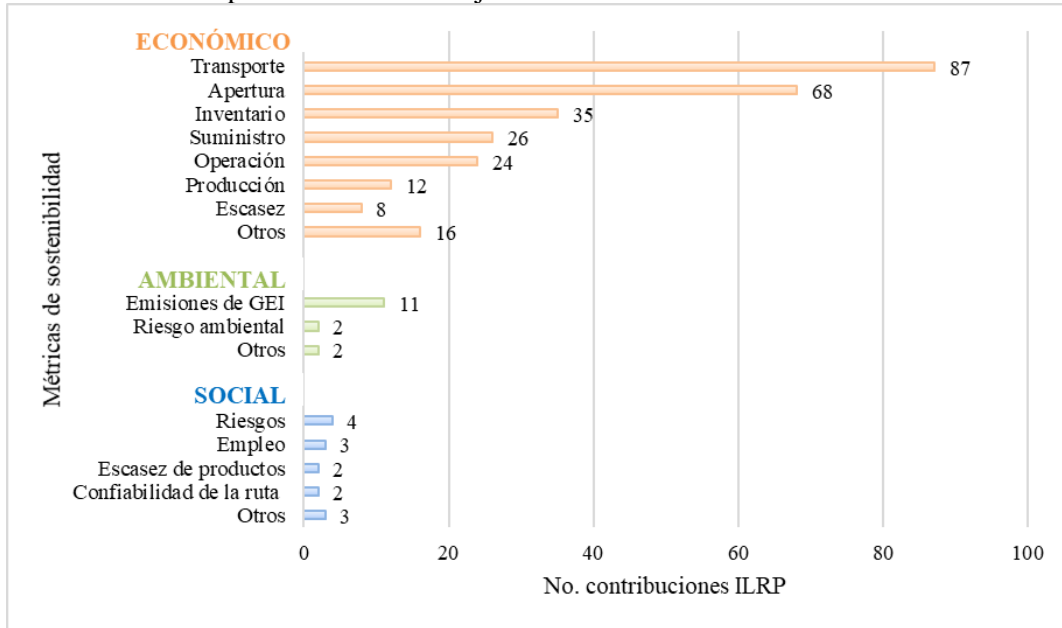
Fuente: Elaboración propia

Continuando con el análisis de los documentos con relación directa incluidos en la *Perspectiva 1*, se identificaron las métricas utilizadas para optimizar los tres componentes de la sostenibilidad; en cuanto a la dimensión económica se consideran los costos de localización de instalaciones, inventario, transporte, producción, costos fijos y variables de operación, entre otros (Wu et al., 2021; Yuchi et al., 2021). Por su parte, las emisiones de GEI es el impacto más representativo en el caso de las funciones objetivo ambiental (Aloui et al., 2021; Karakostas et al., 2020) y los riesgos y la generación de empleo para el pilar social (Ghorashi et al., 2020; Rahbari et al., 2022) (Figura 1-11).

Indudablemente el tratamiento de la incertidumbre de los parámetros de entrada es un tema medular en el diseño de cadenas de suministro (Feitó-Cespón et al., 2021). Sin embargo, en la revisión de la literatura se observa que el 65% de las contribuciones utilizan modelos de optimización y metodologías de solución determinísticos. Y, aunque se avanza en la incorporación de la incertidumbre en los *ILRP*, es necesario fortalecer este enfoque. La demanda sigue siendo el

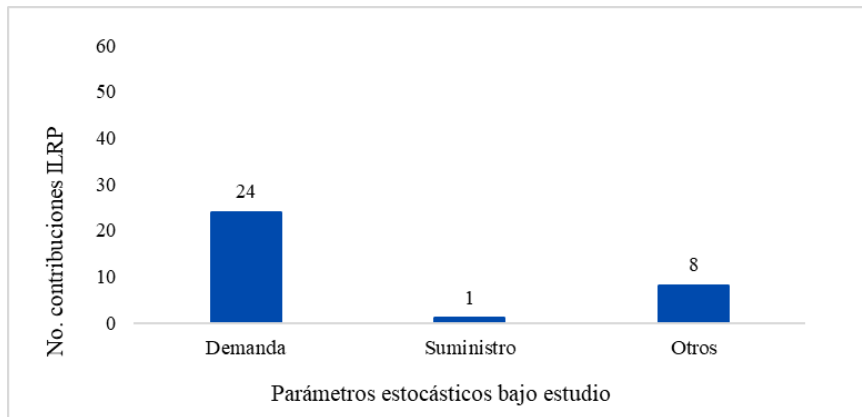
parámetro estocástico más estudiado y la única contribución que incorpora la variabilidad del suministro (disponibilidad de residuos peligrosos) es la de Rabbani et al. (2019) (Figura 1-12).

Figura 1-11: Métricas para las funciones objetivo



Fuente: Elaboración propia

Figura 1-12: Incertidumbre consideradas en el *ILRP*

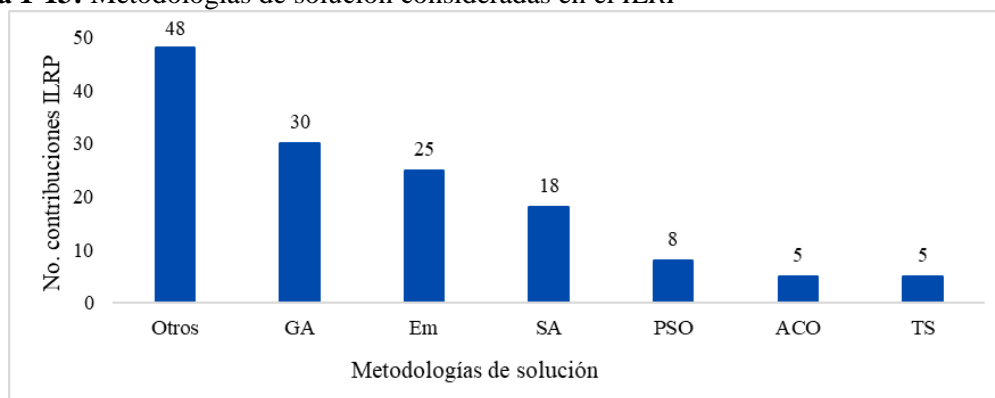


Fuente: Elaboración propia

Con relación a la metodología de solución, para resolver los *ILRP* se han utilizado generalmente métodos exactos (Em) para problemas de tamaño pequeño (Fallah-Tafti et al., 2019; Gholipour et al., 2020; Govindan et al., 2020), usualmente implementados en software comerciales (GAMS, CPLEX, MATLAB). No obstante, el grado de complejidad para problemas de gran tamaño exige el desarrollo de algoritmos avanzados. De acuerdo con la revisión del estado del arte se encuentran

contribuciones con metodologías de solución basadas en algoritmo genético (*GA*) (Asadi et al., 2018; Liu et al., 2015; Nekooghadirli et al., 2014), recocido simulado (*SA*) (Gholamian & Heydari, 2017; Ghorbani & Akbari Jokar, 2016; Rayat et al., 2017), algoritmo de colonia de hormigas (*ACO*) (Ahmadi-Javid & Seddighi, 2012; Chao et al., 2019; Deng et al., 2016), algoritmo de búsqueda tabú (*TS*) (Li & Yang, 2020; Yuchi et al., 2021; Yuchi et al., 2016), optimización de enjambre de partículas (*PSO*) (Biuki et al., 2020; Ghorashi et al., 2020; Li et al., 2016), entre otros enfoques basados principalmente en heurísticas (*O*) (Figura 1-13). Sin embargo, se observa que el *GA* y *SA* son las metaheurísticas más utilizadas con resultados computacionales muy competitivos.

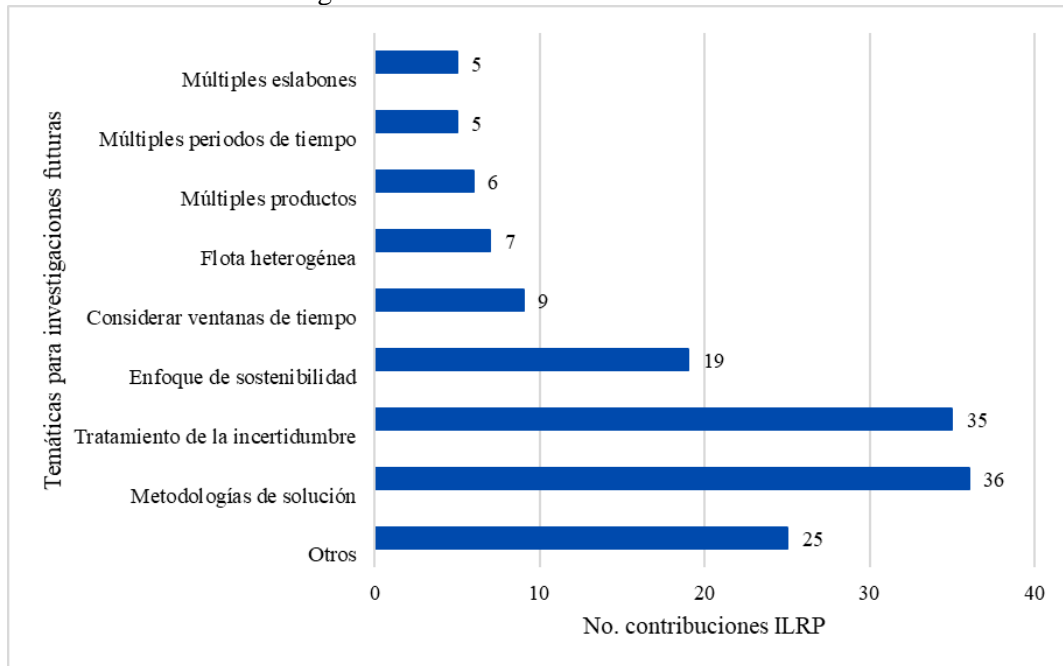
Figura 1-13: Metodologías de solución consideradas en el *ILRP*



Fuente: Elaboración propia

Para observar el rendimiento general del modelo matemático y la metodología de solución asociada, los investigadores utilizan en su mayoría casos de prueba generados aleatoriamente (44 artículos), que permiten analizar el comportamiento de los resultados en diferentes dimensiones del problema. Adicionalmente, se encontraron 32 artículos en donde los investigadores formulan matemáticamente y resuelven problemas reales. En lo que respecta a los análisis de post-optimalidad, se revisaron 37 artículos relacionados con la sensibilidad de los indicadores de desempeño (funciones objetivo) respecto a las variaciones en los parámetros de entrada. Por otra parte, 37 contribuciones analizan el rendimiento de las metodologías de solución propuestas.

Finalmente, las recomendaciones para las líneas de investigación futura coinciden en el desarrollo de algoritmos de solución eficiente para problemas de gran tamaño. Así mismo, con el fin de lograr propuestas de soluciones más cercanas a la realidad del proceso de toma de decisiones, los autores sugieren incorporar conceptos de incertidumbre y sostenibilidad, teniendo en cuenta medidas económicas, ambientales y sociales (Figura 1-14).

Figura 1-14: Líneas de investigación futura identificadas en la literatura

Fuente: Elaboración propia

▪ **Análisis Perspectiva 2**

La revisión sistemática de la literatura arrojó solo dos contribuciones que proponen un modelo matemático que sigue una formulación *ILRP* aplicado en el sector de biocombustibles (Asadi et al., 2018; Habibi et al., 2018). Los estudios se centraron en la transformación de microalgas en el contexto de biocombustibles de tercera generación. Siendo esta una cadena de suministro directa. Como se mencionó en la sección 1.3.2, dos de los autores participan en ambas contribuciones (Habibi, Asadi). En efecto se observa que la contribución de Habibi et al. (2018) “*A location-inventory-routing optimization model for cost effective design of microalgae biofuel distribution system: A case study in Iran*” es el punto de partida de la investigación y el segundo artículo “*A bi-objective stochastic location-inventory-routing model for microalgae-based biofuel supply chain*” tiene avances en esta misma línea.

En el primer documento Habibi et al. (2018) presentaron un modelo de optimización no lineal de enteros mixtos determinístico, que optimiza una función económica centrada en costos (apertura, inventario, transporte). En el segundo artículo, Asadi et al. (2018) se hace una extensión del modelo matemático de Habibi et al. (2018), en donde se incorpora un enfoque de cadena de Markov para formular la naturaleza incierta de la demanda. Adicionalmente, consideran además de la función de costos, las emisiones de GEI como métrica ambiental. Ninguna de los documentos aborda los tres

pilares de la sostenibilidad. Las dos contribuciones se desarrollan en escenarios de proveedor y producto único, operando con flota homogénea para el ruteo de distribución, instalaciones con capacidad definida y un solo periodo de tiempo, lo que indica la ausencia de la estrategia de configuración dinámica. La Tabla 1-8 resume las características de los documentos.

Tabla 1-8: Documentos con relación directa perspectiva 2*

Autores	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		No. de productos	No. de periodos	Parámetro incierto	Metodología de solución
	<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	FV <i>DRV</i>				
Habibi et al. (2018)	Costo			0				Ho Di	S	S		SA GA O
Asadi et al. (2018)	Costo	GEI		0				Ho Di	S	S	D	PSO GA

Fuente: Elaboración propia

*Nota: Los acrónimos utilizados se encuentran definidos en la Tabla 1-6 de la Sección 1.3.3

Con relación a la metodología de solución se desarrollan varias metaheurísticas como recocido simulado (*SA*), algoritmo genético (*GA*), optimización de enjambre de partículas (*PSO*) y algoritmo de luciérnaga (*Firefly Algorithm*). Los investigadores utilizan dimensiones del problema generadas aleatoriamente y en ambos casos la aplicación de un caso real en Irán. El análisis de post-optimalidad se enfoca en el rendimiento de los algoritmos propuestos y la comparación entre tamaños del problema. Finalmente, los autores recomiendan como líneas de investigación futura la incorporación de factores económicos, sociales y ambientales; la incertidumbre en los parámetros; el desarrollo de metodologías de solución eficientes; múltiples periodos de tiempo, proveedores y productos.

▪ **Análisis Perspectiva 3**

La *Perspectiva 3* que relaciona los aportes realizados en cadenas de suministro de biocombustibles a partir de residuos de café, generó 3 documentos con relación directa (Anexo D), dos de estos de Duarte et al. (2014) y Duarte et al. (2016). En los cuales abordan el problema de *SCND* utilizando un solo residuo de café (tallos). En el primer documento “*A facility-location model for biofuel plants: Applications in the Colombian context*” Duarte et al. (2014) proponen un modelo de programación

lineal para ubicar una planta de bioetanol de segunda generación en Colombia, buscando la maximización de los beneficios totales (ingresos menos costos). En el segundo artículo encontrado “*Biofuel supply chain design from Coffee Cut Stem under environmental analysis*” Duarte et al. (2016) amplían el conjunto de plantas por localizar y se incorpora el aspecto ambiental en términos de emisiones de GEI. Los dos estudios se centran solo en las decisiones de localización con una estrategia configuración estática utilizando enfoques determinísticos.

Por otro lado, la tercera contribución que registra la ecuación de búsqueda es producto de esta tesis doctoral (Morales-Chavez et al., 2018). En este documento se presenta el diseño de la cadena de suministro de biocombustible utilizando 3 tipos de residuos de café (tallos, pulpa y mucílago), debido al flujo de suministro que se debe garantizar para el funcionamiento de las biorrefinerías. El diseño incorpora las decisiones de inventario junto con las de localización de instalaciones bajo una *DCS* (apertura, expansión de capacidad y cierre de instalaciones en cualquier período de tiempo). Para tal fin se propone un modelo de programación no lineal entero mixto de objetivos múltiples, en el cual se maximiza los beneficios económicos y sociales y se minimizan los impactos ambientales negativos. Siendo la primera contribución de esta línea en considerar los tres pilares de la sostenibilidad.

Las tres contribuciones utilizan métodos exactos para obtener la solución de la configuración de la cadena en casos de estudio real. Los análisis de post-optimalidad consideran las decisiones incorporadas en el modelo matemático, las dimensiones de sostenibilidad y cambios en los parámetros de entrada. Las investigaciones futuras sugeridas van encaminadas al desarrollo de metodologías de solución para problemas de gran tamaño, incorporación de decisiones de localización, inventario y ruteo de vehículos, y el diseño de la red en escenarios con parámetros inciertos.

▪ **Análisis Perspectiva 4**

El objetivo de la perspectiva 4 era identificar los aportes con relación a la *DCS* en el diseño de cadenas de abastecimiento. Las dos ecuaciones de búsqueda utilizadas obtuvieron 3 documentos con relación directa (Anexo E). En estas contribuciones se toman solo las decisiones de localización de instalaciones. El problema estudiado en Jena et al. (2016) se centra en la localización (apertura, expansión y cierre) de campamentos de una empresa maderera para alojar a sus trabajadores. Además de la asignación de los diferentes tipos de cuadrillas de trabajo (que modelan como productos

diferentes), a una demanda establecida. Teniendo en cuenta estas características, el problema abordado es de localización y asignación, sin flujo de productos a través de la red.

De igual manera Pehlivan et al. (2014) y Bagherinejad et al. (2018) desarrollan modelos matemáticos para problemas de localización y asignación sin flujo de productos. Pehlivan et al. (2014) propone una formulación matemática para la localización de unidades de servicio médico y la asignación de la demanda correspondiente. En particular, solo se pueden cerrar las instalaciones que estuvieran establecidas previo al estudio. Por otro lado, la investigación de Bagherinejad et al. (2018) tiene como objetivo encontrar la localización óptima de instalaciones en las cuales ubicar vehículos (por ejemplo ambulancias), para atender determinada demanda. Como la asignación del número de vehículos puede cambiar cada periodo, asumen que la capacidad de la instalación varía (expansión-contracción). En este caso no hay opción de cierre de las instalaciones.

Con relación a la sostenibilidad, la dimensión económica basada en costos (costo de apertura, operación, expansión, cierre de instalaciones) es la única considerada en Jena et al. (2016) y en Pehlivan et al. (2014). Por su parte Bagherinejad et al. (2018) se enfoca en maximizar el cubrimiento de la demanda, clasificada como una función social. Por otra parte, el único parámetro estocástico es la frecuencia de llegada de clientes considerada en Pehlivan et al. (2014).

Dos de las tres investigaciones encontradas proponen modelos matemáticos no lineales para darle tratamiento a la estrategia de localización dinámica. Por otra parte, las estrategias de solución utilizadas son metodologías exactas, heurísticas y algoritmo genético. En la mayoría de los artículos (2 de 3) se plantea una solución para problemas reales y problemas construidos aleatoriamente. El análisis de post-optimalidad se orienta a la comparación del desempeño de las metodologías de solución propuestas. Las investigaciones futuras sugieren la incorporación de costos asociados al uso de los vehículos y tratamiento de la incertidumbre en la demanda. La Tabla 1-9 resume las características de los documentos.

Tabla 1-9: Documentos con relación directa perspectiva 4

Autores	Decisiones			Función objetivo			Estrategia Instalación			No. de productos	No. de periodos	Parámetro incierto	Metodología de solución
	L	R	I	<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>				
Jena et al. (2016)	✓			Costo			t	✓	✓	✓	M	M	Em/O
Pehlivan et al. (2014)	✓			Costo			t	✓	✓	✓*	M	M	O Em
Bagherinejad et al. (2018)	✓					Cubrir demanda	t	✓	✓		S	M	GA

Fuente: Elaboración propia

1.3.5 Identificación y discusión del vacío de conocimiento

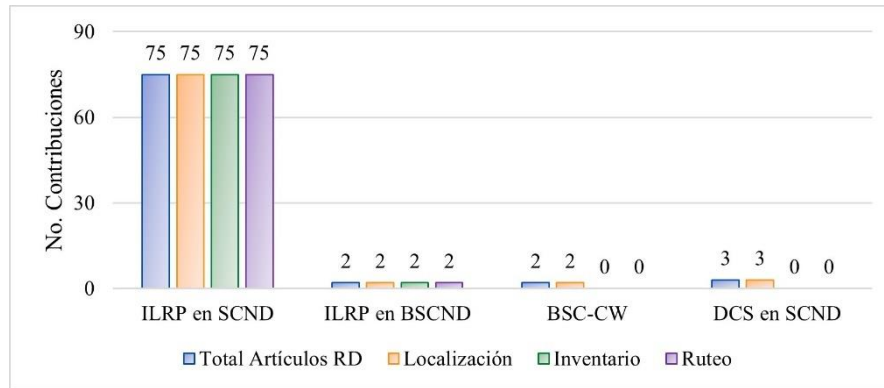
Luego de la exhaustiva revisión de la literatura presentada en este capítulo, se evidencia que la investigación sobre diseño de cadenas de suministro que aborde simultáneamente decisiones de localización, ruteo e inventario es aún limitada. Esto coincide con lo planteado por importantes autores en el área como Biuki et al. (2020), Rabbani et al. (2020) y Asadi et al. (2018), quienes exponen la necesidad de avanzar en modelos matemáticos integrados. En efecto, se identificaron logros significativos en la incorporación de dos decisiones como es el caso del IRP, LIP y LRP. No obstante, la investigación sobre el problema *ILRP* ofrece amplias oportunidades de investigación.

De acuerdo con la revisión del estado del arte solo 75 documentos presentan el *SCND* integrando las decisiones de localización, ruteo e inventario (*ILRP*). Es aún más reducido en el caso de los biocombustibles en el cual se obtuvieron 2 contribuciones. Por otra parte, muy pocos artículos (solo 2) abordan el diseño de cadenas de suministro de biocombustibles a partir de residuos de café (sin incluir el aporte de esta tesis doctoral), los cuales consideran exclusivamente las decisiones de localización. De manera similar sucede con las contribuciones que incorporan la estrategia de configuración dinámica (*DCS*). En ninguno de los dos casos se incluyen decisiones de inventario ni ruteo de vehículos (Figura 1-15).

Con relación a las decisiones de localización, que son las que están presente en todas las perspectivas, se observa que la mayoría de los modelos matemáticos proponen una estrategia de configuración estática (*SCS*). En efecto, todos los documentos de la perspectiva 1, 2 y 3 asumen este enfoque (ver

columnas $T=t$, C_e y C_f de la Tabla 1-10). También se encuentran contribuciones que consideran un solo periodo de tiempo, lo que limita aún más el dinamismo de la configuración de la cadena de suministro. No obstante, algunos autores plantean variables de decisión para el nivel de capacidad que asignarán a las instalaciones en el momento de apertura (periodo inicial), nivel que se mantiene fijo durante todo el horizonte de planificación.

Figura 1-15: Decisiones incorporadas en las 4 perspectivas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 1-10: Estrategia de establecimiento de instalaciones

Perspectivas	No. Artículos relación directa	Estrategia Instalación					No. de periodos	
		$T=0$	$T=t$	C_a	C_e	C_f	S	M
1. <i>ILRP en SCND</i>	75	75	0	17	0	0	32	43
2. <i>ILRP en BSCND</i>	2	2	0	0	0	0	2	0
3. <i>BSC-CW</i>	2	2	0	0	0	0	0	2
4. <i>DCS en SCND</i>	3	0	3	3	3	1	0	3

Fuente: Elaboración propia

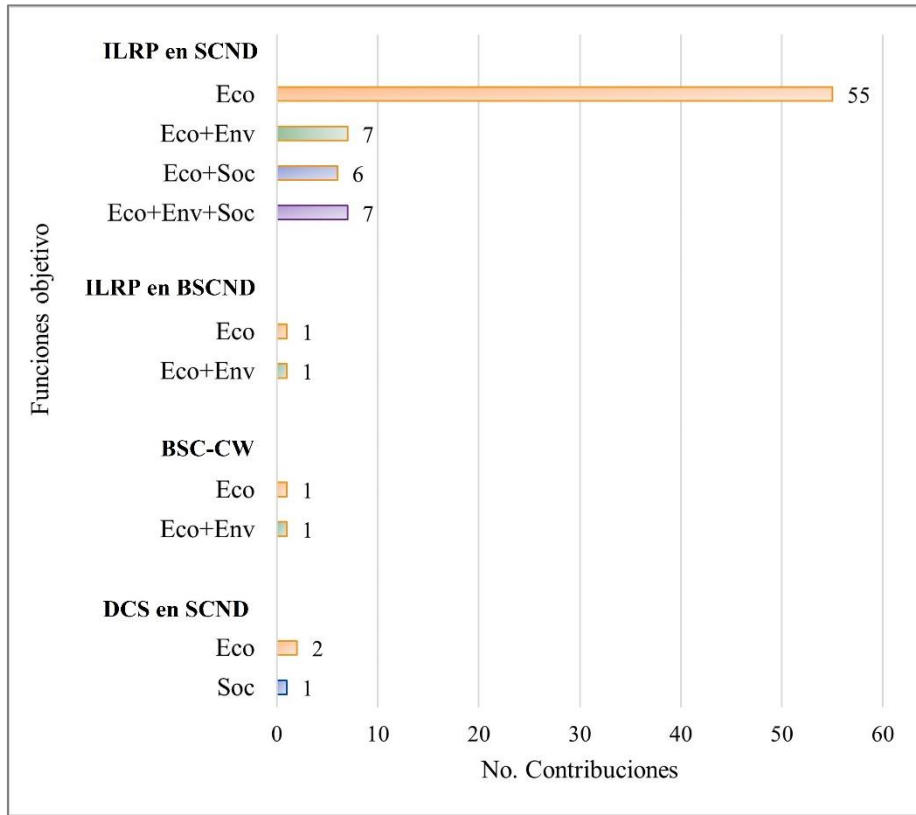
Si bien estos trabajos previos brindan contribuciones relevantes en términos de optimización de *SCND* y enfoques de solución que fortalecen el campo de estudio, la *DCS* ayuda a ajustar la estructura de la cadena de suministro de acuerdo con las variaciones de los parámetros de entrada a largo plazo. Como se discutió anteriormente, a pesar de que la integración *DCS-ILRP* conduce a un mayor esfuerzo computacional y de modelado, esta formulación matemática facilitaría el desarrollo de un plan de inversión más realista en términos de construcción de nuevas instalaciones, expansión

de capacidad y cierre de instalaciones. Por otro lado, solo se encontraron tres contribuciones que desarrollan la *DCS* en el los cuales se presenta las opciones de apertura, y expansión de capacidad de instalaciones en cualquier período de tiempo, con un aporte de cierre solo en uno de los casos.

Otra consideración importante es la sostenibilidad dentro del *SCND*, el objetivo es garantizar la rentabilidad económica sin comprometer los objetivos ambientales y sociales. Desde el punto de vista de la optimización, la dimensión económica ha sido la más recurrente en la formulación de los modelos matemáticos utilizados en el *SCND*. Por lo general el costo total de la estructura de la cadena de suministro es el indicador de desempeño más utilizado para describir el pilar económico (Lahri et al., 2021). Sin embargo, los impactos ambientales y sociales en el *SCND* reclaman mayor investigación (Messmann et al., 2020). Dado el carácter de las implicaciones multidimensionales de la sostenibilidad, los modelos de corte multiobjetivo presentan una mayor capacidad para abordar este tipo de problemas. Por tanto, se debe emplear un esfuerzo computacional adicional para resolver problemas como *ILRP* (o *DCS-ILRP*) con múltiples funciones objetivo.

Como se ve reflejado en la Figura 1-16 la dimensión económica como único objetivo abordado es la que tienen la mayoría de las contribuciones. Por otra parte, poco se ha aportado desde la dimensión ambiental, y en menor medida los aspectos sociales. Solo 7 artículos consideran simultáneamente las tres dimensiones del desarrollo sostenible y están concentrados en el *ILRP* en *SCND* (*Perspectiva I*), en las otras perspectivas de búsqueda hay una ausencia total de este enfoque.

A pesar de que varios artículos plantean una modelación estocástica para el tratamiento de la incertidumbre, la mayoría de las contribuciones desarrollan modelos de corte determinístico para resolver el problema de diseño de cadenas de suministro (Tabla 1-11). Por otro lado, la demanda es el parámetro de entrada más abordado desde la modelación estocástica. Sin embargo, otros parámetros como la capacidad de suministro (desde el eslabón proveedores) es prácticamente inexistente (1 sola contribución). La explicación a esta estadística es que gran parte de los artículos estudian cadenas de suministro directas y muy pocos, cadenas de abastecimiento inversas. Es claro que para redes de suministro directas el parámetro más importante para iniciar el proceso de planificación es la planeación de demanda y, desde luego, en un proceso de logística inversa el punto de partida de la cadena tiene que ver con la generación de residuos. Adicionalmente, cuando se revisaron las pocas contribuciones de diseño de cadenas de suministro a partir de residuos de café, que por su naturaleza son redes de logística inversa, ninguna abordó la incertidumbre en los parámetros de entrada del modelo matemático.

Figura 1-16: Pilares de la sostenibilidad incorporados en las 4 perspectivas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1-11: Incertidumbre incorporada en las 4 perspectivas

Perspectivas	No. Artículos relación directa	Determinístico	Estocástico	Parámetro incierto		
				Suministro	Demanda	Otros
1. <i>ILRP en SCND</i>	75	49	26	1	24	8
2. <i>ILRP en BSCND</i>	2	1	1	0	1	0
3. <i>BSC-CW</i>	2	2	0	0	0	0
4. <i>DCS en SCND</i>	3	2	1	0	0	1

Fuente: Elaboración propia

En resumen, de acuerdo con los hallazgos del estado del arte, se puede concluir que las contribuciones en la integración de decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios en el diseño de cadenas de suministro son limitadas, más aún en el contexto de biocombustibles. Por otro lado, es evidente la ausencia total de la estrategia de configuración dinámica en los *ILRP*, las escasas

contribuciones que la desarrollan se enfocan solo en las decisiones de localización. La sostenibilidad es un tema incipiente dentro de los *ILRP*, con consideraciones en algunos casos de máximo dos de las tres dimensiones del desarrollo sostenible en las otras perspectivas. La cadena de suministro inversa tiene poca representación dentro del problema de optimización conjunta (*ILRP*), lo que conduce a que la incorporación de la incertidumbre en la disponibilidad del suministro sea mínima. Finalmente, los aportes en el diseño de cadenas de suministro a partir de residuos de café se han centrado en localizar las instalaciones dentro de modelos de optimización determinísticos bajo una estrategia de configuración estática (Figura 1-17).

Figura 1-17: Resumen estado del arte



Fuente: Elaboración propia

1.4 Conclusiones parciales

Bajo el marco de los referentes teóricos expuestos hasta aquí y con base en el análisis del estado del arte relacionado con las cuatro perspectivas presentadas en el apartado anterior se puede concluir lo siguiente:

- Existen pocos trabajos que aborden el *SCND* integrando decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios, más aún en el contexto de biocombustibles. Solo se encontraron dos contribuciones, las cuales resuelven el *ILRP* en un entorno menos realista, ya que se trabajaron en un horizonte de planeación de período único y para un solo residuo en lo que respecta al flujo de materiales.

- La localización de instalaciones siguiendo una estrategia de configuración estática (*SCS*) es el único enfoque utilizado para abordar el problema del diseño de cadenas de suministro que integren las decisiones de localización, ruteo e inventario. La configuración dinámica (apertura, expansión y cierre en cualquier periodo de tiempo) de las instalaciones es un tema que ha sido totalmente ignorado. Por otra parte, las contribuciones que emplean una formulación que sigue una estrategia de configuración dinámica (*DCS*) son escasas y solo abarcan las decisiones de localización de instalaciones. El inventario y ruteamiento de vehículos no son considerados.
- La mayoría de los modelos matemáticos propuestos no consideran el estudio del *ILRP* vinculados a la optimización de métricas de desempeño sostenible. Solo siete contribuciones, abordaron simultáneamente los tres pilares de la sostenibilidad (económico, ambiental y social), no obstante, estas contribuciones se formulan bajo una estrategia de configuración estática. Por otro lado, no se encontró ningún aporte que incorpore las tres dimensiones de sostenibilidad en los artículos que resuelven el *ILRP* en el contexto de biocombustibles, ni en los que desarrollan el diseño de cadenas de suministro de biocombustibles a partir de residuos de café, tampoco en los que consideran la estrategia de configuración dinámica.
- El tratamiento de la incertidumbre más común es desarrollado en el análisis de post-optimalidad. Por lo general en las contribuciones se hace una variación numérica de los parámetros de entrada para observar que influencia tienen sobre los indicadores de desempeño que se están optimizando. Sin embargo, pocas contribuciones incorporan el tratamiento de la incertidumbre desde la formulación del problema en el modelo matemático que proponen. En particular, la demanda es el parámetro estocástico más estudiado, dejando a un lado la variabilidad de la disponibilidad del suministro y su impacto en el rendimiento de la cadena de abastecimiento.
- Las contribuciones abordan con más frecuencia cadenas de suministro directas. Muy pocos artículos estudian el diseño de cadenas inversas resolviendo el *ILRP*. No se encontró ningún artículo que estudie redes de logística inversa en la integración de estas tres decisiones en el contexto de biocombustibles, ni en los que desarrollan la estrategia de configuración dinámica.
- La revisión de la literatura ha puesto en evidencia la gran complejidad de los problemas analizados. Por ende, sigue siendo una necesidad además de una tendencia en el área de investigaciones futuras el desarrollo de algoritmos eficientes para hacer frente a la complejidad

computacional en problemas de gran tamaño, que permitan obtener soluciones de buena calidad en tiempos de cómputo razonables.

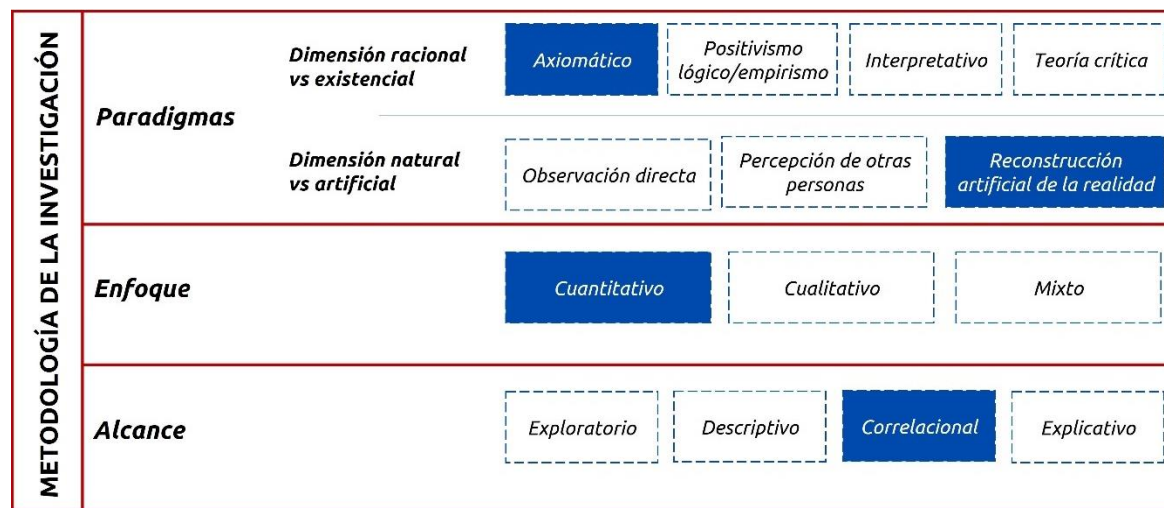
- Los modelos propuestos relacionados con *BSCND*, basados en residuos de cultivos de café, solo asumen la utilización de una materia prima y no la reutilización de múltiples residuos de café. Así mismo, ninguna contribución ha abordado dicho problema integrando múltiples decisiones (*ILRP*) y optimizando simultáneamente las tres dimensiones que componen el enfoque de sostenibilidad.

Con todo lo anterior es posible establecer que el diseño de una de cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, que integre las decisiones de instalaciones con una estrategia de configuración dinámica, ruteo e inventarios (*DCS-ILRP*), bajo un enfoque sostenible y estocástico, es aún un problema no resuelto en su totalidad. Por tanto, este se constituye en el vacío de conocimiento que se aborda en la presente tesis doctoral.

2. Modelo de optimización propuesto

Con base en el vacío de conocimiento identificado en la revisión de la literatura, el presente capítulo tiene como objetivo diseñar la solución conceptual al problema planteado. Con este fin, se presenta la formulación de un conjunto de modelos matemáticos para el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, que integra las decisiones de localización de instalaciones con una estrategia de configuración dinámica, ruteo e inventario (*DCS-ILRP: Dynamic Configuration Strategy - Inventory Location Routing Problem*) bajo un enfoque sostenible y estocástico. La metodología de investigación que se utilizó en el desarrollo de esta tesis doctoral se describe a partir de tres criterios: a) en función de los paradigmas; b) del enfoque de investigación; y c) del alcance (Figura 2-1).

Figura 2-1: Metodología de la investigación



Fuente: Elaboración propia

Meredith et al. (1989) desarrolla un marco para los paradigmas de investigación basado en dos dimensiones clave de las metodologías utilizadas: la estructura racional versus existencial del proceso de investigación y la base natural versus artificial de la información. De acuerdo con esto,

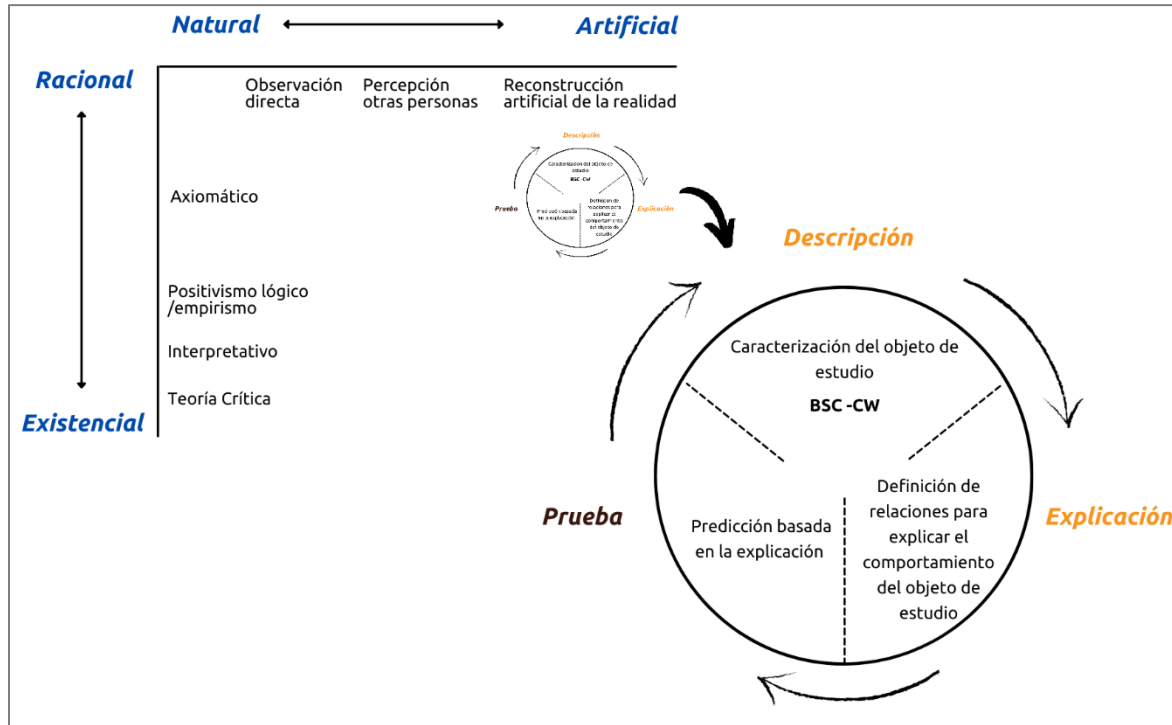
esta investigación doctoral se ubica desde el punto de vista ontológico en la perspectiva axiomática (dimensión racional-existencial) y epistemológicamente en la de reconstrucción artificial de la realidad del objeto (dimensión natural-artificial). A su vez, su metodología se realiza a través de relaciones analíticas de un modelo normativo que cae en los campos de la investigación de operaciones.

El enfoque de investigación es cuantitativo, el cual se caracteriza por el uso del método hipotético-deductivo, así mismo, asegura procedimientos rigurosos de recolección y análisis de los datos, evitando que los sesgos y tendencias del investigador influyan en los resultados, además de dar prioridad a los procedimientos replicables. Es un enfoque que enfatiza el descubrimiento de principios generales y puede inferir las características de una determinada población, observando a un grupo o muestra (Ríos, 2018; Sampieri et al., 2010).

Por otro lado, el alcance de la investigación es de tipo correlacional, el cual tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en una muestra o contexto (Sampieri et al., 2010). En particular, esta tesis doctoral busca, desde sus hipótesis de investigación, determinar si la integración sostenible de las decisiones de instalaciones siguiendo una estrategia de configuración dinámica, ruteo e inventario (variables independientes), permite obtener mejor desempeño económico, ambiental y social (variables dependientes). En general, los estudios científicos involucran un ciclo continuo y repetitivo de descripción, explicación y prueba (Meredith et al., 1989). Las dos primeras fases se desarrollan en esta sección, las cuales se entrelazan a lo largo del capítulo. La etapa de prueba se presenta en el capítulo 4 (Figura 2-2).

Para tal fin, este apartado se construye de la siguiente manera: Primero se plantea un modelo matemático base, del cual partirá la integración de decisiones que propone esta tesis doctoral. Esta formulación matemática inicial incluye el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café que busca optimizar los tres pilares de la sostenibilidad (multiobjetivo), utilizando múltiples residuos (multiproducto), determinando decisiones de localización, inventario y flujo de materiales en el largo plazo (multiperiodo). Se propone una estrategia de configuración estática, no obstante, se considera la capacidad como una variable de decisión, que se define en el periodo inicial y continua sin cambios durante todo el horizonte de planificación.

Figura 2-2: Ciclo investigativo



Fuente: Elaboración propia

A partir de esta representación inicial, se desarrolla la estrategia de configuración dinámica (*DCS*), que consiste en la ubicación, apertura, expansión de capacidad y cierre de instalaciones en cualquier período de tiempo. La interacción entre las variables de cambio de capacidad y el flujo de los materiales, conduce a una formulación no lineal del problema. Para solucionar esta situación se propone un método de linealización. Posteriormente, se incorporan las decisiones de ruteo de vehículos para la recolección de residuos y en la última fase se integra la incertidumbre en la disponibilidad de suministro de los proveedores, obteniendo un modelo de programación lineal multiobjetivo estocástico (Figura 2-3). Se finaliza con las conclusiones parciales del capítulo.

2.1 Modelo matemático base

La producción de biocombustible a partir de biomasa lignocelulósica como los residuos de café, se ha identificado como una estrategia de energía prometedora (Duarte et al., 2014; Ng & Maravelias, 2016). En primer lugar, por la generación de valor al utilizar residuos para obtener energía, típico de una cadena de suministro inversa. Segundo, porque no se requiere de tierra para cultivos como en el caso de los biocombustibles de primera generación, lo que impacta directamente la seguridad

alimentaria. Tercero, ofrece una oportunidad a las comunidades rurales de aumentar ingresos, generar empleos y mejorar la calidad de vida. Finalmente, también se obtiene el beneficio de disminuir la cantidad de desechos de agrícolas que quedan en las zonas cafeteras, los cuales son fuente de contaminación para los recursos naturales y el bienestar humano.

Figura 2-3: Evolución modelo matemático propuesto



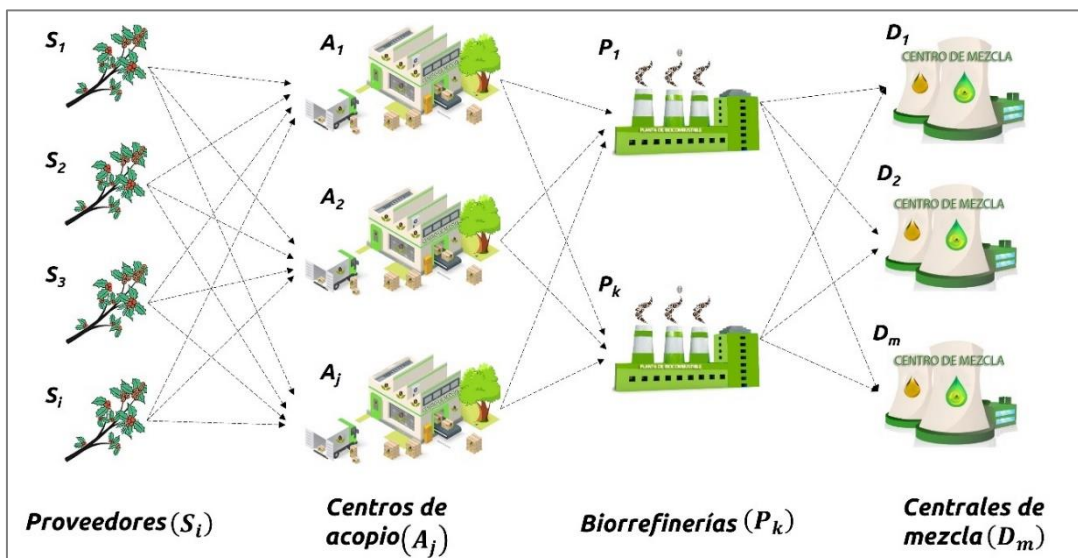
Fuente: Elaboración propia

Al ser una cadena de suministro inversa, su fuente de abastecimiento depende de la cantidad de residuos que generen los cultivos de café. Los cuales dependen de factores como la estacionalidad, variaciones climáticas, condiciones de suelo y control de plagas, que afectan la cantidad y calidad esperada de la cosecha y por tanto de los desechos. Situación que evidencia la necesidad de almacenar biomasa para garantizar un suministro constante de materia prima a las biorrefinerías, evitando interrupciones en el proceso de producción que desencadenen altos costos y baja confiabilidad. A su vez, debido a la perecibilidad de la biomasa, estos residuos requieren

manipulación, almacenamiento y gestión de inventario específicos, ya que el manejo inadecuado puede causar una pérdida sustancial del valor del producto (Behzadi et al., 2018).

De acuerdo con estas características, la configuración de la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café consiste en 1) una red de proveedores de biomásas, 2) centros de acopio donde se realiza el pretratamiento, consolidación de carga y almacenamiento de residuos para garantizar el flujo de materia prima. 3) biorrefinerías en donde se lleva a cabo el proceso de producción del biocombustible y 4) centrales de mezcla en las cuales, de acuerdo con la normativa del país, se mezcla el biocombustible con combustible fósil (Figura 2-4).

Figura 2-4: Configuración cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café



Fuente: Elaboración propia

Dado el conjunto de residuos junto con su disponibilidad, además de las ubicaciones potenciales de las instalaciones, el objetivo es determinar el número óptimo, tamaño y ubicación de los centros de acopio y biorrefinerías, los niveles de inventario de biomasa en los centros de acopio y los flujos tanto para los residuos como para el biocombustible a través de la red de suministro. Para una mayor comprensión se detalla a continuación las variables de decisión, funciones objetivo y restricciones del modelo matemático base.

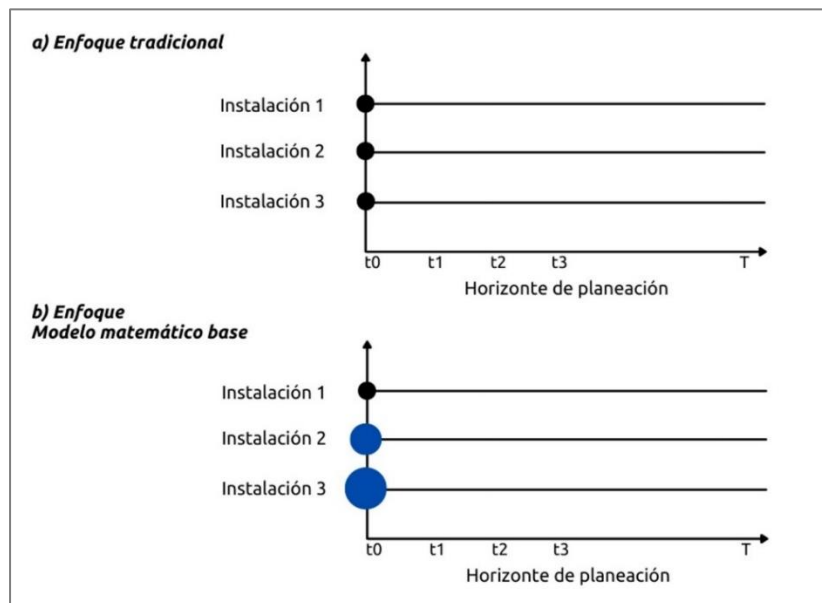
2.1.1 Variables de decisión

En las últimas tres décadas, uno de los aspectos más importantes en el diseño de la cadena de suministro, es un enfoque integrado para optimizar el sistema logístico. Este enfoque implica los lazos entre la localización y asignación de capacidad en las instalaciones, el control de inventario y la estructura de transporte (Yaghoubi & Akrami, 2019).

▪ Decisiones de localización de instalaciones

En las decisiones de localización el modelo determina la cantidad, ubicación y capacidad para las instalaciones de un determinado conjunto de ubicaciones potenciales. Con relación a la asignación de capacidad, como se discutió en la revisión del estado del arte, el enfoque tradicional en *SCND* (*SCND: Supply Chain Network Design*) utiliza instalaciones con una capacidad definida a priori. No obstante, algunas contribuciones tenían la opción de seleccionar su capacidad, planteándola como una variable de decisión. El modelo matemático base propuesto, adopta esta última referencia en donde se tienen varias alternativas de capacidad, la cual se asigna en el periodo inicial y permanece constante hasta el final de la planificación (Figura 2-5).

Figura 2-5: Enfoque para asignación de capacidad en instalaciones



Fuente: Elaboración propia

Hay tres supuestos del modelo matemático que se deben definir:

- Supuesto 1:** La cantidad de escalones de la red de la cadena de suministro son 4 (proveedores, centros de acopio, biorrefinerías e instalaciones de mezcla).
- Supuesto 2:** Se asumen múltiples periodos de tiempo.

Supuesto 3: Se considera el valor del dinero en el tiempo.

Las decisiones de localización se toman tanto para los centros de acopio como para las biorrefinerías. Cada una de estas instalaciones tiene asociada una variable de decisión tipo binario que será igual a 1 si se da apertura con determinado nivel de capacidad, o cero en caso contrario (Tabla 2-1).

Tabla 2-1: Variables de localización de instalaciones

Término	Descripción	Unidad
A_{jb}	1 si se abre el centro de acopio j con capacidad b . 0 en caso contrario	Binario
P_{kc}	1 si se abre la biorrefinería k con capacidad c . 0 en caso contrario	Binario
En donde:		
J	Conjunto de ubicaciones potenciales para los centros de acopio	
B	Conjunto de capacidades para los centros de acopio	
K	Conjunto de ubicaciones potenciales para las biorrefinerías	
C	Conjunto de capacidades para las biorrefinerías	

Fuente: Elaboración propia

▪ Decisiones de inventario

Con el objetivo de garantizar el flujo continuo de materia prima a las biorrefinerías y evitar costos de parada en los procesos de producción, se considera almacenamiento de residuos en los centros de acopio. Por tanto, la variable de decisión se define solo para esta instalación (Tabla 2-2). El nivel de inventario considera además del requerimiento de las biorrefinerías, la velocidad de degradación de la biomasa y la capacidad de almacenamiento. Los supuestos relacionados con esta decisión son los siguientes:

Supuesto 4: Se asumen múltiples residuos agrícolas.

Supuesto 5: Las decisiones de inventario dependen de tres aspectos: 1) requerimientos de materia prima en las biorrefinerías; 2) perecibilidad del residuo, y 3) capacidad de almacenamiento de los centros de acopio.

Supuesto 6: Se asumen conocidas las propiedades principales de cada una de las biomásas, por ejemplo, la velocidad de degradación, estacionalidad y rendimiento.

Supuesto 7: Se asumen frecuencias de abastecimiento por periodo de tiempo.

Tabla 2-2: Variables de inventario

Término	Descripción	Unidad
---------	-------------	--------

IA_{wjbt}	Nivel de inventario del residuo w en el centro de acopio j con capacidad b , en el periodo de tiempo t	ton
En donde:		
W	Conjunto de residuos	
T	Conjunto de periodos de tiempo	

Fuente: Elaboración propia

▪ **Decisiones de transporte**

Las decisiones de flujo de materiales se dividen en dos grupos; por un lado, están las relacionadas con los residuos y por el otro las del bicomcombustible. Con relación a los residuos, se define la cantidad de biomasa que se envía desde los proveedores a los centros de acopio. Adicionalmente, el volumen que queda de estos residuos en los proveedores, para determinar impactos socioambientales como se explicará más adelante. A su vez, se establece el flujo de residuos desde los centros de acopio hasta las biorrefinerías. Debido a que las biomásas tienen características fisicoquímicas particulares, se requiere un tratamiento y tipo de vehículo especial para cada una de ellas (flota heterogénea). Finalmente, se define el flujo de biocombustible desde las biorrefinerías hasta las centrales de mezcla (Tabla 2-3). Los supuestos adicionales relacionados con estas decisiones son:

- Supuesto 8:** Se considera envíos directos a lo largo de la cadena de suministro.
- Supuesto 9:** La asignación de un proveedor a un cliente (granjas a centros de acopio, centros de acopio a biorrefinerías, biorrefinerías a instalaciones de mezcla) no es exclusiva a lo largo del horizonte de planificación.

La Figura 2-6 presenta las decisiones que determina el modelo matemático base, para el diseño de una cadena de suministro sostenible de bicomcombustible a partir de residuos de café, que integra decisiones de instalaciones, inventario y flujo de materiales. A su vez, el Anexo F resume los componentes principales del modelo matemático (conjuntos, parámetros de entrada y variables de decisión).

Tabla 2-3: Variables de flujo

Término	Descripción	Unidad
SO_{iwt}	1 si el residuo w es utilizado como biomasa por el proveedor i en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binario
NS_{iwt}	Cantidad del residuo w que no utiliza como biomasa el proveedor i , en el periodo de tiempo t	ton
SA_{wijbt}	Cantidad del residuo w enviado desde el proveedor i al centro de acopio j con capacidad b , en el periodo de tiempo t	ton

AP_{wjbkct} Cantidad del residuo w enviado desde el centro de acopio j con capacidad b a la biorrefinería k con capacidad c , en el periodo de tiempo t

PB_{kmt} Cantidad de bioetanol enviado desde la biorrefinería k a la central de mezcal m , en el periodo de tiempo t

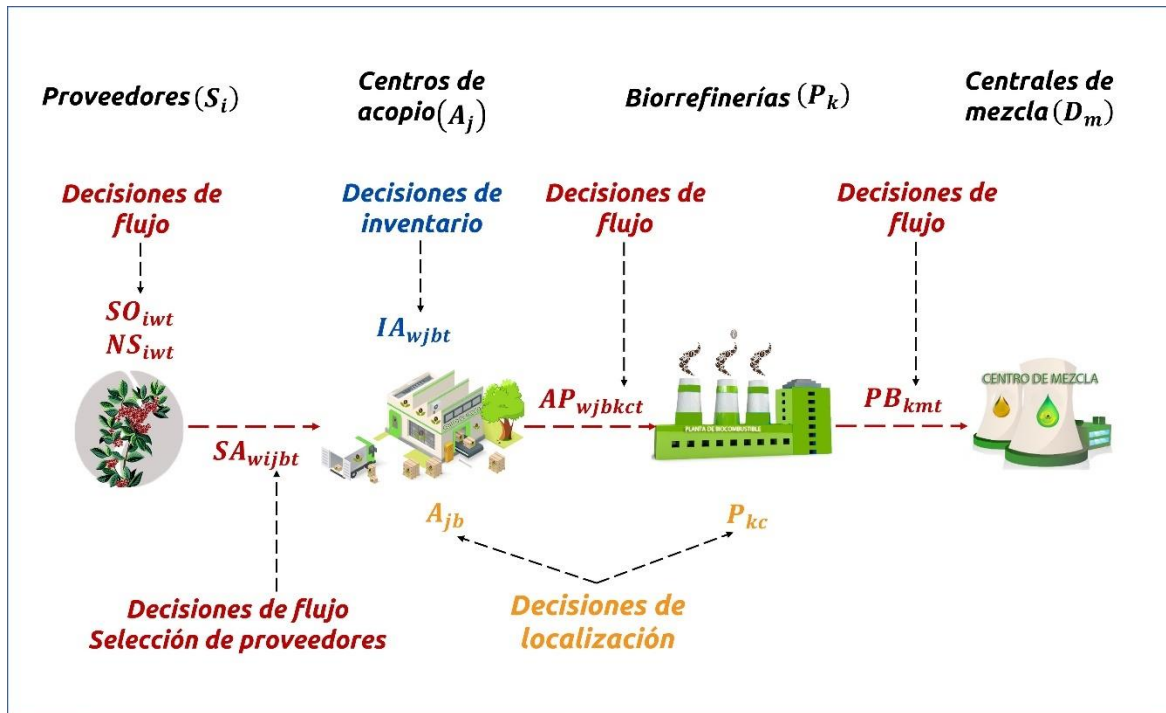
En donde:

I Conjunto de proveedores

M Conjunto de centrales de mezcla

Fuente: Elaboración propia

Figura 2-6: Variables de decisión modelo matemático base



Fuente: Elaboración propia

2.1.2 Funciones objetivo

Teniendo en cuenta la importancia de la sostenibilidad en las cadenas de suministro y en particular en las cadenas de suministro inversa de biocombustibles, se determina el desempeño económico, ambiental y social basado en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Max } F1 = \text{Valor presente neto} \quad (2.1)$$

$$\text{Min } F2 = \text{Impactos ambientales negativos} \quad (2.2)$$

$$\text{Max } F3 = \text{Impactos sociales positivos} \quad (2.3)$$

▪ **Función objetivo económica**

El *SCND* implica decisiones a largo plazo que involucran flujos de dinero dentro del periodo de planificación. Por tanto, es necesario considerar el valor del dinero en el tiempo con el fin de obtener un análisis financiero realista. En consecuencia, la función objetivo económica (Ecuación (2.4)) está enfocada a maximizar el Valor Presente Neto (*NPV: Net Present Value*).

$$Max F1 = NPV = \sum_{t \in T} \frac{Flujo\ de\ efectivo_t}{(1 + InRate)^t} \quad (2.4)$$

Los ingresos para el cálculo del *NPV* se definen en la Ecuación (2.5) que corresponden a las ventas del biocombustible. Por otra parte, las funciones de costo están representadas en las ecuaciones (2.6) a (2.14). El costo por adquisición para cada tipo de residuo de acuerdo con el periodo de tiempo está dado en la Ecuación (2.6). A su vez, los costos relacionados con la apertura de instalaciones teniendo en cuenta el nivel de capacidad asignada se expresan en las ecuaciones (2.7) y (2.8) para los centros de acopio y las biorrefinerías respectivamente.

$$Ingreso\ por\ ventas_t = \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} PBE_t PB_{kmt} \quad \forall t \in T \quad (2.5)$$

$$Costo\ de\ materia\ prima_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} PBM_{tw} SA_{wijbt} \quad \forall t \in T \quad (2.6)$$

$$Costo\ de\ apertura\ centros\ de\ acopio = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} cosA_{jb} A_{jb} \quad (2.7)$$

$$Costo\ de\ apertura\ biorrefinerías = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} cosP_{kc} P_{kc} \quad (2.8)$$

Los costos fijos y variables de operación de las instalaciones se formulan en las ecuaciones (2.9) a (2.12). Así mismo, en las ecuaciones (2.13) y (2.14) se representan los costos de inventario en los centros de acopio y el de transporte tanto para la biomasa como para el biocombustible. Estos costos además de considerar el tipo de residuo y el nivel de capacidad de las instalaciones tienen en cuenta el valor del dinero en el tiempo.

$$Costo\ fijo\ centros\ de\ acopio_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} cosfA_{jbt} A_{jb} \quad \forall t \in T \quad (2.9)$$

$$Costo\ fijo\ biorrefinerías_t = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} cosfP_{kct} P_{kc} \quad \forall t \in T \quad (2.10)$$

$$\text{Costo variable centros de acopio}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosv}A_{wjbt}SA_{wijbt} \quad \forall t \in T \quad (2.11)$$

$$\text{Costo variable biorrefinerías}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{cosv}P_{kct}AP_{wjbkct} \quad \forall t \in T \quad (2.12)$$

$$\text{Costo de inventario centros de acopio}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cossto}A_{wjbt}IA_{wjbt} \quad \forall t \in T \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de transporte}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cost}SA_{wijt}SA_{wijbt} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{cost}AP_{wjkt}AP_{wjbkct} \\ &+ \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{cost}PB_{kmt}PB_{kmt} \quad \forall t \in T \quad (2.14) \end{aligned}$$

▪ Función objetivo ambiental

El enfoque ambiental en la cadena de suministro tiene como objetivo principal disminuir el impacto generado en el entorno por las operaciones de abastecimiento, producción y entrega. Uno de los principales desafíos en el área de la sostenibilidad ambiental se relaciona con las emisiones de carbono y otros Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Babagolzadeh et al., 2020). En efecto, a nivel mundial, los procesos industriales y la industria manufacturera representan más del 18% de todas las emisiones de GEI (Valderrama et al., 2020), y solo el sector transporte contribuye aproximadamente con el 25% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (X. Zhao et al., 2020). Dado lo anterior, el modelo propuesto incorpora los estándares *GRI* (*Global Reporting Initiative*).

Desde la perspectiva *GRI*, la dimensión ambiental tiene en cuenta los impactos de la cadena de suministro en la tierra, aire, agua y ecosistemas (*GRI*, 2016). En particular, se incluyeron los dos efectos ambientales más significativos de la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café: contaminación del agua en términos de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y del aire con relación al CO₂ emitido. Estos efectos se analizan en dos grupos, por un lado, están los generados por las actividades de la cadena de suministro como son: contaminación del agua y aire por centros de acopio y biorrefinerías, además de las emisiones de CO₂ por operaciones de transporte. Por otro lado, se consideraron los impactos que generan los residuos agrícolas que no se utilizan como materia prima para producción de biocombustible. Estos llegan a fuentes hídricas contaminando el agua o se quedan en el terreno emitiendo CO₂ debido a su proceso de descomposición. Por tanto, la contaminación en las granjas depende de la biomasa no demandada por la cadena de abastecimiento.

En este sentido, la Ecuación (2.15) minimiza el costo de las emisiones de CO₂ y de la contaminación del agua de los vertimientos de efluentes teniendo en cuenta la carga de SST.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } F2 = & \sum_{t \in T} \text{Contaminación de agua en proveedores}_t \\
 & + \text{Contaminación de aire en proveedores}_t \\
 & + \text{Contaminación de agua en centros de acopio}_t \\
 & + \text{Contaminación de aire en centros de acopio}_t \\
 & + \text{Contaminación de agua en biorrefinerías}_t \\
 & + \text{Contaminación de aire en biorrefinerías}_t \\
 & + \text{Contaminación de aire en transporte}_t
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Las ecuaciones (2.16) y (2.17) establecen los impactos ambientales generados por las fincas cuando los residuos agrícolas no son utilizados por la cadena de suministro. A su vez, las expresiones desde la (2.18) hasta la (2.21) representan el costo de la contaminación del agua y aire de los centros de acopio y biorrefinerías. Por último, el costo del CO₂ generado por las operaciones de transporte se define en la Ecuación (2.22).

$$\text{Contaminación de agua en proveedores}_t = \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosSST}_t \text{SSTS}_w \text{NS}_{iwt} \quad \forall t \in T \tag{2.16}$$

$$\text{Contaminación de aire en proveedores}_t = \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosCO2}_t \text{CO2S}_w \text{NS}_{iwt} \quad \forall t \in T \tag{2.17}$$

$$\text{Contaminación de agua en centros de acopio}_t = \sum_{J \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosSST}_t \text{SSTA}_{wb} \text{SA}_{wijbt} \quad \forall t \in T \tag{2.18}$$

$$\text{Contaminación de aire en centros de acopio}_t = \sum_{J \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosCO2}_t \text{CO2A}_{wb} \text{SA}_{wijbt} \quad \forall t \in T \tag{2.19}$$

$$\text{Contaminación de agua en biorrefinerías}_t = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{J \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cosSST}_t \text{SSTP}_c \text{AP}_{wjbkct} \quad \forall t \in T \tag{2.20}$$

$$\text{Contaminación de aire en biorrefinerías}_t = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{J \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cosCO2}_t \text{CO2P}_c \text{AP}_{wjbkct} \quad \forall t \in T \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Contaminación de aire en transporte}_t = & \sum_{J \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosCO2}_t \text{CO2SA}_{wij} \text{SA}_{wijbt} \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{J \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cosCO2}_t \text{CO2AP}_{wjk} \text{AP}_{wjbkct} \\
 & + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{cosCO2}_t \text{CO2PB}_{km} \text{PB}_{kmt} \quad \forall t \in T
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

▪ **Función objetivo social**

La dimensión social del enfoque sostenible para el SCND evalúa cómo las operaciones a lo largo de la red de suministro afectan a las personas y a la comunidad en general (Eskandarpour et al., 2015).

Los impactos sociales pueden ser consecuencia de presiones positivas o negativas sobre el bienestar de los interesados (accionistas, comunidad cercana a los centros de acopio y biorrefinerías, proveedores, etc.). En este sentido, las comunidades alrededor del lugar de trabajo deben ser mejoradas tanto social como económicamente (Cadena et al., 2019).

El objetivo del modelo matemático es maximizar dos de los principales efectos sociales positivos (Ecuación (2.23)). En primer lugar, están los impactos en la seguridad alimentaria. Estos impactos se generan cuando el biocombustible se produce a partir residuos agrícolas en lugar de biomásas utilizadas para el consumo humano o animal, por ejemplo, el maíz o la soja (Sharma et al., 2013). En este caso, se supone que cierta cantidad de tierra destinada al cultivo de biomasa para la obtención de biocombustibles, se libera para la producción de alimentos (Morales-Chavez et al., 2018). En segundo lugar, está el impacto de la generación de empleo, que considera además del número de puestos de trabajo generados, el índice de desempleo en las zonas de influencia de manera que el efecto sea mayor.

Teniendo en cuenta estos dos impactos, la Ecuación (2.24) determina la cantidad de tierra que puede liberarse si el biocombustible se produce a partir de residuos agrícolas. Por otra parte, las ecuaciones desde la (2.25) a la (2.27) establecen en las regiones de influencia, los efectos que se obtienen por los empleos generados en fincas, centros de acopio y biorrefinerías sobre la tasa de desempleo. Es importante resaltar que, teniendo en cuenta que la operación principal de los proveedores no es el suministro de residuos, al decidir operar en el mercado de biocombustibles, generarán oportunidades de empleo e ingresos adicionales.

$$\begin{aligned} \text{Max } F3 = & \sum_{t \in T} \text{Contribución a la seguridad alimentaria}_t \\ & + \text{Aporte al índice de empleo en proveedores}_t \\ & + \text{Aporte al índice de empleo en centros de acopio}_t \\ & + \text{Aporte al índice de empleo en biorrefinerías}_t \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\text{Contribución a la seguridad alimentaria}_t = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \frac{PB_{kmt}}{BIO} \quad \forall t \in T \quad (2.24)$$

$$\text{Aporte al índice de empleo en proveedores}_t = \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} UES_{it} ES_w SO_{iwt} \quad \forall t \in T \quad (2.25)$$

$$\text{Aporte al índice de empleo en centros de acopio}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} UEA_{jt} EA_b A_{jb} \quad \forall t \in T \quad (2.26)$$

$$\text{Aporte al índice de empleo en biorrefinerías}_t = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} UEP_{kt} EP_c P_{kc} \quad \forall t \in T \quad (2.27)$$

2.1.3 Restricciones

El modelo matemático considera varios grupos de restricciones relacionadas con las instalaciones (centros de acopio y biorrefinerías), inventario y flujo de materiales a lo largo de la red de suministro. A continuación, se proporciona una descripción detallada.

▪ Restricciones de instalaciones

Las instalaciones pueden abrirse en múltiples lugares, con diferentes capacidades. Adicionalmente ser abastecidas por múltiples proveedores. No obstante, solo podrá abrirse una instalación por ubicación, lo que se garantiza en las ecuaciones (2.28) y (2.29) para centros de acopio y biorrefinerías respectivamente.

$$\sum_{b \in B} A_{jb} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (2.28)$$

$$\sum_{c \in C} P_{kc} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2.29)$$

Por otro lado, las ecuaciones (2.30) y (2.31) garantizan que la cantidad de residuo enviado desde los proveedores a los centros de acopio no supere la capacidad de las operaciones de pretratamiento y almacenamiento, respectivamente. De manera similar, la Ecuación (2.32) restringe la producción de bioetanol de acuerdo con la capacidad de las biorrefinerías.

$$\sum_{i \in I} SA_{wijbt} \leq capA_{wb} A_{jb} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.30)$$

$$IA_{wjbt} \leq capstoA_{wb} A_{jb} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.31)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkct} \leq capP_c P_{kc} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (2.32)$$

▪ Restricciones de inventario

El nivel de inventario para cada tipo de residuo w es calculado usando la Ecuación (2.33).

$$IA_{wjbt} = \sum_{r \in T/r \leq t} \sum_{i \in I} SA_{wijbr} - \sum_{r \in T/r \leq t} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} AP_{wjbkcr} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.33)$$

▪ Restricciones de flujo de materiales

La expresión (2.34) determina si los proveedores suministran residuos para biomasa en cada periodo de tiempo (SO_{iwt}). Este valor se utiliza para calcular el impacto social generado por los agricultores con relación al incremento del índice de empleo. De igual manera, la restricción (2.35) calcula la cantidad de residuos no utilizados para la producción de biocombustible. Este resultado permite cuantificar el impacto ambiental negativo debido a que los residuos que se descomponen en las fincas generan CO_2 y contaminan las fuentes hídricas.

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} SA_{wijbt} \leq SO_{iwt} * MM \quad \forall w \in W ; \forall i \in I ; \forall t \in T \quad (2.34)$$

$$NS_{iwt} = S_{iwt} - \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} SA_{wijbt} \quad \forall w \in W ; \forall i \in I ; \forall t \in T \quad (2.35)$$

La capacidad de los proveedores se considera en la Ecuación (2.36). La continuidad de flujo a través de los centros de acopio se consideró en las restricciones de inventario (Ecuación (2.33)). A su vez, la expresión (2.37) asegura que todo el residuo que llega a las biorrefinerías se convierte en biocombustible y es enviado a las centrales de mezcla. Por otro lado, la demanda de las centrales de mezcla no debe ser superada por ningún envío procedente de las biorrefinerías, lo que se garantiza en la restricción (2.38).

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} SA_{wijbt} \leq S_{iwt} \quad \forall w \in W ; \forall i \in I ; \forall t \in T \quad (2.36)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkct} IC = \sum_{m \in M} PB_{kmt} \quad \forall k \in K ; \forall t \in T \quad (2.37)$$

$$\sum_{k \in K} PB_{kmt} \leq D_{mt} \quad \forall m \in M ; \forall t \in T \quad (2.38)$$

Finalmente, las restricciones (2.39) y (2.40) indican el rango numérico (dominio) de todas las variables de decisión (variables binarias y continuas).

$$A_{jb}, P_{kc}, SO_{iwt} \in (0,1) \quad (2.39)$$

$$IA_{wjb}, NS_{iwt}, SA_{wijbt}, AP_{wjbkct}, PB_{kmt} \geq 0 \quad (2.40)$$

2.2 Estrategia de configuración dinámica (*DCS*)

Históricamente los modelos matemáticos en el *SCND* han abordado las decisiones de localización de instalaciones empleando una formulación que sigue una configuración estática. La cual asume, que una instalación está diseñada con una capacidad fija, definida a priori y ubicada en un área determinada (ciudad o región), de tal manera que estas decisiones no cambian durante el horizonte de planeación. Este supuesto es poco eficiente, en la medida en que una instalación puede requerir cambios de capacidad en el tiempo, debido a fluctuaciones del mercado a largo plazo (aumentos o disminuciones de la demanda) y / o restricciones de oferta, especialmente cuando la materia prima es un residuo agrícola (Ivanov & Stoyanov, 2016; Yao & Askin, 2019).

Modelos avanzados consideran la asignación de capacidad como una variable de decisión que se toma en el periodo inicial y continua sin cambios durante todo el horizonte de planificación, tal como se formuló en el modelo matemático base. No obstante, en el contexto de la cadena de suministro de biocombustibles, se requiere mayor flexibilidad en la toma de decisiones de localización, debido a las características de la biomasa. Factores como la estacionalidad exigen una estrategia de configuración dinámica que permita determinar el momento óptimo para abrir una instalación, la capacidad con la que operará y adicionalmente, si a lo largo del periodo de planeación es necesario expandir la capacidad o tomar la decisión del cierre de la instalación si su operación ya no es viable (Morales-Chavez et al., 2018). De acuerdo con lo anterior, se requiere incorporar a la formulación del modelo matemático base, la estrategia de configuración dinámica. A continuación, se detallan los ajustes correspondientes (variables y ecuaciones adicionales o que requieren alguna modificación).

2.2.1 Variables de decisión siguiendo la estrategia *DCS*

La estrategia de configuración dinámica incluye tres decisiones: apertura, ampliación de capacidad y cierre de instalaciones en cualquier período de tiempo. Con relación a las variables de apertura, es necesario ajustar las planteadas en el modelo matemático base, con la adición del subíndice t , de tal manera que permita abrir las instalaciones en cualquier periodo de tiempo. La Tabla 2-4 presenta las variables con la modificación.

Tabla 2-4: Variables de apertura de instalaciones siguiendo la estrategia *DCS*

Término	Descripción	Dominio
A_{jbt}	1 si se abre el centro de acopio j con capacidad b en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
P_{kct}	1 si se abre la biorrefinería k con capacidad c en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, se requiere plantear variables relacionadas con las decisiones de expansión de capacidad y cierre de las instalaciones. Las variables de expansión de capacidad incluyen información sobre el nivel inicial y el nivel expandido de la capacidad, además del periodo de tiempo en el que ocurre este cambio (Tabla 2-5). De tal manera que se pueda calcular los costos e impactos adicionales a partir de ese periodo de tiempo.

Tabla 2-5: Variables de expansión de capacidad de instalaciones siguiendo la estrategia *DCS*

Término	Descripción	Dominio
$UA_{jb}^{ub t}$	1 si la capacidad del centro de acopio j se expande del nivel b al nivel ub en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
$UP_{kc}^{uc t}$	1 si la capacidad de la biorrefinería k se expande del nivel c al nivel uc en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria

En donde:

UB	Conjunto de capacidades de expansión para los centros de acopio
UC	Conjunto de capacidades de expansión para las biorrefinerías

Fuente: Elaboración propia

A su vez, las variables de decisión que corresponden al cierre de las instalaciones se dividen en dos grupos; 1) las variables que relacionan el cierre de la instalación teniendo en cuenta su capacidad inicial y 2) las que indican el cierre de la expansión de capacidad, si esta hubiera tenido lugar. En ambos casos se considera los niveles de capacidad, los periodos de tiempo de apertura, expansión y cierre (Tabla 2-6), con el objetivo de determinar el valor de salvamento y costo del cierre de la instalación, de acuerdo con una depreciación lineal.

Tabla 2-6: Variables de cierre de instalaciones siguiendo la estrategia *DCS*

Término	Descripción	Dominio
$AC_{jb}^{t_0 t}$	1 si el centro de acopio j el cual fue abierto con capacidad b en el periodo t_0 , termina su operación en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
$PC_{kc}^{t_0 t}$	1 si la biorrefinería k la cual fue abierta con capacidad c en el periodo t_0 , termina su operación en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
$UAC_{jub}^{t_0 t}$	1 si el centro de acopio j que expandió su capacidad (del nivel b al nivel ub) en el periodo t_0 , termina su operación en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
$UPC_{kuc}^{t_0 t}$	1 si la biorrefinería k que expandió su capacidad (del nivel c al nivel uc) en el periodo t_0 , termina su operación en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria

En donde:

$$T_0 \in T$$

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, para generar una conexión entre las variables de apertura y cierre, tanto de las instalaciones en general como de la expansión de capacidad, fue necesario plantear variables de operación (Tabla 2-7). Las cuales indican si las instalaciones están operando en cada periodo de tiempo. El nivel de capacidad que relaciona las variables AO_{jbt} , PO_{kct} hace referencia al momento de la apertura. La Figura 2-7 resume los enfoques de localización de instalaciones, señalando las decisiones que se consideran en cada uno de estos.

2.2.2 Función objetivo siguiendo la estrategia DCS

Las nuevas decisiones que incorpora la estrategia de configuración dinámica conllevan a una adecuación de las funciones objetivo. Puesto que, el incremento de la capacidad de las instalaciones, en el caso de la expansión, genera costos e impactos ambientales y sociales adicionales. Por el contrario, cuando se cierra la instalación se deben suprimir todos estos indicadores. A continuación, se detallan los cambios que se requieren en las funciones objetivo planteadas en el modelo matemático base.

Figura 2 7: Estrategias de configuración de instalaciones

Enfoque	Decisiones	Esquema
Tradicional	Apertura → Ubicación	
Modelo matemático base	Apertura → Ubicación Capacidad	
Estrategia de configuración dinámica (DCS)	Apertura → Ubicación Capacidad Tiempo	
	Expansión → Ubicación Capacidad inicial Capacidad expandida Tiempo	
	Cierre → Ubicación Capacidad Tiempo de apertura Tiempo de cierre	$AC_{jb}^{t_0 t}$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-7: Variables de operación de instalaciones siguiendo la estrategia DCS

Término	Descripción	Dominio
AO_{jbt}	1 si el centro de acopio j con capacidad b está operando en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
PO_{kct}	1 si la biorrefinería k con capacidad c está operando en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
$UAO_{jb}^{ub t}$	1 si el centro de acopio j con expansión de capacidad (del nivel b al nivel ub) está operando en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
$UPO_{kc}^{uc t}$	1 si la biorrefinería k con expansión de capacidad (del nivel c al nivel uc) está operando en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria

Fuente: Elaboración propia

▪ Función objetivo económica siguiendo la estrategia DCS

Los centros de acopio y biorrefinerías se abren con una capacidad inicial, que se puede ampliar en todo el horizonte de planeación. Dado que los ingresos y costos asociados a estas instalaciones dependen de una estrategia de configuración dinámica (DCS), es necesario dividirlos en dos partes:

1) los valores asociados a la capacidad inicial y 2) el aumento de este valor cuando se expande la capacidad.

Los ingresos que se consideran para el cálculo del valor presente neto consisten en las ventas de biocombustible que continúan sin ninguna modificación, además del valor de salvamento asociado al cierre de los centros de acopio y biorrefinerías. En las ecuaciones (2.41) y (2.42), se observa una primera expresión que hace referencia al valor de salvamento de la instalación de acuerdo con su capacidad y periodo de apertura inicial. El segundo término relaciona el momento y nivel de la expansión de la capacidad si esta hubiese tenido lugar. El Anexo G, presenta un resumen de las variables de decisión y parámetros de entrada del modelo matemático siguiendo la estrategia *DCS*.

$$\begin{aligned}
 \text{Valor de salvamento} \\
 \text{centros de acopio}_t &= \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < t}} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} revAC_{jb}^{t_0 t} AC_{jb}^{t_0 t} \\
 &+ \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < t}} \sum_{j \in J} \sum_{\substack{b \in B \\ ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{ub \in UB} revUAC_{jb ub}^{t_0 t} UAC_{jb ub}^{t_0 t} \quad \forall t \in T \quad (2.41)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Valor de salvamento} \\
 \text{biorrefinerías}_t &= \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < t}} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} revPC_{kc}^{t_0 t} PC_{kc}^{t_0 t} \\
 &+ \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < t}} \sum_{k \in K} \sum_{\substack{c \in C \\ uc \in UC \\ /c < uc}} \sum_{uc \in UC} revUPC_{kc uc}^{t_0 t} UPC_{kc uc}^{t_0 t} \quad \forall t \in T \quad (2.42)
 \end{aligned}$$

En el caso de los costos, los relacionados con la compra de materia prima y transporte permanecen sin cambios. En contraste, los costos de apertura como se visualiza en las ecuaciones (2.43) y (2.44) responden a un índice t , que permite determinarlos en cada periodo de tiempo. Por otra parte, se incluyen los costos en los que incurren las instalaciones si deciden ampliar la capacidad del nivel b al nivel ub en el caso de los centros de acopio, o del nivel c al nivel uc en el de las biorrefinerías (Ecuaciones (2.45) y (2.46)). Adicionalmente, se incorporan los costos de cierre que están asociados al valor de la instalación de acuerdo con la depreciación estimada.

$$\text{Costo de apertura} \\
 \text{centros de acopio}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} cosA_{jbt} A_{jbt} \quad \forall t \in T \quad (2.43)$$

$$\text{Costo de apertura} \\
 \text{biorrefinerías}_t = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} cosP_{kct} P_{kct} \quad \forall t \in T \quad (2.44)$$

$$\text{Costo de expansión centros de acopio}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \text{cos}UA_{jb}^{ub}{}^t UA_{jb}^{ub}{}^t \quad \forall t \in T \quad (2.45)$$

$$\text{Costo de expansión biorrefinerías}_t = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{cos}UP_{kc}^{uc}{}^t UP_{kc}^{uc}{}^t \quad \forall t \in T \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de cierre centros de acopio}_t &= \sum_{t_0 \in T} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \text{cos}AC_{jb}^{t_0 t} AC_{jb}^{t_0 t} \\ &+ \sum_{t_0 \in T} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \text{cos}UAC_{jb ub}^{t_0 t} UAC_{jb ub}^{t_0 t} \quad \forall t \in T \quad (2.47) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de cierre biorrefinerías}_t &= \sum_{t_0 \in T} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \text{cos}PC_{kc}^{t_0 t} PC_{kc}^{t_0 t} \\ &+ \sum_{t_0 \in T} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{cos}UPC_{kc uc}^{t_0 t} UPC_{kc uc}^{t_0 t} \quad \forall t \in T \quad (2.48) \end{aligned}$$

Con relación a los costos fijos de las instalaciones, las ecuaciones (2.49) y (2.50), utilizan las variables auxiliares de operación, que le indican al modelo matemático, en qué periodos de tiempo están operando las instalaciones y con qué capacidades. Así mismo, se adiciona el costo fijo relacionado con la expansión de capacidad.

$$\begin{aligned} \text{Costo fijo centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \text{cos}fA_{jbt} AO_{jbt} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \text{cos}fUA_{jb}^{ub}{}^t UA_{jb}^{ub}{}^t \quad \forall t \in T \quad (2.49) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo fijo biorrefinerías}_t &= \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \text{cos}fP_{kct} PO_{kct} \\ &+ \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{cos}fUP_{kc}^{uc}{}^t UPO_{kc}^{uc}{}^t \quad \forall t \in T \quad (2.50) \end{aligned}$$

Por otro lado, los costos variables (Ecuaciones (2.51) y (2.52)) y de inventario en los centros de acopio (Ecuación (2.53)) presentan un comportamiento particular. Al agregar la expresión relacionada con el incremento de capacidad, se genera una no-linealidad. Puesto que, a la variable de flujo correspondiente, es necesario multiplicarla por la variable binaria que indica si la instalación está operando o no con expansión de capacidad.

$$\begin{aligned}
 \text{Costo variable} & \\
 \text{centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosv}A_{wjb} SA_{wijbt} \\
 &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosv}UA_{wjb}^{ub} SA_{wijbt} UAO_{jb}^{ub} \\
 &\forall t \in T \quad (2.51)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Costo variable} & \\
 \text{biorrefinerías}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{cosv}P_{kct} AP_{wjbkct} \\
 &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \sum_{w \in W} \text{cosv}UP_{kc}^{uc} AP_{wjbkct} UPO_{kc}^{uc} \\
 &\forall t \in T \quad (2.52)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Costo de inventario} & \\
 \text{centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cossto}A_{wjb} IA_{wjb} \\
 &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{cossto}UA_{wjb}^{ub} IA_{wjb} UAO_{jb}^{ub} \\
 &\forall t \in T \quad (2.53)
 \end{aligned}$$

▪ **Función objetivo ambiental siguiendo la estrategia DCS**

Con relación a la función objetivo ambiental, los impactos generados por los proveedores y el transporte permanecen sin cambios. Sin embargo, la contaminación de aire y agua que generan los centros de acopio y biorrefinerías al estar asociados a la dinámica de cambio de capacidades, requieren la adición de los impactos que se generarían si la instalación decidiera ampliar su capacidad. Al igual que los costos variables y de inventario, las nuevas ecuaciones presentan un comportamiento no lineal (Ecuaciones (2.54) - (2.57)).

$$\begin{aligned}
 \text{Contaminación de agua} & \\
 \text{en centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosSST}_t SSTA_{wb} SA_{wijbt} \\
 &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosSST}_t SSTUA_{wjb}^{ub} SA_{wijbt} UAO_{jb}^{ub} \\
 &\forall t \in T \quad (2.54)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Contaminación de aire} & \\
 \text{en centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosCO2}_t CO2A_{wb} SA_{wijbt} \\
 &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosCO2}_t CO2UA_{wjb}^{ub} SA_{wijbt} UAO_{jb}^{ub} \\
 &\forall t \in T \quad (2.55)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Contaminación de agua} & \\
 \text{en biorrefinerías}_t &= \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cosSST}_t SSTP_c AP_{wjbkct}
 \end{aligned}$$

$$+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \sum_{w \in W} \cos SST_t SST UP_c^{uc} AP_{wjbkct} UPO_{kc}^{uc t} \quad \forall t \in T \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de aire} \\ \text{en biorrefinerías}_t &= \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \cos CO2_t CO2 P_c AP_{wjbkct} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \sum_{w \in W} \cos CO2_t CO2 UP_c^{uc} AP_{wjbkct} UPO_{kc}^{uc t} \quad \forall t \in T \quad (2.57) \end{aligned}$$

▪ Función objetivo social siguiendo la estrategia DCS

Finalmente, la función objetivo social requiere modificaciones en los aportes al índice de empleo asociados a las instalaciones, de acuerdo con los cambios de capacidad que se generen en el horizonte de planificación. Es así, como se observa en las ecuaciones (2.58) y (2.59) los impactos sociales de los centros de acopio y biorrefinerías respectivamente utilizando las variables de operación. En el caso de los impactos de proveedores y seguridad alimentaria permanecen sin ningún cambio.

$$\begin{aligned} \text{Aporte al índice de empleo} \\ \text{en centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} UEA_{jt} EA_b AO_{jbt} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UEA_{jt} EUA_b^{ub} UAO_{jb}^{ub t} \quad \forall t \in T \quad (2.58) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aporte al índice de empleo} \\ \text{en biorrefinerías}_t &= \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} UEP_{kt} EP_c PO_{kct} \\ &+ \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UEP_{kt} EUP_c^{uc} UPO_{kc}^{uc t} \quad \forall t \in T \quad (2.59) \end{aligned}$$

2.2.3 Restricciones para la estrategia DCS

▪ Restricciones de instalaciones para la estrategia DCS

Bajo una DCS, los centros de acopio y biorrefinerías pueden abrirse con diferentes niveles de capacidad, en diversas regiones, en cualquier período de tiempo. Además, estas instalaciones pueden ser suministradas por varios proveedores. Para hacer esto posible, las expresiones (2.60) y (2.61) establecen que solo se pueda abrir un centro de acopio y / o una biorrefinería por ubicación y con un

nivel de capacidad. Dado que no se pueden realizar operaciones en instalaciones inexistentes, las restricciones (2.62) y (2.63) determinan, de acuerdo con las variables de apertura y cierre si la instalación está activa. Por otro lado, las ecuaciones (2.64) y (2.65) establecen que las decisiones de expansión solo se pueden tomar en las instalaciones existentes. Adicionalmente, se permite expandir el nivel de capacidad una sola vez durante el periodo de planificación (Ecuaciones (2.66) – (2.67)). Las expresiones (2.68) y (2.69) permiten que, en aquellas instalaciones en las que se ha tomado una decisión de ampliación, se opere según el nuevo nivel de capacidad.

$$\sum_{t \in T} \sum_{b \in B} A_{jbt} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (2.60)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{c \in C} P_{kct} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2.61)$$

$$AO_{jbt} = \sum_{r \in T/r \leq t} A_{jbr} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} AC_{jb}^{t_0 r} \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.62)$$

$$PO_{kct} = \sum_{r \in T/r \leq t} P_{kcr} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} PC_{kc}^{t_0 r} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (2.63)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UA_{jb}^{ub t} \leq \sum_{r \in T/r < t} A_{jbr} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r < t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} AC_{jb}^{t_0 r} \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.64)$$

$$\sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UP_{kc}^{uc t} \leq \sum_{r \in T/r < t} P_{kcr} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r < t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} PC_{kc}^{t_0 r} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (2.65)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UA_b^{ub t} \leq 1 \quad \forall b \in B; \forall j \in J \quad (2.66)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UP_{kc}^{uc t} \leq 1 \quad \forall c \in C; \forall k \in K \quad (2.67)$$

$$UAO_{jb}^{ub t} = \sum_{r \in T/r \leq t} UA_{jb}^{ub r} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} UAC_{jb ub}^{t_0 r} \quad \forall ub \in UB /b < ub; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.68)$$

$$UPO_{kc}^{uc t} = \sum_{r \in T/r \leq t} UP_{kc}^{uc r} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} UPC_{kc uc}^{t_0 r} \quad \forall uc \in UC /c < uc; \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (2.69)$$

El tiempo transcurrido entre la apertura y el cierre de una instalación se calcula utilizando las restricciones (2.70) y (2.71), para centros de acopio y biorrefinerías respectivamente; el resultado se utiliza además para obtener el valor de depreciación de la instalación. Asimismo, las expresiones

(2.72) y (2.73) determinan el tiempo transcurrido entre la expansión de capacidad y el cierre; este resultado también se utiliza para establecer la depreciación de activos para este período de tiempo. Por otra parte, las ecuaciones desde la (2.74) hasta la (2.77) garantizan que, si alguna instalación se cierra después de una expansión de capacidad, esta expansión cesa en el horizonte de planificación restante.

$$A_{jbt_0} \geq \sum_{t \in T/t_0 < t} AC_{jb}^{t_0 t} \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t_0 \in T \quad (2.70)$$

$$P_{kct_0} \geq \sum_{t \in T/t_0 < t} PC_{kc}^{t_0 t} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t_0 \in T \quad (2.71)$$

$$UA_{jb}^{ub t_0} \geq \sum_{t \in T/t_0 < t} UAC_{jb ub}^{t_0 t} \quad \forall ub \in UB; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t_0 \in T \quad (2.72)$$

$$UP_{kc}^{uc t_0} \geq \sum_{t \in T/t_0 < t} UPC_{kc uc}^{t_0 t} \quad \forall uc \in UC; \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t_0 \in T \quad (2.73)$$

$$AC_{jb}^{t_0 t} + \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UA_{jb}^{ub r} \geq 2 \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAC_{jb ub}^{t_0 t} \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t_0 \in T / t_0 < t, \forall t \in T \quad (2.74)$$

$$AC_{jb}^{t_0 t} + \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UA_{jb}^{ub r} \leq \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAC_{jb ub}^{t_0 t} + 1 \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t_0 \in T / t_0 < t, \forall t \in T \quad (2.75)$$

$$PC_{kc}^{t_0 t} + \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UP_{kc}^{uc r} \geq 2 \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UPC_{kc uc}^{t_0 t} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t_0 \in T / t_0 < t, \forall t \in T \quad (2.76)$$

$$PC_{kc}^{t_0 t} + \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UP_{kc}^{uc r} \leq \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UPC_{kc uc}^{t_0 t} + 1 \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t_0 \in T / t_0 < t, \forall t \in T \quad (2.77)$$

Las restricciones que relacionan la capacidad de las instalaciones se actualizan agregando un segundo término que considera la capacidad adicional del nivel de expansión, si se ha tomado esta decisión (Ecuaciones (2.78) – (2.80)). En contraste, las restricciones de inventario y flujo de materiales se mantienen sin ninguna modificación. Finalmente, las expresiones (2.81) y (2.82) relacionan la naturaleza de las variables.

$$\sum_{i \in I} SA_{wijbt} \leq capA_{wb} AO_{jbt} + \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} capUA_{wb}^{ub} UAO_{jb}^{ub t} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.78)$$

$$IA_{wjb t} \leq capstoA_{wb} AO_{jbt+1} + \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} capstoUA_{wb}^{ub} UAO_{jb}^{ub t+1} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.79)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkct} \leq capP_c PO_{kct} + \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} capUP_c^{uc} UPO_{kc}^{uc t} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (2.80)$$

$$A_{jbt}, P_{kct}, UA_{jb}^{ub t}, UP_{kc}^{uc t}, AC_{jb}^{t_0 t}, PC_{kc}^{t_0 t}, UAC_{jb ub}^{t_0 t}, UPC_{kc uc}^{t_0 t}, AO_{jbt}, PO_{kct}, UAO_{jb}^{ub t}, UPO_{kc}^{uc t}, SO_{iwt} \in (0,1) \quad (2.81)$$

$$IA_{wjb t}, NS_{iwt}, SA_{wijbt}, AP_{wjbkct}, PB_{kmt} \geq 0 \quad (2.82)$$

2.2.4 Linealización

Como se mencionó en las Sección 2.2.2, la expansión de capacidad de las instalaciones conduce a ecuaciones no lineales ((2.51) – (2.57)) en el modelo de optimización. Por ejemplo, la expansión de capacidad de las biorrefinerías ($c \rightarrow uc$), aumenta el costo variable de la producción de biocombustible. Por tanto, se necesita cuantificar la contribución de este nuevo costo variable al costo total de operación de la cadena de suministro ($cosvUP_{kc}^{uc t} AP_{wjbkct} UPO_{kc}^{uc t}$). Para tal fin, se plantea la variable auxiliar $AUP_{kc}^{uc ts}$ que contiene la cantidad de residuos en AP_{wjbkct} en los periodos de tiempo que la instalación opera con expansión de capacidad ($UPO_{kc}^{uc t} = 1$). Así, habrá una cuantificación del costo variable ($cosvUA_{wjb}^{ub t} * AUP_{kc}^{uc ts}$) como resultado de la expansión de capacidad.

Proposición 1. La restricción mixta polinómica no lineal ($AUP = AP * UPO$) se puede transformar en desigualdades lineales (Ecuaciones (2.83) – (2.85)), sin establecer límites superior e inferior para la variable continua AP .

$$(AUP \leq AP) \quad (2.83)$$

$$(AUP \leq UPO * M) \quad (2.84)$$

$$(AUP + (1 - UPO) * M \geq AP) \quad (2.85)$$

Prueba. Se considera que cuando no hay expansión de capacidad ($UPO = 0$), la desigualdad lineal ($AUP \leq UPO * M$) garantiza que ($AUP = 0$). Por tanto, el costo variable permanece sin cambios, solo el nivel de inventario de residuos AP se usa para calcular la expresión (2.52), y se cumple la desigualdad ($AUP \leq AP$). Si, por el contrario, se produce la expansión de la capacidad de la

biorrefinería ($UPO = 1$), entonces la variable auxiliar AUP sería igual a AP (nivel de residuos actual) gracias a la desigualdad complementaria ($AUP + (1 - UPO) * M \geq AP$). Cuando se amplía la capacidad de la biorrefinería, el valor AUP se utiliza para calcular el incremento total del costo variable en la expresión (2.52).

Utilizando la lógica de la Proposición 1, se introduce el cálculo de las tres variables auxiliares que se presentan en la Tabla 2-9, vinculadas a la estrategia de linealización propuesta en esta tesis doctoral. Las restricciones (2.86) a (2.88) determinan la variable del flujo de biomasa que llega a las biorrefinerías (AUP). A su vez, las expresiones (2.92) – (2.94) permiten estimar la cantidad de residuos que llega a los centros de acopio (SUA) y su nivel de inventario (IUA) se calcula utilizando las ecuaciones (2.89) – (2.91).

Tabla 2-8: Variables auxiliares para linealización de la formulación original de la estrategia DCS

Término	Descripción	Unidad
$IUA_{wjb}^{ub t}$	Variable auxiliar (linealización) - Nivel de inventario del residuo w en el periodo de tiempo t , en el centro de acopio j que expandió su capacidad (del nivel b al nivel ub)	ton/t
$SUA_{wjb}^{ub t}$	Variable auxiliar (linealización) – Cantidad total del residuo w enviado en el periodo de tiempo t al centro de acopio j que expandió su capacidad (del nivel b al nivel ub)	ton/t
$AUP_{kc}^{uc t}$	Variable auxiliar (linealización) – Cantidad total de residuos enviados en el periodo de tiempo t a la biorrefinería k que expandió su capacidad (del nivel c al nivel uc)	ton/t

Fuente: Elaboración propia

$$\sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} AUP_{kc}^{uc t} \leq \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkct} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (2.86)$$

$$AUP_{kc}^{uc t} \leq UPO_{kc}^{uc t} MM \quad \forall uc \in UC / c < uc; \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (2.87)$$

$$\sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} AUP_{kc}^{uc t} + \left(1 - \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UPO_{kc}^{uc t}\right) MM \geq \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkct} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (2.88)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} IUA_{wjb}^{ub t} \leq IA_{wjb} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.89)$$

$$IUA_{wjb}^{ub t} \leq UAO_{jb}^{ub t} MM \quad \forall w \in W; \forall ub \in UB / b < ub; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.90)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} IUA_{wjb}^{ub,t} + \left(1 - \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAO_{jb}^{ub,t}\right) MM \geq IA_{wjb} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.91)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} SUA_{wjb}^{ub,t} \leq \sum_{i \in I} SA_{wijbt} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.92)$$

$$SUA_{wjb}^{ub,t} \leq UAO_{jb}^{ub,t} MM \quad \forall w \in W; \forall ub \in UB / b < ub; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.93)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} SUA_{wjb}^{ub,t} + \left(1 - \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAO_{jb}^{ub,t}\right) MM \geq \sum_{i \in I} SA_{wijbt} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.94)$$

Por otro lado, las ecuaciones (2.95) – (2.97) presentan las nuevas expresiones de los costos variables de centros de acopio y biorrefinerías, además del costo de inventario en centros de acopio. De igual manera, se plantean los impactos ambientales que tenían una formulación no lineal (ver en las ecuaciones (2.98) – (2.101)).

$$\begin{aligned} \text{Costo variable} \\ \text{centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosv}A_{wjb} SA_{wijbt} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{cosv}UA_{wjb}^{ub,t} SUA_{wjb}^{ub,t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.95)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo variable} \\ \text{biorrefinerías}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{cosv}P_{kct} AP_{wjbkct} \\ &+ \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{cosv}UP_{kc}^{uc,t} AUP_{kc}^{uc,t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.96)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de inventario} \\ \text{centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cossto}A_{wjb} IA_{wjb} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{cossto}UA_{wjb}^{ub,t} IUA_{wjb}^{ub,t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.97)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de agua} \\ \text{en centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosSST}_t SSTA_{wb} SA_{wijbt} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{cosSST}_t SSTUA_{wb}^{ub,t} SUA_{wjb}^{ub,t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.98)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de aire} \\ \text{en centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{cosCO}_2 CO2A_{wb} SA_{wijbt} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{cosCO}_2 CO2UA_{wb}^{ub,t} SUA_{wjb}^{ub,t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.99)$$

$$\begin{aligned}
\text{Contaminación de agua} \\ \text{en biorrefinerías}_t &= \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \cos S S T_t S S T P_c A P_{w j b k c t} \\ &+ \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{u c \in U C \\ /c < u c}} \cos S S T_t S S T U P_c^{u c} A U P_{k c}^{u c t} \quad \forall t \in T \quad (2.100)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Contaminación de aire} \\ \text{en biorrefinerías}_t &= \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \cos C O 2_t C O 2 P_c A P_{w j b k c t} \\ &+ \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{u c \in U C \\ /c < u c}} \cos C O 2_t C O 2 U P_c^{u c} A U P_{k c}^{u c t} \quad \forall t \in T \quad (2.101)
\end{aligned}$$

Finalmente, la expresión (2.99) relacionan la naturaleza de las nuevas variables.

$$I U A_{w j b}^{u b t}, S U A_{w j b}^{u b t}, A U P_{k c}^{u c t} \geq 0 \quad (2.102)$$

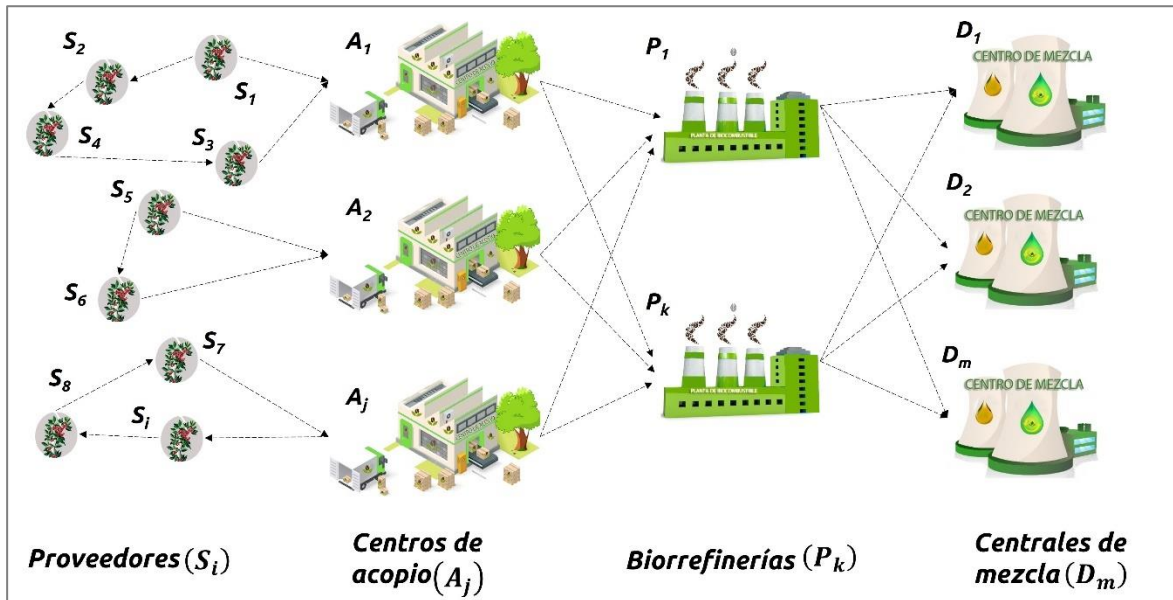
2.3 Decisiones de ruteo de vehículos

Los proveedores de biomasa son un conjunto de granjas geográficamente dispersas, en donde la cantidad de biomasa generada es inferior a la capacidad de los vehículos, esto implica que la recolección de los residuos no se realice por envíos directos, sino a través de vehículos que visitan a varios proveedores en una misma ruta (Figura 2-8). Por tanto, se incorporan las decisiones de ruteamiento de vehículos en el primer eslabón de la cadena de suministro. Decisiones que integradas con las de localización e inventario que ya se consideran en la formulación matemática propuesta, generan el enfoque del Problema Inventario-Localización-Ruteamiento (*ILRP: Inventory Location Routing Problem*). Para tal fin, el modelo matemático se modifica como se detalla a continuación.

2.3.1 Variables de decisión siguiendo la formulación *ILRP*

Con relación a las variables de decisión, la variable $S A_{w i j b t}$ (cantidad del residuo w enviado desde el proveedor i al centro de acopio j con capacidad b , en el periodo de tiempo t) se modifica por la variable $S A_{w j b t}$ (cantidad del residuo w recibido por el centro de acopio j con capacidad b , en el periodo de tiempo t). Adicionalmente, se plantean las cuatro nuevas variables que se presentan en la Tabla 2-10 relacionadas con el ruteo de vehículos. Como se puede observar estas consideran grupos de vehículos exclusivos, teniendo en cuenta las características de cada uno de los residuos. El Anexo H, resume las variables de decisión y parámetros de entrada del modelo matemático con el enfoque *ILRP*.

Figura 2-7: Configuración cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café considerando ruteo de vehículos para recolección de biomasa



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-9: Variables de flujo - ruteo de vehículos

Término	Descripción	Unidad
X_{whgvwt}	1 si el arco h, g (proveedores o centros de acopio) está en la ruta del vehículo v_w , en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binaria
Q_{whgvwt}	Cantidad del residuo w transportado a través del arco h, g (proveedores o centros de acopio) por el vehículo v_w , en el periodo de tiempo t	ton/t
Z_{wjivwt}	1 si el residuo w es suministrado por el proveedor i al centro de acopio j , utilizando el vehículo v_w , en el periodo de tiempo t . 0 en caso contrario	Binario
M_{wivwt}	Variable auxiliar no negativa utilizada para la eliminación de subtours, asociada al transporte del residuo w , en la ruta el vehículo v_w , en el periodo de tiempo t	--

En donde:

H Conjunto de proveedores y centros de acopio $I \cup J$

V_w Conjunto de vehículos utilizados para transportar el residuo w

$G \in H; L \in I; R \in T$

Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Función objetivo siguiendo la formulación *ILRP*

Las modificaciones en las funciones objetivo debido a la integración de las decisiones de ruteo de vehículos se presentan a continuación.

▪ Función objetivo económica siguiendo la formulación *ILRP*

Las decisiones de ruteamiento implican principalmente un cambio en el costo de transporte de la cadena de suministro, el cual considera además del valor de las rutas de recolección de residuos, un costo fijo por la utilización de estos vehículos (Ecuación (2.105)). Adicionalmente al modificarse la variable de flujo SA_{wijbt} , es necesario ajustar las ecuaciones con la nueva variable SA_{wjb} , en la cual se elimina el subíndice i , como es el caso del costo de materia prima (Ecuación (2.103)) y el costo variable de los centros de acopio (Ecuación (2.104)).

$$\text{Costo de materia prima}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} PBM_{tw} SA_{wjb} \quad \forall t \in T \quad (2.103)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo variable centros de acopio}_t &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{cosv} A_{wjb} SA_{wjb} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{cosv} UA_{wjb}^{ub,t} SUA_{wjb}^{ub,t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.104)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de transporte}_t &= \sum_{h \in H} \sum_{g \in H} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \text{cost} SA_{whgt} X_{whgv_w t} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \text{cost} SA_{wt} X_{wji v_w t} \\ &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{cost} AP_{wjkt} AP_{wjbkct} \\ &+ \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{cost} PB_{kmt} PB_{kmt} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.105)$$

▪ Función objetivo ambiental siguiendo la formulación *ILRP*

En el caso de los impactos ambientales, los ajustes surgen primero por el cambio de la variable de flujo SA_{wjb} , la cual solo afecta la contaminación de agua y aire generada por los centros de acopio (Ecuaciones (2.106) y (2.107)). En segunda instancia, se modifica el impacto generado por el transporte en el primer eslabón de la cadena, al cambiar transporte directo por el ruteo de vehículos, este impacto se determina de acuerdo con la carga que se transporta por cada arco $Q_{whgv_w t}$ (Ecuación (2.108)).

$$\begin{aligned}
 \text{Contaminación de agua} &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \cos S S T_t S S T A_{wb} S A_{wjb t} \\
 \text{en centros de acopio}_t &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \cos S S T_t S S T U A_{wb}^{ub} S U A_{wjb}^{ub t} \\
 &\forall t \in T \quad (2.106)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Contaminación de aire} &= \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \cos C O 2_t C O 2 A_{wb} S A_{wjb t} \\
 \text{en centros de acopio}_t &+ \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \cos C O 2_t C O 2 U A_{wb}^{ub} S U A_{wjb}^{ub t} \\
 &\forall t \in T \quad (2.107)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Contaminación de aire} &= \sum_{h \in H} \sum_{g \in H} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \cos C O 2_t C O 2 S A_{whg} Q_{whg v_w t} \\
 \text{en transporte}_t &+ \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \cos C O 2_t C O 2 A P_{wjk} A P_{wjbkct} \\
 &+ \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \cos C O 2_t C O 2 P B_{kmt} P B_{kmt} \quad \forall t \in T \quad (2.108)
 \end{aligned}$$

▪ **Función objetivo social siguiendo la formulación ILRP**

Los impactos sociales se incrementan (Ecuación (2.109)) al considerar el aporte al índice de empleo que genera el proceso de transporte, no solo en la recolección de los residuos, sino en toda la cadena de suministro (Ecuación (2.110)).

$$\begin{aligned}
 \text{Max } F3 &= \sum_{t \in T} \text{Contribución a la seguridad alimentaria}_t \\
 &+ \text{Aporte al índice de empleo en proveedores}_t \\
 &+ \text{Aporte al índice de empleo en centros de acopio}_t \\
 &+ \text{Aporte al índice de empleo en biorrefinerías}_t \\
 &+ \text{Aporte al índice de empleo en transporte}_t \quad (2.109)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Aporte al índice de empleo} &= \sum_{v_w \in V_w} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{w \in W} E T S A_w U E A_{jt} X_{w j i v_w t} \\
 \text{en transporte}_t &+ \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} E T A P_w U E P_{kt} \frac{A P_{wjbkct}}{cap V A P_w} \\
 &+ \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} E T P B * U E B_{mt} \frac{P B_{kmt}}{cap V P B} \quad \forall t \in T \quad (2.110)
 \end{aligned}$$

2.3.3 Restricciones siguiendo la formulación *ILRP*

Las restricciones de instalaciones e inventario solo conllevan modificaciones por el cambio de la variable de flujo $SA_{wjb t}$, como es el caso de la capacidad de procesamiento de los centros de acopio y el cálculo de su inventario (Ecuación (2.011) y (2.112)).

$$SA_{wjb t} \leq capA_{wb} AO_{jbt} + \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} capUA_{wb}^{ub} UAO_{jb}^{ub t} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.111)$$

$$IA_{wjb t} = \sum_{r \in T / r \leq t} SA_{wjb r} - \sum_{r \in T / r \leq t} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} AP_{wjbkcr} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.112)$$

Por el contrario, las restricciones de flujo de materiales tienen no solo modificaciones por el cambio de variable, sino también la adición de nuevas restricciones relacionadas con el ruteamiento de vehículos. Las expresiones (2.113) y (2.114) reemplazan a las ecuaciones (2.34) y (2.35) respectivamente, las cuales, aunque sufren cambios en las variables mencionadas, siguen determinando los valores SO_{iwt} y NS_{iwt} para estimar impactos ambientales y sociales. Adicionalmente, la expresión (2.115) reemplaza a la restricción (2.36), que relaciona la capacidad de suministro de los proveedores de biomasa.

$$\sum_{v_w \in V_w} \sum_{j \in J} Z_{wjiv_w t} = SO_{iwt} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall t \in T \quad (2.113)$$

$$NS_{iwt} = S_{iwt} - \sum_{v_w \in V_w} \sum_{j \in J} S_{iwt} Z_{wjiv_w t} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall t \in T \quad (2.114)$$

$$\sum_{v_w \in V_w} \sum_{i \in I} S_{iwt} Z_{wjiv_w t} = \sum_{b \in B} SA_{wjb t} \quad \forall w \in W; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.115)$$

Con relación a las restricciones de ruteo, la Ecuación (2.113) garantiza que cada vehículo realice máximo una ruta en cada periodo de tiempo. Por su parte, la expresión (2.117) relaciona la capacidad de los vehículos para cada tipo de residuo. La Ecuación (2.118) asegura que los proveedores sean visitados por máximo un vehículo para cada residuo por periodo de tiempo. La continuidad de flujo se establece en la Ecuación (2.119) y la asignación de proveedores a centros de acopio solo si existe una ruta que los conecte se garantiza en las expresiones (2.120) y (2.121). Los subtours se eliminan implementando la restricción (2.122). Finalmente, la cantidad de residuos transportados a través de cada arco está controlada por las expresiones desde la (2.123) a la (2.125).

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} X_{wjiv_{wt}} \leq 1 \quad \forall w \in W; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T \quad (2.116)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} S_{iwt} X_{whiv_{wt}} \leq CapVSA_w \quad \forall w \in W; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T \quad (2.117)$$

$$\sum_{v_w \in V_w} \sum_{h \in H} X_{whiv_{wt}} \leq 1 \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall t \in T \quad (2.118)$$

$$\sum_{g \in H} X_{whgv_{wt}} - \sum_{g \in H} X_{wghv_{wt}} = 0 \quad \forall w \in W; \forall h \in H; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T \quad (2.119)$$

$$\sum_{h \in H} X_{wjhv_{wt}} + \sum_{h \in H} X_{wihv_{wt}} \geq 2 Z_{wjiv_{wt}} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall j \in J; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T \quad (2.120)$$

$$\sum_{h \in H} X_{wjhv_{wt}} + \sum_{h \in H} X_{wihv_{wt}} \leq Z_{wjiv_{wt}} + 1 \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall j \in J; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T \quad (2.121)$$

$$M_{wiv_{wt}} - M_{w\ell v_{wt}} + I / X_{wi\ell v_{wt}} \leq I / -1 \quad \forall w \in W; \forall v_w \in V_w; \forall i, \ell \in I; \forall t \in T \quad (2.122)$$

$$\sum_{h \in H} Q_{wihv_{wt}} - \sum_{h \in H} Q_{whiv_{wt}} = \sum_{h \in H} X_{wihv_{wt}} S_{iwt} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T \quad (2.123)$$

$$Q_{whgv_{wt}} \leq X_{whgv_{wt}} MM \quad \forall w \in W; \forall h, g \in H; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T \quad (2.124)$$

$$Q_{wjiv_{wt}} = 0 \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall j \in J; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T \quad (2.125)$$

En cuanto a las restricciones auxiliares de linealización del modelo matemático, se ajustan las relacionadas al flujo de residuos de los centros de acopio debido al cambio de variable, como se muestra en las ecuaciones (2.126) y (2.127).

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} SUA_{wjb}^{ub,t} \leq SA_{wjb} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.126)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} SUA_{wjb}^{ub,t} + \left(1 - \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAO_{jb}^{ub,t} \right) MM \geq SA_{wjb} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (2.127)$$

Finalmente, la naturaleza de las nuevas variables se precisa en las ecuaciones (2.128) y (2.129)

$$X_{whgv_{wt}}, Z_{wjiv_{wt}} \in (0,1) \quad (2.128)$$

$$SA_{wjbt}, Q_{whgvwt}, M_{wivwt} \geq 0 \quad (2.129)$$

2.4 Incertidumbre del suministro

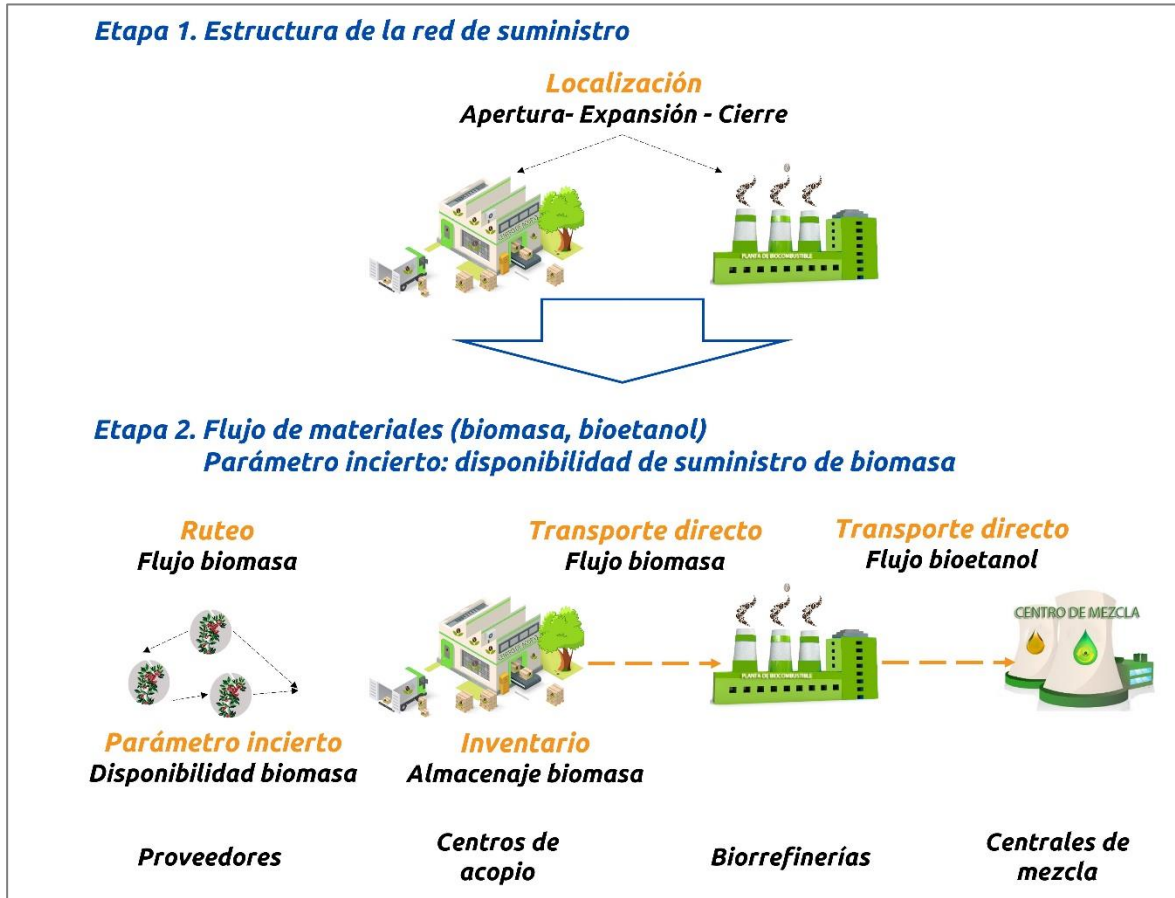
Como se mencionó en la Sección 1.1.3, la cadena de abastecimiento de biocombustible a partir de residuos de café combina características de la cadena de suministro inversa y agrícola. Lo que genera incertidumbre en la disponibilidad de biomasa, debido a que los cultivos se ven afectados por factores externos como la estacionalidad, variabilidad climática, plagas y perecibilidad. Estos factores afectan fuertemente el *SCND*, dado que se pueden generar soluciones de diseño subóptimas o incluso inviables sino se presta atención a la naturaleza incierta del problema (Rabbani et al., 2019).

Teniendo en cuenta los efectos de la incertidumbre en las decisiones de planificación, la capacidad de generación de residuos de las fincas se asume como un parámetro incierto. Para abordar esta nueva característica, el problema se plantea utilizando la programación estocástica de dos etapas (*A two-stage stochastic programming*). En la primera etapa se define la estructura de la red de suministro considerando la apertura, expansión y cierre de las instalaciones (centros de acopio y biorrefinerías). En la segunda etapa se optimizan las variables relacionadas con el flujo de materiales (biomasa y biocombustible) (Figura 2-9). Lo anterior incluye: determinar los niveles de inventario en los centros de acopio, optimizar el problema de enrutamiento de vehículos asociado a la recolección de residuos agrícolas y abordar el problema de transporte de material hasta que el biocombustible llegue a las instalaciones de mezcla. En este sentido, el modelo propone la integración de las decisiones *DCS-ILRP* bajo un enfoque sostenible y estocástico. A continuación, se detallan los ajustes requeridos en las variables de decisión, funciones objetivo y restricciones del modelo matemático.

2.4.1 Variables de decisión enfoque estocástico

Las modificaciones requeridas en las variables de decisión están asociadas al flujo y almacenaje del de la biomasa y/o biocombustible a lo largo de la red de suministro. Teniendo en cuenta la adición del subíndice *s* el cual hace referencia a los escenarios estocásticos considerados (Tabla 2-10).

Figura 2-8: Etapas modelo estocástico



Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Funciones objetivo enfoque estocástico

Al tratarse de un problema de programación estocástica, las funciones objetivo representan los valores esperados del valor presente neto y de los impactos ambientales y sociales (Ecuaciones (2.130) – (2.132)).

$$\text{Max } F1 = \text{Valor esperado (Valor presente neto)} \tag{2.130}$$

$$\text{Min } F2 = \text{Valor esperado (Impactos ambientales negativos)} \tag{2.131}$$

$$\text{Max } F3 = \text{Valor esperado (Impactos sociales positivos)} \tag{2.132}$$

Tabla 2-10: Variables de decisión con componente estocástico

Término	Descripción	Unidad
<i>Inventario</i>		
IA_{wjbts}	Nivel de inventario del residuo w en el centro de acopio j con capacidad b , en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s	ton/t
<i>Flujo</i>		
SO_{iwts}	1 si el residuo w es utilizado como materia prima para la producción de bioetanol por el proveedor i en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s . 0 en caso contrario	Binaria
NS_{iwts}	Cantidad del residuo w que no es usado por proveedor i como materia prima para la producción de bioetanol, en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s	ton/t
SA_{wjbts}	Cantidad del residuo w recibido por el centro de acopio j con capacidad b , en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s	ton/t
$AP_{wjbkcts}$	Cantidad del residuo w enviado desde el centro de acopio j con capacidad b a la biorrefinería k con capacidad c , en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s	ton/t
PB_{kmts}	Cantidad de bioetanol enviado desde la biorrefinería k a la central de mezcal m , en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s	l/t
X_{whgv_wts}	1 si el arco h, g (proveedores o centros de acopio) está en la ruta del vehículo v_w , en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s . 0 en caso contrario	Binaria
Q_{whgv_wts}	Cantidad del residuo w transportado a través del arco h, g (proveedores o centros de acopio) por el vehículo v_w , en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s	ton/t
Z_{wjiv_wts}	1 si el residuo w es suministrado por el proveedor i al centro de acopio j , utilizando el vehículo v_w , en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s . 0 en caso contrario	Binario
M_{wiv_wts}	Variable auxiliar no negativa utilizada para la eliminación de subtours, asociada al transporte del residuo w , en la ruta el vehículo v_w , en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s	--
<i>Linealización</i>		
$IUA_{wjb}^{ub\ ts}$	Variable auxiliar (linealización) - Nivel de inventario del residuo w en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s , en el centro de acopio j que expandió su capacidad (del nivel b al nivel ub)	ton/t
$SUA_{wjb}^{ub\ ts}$	Variable auxiliar (linealización) - Cantidad total del residuo w enviado en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s al centro de acopio j que expandió su capacidad (del nivel b al nivel ub)	ton/t
$AUP_{kc}^{uc\ ts}$	Variable auxiliar (linealización) - Cantidad total de residuos enviados en el periodo de tiempo t , bajo el escenario s , a la biorrefinería k que expandió su capacidad (del nivel c al nivel uc)	ton/t
En donde;		
S	Conjunto de escenarios estocásticos	

Fuente: Elaboración propia

Los componentes de las funciones objetivo que sufren modificaciones son los que incluyen las variables de decisión presentadas en la Tabla 2-11. En el caso del pilar económico son los valores esperados de: los ingresos por ventas, el costo de materia prima, los costos variables de las instalaciones, el costo de inventario en los centros de acopio y el costo de transporte (Ecuaciones desde la (2.133) a la (2.138)).

$$\begin{aligned} \text{Ingreso por ventas} \\ \text{esperado}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{Prob}_s(PBE_t PB_{kmts}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.133)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de materia} \\ \text{prima esperado}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(PBM_{tw} SA_{wjbts}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.134)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo variable esperado} \\ \text{de centros de acopio}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosv}A_{wjbts} SA_{wjbts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosv}UA_{wjb}^{ubt} SA_{wjb}^{ubts}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.135)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo variable esperado} \\ \text{de biorrefinerías}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosv}P_{kct} AP_{wjbkcts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{Prob}_s(\text{cosv}UP_{kc}^{uct} AUP_{kc}^{ucts}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.136)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de inventario} \\ \text{esperado en} \\ \text{centros de acopio}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cossto}A_{wjbts} IA_{wjbts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cossto}UA_{wjb}^{ubt} IUA_{wjb}^{ubts}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.137)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de transporte} \\ \text{esperado}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{g \in H} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cost}SA_{whgt} X_{whgv_wts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cost}SA_{wt} X_{wjiv_wts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cost}AP_{wjkt} AP_{wjbkcts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{Prob}_s(\text{cost}PB_{kmt} PB_{kmts}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.138)$$

Con relación a la dimensión ambiental se obtienen los valores esperados de la contaminación en aire y agua en proveedores e instalaciones y aire por generación de CO₂ en transporte (Ecuaciones desde la (2.139) a la (2.145)). Por otra parte, el pilar social de la sostenibilidad solo presenta cambios en

la contribución esperada a la seguridad alimentaria, y en el aporte esperado al índice de empleo en proveedores y transporte (Ecuaciones desde la (2.146) hasta la (2.148)). Este último índice no se ve afectado en los centros de acopio y biorrefinerías pues estos dependen del tamaño de la instalación y no del flujo del material.

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de agua} \\ \text{esperada en} \\ \text{proveedores}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTS}_w \text{NS}_{iwt_s}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.139)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de aire} \\ \text{esperada en} \\ \text{proveedores}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2S}_w \text{NS}_{iwt_s}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.140)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de agua} \\ \text{esperada en} \\ \text{centros de acopio}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTA}_{wb} \text{SA}_{wjbts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in \substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTUA}_{wb}^{ub} \text{SUA}_{wjb}^{ubts}) \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (2.141)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de aire} \\ \text{esperada en} \\ \text{centros de acopio}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2A}_{wb} \text{SA}_{wjbts}) + \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in \substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2UA}_{wb}^{ub} \text{SUA}_{wjb}^{ubts}) \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (2.142)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de agua} \\ \text{esperada en} \\ \text{biorrefinerías}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTP}_c \text{AP}_{wjbkcts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in \substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTUP}_c^{uc} \text{AUP}_{kc}^{uc ts}) \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (2.143)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de aire} \\ \text{esperada en} \\ \text{biorrefinerías}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2P}_c \text{AP}_{wjbkcts}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in \substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2UP}_c^{uc} \text{AUP}_{kc}^{uc ts}) \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (2.144)$$

$$\begin{aligned} \text{Contaminación de aire} \\ \text{esperada en} \\ \text{transporte}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{g \in G} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2SA}_{whg} \text{Q}_{whgv_wts}) + \\ &\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2AP}_{wjk} \text{AP}_{wjbkcts}) + \\ &\sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2PB}_{km} \text{PB}_{kmts}) \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (2.145)$$

$$\begin{aligned} \text{Contribución esperada} \\ \text{a la seguridad} \\ \text{alimentaria}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \text{Prob}_s \left(\frac{PB_{kmts}}{BIO} \right) \quad \forall t \in T \quad (2.146) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aporte esperado} \\ \text{al índice de empleo} \\ \text{en proveedores}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s (UES_{it} ES_w SO_{iwt}) \quad \forall t \in T \quad (2.147) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aporte esperado} \\ \text{al índice de empleo} \\ \text{en transporte}_t &= \sum_{s \in S} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s (ETSA_w UE_{jt} X_{wji v_w t}) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s \left(ETAP_w UEP_{kt} \frac{AP_{wjbkcts}}{capVAP_w} \right) \\ &+ \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{Prob}_s \left(ETPB * UEB_{mt} \frac{PB_{kmts}}{capVPB} \right) \quad \forall t \in T \quad (2.148) \end{aligned}$$

2.4.3 Restricciones enfoque estocástico

Las restricciones relacionadas con la apertura, expansión y cierre de las instalaciones se mantienen con la misma estructura. En contraste, las expresiones desde la (2.149) hasta la (2.151) presentan las capacidades de procesamiento y almacenamiento de los centros de acopio y/o biorrefinerías con relación a los flujos de biomasa y bioetanol de acuerdo con los escenarios planteados para el nivel de suministro estocástico.

$$\begin{aligned} SA_{wjbts} \leq capA_{wb} AO_{jbt} + \sum_{\substack{ub \in \bar{U}B \\ /b < ub}} capUA_{wb}^{ub} UAO_{jb}^{ub t} \\ \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (2.149) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} IA_{wjbts} \leq capstoA_{wb} AO_{jbt+1} + \sum_{\substack{ub \in \bar{U}B \\ /b < ub}} capstoUA_{wb}^{ub} UAO_{jb}^{ub t+1} \\ \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (2.150) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkcts} \leq capP_c PO_{kct} + \sum_{\substack{uc \in \bar{U}C \\ /c < uc}} capUP_c^{uc} UPO_{kc}^{uc t} \\ \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (2.151) \end{aligned}$$

Las restricciones de flujo de materiales e inventario se ajustan agregando el subíndice s el cual hace referencia a los escenarios estocásticos considerados. El anexo I presenta la formulación completa del modelo matemático para el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, integrando decisiones de instalaciones, ruteo e inventario, bajo un enfoque sostenible y estocástico.

Adicionalmente, en el Capítulo 4 se presentan y discuten los resultados computacionales del modelo matemático utilizado en 15 conjuntos de datos de prueba y un caso de estudio en la región cafetera de Colombia.

2.5 Conclusiones parciales

Integrar las operaciones de abastecimiento, producción y entrega de una cadena de suministro desde un enfoque sostenible, implica un desafío matemático complejo, que genera varias oportunidades de investigación. Para abordar el vacío de conocimiento identificado en la revisión sistemática de la literatura, se presenta la formulación de un conjunto de modelos matemáticos para el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, que integra las decisiones de localización siguiendo una estrategia de configuración dinámica, ruteo e inventario (*DCS-ILRP*) bajo un enfoque sostenible y estocástico.

El modelo matemático determina el número y ubicación de los centros de acopio y biorrefinerías, las rutas por las cuales una flota heterogénea de vehículos recolectará los diferentes residuos agrícolas, el nivel de inventario en los centros de acopio y el flujo de material adecuado para contribuir con la satisfacción de la demanda de biocombustible. Con base en las brechas de investigación identificadas en la literatura, el modelo matemático propuesto es el primero que aborda un enfoque *ILRP* bajo una estrategia de configuración dinámica la cual considera: (1) la apertura de las instalaciones en cualquier período de tiempo; (2) expansión de la capacidad dentro del horizonte de planificación; y (3) el cierre de las instalaciones si su operación ya no es viable. La formulación matemática original incluye algunas ecuaciones no lineales debido a la interacción entre las variables de cambio de capacidad y el flujo de los materiales. Para abordar esta situación, se introduce una estrategia de linealización destinada a transformar de manera eficiente las restricciones no lineales en desigualdades lineales.

Se considera un equilibrio entre el desempeño económico, ambiental y social. Para tal fin, el modelo propuesto incorpora los estándares *GRI*. La función objetivo económica está enfocada en maximizar el valor presente neto (*NPV*), que incluye los ingresos por ventas del biocombustible y el valor de salvamento si se toma la decisión del cierre de las instalaciones. También considera, los costos de materia prima, de apertura, expansión y cierre de las instalaciones, costos fijos, variables, de inventario y transporte. Con relación a la dimensión ambiental, se minimiza la contaminación del agua en términos de sólidos suspendidos totales (*SST*) y del aire con relación al CO_2 generado por

proveedores, centros de acopio, biorrefinerías y transporte. Adicionalmente, se contempla la contaminación en las granjas que depende de la biomasa no demandada por la cadena de abastecimiento. Finalmente, en el pilar social se maximizan los impactos en la seguridad alimentaria y en la generación de empleo, que considera además del número de puestos de trabajo generados, el índice de desempleo en las zonas de influencia.

El modelo matemático ha considerado, por primera vez, la utilización de múltiples residuos de la cosecha de café para la producción de bioetanol. Teniendo en cuenta la naturaleza estacional y la variabilidad anual del suministro de estos residuos, la capacidad de generación de biomasa de las fincas se asume como un parámetro incierto. Para abordar esta característica, se utiliza la programación estocástica de dos etapas. En la primera etapa se define la estructura de la red de suministro considerando la apertura, expansión y cierre de las instalaciones (centros de acopio y biorrefinerías). En la segunda etapa se optimizan las variables relacionadas con el flujo de materiales (biomasa y biocombustible).

La formulación matemática propuesta se resume en un modelo de programación lineal entera mixta estocástica de objetivos múltiples (*MOSMILP: Multi Objective Stochastic Mixed-Integer Linear Programming*). En el que las decisiones estratégicas (localización siguiendo una *DCS*) se integran con las decisiones tácticas (inventario) y operativas (ruteamiento), en un problema de múltiples periodos, múltiples escalones y múltiples productos. Dando respuesta al vacío de conocimiento abordado en esta tesis doctoral. Teniendo en cuenta que el modelo de optimización pertenece a la clase de problemas *NP-hard*, en el siguiente capítulo se presenta la metodología de solución para resolver el modelo formulado.

3. Metodología de solución propuesta

El modelo matemático propuesto en esta tesis doctoral incorpora una estrategia de configuración dinámica al *ILRP* (*DCS-ILRP*). Como se mencionó, el Problema de inventario localización ruteamiento (*ILRP: Inventory Location Routing Problem*) se clasifica dentro de la categoría de problemas *NP-hard* (Biuki et al., 2020; Saif-Eddine et al., 2019). Por tanto, el *DCS-ILRP* hace parte de la misma categoría. Por otro lado, el modelo considera tres funciones objetivo (económica, ambiental y social). Para abordar el problema multiobjetivo derivado (*multi-objective DCS -ILRP*), se utilizan dos enfoques de solución: 1) métodos exactos y 2) métodos aproximados.

Dentro de los enfoques de modelamiento utilizados para ser resueltos con métodos exactos (implementados en software comercial), está la Programación Compromiso (*CP: Compromise Programing*) y el método de las restricciones (ϵ -*constraint*), aplicados a problemas de tamaño pequeño. Por otra parte, teniendo en cuenta la necesidad evidenciada en el estado del arte y la tendencia en líneas de investigaciones futuras con relación al desarrollo de algoritmos eficientes para hacer frente a la complejidad computacional en problemas de gran tamaño, como aporte metodológico se diseñó un método aproximado que busca de manera eficiente (tiempo de cálculo razonable) soluciones de alta calidad al problema de optimización.

De acuerdo con la revisión sistemática de la literatura el algoritmo genético (*GA: Genetic algorithm*) y el recocido simulado (*SA: Simulated annealing*) son las metaheurísticas más utilizadas con resultados computacionales muy competitivos. En particular, el SA fue utilizado no sólo de manera exclusiva por autores como Rahbari et al. (2022), Kaya & Ozkok (2020), Misni et al., 2020, Saragih et al. (2019), (Rayat et al., 2017). Sino también en el desarrollo de algoritmos híbridos como en el caso de Yuchi et al. (2021) quienes proponen un algoritmo híbrido basado en búsqueda tabú y recocido simulado, o la contribución de Guo et al. (2018) que desarrolla un enfoque que incorpora recocido simulado en un algoritmo genético adaptativo para resolver el modelo de manera eficiente.

En la propuesta de Saragih et al. (2019) el SA se utiliza en la etapa de mejora de la solución, generando una brecha promedio muy competitiva en comparación con el modelo de programación no lineal de enteros mixtos. A partir de las contribuciones analizadas en el estado del arte y de la calidad de soluciones reportadas por los autores al utilizar el SA, la heurística propuesta inicia con una fase constructiva donde se obtiene una solución inicial factible. En la segunda etapa, la solución se mejora iterativamente (mejor solución compromiso) utilizando una adaptación de la técnica metaheurística de recocido simulado.

Aunque se utiliza el SA que como se mencionó ha sido probado por varios autores en la solución del problema ILRP, el algoritmo propuesto tiene sustanciales modificaciones debido a la estructura del problema abordado en esta tesis doctoral (*multi-objective DCS -ILRP*). No solo en la construcción de la solución inicial sino también en la etapa de mejora de la solución.

3.1 Métodos exactos

Dentro de los enfoques multicriterio, el concepto de optimalidad paretiana juega un papel esencial para garantizar la racionalidad de las soluciones generadas por los diferentes métodos. Un conjunto de soluciones es eficiente (o Pareto óptimas) cuando está formado por soluciones factibles (esto es, que cumplen las restricciones), tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un atributo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los atributos (Romero, 1993). Planteado el problema de optimización en estos términos, la estructura general del modelo matemático se representa esquemáticamente en las ecuaciones (3.1) y (3.2) (Romero, 1993).

$$Eff \ f(x) = [f_1(x), \dots, f_i(x), \dots, f_q(x)] \quad (3.1)$$

$$\text{Sujeto a:} \quad X \in F \quad (3.2)$$

En donde:

Eff soluciones eficientes o Pareto óptimas

$f_i(x)$ = expresión matemática del atributo i – ésimo

X = vector de variables de decisión

F = conjunto de restricciones que definen el conjunto de soluciones factibles

Para la aplicación de los enfoques de modelamiento utilizados para ser resueltos con métodos exactos fue necesario determinar el punto ideal (todos los objetivos alcanzan su valor óptimo) y anti-ideal del problema. Con este fin, se determina la matriz de pagos (*pay-off matrix*). Para la cual se optimiza

cada objetivo por separado, calculándose los valores alcanzados por los demás objetivos en cada solución óptima. De esta forma, se obtiene una matriz cuadrada, cuya dimension coincide con el número de objetivos. El peor elemento de cada columna de la matriz de pagos se denomina anti-ideal, este punto corresponde al elemento mínimo de la columna si el objetivo correspondiente se maximiza o al elemento máximo si se minimiza.

3.1.1 Método de las restricciones

El método de las restricciones permite generar soluciones eficientes al optimizar cada uno de los objetivos, mientras que los demás se incorporan al conjunto de restricciones. La aplicación de este método con q objetivos por maximizar conduce a la estructura matemática que se presenta en las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5) (Romero, 1993). Por medio de variaciones de los términos independientes ε_j , se genera el conjunto de soluciones eficientes. Los valores ideales y anti-ideales que se obtienen en la matriz de pagos indican el límite inferior y superior del intervalo dentro del cual el parámetro ε puede variar.

Este método multiobjetivo puede considerarse la primera etapa de un proceso decisional, en donde, el conjunto de soluciones posibles se divide en dos subconjuntos disjuntos: el de soluciones eficientes y el de soluciones no eficientes (Romero, 1993). Posteriormente, se debe elegir entre las soluciones eficientes aquella que resulte óptima para el centro decisor de acuerdo con sus preferencias. A continuación, se expone un procedimiento para abordar esta tarea, que se conoce en la literatura multicriterio como programación compromiso.

$$\text{Maximizar } f_k(x) \quad (3.3)$$

$$\text{Sujeto a: } X \in F \quad (3.4)$$

$$f_j(x) \geq \varepsilon_j \quad j = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, q \quad (3.5)$$

3.1.2 Programación compromiso

La Programación compromiso (*CP*) fue introducida oficialmente por Zeleny (1973), y tiene como objetivo elegir del conjunto de soluciones eficientes (frontera de Pareto), la solución más cercana al punto ideal (Romero & Rehman, 2003). El enfoque *CP* se utiliza en contribuciones recientes vinculadas a la cadena de suministro. Algunas aplicaciones exitosas de *CP* incluyen: operaciones de logística humanitaria (Boostani et al., 2021; Monemi et al., 2021), planificación de cosecha,

mantenimiento y transporte de la cadena de suministro de caña de azúcar (Morales-Chavez et al., 2020), y problemas de ubicación de centros de asignación múltiple (Sarma et al., 2020), entre otros.

La programación compromiso se apoya en el axioma de Zeleny que puede enunciarse de la siguiente manera: dadas dos soluciones posibles, la solución preferida será aquella que se encuentre más próxima al punto ideal (Zeleny, 1973). A continuación, se presenta la formulación de este axioma.

$$Z_1 P Z_2 \Leftrightarrow D(Z_1) < D(Z_2)$$

$$Z_2 P Z_1 \Leftrightarrow D(Z_2) < D(Z_1)$$

$$Z_1 I Z_2 \Leftrightarrow D(Z_1) = D(Z_2)$$

En donde:

P e I relaciones de preferencia e indiferencia

$D(Z_i)$ distancia entre la solución Z_i y el correspondiente punto ideal

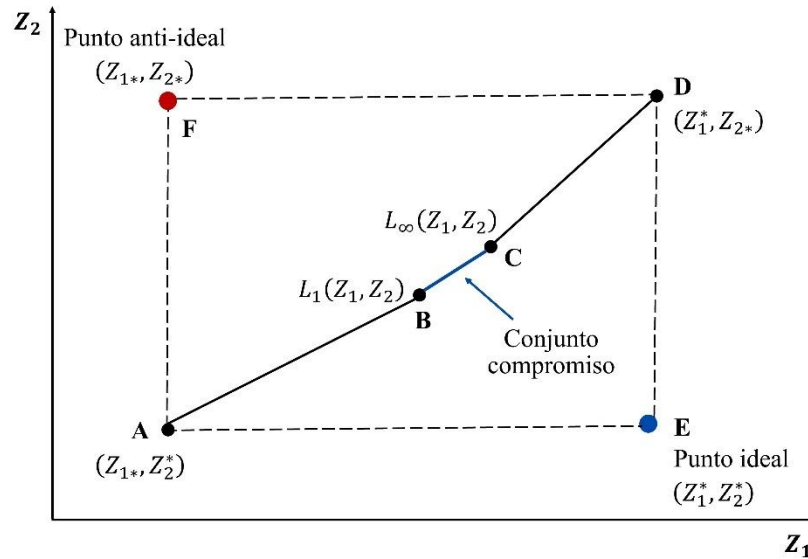
En este enfoque multicriterio se introduce W_i como las preferencias del centro decisor con relación a la discrepancia entre la realización del objetivo i –ésimo y su ideal. La formulación general de CP se muestra en la Ecuación (3.1). En donde, $p \in [1, \infty]$ representa una métrica de distancia (entre la solución eficiente buscada y el punto ideal). El término Z_i^* y Z_{i*} denotan el valor ideal y anti-ideal del objetivo i respectivamente. A su vez, $Z_i(x)$ indica la solución compromiso que minimiza L_p . Dado que los objetivos se miden en unidades distintas es necesario normalizarlos ($Z_{i*}-Z_i^*$). Con $W_i = 1$, el grado de proximidad (L_p) está acotado entre $[0,1]$. Cuando el objetivo alcanza su valor ideal, su grado de proximidad es cero. Por el contrario, esta distancia se hace igual a uno cuando el objetivo en cuestion toma el valor del punto anti-ideal.

$$\text{Min } L_p = \left(\sum_{\forall i} \left| w_i \frac{Z_i(x) - Z_i^*}{Z_{i*} - Z_i^*} \right|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (3.1)$$

En la Figura 3-1 se presenta graficamente un problema bi-objetivo en donde las soluciones D y A contienen los valores óptimos de los objetivos Z_1 y Z_2 respectivamente (maximización de Z_1 y minimización de Z_2). De acuerdo con estos valores, se obtiene E que es el punto ideal en el que ambos objetivos están en el óptimo. En contraste, F es el punto anti-ideal. El segmento de línea que

conecta los puntos B y C establece el conjunto de soluciones compromiso. Se puede observar que este conjunto está limitado por las métricas de distancia L_1 (Manhattan) y L_∞ (Chebyshev).

Figura 3-1: Representación gráfica conjunto compromiso



Fuente: Elaboración propia

3.2 Método aproximado

Los conjuntos de datos de gran tamaño abordados con la formulación matemática propuesta en esta tesis doctoral son intratables si se utilizan métodos de solución exactos. Por esa razón, esta sección presenta como contribución metodológica de esta tesis doctoral un método heurístico de dos fases. (1) fase constructiva y (2) fase de mejora. En la primera se genera una solución inicial factible para la estructura de la cadena de suministro que se muestra en la Figura 2-8. En la segunda etapa se propone una adaptación de la técnica metaheurística de recocido simulado para mejorar la convergencia y la calidad (mejor solución de compromiso) de la solución factible encontrada en la etapa 1.

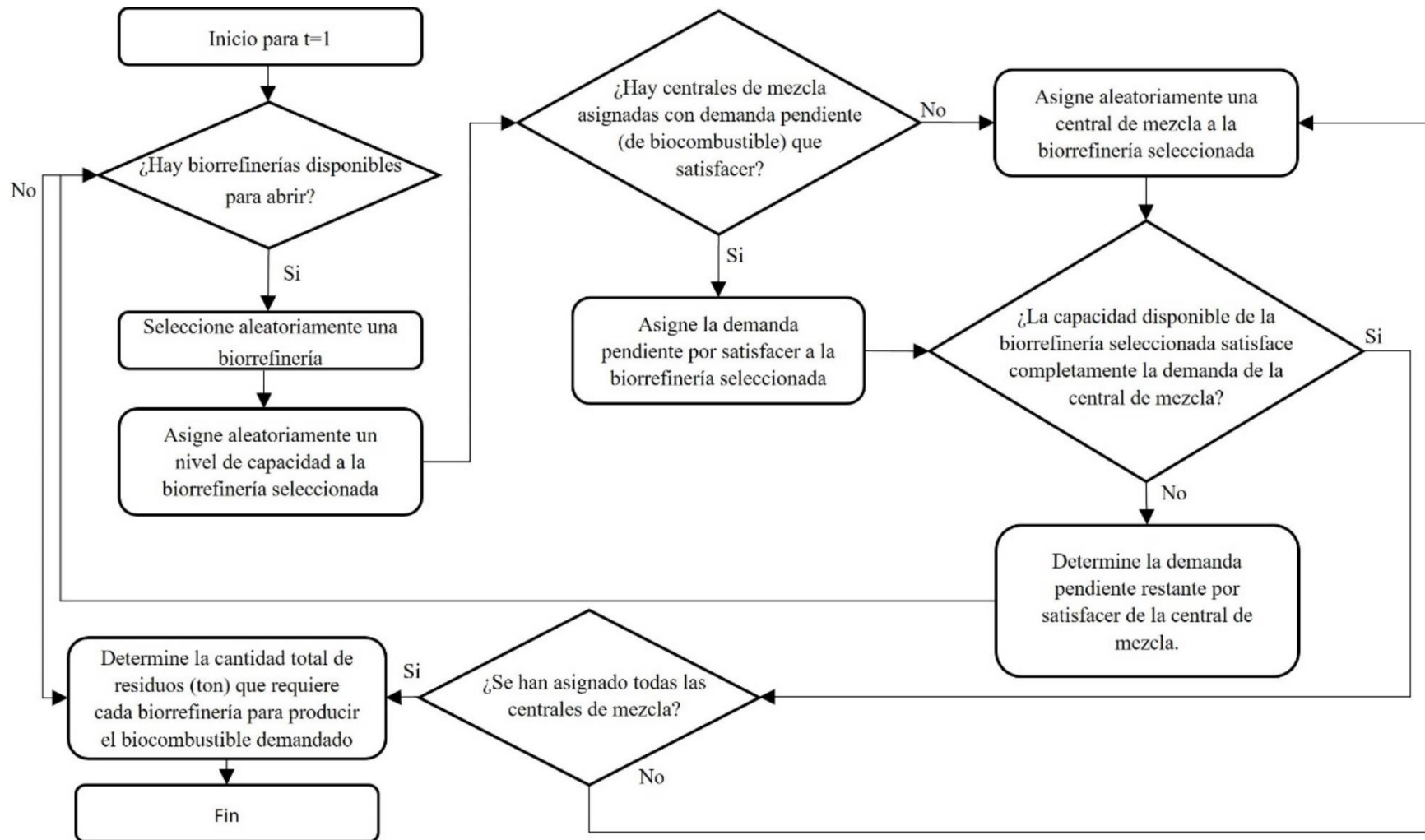
3.2.1 Fase constructiva

Esta fase utiliza la estructura de la cadena de suministro que se muestra en la Figura 2-8. Para el período de tiempo inicial ($t = 1$), la construcción de una solución factible comienza dando apertura aleatoriamente al conjunto de biorrefinerías potenciales. La decisión de abrir la instalación va acompañada de la selección del nivel de capacidad inicial (por ejemplo, pequeña, mediana y grande)

que también se genera aleatoriamente. A continuación, se le asigna a la biorrefinería la demanda de una de las centrales de mezcla. Una vez que la central de mezcla tiene su demanda completamente satisfecha, habrá una búsqueda aleatoria de una biorrefinería disponible que se debe asignar a una instalación de mezcla con demanda insatisfecha. El detalle del proceso de decisión se muestra en el diagrama de la Figura 3-2.

Para una mejor comprensión, se desarrolla un ejemplo para la estructura de cadena de suministro de biocombustibles que incluye: 3 tipos de residuos agrícolas ($W = 1,2,3$), 4 proveedores ($I = 1,2,3,4$), 3 centros de acopio ($J = 1,2,3$), 4 biorrefinerías ($K = 1,2,3,4$), 3 niveles de capacidad en las instalaciones (centros de acopio y biorrefinerías) ($B, C = 1,2,3$), 4 centrales de mezcla ($M = 1,2,3,4$), un horizonte de planificación compuesto por 3 periodos de tiempo ($T = 1,2,3$) y 3 escenarios posibles ($S = 1,2,3$). La Figura 3-3 presenta un fragmento del vector de solución (cromosoma) donde se ilustra la asignación de pares de instalaciones (biorrefinerías \rightarrow centrales de mezcla). Este cromosoma contiene tres secciones. Inicia con las decisiones de apertura de las biorrefinerías, luego se almacenan las capacidades asignadas a las biorrefinerías abiertas. Finalmente, se presenta la asignación de demanda de las centrales de mezcla a cada una de las biorrefinerías seleccionadas.

Figura 3-2: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura y asignación de biorrefinerías



Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

Figura 3-3: Ejemplo gráfico de asignación de biorrefinerías

Decisión de apertura (K)		Nivel de capacidad (C)		Centrales de mezcla																			
				M1 M2 M3 M4				M1 M2 M3 M4				M1 M2 M3 M4				M1 M2 M3 M4							
				Biorrefinería 1 ($K1$)				Biorrefinería 2 ($K2$)				Biorrefinería 3 ($K3$)				Biorrefinería 4 ($K4$)							
0	1	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	500	400	100	1000	100	600	200	100	0	0	0	0

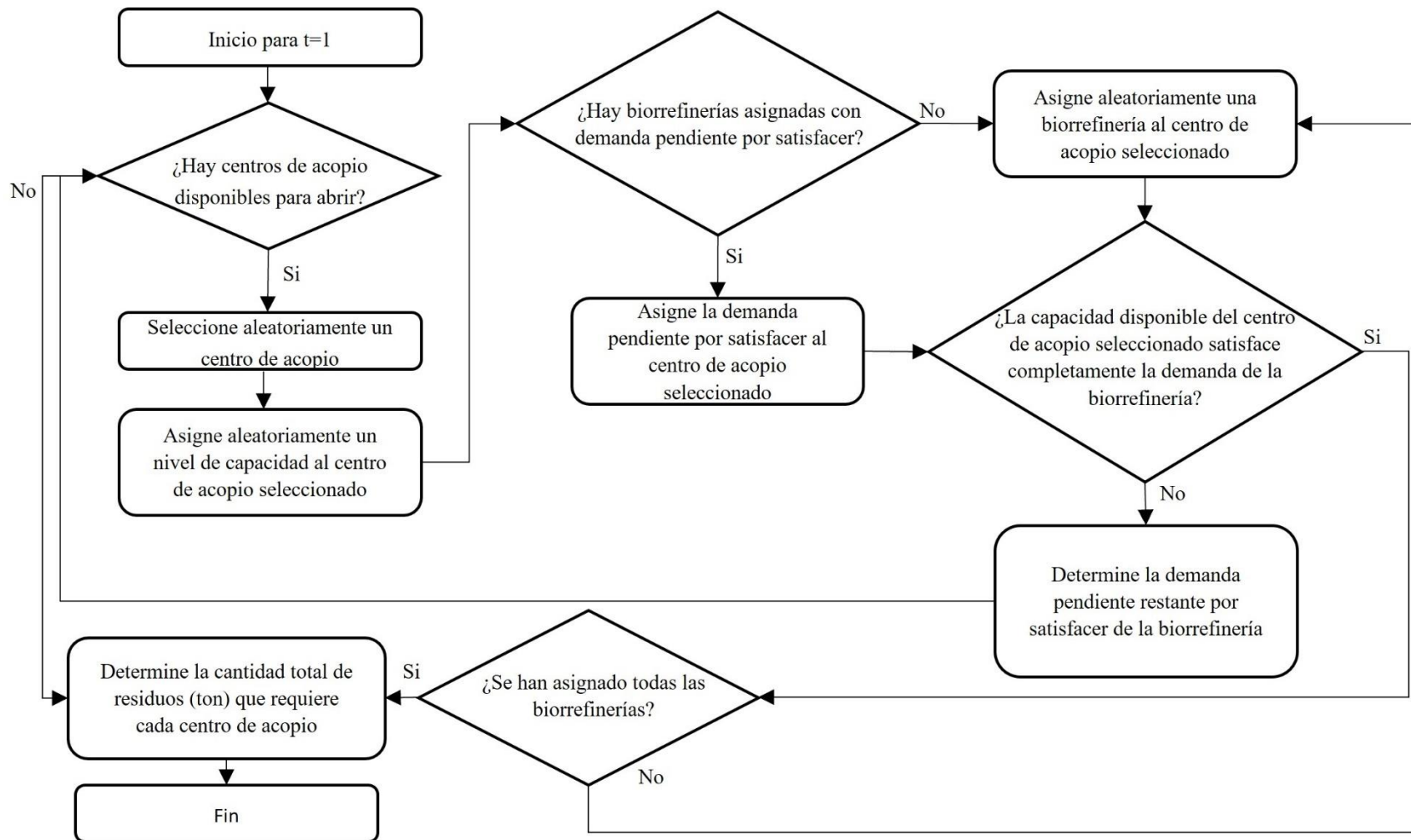
Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

En el ejemplo de la Figura 3-3 se observa que se dio apertura a dos biorrefinerías en el período de tiempo 1 (primera sección del cromosoma). La Biorrefinería 2 ($K = 2$) comienza a operar con un nivel de capacidad medio ($C = 2$), mientras que la Biorrefinería 3 ($K = 3$) abre con un nivel de capacidad pequeño ($C = 1$). Luego se encuentra la asignación de la demanda de cada central de mezcla a las 2 biorrefinerías abiertas. Por ejemplo; a la biorrefinería 2 se le asignó 500, 400, 100 y 1000 litros de bioetanol para las centrales de mezcla M1, M2, M3 y M4 respectivamente. Se puede evidenciar que los espacios asignados a las biorrefinerías 1 y 4 son cero debido a que no fueron abiertas.

Después de localizar las biorrefinerías, la etapa constructiva continua con la apertura/asignación de los centros de acopio. La metodología es similar a la planteada en el diagrama de flujo de la Figura 3-2, pero en este caso las decisiones de apertura están relacionadas con los centros de acopio y las demandas asignadas son las toneladas de residuos que requieren las biorrefinerías para satisfacer la demanda de bioetanol que les fue asignada (Figura 3-4).

La Biorrefinería 2 debe producir 2000 litros de biocombustible para atender la demanda de las 4 centrales de mezcla (Figura 3-3). Para alcanzar este nivel de producción, esta planta necesita procesar 1000 toneladas de residuos agrícolas ($W1, W2, W3$). Como se puede observar en la Fig. 3-5, los centros de acopio 1 y 2 que se abren con capacidad grande ($B = 3$) y pequeña ($B = 1$) respectivamente, le proveen la cantidad requerida de residuos (700 y 300 toneladas). De igual manera, satisfacen la necesidad de biomasa de la Biorrefinería 3 enviando 500 toneladas de residuos agrícolas.

Figura 3-4:Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura y asignación de centros de acopio



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-5: Fragmento de cromosoma de la asignación de centros de acopio

Apertura centros de acopio (J)						Nivel de capacidad (B)						Biorrefinerías											
												K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4	K1	K2	K3	K4
												Centro de acopio 1 ($J1$)				Centro de acopio 2 ($J2$)				Centro de acopio 3 ($J3$)			
1	1	0	3	1	0	0	700	300	0	0	300	200	0	0	0	0	0						

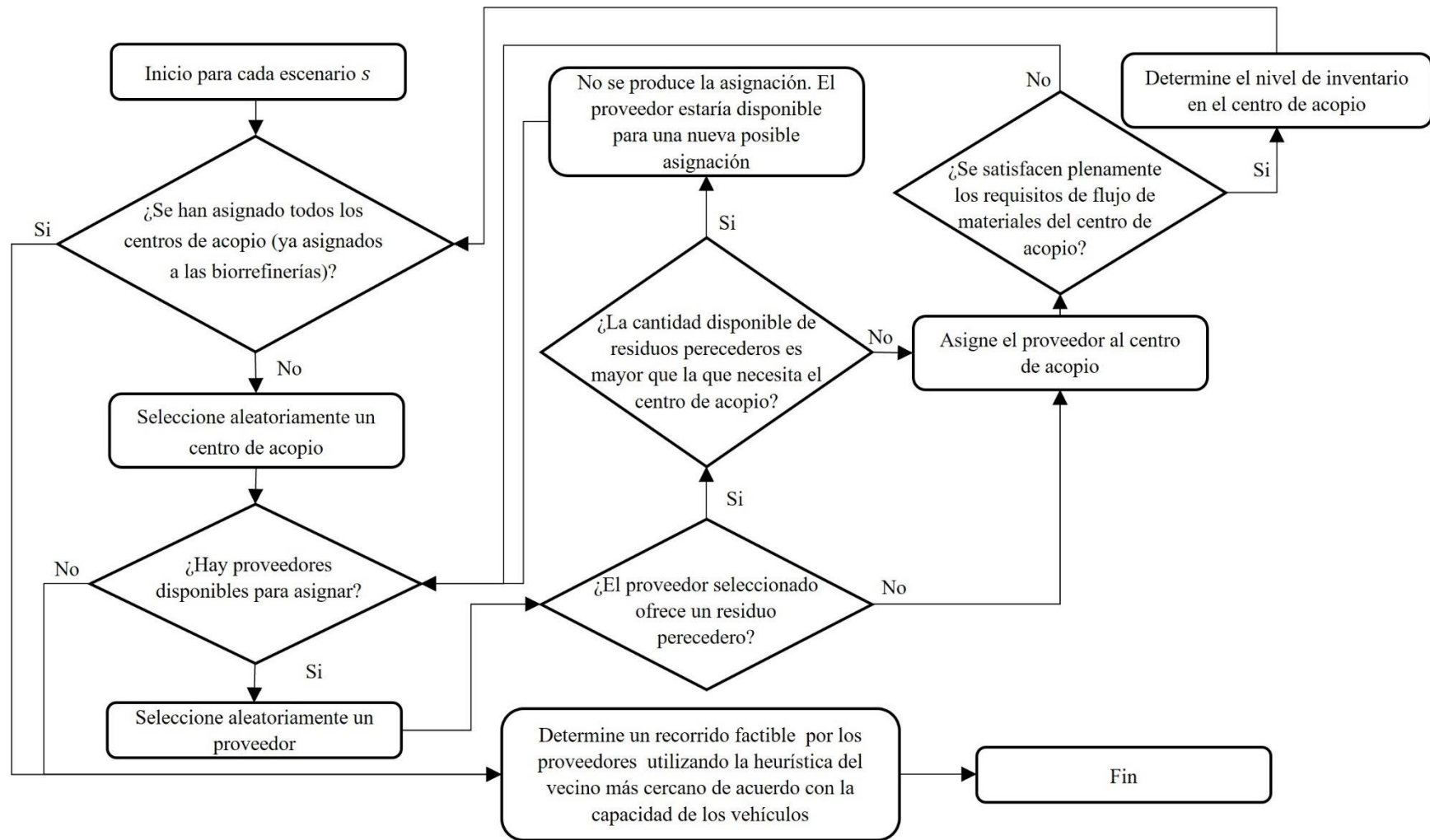
Fuente: Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

El diagrama de flujo presentado en la Figura 3-6 muestra cómo los proveedores de biomasa (granjas) se asignan a los centros de acopio abiertos. Esta asignación se hace de manera aleatoria hasta que se cumplan sus necesidades de flujo de materiales. Es importante resaltar que cuando un proveedor ofrece residuos agrícolas perecederos, solo puede ser asignado a centros de acopio con capacidad suficiente (capacidad igual o mayor a la cantidad de biomasa que ofrece el proveedor) para procesar dichos residuos. Esto permite determinar el nivel de inventario solo con biomasa que se pueda almacenar (los residuos perecederos deben fluir sin interrupción).

En esta fase se incorpora la naturaleza estocástica del diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos agrícolas, puesto que el parámetro incierto evaluado es la disponibilidad de suministro de cada proveedor. Como se puede observar en la Figura 3-6, el flujo de decisiones se genera para cada escenario considerado en el problema, de acuerdo con la metodología de la programación estocástica en dos etapas abordada en la Sección 2-4.

La Figura 3-7 muestra otro fragmento del vector solución. Esta parte del cromosoma considera escenarios múltiples para la asignación de proveedores a los centros de acopio. Aquí el valor entero mostrado en el cromosoma representa el centro de acopio asignado ($J = 1, 2, 3$). Por ejemplo, el primer valor entero (1) indica que el Centro de acopio 1 ($J = 1$) recibe el residuo 1 ($W = 1$) de la finca 1 ($I = 1$), bajo el supuesto del Escenario 1 ($S = 1$) (por ejemplo, menor disponibilidad de residuos agrícolas).

Figura 3-6: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de proveedores a centros de acopio



Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

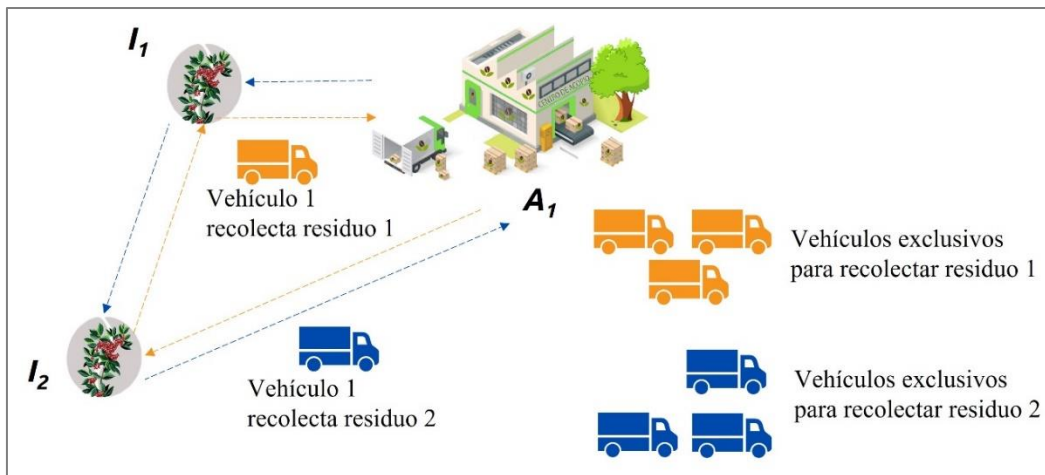
Figura 3-7: Fragmento de cromosoma de la asignación de proveedores a centros de acopio

	Escenario 1 (S1)				Escenario (S2)				Escenario 3 (S3)																
	W = 1		W = 2		W = 3		xxx	W = 1		W = 2		W = 3													
	I1	I2	I3	I4	I1	I2	I3	I4	I1	I2	I3	I4	I1	I2	I3	I4									
J(1,2,3) →	1	1	2	2	1	1	1	0	0	0	2	2	xxx	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1

Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

A partir de las asignaciones de los proveedores a los centros de acopio y utilizando la heurística del vecino más cercano se determinan las rutas de recolección para cada uno de los residuos. Se consideran grupos de vehículos exclusivos, teniendo en cuenta las características de cada uno de los residuos (Figura 3-8). La codificación de cuatro dígitos que se utilizó en este fragmento del cromosoma se interpreta de la siguiente manera: los dos primeros dígitos corresponden al orden en el que serán visitados los proveedores. Los últimos dos dígitos al vehículo asignado. La Figura 3-9 ejemplifica la asignación de rutas del centro de acopio 1 para la recolección de los residuos 1 y 2.

Figura 3-8: Ejemplo gráfico de asignación de rutas para recolección de residuos



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-9: Fragmento de cromosoma de la asignación de rutas para recolección de residuos

Escenario 1												Escenario 2	Escenario 3		
Centro de acopio 1						Centro de acopio 2	Centro de acopio 3	xxx	xxx						
W = 1		W = 2		W = 3		xxx	xxx	xxx	xxx						
I1	I2	I3	I4	I1	I2	I3	I4	I1	I2	I3	I4	xxx	xxx		
0201	0101	0	0	0101	0201	0	0	0	0	0	0	xxx	xxx	xxx	xxx

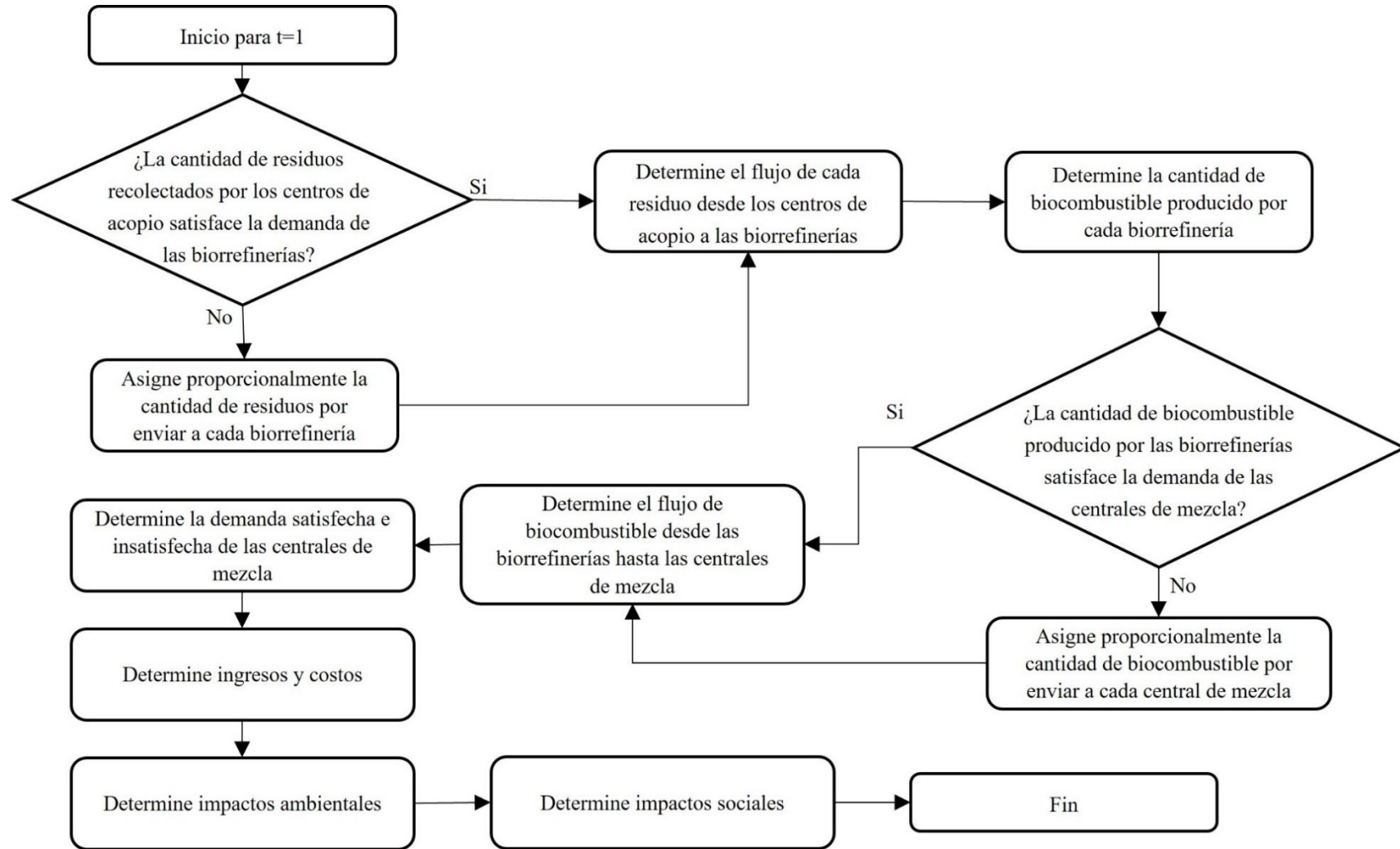
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 3-9, el Centro de acopio 1 se abastecerá del residuo 1 desde los proveedores 1 y 2 ($I1, I2$), para tal fin utilizará el vehículo 1 del conjunto de vehículos dedicados al transporte de este tipo de residuo. El cual visitará primero al Proveedor 2 y luego al Proveedor 1. De manera similar recolectará el residuo 2, pero ahora visitará primero al Proveedor 1 y luego al Proveedor 2 con el vehículo 1 que hace parte del grupo de vehículos que tienen las características requeridas para transportar esa clase de residuo.

Las asignaciones realizadas hasta el momento se basan en la demanda generada por las centrales de mezcla. No obstante, dependiendo de la cantidad de residuo disponible que tengan los proveedores (parámetro incierto) se podrá satisfacer esta demanda. Debido a esto, el siguiente paso en la construcción de solución inicial, es determinar para cada escenario si la cantidad de residuo recolectado por los centros de acopio satisface la demanda. Si se cumple con la totalidad de suministro requerido, se envían los flujos de materiales a las biorrefinerías y luego a las centrales de mezcla. Si, por el contrario, la cantidad de residuo obtenido por los centros de acopio es menor a lo demandado, se enviará proporcionalmente a cada biorrefinería y así mismo a las centrales de mezcla. El diagrama de flujo presentado en la Figura 3-10 muestra el proceso de decisión antes descrito, que finaliza la construcción de la solución inicial para el periodo de tiempo 1.

Después de obtener la configuración de la red de suministro para el primer periodo de tiempo, se construye una solución factible para los periodos posteriores ($t \geq 2$). La Figura 3-11 muestra la lógica seguida para establecer la apertura, el cierre y la expansión de la capacidad de las biorrefinerías dentro del horizonte de planificación. De acuerdo con la demanda del biocombustible, se determina si la red de suministro requiere capacidad adicional. Si es el caso, se evalúa la disponibilidad de biomasa de los proveedores para satisfacer esta demanda. Con la cantidad de residuos necesarios, se prioriza expandir el nivel de las biorrefinerías abiertas. Si no es suficiente, se generan alternativas de apertura de nuevas instalaciones.

Figura 3-10: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de flujo final de materiales



Fuente: Elaboración propia

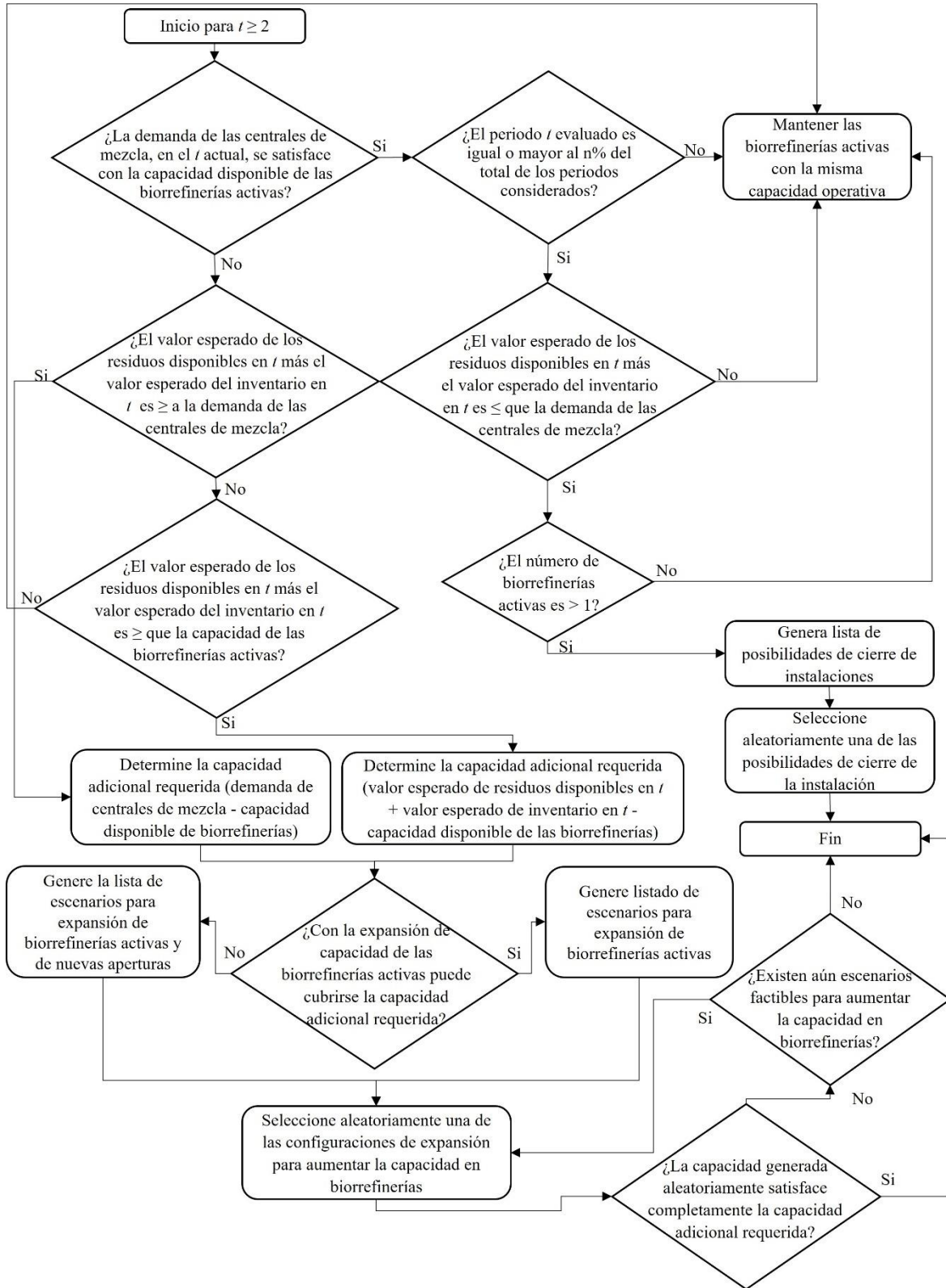
También es posible que el sistema no requiera capacidad adicional y que, por el contrario, sea conveniente la opción del cierre de instalaciones. Para generar la lista de posibilidades de cierre (Anexo K), se considera primero que haya más de una biorrefinería abierta y que se cumpla un mínimo de periodos de tiempo en el cual la instalación estuvo funcionando (parámetro definido por el investigador). Al tener definida la nueva capacidad del sistema con relación a las biorrefinerías, se procede a asignarles la demanda de las centrales de mezcla (Figura 3-12).

El proceso de apertura, expansión, cierre y asignación de demanda a los centros de acopio se realiza de manera similar al de las biorrefinerías (Anexo L). Posteriormente, se asignan los proveedores y se determina el flujo final de materiales a lo largo de la cadena de suministro, con la misma estructura que se empleó para el periodo de tiempo 1 (Figuras 3-6 y 3-10). La única diferencia estriba en que para determinar la cantidad de residuos que requiere de los proveedores cada centro de acopio, se le resta a la cantidad demanda el nivel de biomasa en inventario. El Anexo M presenta el diagrama de flujo correspondiente, en cual se evidencia el paso mencionado.

La Figura 3-13 muestra un fragmento de la evolución de una solución factible a lo largo de tres periodos de tiempo (cada fila de la matriz corresponde a un periodo de tiempo). Se observa que a la estructura del cromosoma presentado en la Figura 3-3 se le adiciona las decisiones de expansión de capacidad y cierre de las instalaciones. En esta solución, la capacidad de la Biorrefinería 3 se expande de nivel pequeño ($C = 1$) a grande ($C = 3$) en el periodo de tiempo 2 ($t = 2$). Mientras que la Biorrefinería 2 se cierra en el período de tiempo 3. Por tanto, en este periodo no registra asignación de demanda de las centrales de mezcla.

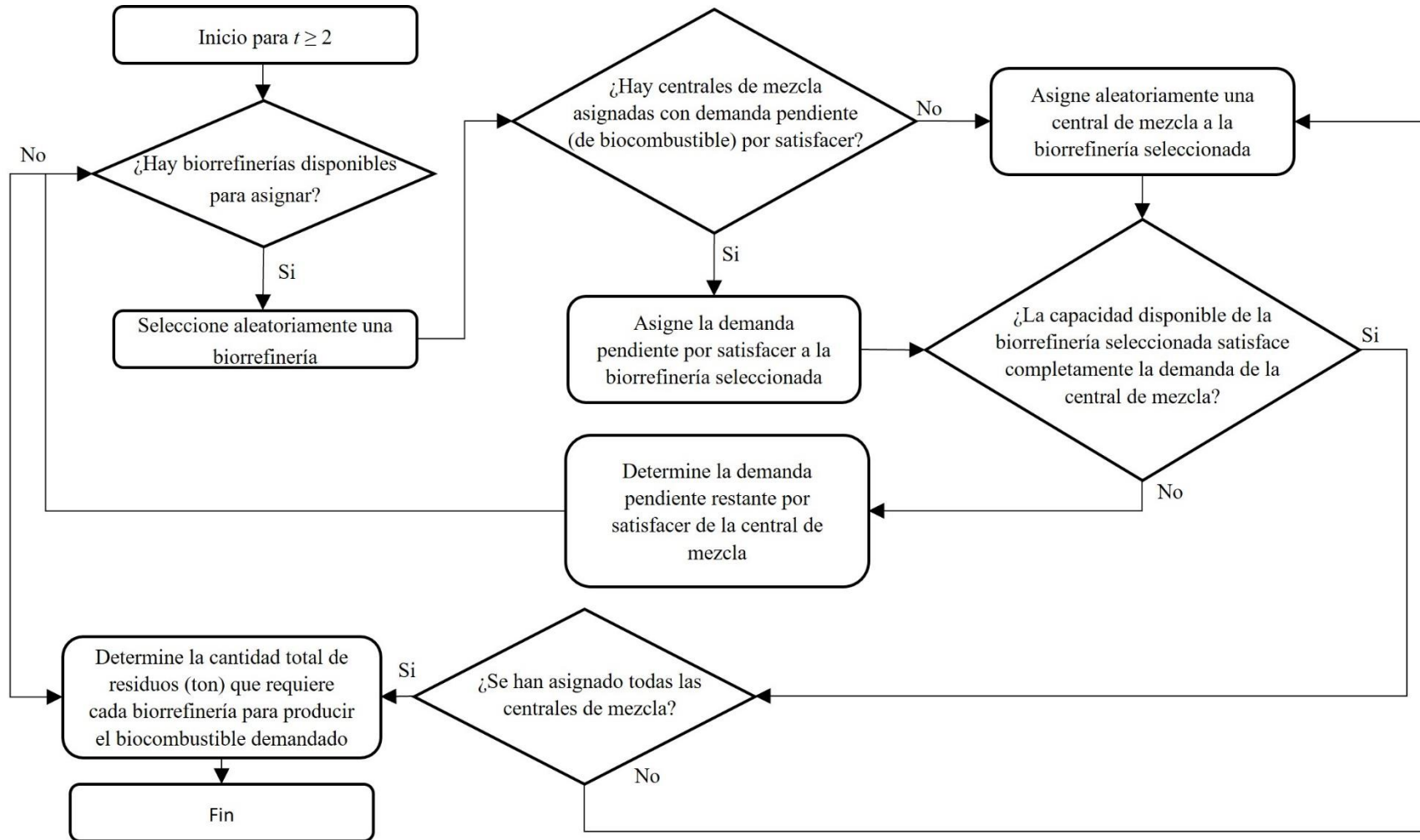
La fase constructiva termina con una solución factible inicial que luego se utiliza en la Sección 3.2.2. La calidad de la solución inicial construida se mejora mediante una adaptación de la técnica metaheurística de recocido simulado (SA).

Figura 3-11: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura, expansión y cierre de biorrefinerías para ($t \geq 2$)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-12: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de biorrefinerías para ($t \geq 2$)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-13: Fragmento de cromosoma - configuración de instalaciones dinámicas ($t \geq 2$)

t ↓	Apertura biorrefinerías (K)	Nivel de capacidad (C)	Expansión de capacidad	Cierre	Centrales de mezcla																													
					M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4														
					Biorrefinería 1(K1)				Biorrefinería 2(K2)				Biorrefinería 3(K3)				Biorrefinería 4(K4)																	
1...	0	1	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	400	100	1000	100	600	200	100	0	0	0	0
2...	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300	150	400	700	280	1650	600	200	0	0	0	0
3...	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300	1800	550	300	0	0	0	0

Fuente: Morales- Chávez et al. (2021)

3.2.2 Fase de mejora

Para mejorar la calidad de la solución inicial, se ha adaptado el algoritmo de recocido simulado (SA). Este algoritmo fue propuesto por Metropolis et al. en 1953 para simular el proceso de calentamiento y enfriamiento de metales con el fin de alcanzar el equilibrio térmico. Posteriormente, Kirkpatrick et al. (1983) lo utilizó por primera vez en problemas de optimización. Como se encontró en la revisión de la literatura de esta tesis doctoral, esta metaheurística se ha aplicado con éxito a modelos matemáticos similares (Kaya & Ozkok, 2020; Rahbari et al., 2022; Q. Yuchi et al., 2021) al problema abordado en esta investigación.

El algoritmo de metrópolis genera una secuencia de estados del sólido en su proceso de enfriamiento. En problemas de optimización, el SA provoca un cambio al estado actual del sistema (E_i) mediante un mecanismo de perturbación. Si el cambio conduce a una disminución en la función objetivo (en un problema de minimización), el nuevo estado (E_j) es aceptado como el estado actual. De lo contrario, si el cambio conduce a un incremento en la función objetivo, se aceptará con una probabilidad de $\exp^{-\frac{\Delta E}{T}}$, donde $-\Delta E$ representa la diferencia entre las dos funciones objetivo y T indica la temperatura. Este enfoque evita quedar atrapado en una solución óptima local durante el proceso de búsqueda (Habibi et al., 2017). A medida que el proceso evoluciona, la temperatura disminuye, se incrementa la longitud de la cadena y, por tanto, se reduce la probabilidad de aceptar soluciones de peor calidad (Echeverry, 2009).

Aunque el SA se ha utilizado en la solución de modelos matemáticos que siguen una formulación ILRP (Rahbari et al., 2022; Wu et al., 2021), teniendo en cuenta que es la primera vez que se propone abordar este problema bajo una estrategia de configuración dinámica, fue necesaria una adaptación del algoritmo para generar una solución considerando las decisiones de ubicación, apertura, expansión de capacidad y cierre de las instalaciones en cualquier periodo dentro del horizonte de

planeación. Adicionalmente, se garantiza la factibilidad de las soluciones iniciales y de las que se generen al aplicar el mecanismo de inserción.

La adaptación del SA que se propone en esta investigación requiere cinco parámetros definidos por el usuario: T_0 , T_f , K_0 , α y ρ . Los términos T_0 y T_f representan las temperaturas inicial y final respectivamente. El número de iteraciones a una temperatura determinada se denota por K_0 . El parámetro α indica la tasa de enfriamiento y ρ la tasa de incremento para las iteraciones. El pseudocódigo del algoritmo propuesto se presenta en la Figura 3-14.

Figura 3-14: Pseudocódigo de SA propuesto utilizado en la fase de mejora

```

SA adaptado ( $T_0, T_f, K_0, \alpha, \rho$ )
Inicio
 $T = T_0; K = K_0; MejorL_1 = \emptyset; List = Solucion\_inicial\_factible$ 
While  $T > T_f$ 
   $a, k = 1;$ 
  While  $k \leq K \ \& \ a \leq A$ 
    Generación de un vecino  $j$  a partir de  $i$  usando el método de inserción
    Agregue el vecino  $j$  a  $List$ 
    Determine los  $L_1$ (aplicando el Procedimiento 1)
     $\Delta L_1 = L_1(j) - L_1(i)$ 
    If  $\Delta L_1 < 0$  Then
       $i \leftarrow j$  /* Acepte la solución del vecino*/
      Actualice la lista de soluciones (sustituya  $i$  por  $j$ )
       $a = a + 1$ 
    Else
       $rand = U(0,1)$ 
      If  $rand < \exp(-\frac{\Delta L_1}{T})$  Then
         $i \leftarrow j$  /* Acepte la solución del vecino */
        Actualice la lista de soluciones (sustituya  $i$  por  $j$ )
         $a = a + 1$ 
      End if
    End if
     $k = k + 1$ 
  End While
   $T = \alpha \cdot T$ 
   $K = \rho \cdot K$ 
End While
 $MejorL_1 =$  Procedimiento 1(todas las soluciones que pertenecen a  $List$ )
end

```

Fuente: Morales- Chávez et al. (2021)

El SA propuesto inicia con la solución obtenida en la fase constructiva (Sección 3.2.1) para la búsqueda de vecinos. Posteriormente, cada iteración a una temperatura determinada genera una solución j (vecino) a partir de la solución factible inicial i utilizando el mecanismo de inserción (que

se detalla más adelante en esta sección). Para comparar las soluciones, se calcula el valor de L_1 (consulte el *Procedimiento 1* en la Figura 3-15) para las dos soluciones (solución i y j). Una vez que se calcula la diferencia de L_1 (es decir, $\Delta L_1 = L_1(j) - L_1(i)$), la solución j puede reemplazar la solución actual i si $\Delta L_1 < 0$. En caso contrario, se acepta la nueva solución j si al generar un número aleatorio uniformemente distribuido se obtiene que $rand < \exp(-\frac{\Delta L_1}{T})$.

Figura 3-15: Cálculo del valor de L_1 en el Procedimiento 1.

Procedimiento 1 ($List, i, j, f$)

Establezca la matriz de valores de rendimiento $F_{sf} \{S = i, j; f: \text{funciones objetivo}\}$

Para cada función objetivo f en el conjunto de soluciones que pertenece a $List$ realice

Min_f = valor mínimo de rendimiento de la función objetivo f

Max_f = valor máximo de rendimiento de la función objetivo f

Para cada una de las soluciones del conjunto F determine

$$Z_{sf} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{Max_f - F_{sf}}{Max_f - Min_f} & \text{si } f \text{ se maximiza} \\ \frac{F_{sf} - Min_f}{Max_f - Min_f} & \text{si } f \text{ se minimiza} \end{array} \right\}$$

$$L_{1s} = \sum_{\forall f} W_f Z_{sf}$$

End Procedimiento 1

Fuente: Morales- Chávez et al. (2021)

Para valores altos de temperatura (cuando T se acerca a T_0), el número de ciclos vinculados a la generación de vecinos siempre es menor en comparación con las iteraciones a baja temperatura. Esto está asegurado por el pequeño valor inicial de K , que crece después de cada iteración. Por otro lado, el parámetro A (definido por el usuario) establece el número máximo posible de iteraciones para cada valor de temperatura. El proceso de enfriamiento está garantizado por αT , $0 < \alpha < 1$. El SA propuesto finaliza cuando la temperatura (derivada del proceso de enfriamiento) es menor que un T_f definido por el usuario. Todas las soluciones (vecinos y solución inicial) se guardan en el conjunto denominado $List$.

Al finalizar SA se realiza un cálculo de L_1 final, en el cual se aplica el *Procedimiento 1* a todas las soluciones que integran el conjunto $List$ ($E = i, j, \dots, List$). Es importante tener en cuenta que el valor más pequeño de L_{1E} , ver en la Figura 3-17, denota la mejor solución compromiso ($MejorL_1$) considerando todas las funciones objetivo (f) abordadas en el proceso de optimización. Como se

puede observar en el *Procedimiento 1*, L_1 es una métrica de distancia normalizada (presentada en la Sección 3.1.2) que indica qué tan lejos está la solución E de la solución ideal (es decir, una solución utópica que contiene los mejores valores posibles encontrados por SA para cada función objetivo f).

▪ **Mecanismo de inserción**

Como se mencionó, el SA propuesto requiere generar un vecino en cada una de las iteraciones del algoritmo. Teniendo en cuenta que las decisiones de instalaciones generan un gran impacto en las funciones objetivo de la cadena de suministro, la estrategia de generación del vecino se centra en la perturbación de estas decisiones. Para tal fin, se utiliza un mecanismo de inserción en el cual cada nueva solución j se construye siguiendo los pasos que se describen a continuación:

Paso 1: Sea T el horizonte de planificación expresado entre $t = 1$ y T . Seleccione un período de tiempo aleatorio dentro del intervalo $2 \leq t \leq T$.

Paso 2: Seleccione en qué instalación (de igual probabilidad) (biorrefinería o centros de acopio) se aplicará la perturbación (por ejemplo; si está abierto cerrar o expandir capacidad). La instalación puede estar o no activa en ese periodo de tiempo.

Paso 3: Después de analizar la configuración de la instalación hasta el t seleccionado (Paso 1), se crea una lista de perturbaciones factibles en términos de: 1) apertura; 2) expansión a diferentes niveles de capacidad o 3) cierre de la instalación.

Paso 4: Seleccione aleatoriamente uno de los posibles movimientos de inserción definidos en el Paso 3.

Paso 5: Actualice todo el cromosoma (desde el t seleccionado hasta el último período del horizonte de planificación T) usando la lógica de los diagramas de flujo para los periodos $t \geq 2$ de la Sección 3.2.1.

Para una mejor comprensión se ilustra el mecanismo de inserción con el ejemplo utilizado en la fase constructiva (Sección 3.2.1). A partir de la solución inicial que se presenta en la Figura 3-16, en la cual se observa la configuración de las biorrefinerías y la asignación de las demandas de las centrales de mezcla. Se selecciona aleatoriamente un periodo de tiempo dentro del intervalo $2 \leq t \leq 3$ (Paso 1). Escogiéndose el período de tiempo 2 para iniciar el procedimiento de inserción.

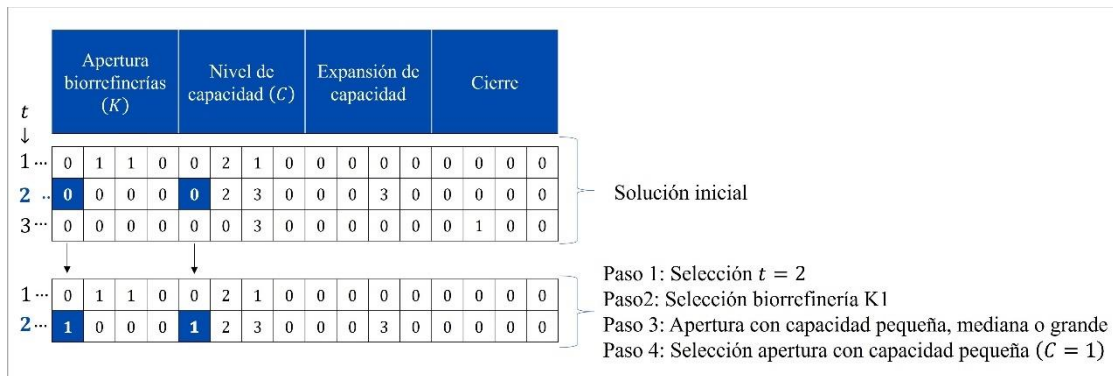
Figura 3-16: Fragmento de cromosoma solución inicial - configuración de biorrefinerías

t ↓	Apertura biorrefinerías (K)	Nivel de capacidad (C)	Expansión de capacidad	Cierre	Centrales de mezcla																												
					M1 M2 M3 M4				M1 M2 M3 M4				M1 M2 M3 M4				M1 M2 M3 M4																
					Biorrefinería 1(K1)				Biorrefinería 2(K2)				Biorrefinería 3(K3)				Biorrefinería 4(K4)																
1...	0	1	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500	400	100	1000	100	600	200	100	0	0	0	0	
2...	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300	150	400	700	280	1650	600	200	0	0	0	0
3...	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300	1800	550	300	0	0	0	0	

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, la Biorrefinería K1 se elige aleatoriamente del conjunto de instalaciones del problema (4 biorrefinerías y 3 centros de acopio) para aplicar la perturbación (Paso 2). De acuerdo con la solución inicial (Figura 3-19) en el período de tiempo 2, la Biorrefinería K1 aún no se ha establecido. Entonces se tienen múltiples movimientos de inserción para esta posición del cromosoma; es decir, abrir la biorrefinería con capacidad pequeña, mediana o grande (Paso 3). Teniendo las tres opciones igual probabilidad de ocurrencia, para el ejemplo se elige abrir la instalación con capacidad pequeña (Paso 4). Los pasos antes mencionados se presentan en la Figura 3-17.

Figura 3-17: Fragmento de cromosoma – mecanismo de inserción Pasos 1- 4



Fuente: Elaboración propia

A partir de esta nueva configuración (3 biorrefinerías activas) se actualiza el resto del cromosoma, desde el $t = 2$ en donde ocurrió la perturbación, hasta el último período de tiempo, que para el caso del ejemplo es $T = 3$ (Paso 5). En la Figura 3-18 se observa como en la nueva solución la Biorrefinería K1 participa en la asignación de la demanda de las centrales de mezcla. Adicionalmente, al actualizar el periodo de tiempo 3, la Biorrefinería K2 no cesa su operación, lo que lleva a que la red de suministro finalice con las tres plantas abiertas.

Figura 3-18: Fragmento de cromosoma – mecanismo de inserción Paso 5

t	Apertura biorrefinerías (K)	Nivel de capacidad (C)	Expansión de capacidad	Cierre	Centrales de mezcla																																														
					M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4																															
					Biorrefinería 1(K1)				Biorrefinería 2(K2)				Biorrefinería 3(K3)				Biorrefinería 4(K4)																																		
1...	0	1	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
2...	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
3...	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1...	0	1	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2...	1	0	0	0	1	2	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3...	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de analizar el desempeño del modelo matemático y la metodología de solución propuesta, en el siguiente capítulo se presentan los resultados computacionales para un caso de estudio de la región cafetera de Colombia y para 15 conjuntos de datos tomados de la literatura y adaptados al problema abordado en esta tesis doctoral.

3.3 Conclusiones parciales

Resolver el modelo matemático propuesto en esta tesis doctoral implica dos consideraciones importantes. Primero, diseñar una cadena de suministro integrando decisiones de localización, ruteo e inventarios (*ILRP*), convierte al problema abordado en *NP-hard*, lo que implica la necesidad de desarrollar una metodología de solución, que se ajuste a las limitaciones impuestas por la complejidad computacional derivada del modelo. Segundo, incorporar un enfoque sostenible, en el cual se optimizan métricas económicas ambientales y sociales simultáneamente, precisa la utilización de métodos multicriterio para solucionar el problema multiobjetivo resultante. A partir de estas dos consideraciones, se divide la metodología de solución propuesta en dos enfoques: 1) métodos exactos y 2) métodos aproximados.

Dentro de los enfoques de modelamiento utilizados para ser resueltos con métodos exactos se selecciona el método de las restricciones, que permite analizar los valores de las funciones objetivo para diferentes incrementos (valores) de ε (frontera de Pareto). Adicionalmente, con el fin de encontrar un compromiso entre la optimización económica y los impactos ambientales y sociales, se elige la programación compromiso, con la cual se obtiene la solución eficiente que tiene la mínima distancia con relación al punto ideal de todos los objetivos considerados.

Dando respuesta a la necesidad evidenciada en la revisión de la literatura, sobre el desarrollo de algoritmos eficientes para hacer frente a la complejidad computacional, como contribución metodológica se diseñó una heurística personalizada que aborda el *SCND* siguiendo una formulación *ILRP* bajo una estrategia de configuración dinámica. La heurística consta de dos etapas, en la primera se construye una solución inicial factible, la cual se mejora en la segunda etapa aplicando una adaptación de la metaheurística recocido simulado.

Aunque el SA se ha utilizado en la solución de modelos matemáticos que siguen una formulación *ILRP* (Rahbari et al., 2022; Wu et al., 2021), teniendo en cuenta que es la primera vez que se propone abordar este problema bajo una *DCS*, fue necesaria una adaptación del algoritmo para generar una solución considerando: 1) las decisiones de ubicación, apertura, expansión de capacidad y cierre de las instalaciones en cualquier periodo dentro del horizonte de planeación; 2) la medición de las tres funciones objetivo relacionadas con la sostenibilidad y 3) la generación de escenarios para la utilización de la programación estocástica de dos etapas. Adicionalmente, se garantiza la factibilidad de las soluciones iniciales y de las que se generen al aplicar el mecanismo de inserción.

La calidad de las soluciones obtenidas por la heurística propuesta se mide con una métrica de distancia normalizada, que indica qué tan lejos está la solución encontrada y el punto ideal (una solución que contiene los mejores valores encontrados por la heurística para cada función objetivo). Al utilizar la misma métrica que emplea la programación compromiso, permite comparar la calidad de las soluciones y por tanto la eficiencia del algoritmo propuesto con respecto al método exacto.

4. Resultados computacionales

Para realizar un análisis del desempeño del modelo matemático propuesto en el Capítulo 2 y del rendimiento de la metodología de solución presentada en el Capítulo 3, se abordan dos escenarios. En el primero, se selecciona de la literatura 15 conjuntos de datos de referencia (Rabbani et al., 2019) y se adaptan al problema abordado en esta tesis doctoral. A partir de los resultados computacionales obtenidos, se evalúa la competitividad en cuanto a calidad de las soluciones y tiempo computacional de la heurística propuesta (PHeu) con relación al método exacto. A su vez, se analiza el efecto de la incertidumbre en las métricas de desempeño (económicas, ambientales y sociales) consideradas.

Por otro lado, se diseña una cadena de suministro de biocombustible a partir de tallos, pulpa y mucílago de café (residuos de café) en la región cafetera de Colombia. En este caso de estudio se determinan las decisiones de instalaciones bajo una *DCS (Dynamic Configuration Strategy)*, inventario y flujo de materiales. Debido a cuestiones de confidencialidad y seguridad por parte de la Federación de Cafeteros de Colombia, no se tuvo acceso a la información detallada sobre ubicaciones y disponibilidad de suministro de cada finca cafetera. Sin embargo, se contó con el área cultivada por departamento. En consecuencia, las decisiones de ruteamiento de vehículos no se consideran y se asume transporte directo entre los eslabones de la red de suministro. Utilizando el método de las restricciones se obtiene la frontera de Pareto del problema. De igual manera, se detalla el plan de inversión con relación a las instalaciones, además de un análisis de *trade-off* y de sensibilidad de las funciones objetivo. Finalmente, se realiza una discusión de los resultados en donde se evalúan las hipótesis de investigación de esta tesis doctoral.

4.1 Conjunto de datos de prueba

En la revisión del estado del arte de esta tesis doctoral, no se encontró un conjunto de datos de referencia con las características del alcance del problema de optimización abordado en esta investigación. Por tanto, los conjuntos de datos de prueba utilizados se generaron a partir de una adaptación de Rabbani et al. (2019) y Morales-Chávez et al. (2018). La Tabla 4-1 presenta los 15

conjuntos de datos propuestos, clasificados en pequeña, mediana y gran escala, los cuales se desarrollan en T periodos de tiempo y tres escenarios ($S = 3$) en donde se estudia la incertidumbre en la disponibilidad de biomasa. Por otro lado, tal como lo definen Rabbani et al. (2019), se asumen tres niveles de incertidumbre con respecto al parámetro estocástico, 5% (incertidumbre baja), 10% (incertidumbre moderada) y 25% (incertidumbre alta).

Por otra parte, los proveedores (I) pueden suministrar tres tipos diferentes de residuos agrícolas ($W = 3$), que se recolectan a través de rutas con una flota de vehículos exclusiva para cada uno de estos (V_1, V_2, V_3). Con relación a las instalaciones, se contemplan tres niveles de capacidad (B/C) (pequeña, mediana y grande) tanto para centros de acopio (J) como para biorrefinerías (K), con sus respectivas posibilidades de expansión. En el Anexo N se muestra cómo se generaron los valores de los parámetros de entrada del modelo matemático para todas las dimensiones del problema. En su mayoría, resultan del valor esperado de una distribución uniforme.

Tabla 4-1: Dimensión de los conjuntos de datos de prueba

Dimensión del problema	Conjunto de datos no.	W	I	J	K	M	B/C	V_1	V_2	V_3	T	S
Pequeño	1	3	6	3	4	4	3	2	2	2	3	3
	2	3	8	3	4	4	3	3	3	3	4	3
	3	3	10	3	5	4	3	4	4	4	5	3
	4	3	12	3	5	4	3	4	4	4	4	3
	5	3	15	4	5	4	3	5	5	5	5	3
Mediano	6	3	20	4	6	5	3	6	6	6	4	3
	7	3	23	4	6	5	3	6	6	6	4	3
	8	3	25	4	6	5	3	6	6	6	5	3
	9	3	27	4	6	5	3	7	7	7	5	3
	10	3	30	4	6	5	3	7	7	7	5	3
Grande	11	3	40	4	7	5	3	7	7	7	5	3
	12	3	50	5	7	6	3	9	9	9	5	3
	13	3	75	5	7	6	3	9	9	9	5	3
	14	3	90	5	8	7	3	9	9	9	5	3
	15	3	100	5	8	7	3	9	9	9	5	3

Fuente: Adaptado de Rabbani et al. (2019)

Este conjunto de datos se aborda con el modelo matemático propuesto en esta tesis doctoral. En el cual se diseña una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos agrícolas, integrando decisiones de localización (con una estrategia de configuración dinámica), inventario y ruteo de vehículos bajo un enfoque sostenible y estocástico. Para su solución, se utiliza la Programación Compromiso (*CP*), con el objetivo de encontrar único valor de rendimiento (métrica de distancia) a través de un enfoque de solución exacta. Dicho valor se compara con la mejor solución encontrada por la heurística propuesta (PHeu). En este sentido, se puede afirmar que el método heurístico es competitivo siempre que su desempeño general (mejor solución L_1) no difiera significativamente de los resultados del método exacto.

Teniendo en cuenta las limitaciones computacionales de los métodos exactos, se selecciona el conjunto de datos de tamaño pequeño (Conjuntos del 1 al 5) con un nivel de incertidumbre del 5% en la disponibilidad de biomasa, para medir el desempeño de PHeu al compararlo con la solución por el método exacto (PC). Para tal fin, a los pesos de las funciones objetivo que requiere el cálculo de L_1 se les asigna el valor de 1. Todos los experimentos computacionales se realizaron utilizando GAMS (soluciones exactas) y el software MATLAB (PHeu) en una CPU Intel Corei5-1.7GHz, equipada con 8 gigabytes de RAM. La Tabla 4-2 muestra los resultados computacionales obtenidos.

Tabla 4-2: Resultados computacionales alcanzados por el software comercial y la heurística propuesta

Conjunto de datos no.	GAMS $-L_1$ encontrada	GAMS $-L_1$ mejor solución	PHeu $-L_1$	T_0
1	2.336	0.857	0.972	500
2	2.597	0.754	0.883	500
3	2.591	0.686	0.948	500
4	2.682	0.729	1.069	500
5	2.905	0.652	1.231	500
Promedio	2.622	0.736	1.021	500

Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

La segunda columna de la Tabla 4-2 muestra el valor de L_1 encontrado por el optimizador de GAMS. Por otro lado, la tercera columna muestra el límite más bajo (el mejor posible - *best possible*) en el proceso de minimización de cada uno de los conjuntos de tamaño pequeño. Aquí se puede evidenciar una gran brecha entre el valor de L_1 encontrado por el software comercial, y el mejor valor posible

que pudiera alcanzarse para cada conjunto de datos. Los resultados computacionales de la PHeu (los mejores valores de L_1) se presentan en la columna cuatro, estos valores se obtienen cuando se establece la misma temperatura inicial de SA ($T_0 = 500$). Para establecer la temperatura inicial se hace un análisis para los conjuntos de tamaño pequeño con cuatro diferentes temperaturas: 250, 500, 750, 1000. Como se observar en el Anexo O en promedio la temperatura que genera un mayor mejoramiento de la solución inicial es $T_0 = 500$.

A partir de los resultados computacionales de la Tabla 4-2, se verifica si la PHeu es competitiva o no en términos de calidad de la solución (mínimo L_1). Con este fin se llevan a cabo pruebas tanto paramétricas (prueba T pareada) como no paramétricas (prueba de rangos con signo de Wilcoxon). Los resultados presentados en la Tabla 4-3 muestran claramente que la heurística es competitiva con respecto a la calidad de las soluciones compromiso. Los resultados de la PHeu son significativamente mejores (valor $p = 1.33E-5$ y media más pequeña en la Tabla 4-3) en comparación con los resultados computacionales encontrados por el software comercial. Las brechas entre las soluciones reales encontradas por el software comercial y el límite inferior son estadísticamente significativas (valor $p = 1.08E-4$).

Tabla 4-3: Comparación de rendimiento mediante pruebas paramétricas y no paramétricas

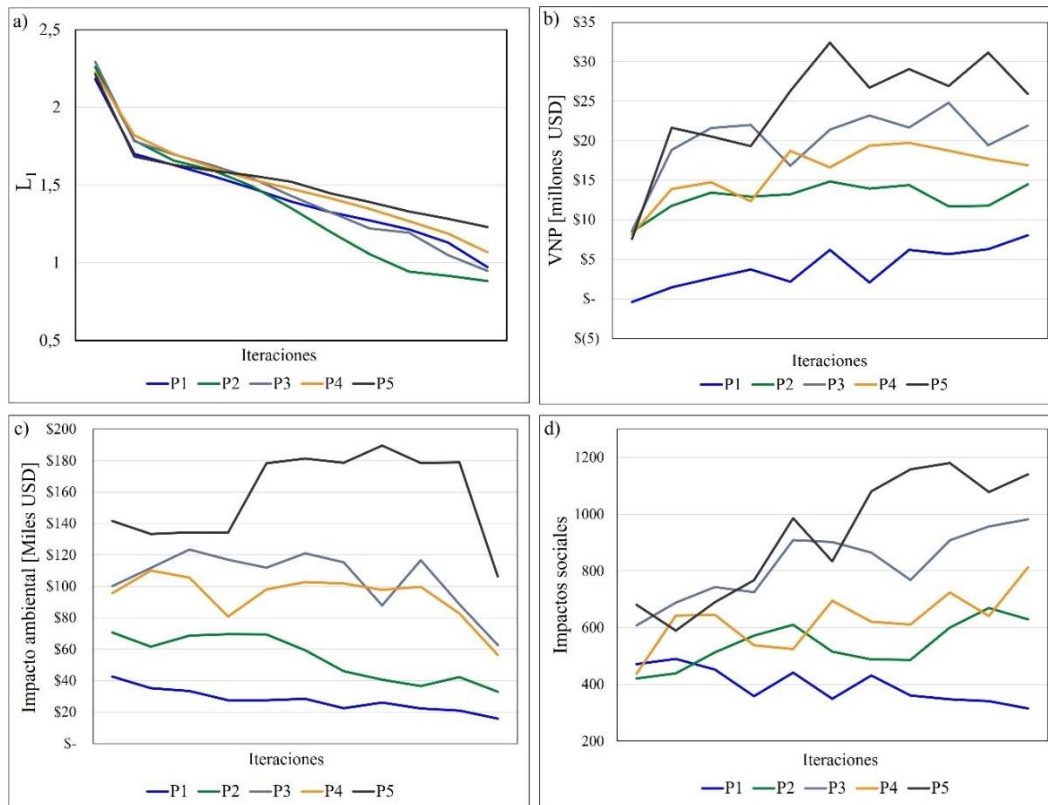
Resultado computacional → ↓	GAMS $-L_1$ encontrada	GAMS $-L_1$ mejor solución	Heurística Propuesta $-L_1$
GAMS $-L_1$ encontrada	n.a.	Valor $p = 1.08E-4$ (Prueba T) Hipótesis → se rechaza ($\alpha = 0.01, 0.05$)	Valor $p = 1.33E-5$ (Prueba T) Hipótesis → se rechaza ($\alpha = 0.01, 0.05$)
GAMS $-L_1$ mejor solución	Valor $p = 0.06$ (Prueba Wilcoxon) Hipótesis → no se rechaza ($\alpha = 0.01, 0.05$)	n.a.	Valor $p = 0.03$ (Prueba T) Hipótesis → no se rechaza ($\alpha = 0.01$) Hipótesis → se rechaza ($\alpha = 0.05$)
Heurística Propuesta $-L_1$	Valor $p = 0.06$ (Prueba Wilcoxon) Hipótesis → no se rechaza ($\alpha = 0.01, 0.05$)	Valor $p = 0.06$ (Prueba Wilcoxon) Hipótesis → no se rechaza ($\alpha = 0.01, 0.05$)	n.a.

Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

Por otro lado, los resultados obtenidos por la PHeu son muy similares a los resultados del límite inferior (*best possible*). De hecho, si se establece un nivel de confianza del 99 % ($\alpha=0,01$) para la prueba *t-student*, no hay diferencias significativas (valor $p = 0,03$) cuando se comparan los resultados de la heurística con los mejores resultados posibles. Todos los valores p (0.06) resultantes de la prueba no paramétrica (Wilcoxon) también indican que el método propuesto es competitivo en comparación con las mejores soluciones compromiso (*best possible* - columna 3 Tabla 4-3).

La Figura 4-1 presenta la convergencia de la heurística propuesta. Se puede observar que para la métrica distancia L_1 (Figura 4-1a) la solución inicial factible que genera la PHeu en la etapa de construcción va disminuyendo para cada temperatura de refrigeración en la etapa de mejoramiento, lo que indica que la estrategia del algoritmo para incrementar la calidad de la solución es apropiada y que la heurística propuesta es convergente. De igual manera se evidencia como el valor de cada una de las funciones objetivo va evolucionando en la etapa de mejora, en el caso del VPN va incrementando el valor (Figura 4-1b) al igual que los impactos sociales (Figura 4-1d), por el contrario, y de acuerdo con lo esperado los impactos ambientales van disminuyendo (Figura 4-1c).

Figura 4-1: Evolución de la solución- Etapa constructiva y etapa de mejora



Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, la Tabla 4-4 presenta los valores de L_1 obtenidos en la solución inicial (columna 2), al finalizar la etapa de mejoramiento (columna 3) y las mejores soluciones compromiso (columna 4) para cada uno de los conjuntos de datos de tamaño pequeño. En donde nuevamente se evidencia la disminución de la brecha entre la solución generada en la etapa de construcción y la mejor solución encontrada por el método exacto.

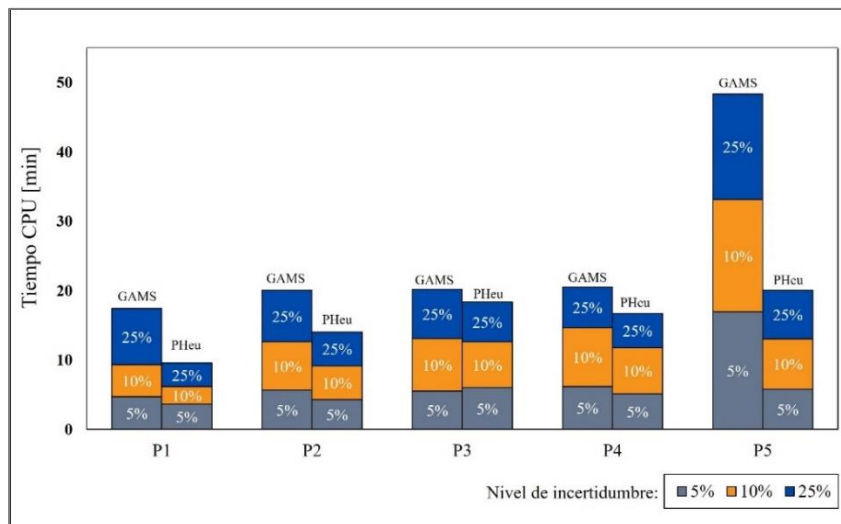
Tabla 4-4: Valores de L_1 para las etapas de PHeu y el método exacto

Conjunto	Solución inicial- Etapa 1 PHeu	Solución final- Etapa de mejora PHeu	GAMS - L_1 mejor solución
P1	2,184	0,972	0,857
P2	2,261	0,883	0,754
P3	2,295	0,948	0,686
P4	2,226	1,069	0,729
P5	2,214	1,231	0,652

Fuente: Elaboración propia

Continuando con el análisis de desempeño, se evalúa la eficiencia de la PHeu con relación al tiempo de cómputo requerido para resolver los conjuntos de pequeña escala. La Figura 4-2 muestra que el método de solución propuesto es evidentemente menos costoso en términos computacionales en comparación con el enfoque de solución exacta. Lo anterior también se comprobó luego de realizar la prueba *t-student*, resultando con un valor *p* igual a 0.003, es decir, la PHeu encontró soluciones muy competitivas consumiendo significativamente menos tiempo de ejecución.

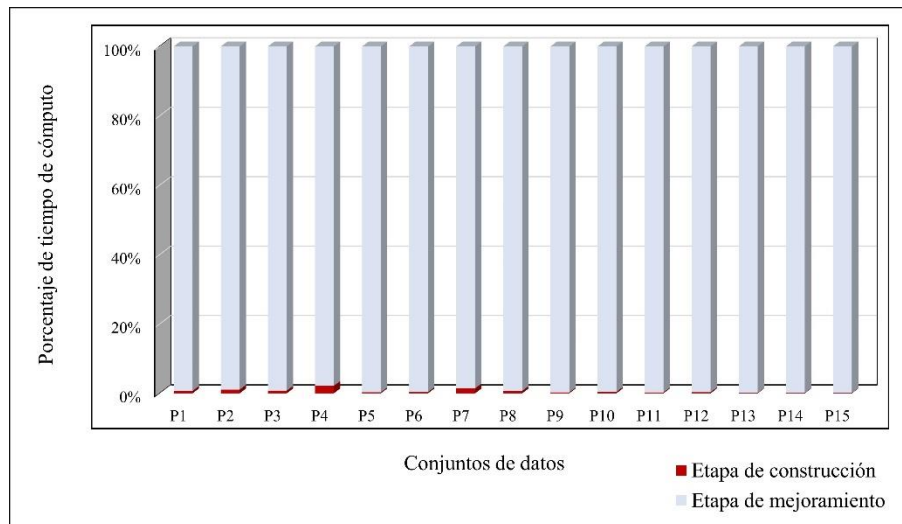
Figura 4-2: Comparaciones de tiempos de cómputo en los conjuntos de tamaño pequeño



Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

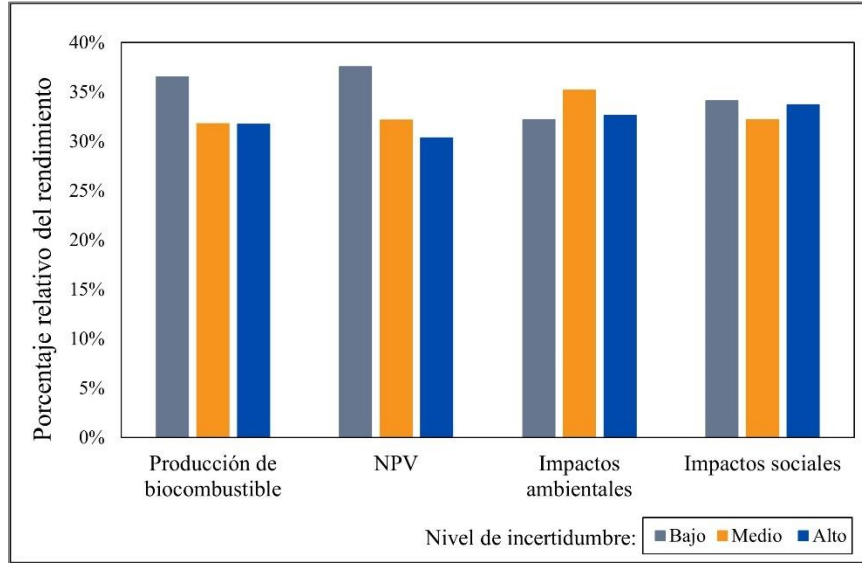
A su vez, la Figura 4-3 presenta el tiempo de cómputo tanto de la etapa de construcción como de la etapa de mejora de la PHeu, en donde se observa que la mayor parte del tiempo requerido en la solución del problema se invierte en la segunda etapa. En promedio para los 15 conjuntos de datos se obtuvo que la etapa inicial consumió un 0.6% del tiempo de cómputo total, con un mínimo de 0.1% y un máximo de 2.2%. Estos valores muestran que la generación de la solución inicial es ágil permitiendo que el recurso tiempo sea utilizado en mejorar la calidad de la solución.

Figura 4-3: Tiempo de cómputo para cada etapa de la PHeu



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-4 muestra el efecto de la incertidumbre (disponibilidad de residuos agrícolas) en los indicadores de desempeño más importantes bajo estudio. Usando el enfoque de solución exacta para resolver los conjuntos pequeños, primero se determina el valor promedio (de P1 a P5) de cada indicador de desempeño, para cada nivel de incertidumbre (5%, 10% y 25%). Posteriormente, se calcula el porcentaje relativo de cada nivel de incertidumbre (a partir de la suma de todos los valores promedio) para cada indicador de desempeño. En todos los indicadores analizados, un menor nivel de incertidumbre influye positivamente en el desempeño de la cadena de suministro de biocombustible; es decir, mayor producción de biocombustible, mayor valor presente neto, menor impacto ambiental negativo y mayor impacto social.

Figura 4-4: Efecto de la incertidumbre sobre los indicadores de desempeño

Fuente: Morales-Chávez et al. (2021)

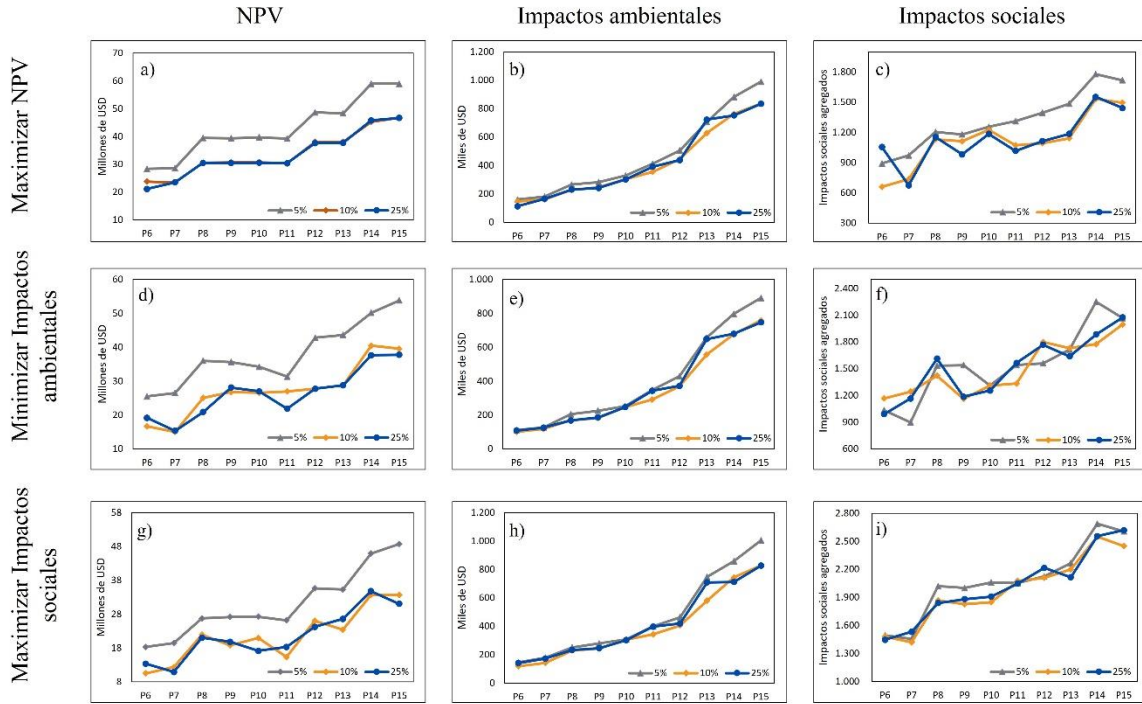
Además, se examina el efecto de la incertidumbre en el desempeño de las funciones objetivo (económica, ambiental y social) de manera más exhaustiva. La Figura 4-5 muestra la influencia de la disponibilidad de desechos agrícolas en el rendimiento de cada función objetivo cuando se optimizan por separado⁴. Ahora los experimentos computacionales se llevan a cabo utilizando los conjuntos de datos de mediana y gran escala (P6, ..., P15). Después de resolver los 10 casos mencionados con PHeu, se observa que la incertidumbre en la disponibilidad de desechos agrícolas tiene la mayor influencia en el valor presente neto (se alcanza un *NPV* más alto con una incertidumbre baja). También se observa comportamientos interesantes para algunas comparaciones por pares de las funciones objetivo. Por ejemplo, el impacto ambiental funciona de manera muy similar sin importar qué otra función objetivo (es decir, maximizar *NPV* o impactos sociales) se optimice, como se puede evidenciar cuando se analiza la Figura 4-5b y la Figura 4-5h.

Finalmente, se evalúa el tiempo de CPU consumido al resolver los conjuntos de datos de mediana y gran escala bajo los tres niveles de incertidumbre. La Figura 4-6 revela claramente que el tiempo de CPU presenta una tendencia ascendente cuando aumenta el tamaño del problema. El tiempo de CPU es muy similar cuando se resuelve el problema bajo diferentes niveles de incertidumbre. Este análisis

⁴ Para optimizar por separado las funciones objetivo usando PHeu, se asignan los pesos a la métrica L_1 de acuerdo con la función que se quiera optimizar. Por ejemplo, para maximizar *NPV* se utilizarán los pesos (1,0,0). Mientras que, si se quieren minimizar los impactos ambientales los pesos asignados serán (0,1,0).

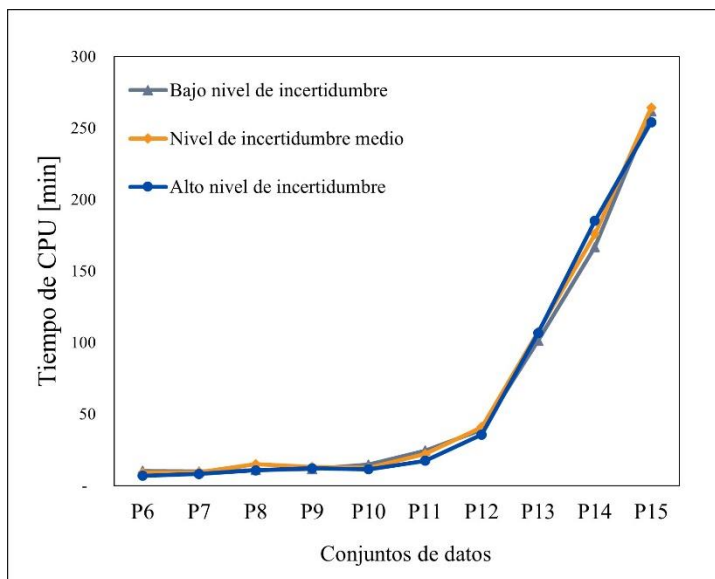
también indica que la heurística propuesta es sólida en términos de eficiencia computacional dado que la dimensión más grande del problema se resolvió en 4.23 horas.

Figura 4-5: Análisis funciones objetivo vs incertidumbre



Fuente: Morales- Chávez et al. (2021)

Figura 4-6: Tiempos de cómputo en conjuntos de datos de mediana y gran escala



Fuente: Morales- Chávez et al. (2021)

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los conjuntos de datos de prueba con relación al modelo matemático y al rendimiento de la heurística propuesta, se procede al diseño de la cadena de suministro de biocombustibles a partir de residuos de café en un caso de estudio en la región cafetera de Colombia.

4.2 Caso de estudio: Región cafetera de Colombia

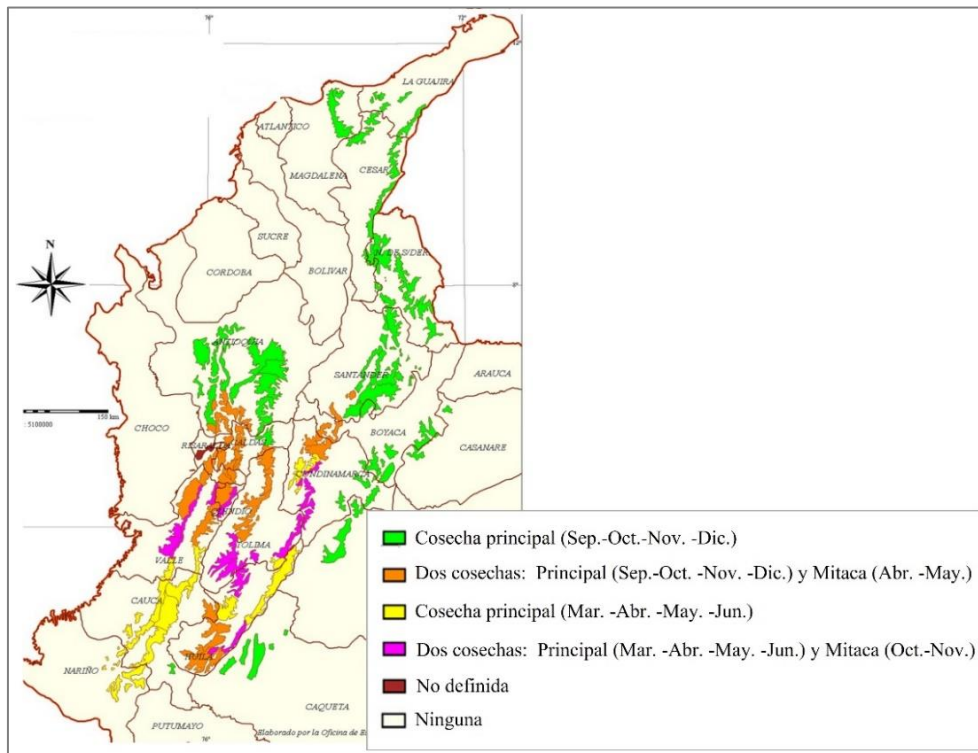
Colombia tiene una ventaja comparativa con respecto a otros países en la producción de biomásas, debido a su enorme biodiversidad, posición geográfica preferencial y riqueza hídrica. Por lo cual, ha generado políticas que promueven el mercado de biocombustible, no solo para el consumo interno, sino también con fines de exportación (Conpes, 2008). Adicionalmente, cuenta con una variedad de residuos de origen agroindustrial con amplio potencial para la generación de energía que no están siendo aprovechados. Sin embargo, el desarrollo del mercado de biocombustibles ha sido lento, actualmente solo 10 % de mezclas de bioetanol y biodiesel, ha sido autorizado dadas las restricciones en la oferta interna (Conpes, 2022).

En cuanto al café, Colombia es el tercer productor mundial después de Brasil y Vietnam (ICO, 2022), con un área de cultivo de 840,11 miles de hectáreas a lo largo del territorio nacional. Con presencia en 22 de los 32 departamentos que la conforman (FNC, 2022), mostrando un atractivo potencial para la obtención de bioetanol a partir de los residuos de café. Uno de los aspectos más importantes del diseño de la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos agrícolas, es establecer la disponibilidad de biomasa según las operaciones de cosecha. Dadas las condiciones geográficas del país, cada región cafetera presenta condiciones particulares de disponibilidad de agua, temperatura, radiación solar y régimen de vientos. Por tanto, las temporadas de cosecha varían según la latitud de las regiones. Por lo general, la cosecha principal tiene lugar entre septiembre y diciembre y la secundaria (mitaca) entre abril y junio (ver Figura 4-7).

Con base en la cantidad de hectáreas cultivada se obtiene la disponibilidad de pulpa y mucílago. En cuanto a los tallos de café, la renovación de cultivos (corte de tallos) se lleva a cabo en el 20% de las fincas cada año (FNC, 2013). Se supone que este proceso tiene lugar en un período de tiempo diferente a la temporada de cosecha. Con base en la generación potencial de residuos, los caficultores (fincas) se agruparon en cinco regiones; además, se seleccionaron cuatro posibles ubicaciones para centros de acopio y tres para biorrefinerías. Por otro lado, la demanda se dividió en tres zonas: (1) norte, (2) centro y (3) sur del país (Figura 4-8). Para cada zona se obtuvo la demanda con base al

consumo de gasolina, y la tasa de mezcla establecida por la normatividad nacional (bioetanol + combustible fósil). El horizonte de planificación fue de cinco años, divididos en periodos mensuales. Los parámetros de entrada utilizados con las correspondientes fuentes de información se presentan en el Anexo J.

Figura 4-7: Mapa de cosecha de café en Colombia

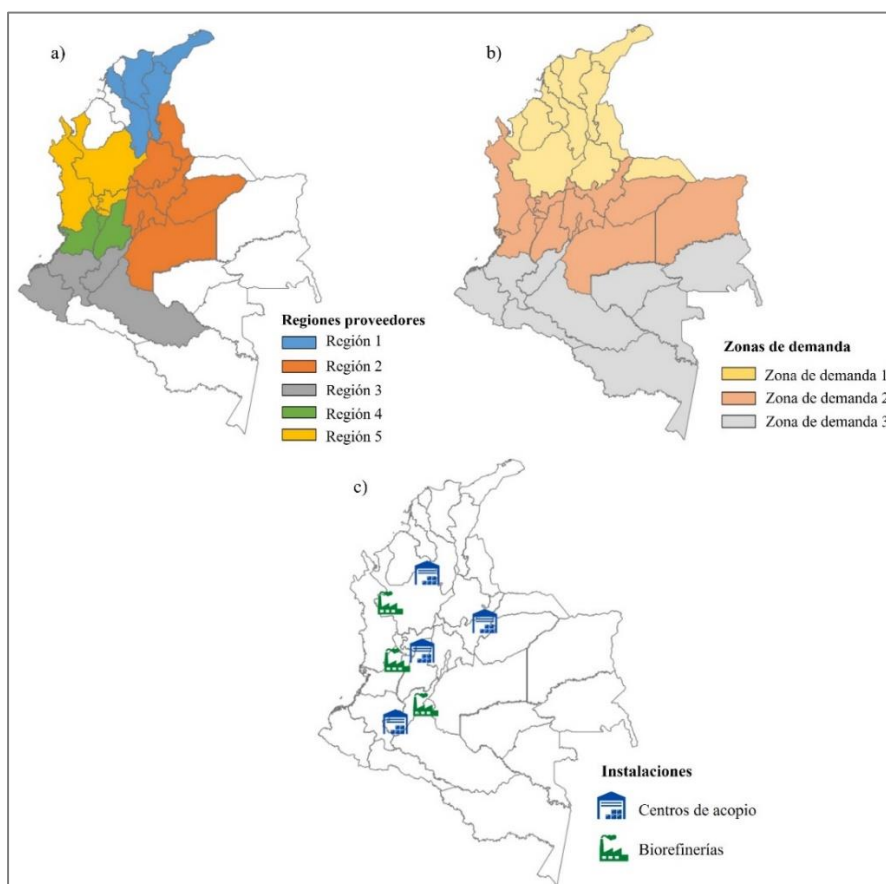


Fuente: Adaptado de Federación nacional de cafeteros de Colombia (2022)

Para abordar este caso de estudio se plantea un modelo de programación lineal entera mixta de objetivos múltiples (*MOMILP*). El modelo propone una estrategia de configuración dinámica, analizando sus efectos en las decisiones de instalaciones, inventario y flujo de materiales, así como el desempeño de la cadena de abastecimiento en términos económicos, ambientales y sociales. Se consideran tres residuos de café como biomasa y se asume transporte directo entre los eslabones de la red de suministro. Como se mencionó las decisiones de ruteo de vehículos no se incorporan en este caso de estudio, debido a cuestiones de confidencialidad y seguridad por parte de la Federación de Cafeteros de Colombia, con relación a la información detallada sobre ubicaciones y disponibilidad de suministro de cada finca cafetera.

Para obtener la solución ideal de F1, F2 y F3 (diagonal de la matriz de pago), cada modelo se resolvió por separado, obteniendo las matrices de pago que se presentan en la Tabla 4-5. El problema multiobjetivo se resuelve con el método de las restricciones (ϵ -constraint). Este método permite analizar los valores de las funciones objetivo para diferentes límites de ϵ . Con base en los resultados se determinan las soluciones no dominadas que conforman la frontera de Pareto, las cuales se presentan en la Figura 4-9.

Figura 4-8: Contexto geográfico del caso de estudio de la región cafetera de Colombia



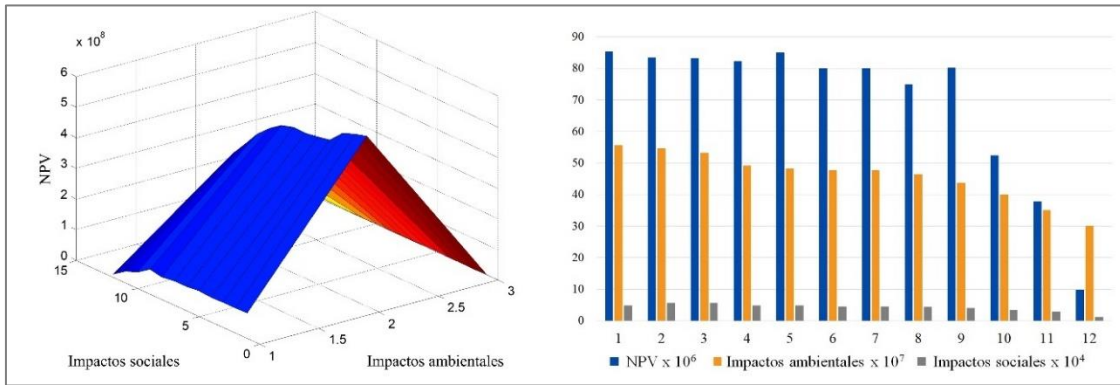
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-5: Matriz de pago del caso de estudio de la región cafetera de Colombia

	<i>NPV</i>	Impactos ambientales	Impactos sociales
Max. <i>NPV</i>	\$85,213,455.08	\$555,680,690.40	48,576.49
Min. Impactos ambientales	\$-	\$277,559,695.67	0
Max. Impactos sociales	-\$155,249,319.92	\$634,591,117.39	62,342.41

Fuente: Elaboración propia

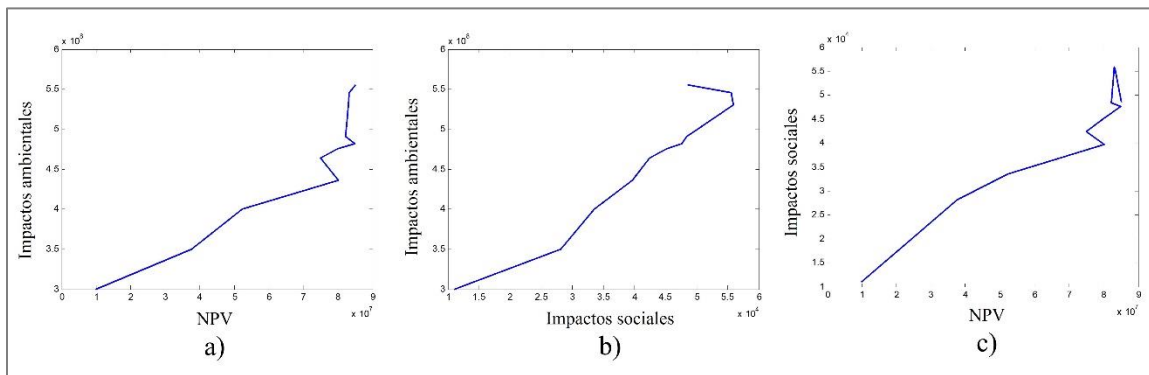
Figura 4-9: Resultados de soluciones no dominadas



Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

Entre los objetivos que se pretende optimizar (económicos, ambientales y sociales) existe un cierto grado de conflicto. Puesto que, si se aumenta la capacidad del sistema, teniendo en cuenta una demanda con tendencia creciente (como es el caso de los biocombustibles), el valor presente neto (*NPV*) se incrementaría, al igual que el aporte a la tasa de empleo y a la seguridad alimentaria (impactos sociales). No obstante, se degradaría la calidad del agua y aire debido a la contaminación que generan los procesos de operación y distribución de la cadena de suministro (Figura 4-10).

Figura 4-10: Comparación funciones objetivo caso de estudio región cafetera de Colombia



Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

Se realizó un análisis de *trade-off* para las tres funciones objetivo y las 12 soluciones no dominadas, el promedio entre todas las posibles combinaciones se presenta en la Tabla 4-6. Por ejemplo, aumentar el *NPV* en una unidad (F1) implica un aumento de los impactos ambientales negativos de 14,56 USD (empeoramiento F2). Asimismo, mejorar los impactos sociales en una unidad (mejorar F3) implica un deterioro de \$14,916.77 USD en el impacto ambiental (empeorar F2). El cálculo de *trade-off* se basa en el enfoque descrito en Hurford et al. (2014).

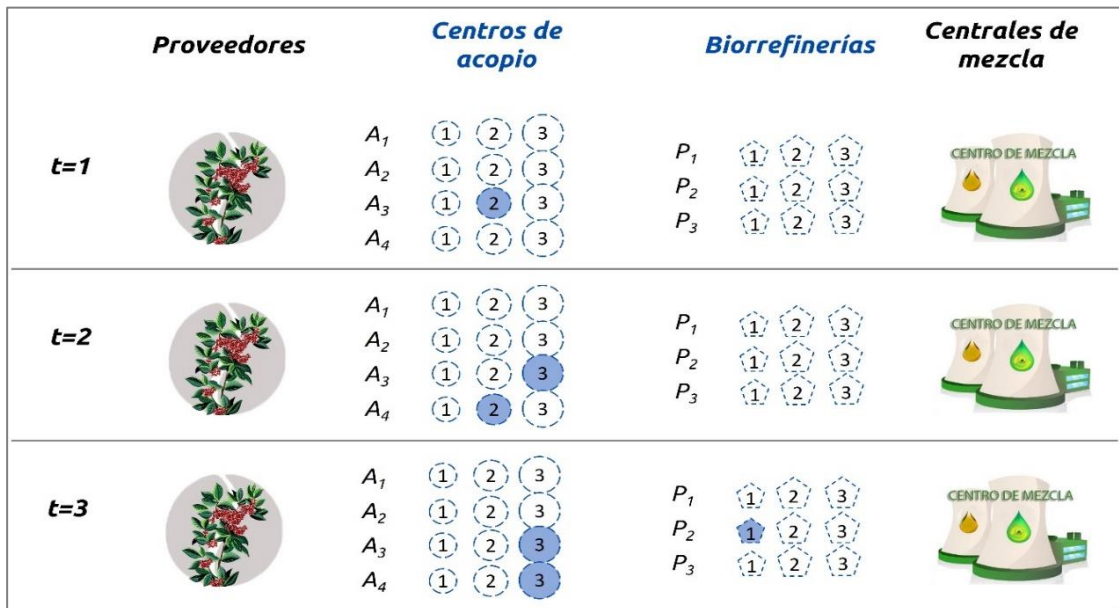
Tabla 4-6: Promedio de *trade-off* para las funciones objetivo del caso de estudio

		Degradación		
		NPV [\$]	Impactos ambientales [\$]	Impactos sociales [unidad]
Mejoramiento	NPV (↑ \$1)	-	14.56	n.a
	Impactos ambientales (↑ \$1)	0.27	-	0.00017
	Impactos sociales (↑1 unidad)	n.a	\$14,916.77	-

Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

La estrategia de configuración dinámica (apertura, expansión y cierre) permite una mayor flexibilidad en la toma de decisiones de localización, para optimizar el desempeño de la cadena de suministro en el largo plazo. Como ejemplo se presenta la evolución de la configuración de la cadena de suministro para la solución no dominada 5. Los periodos de tiempo uno a tres se muestra en la Figura 4-11. Como se puede observar, en el periodo $t = 1$, el centro de acopio ubicado en la región A_3 es abierto con una capacidad media (2). De manera similar, en el período $t = 2$, el centro de acopio ubicado en la región A_4 se abre con una capacidad media (2) y el centro de acopio ubicado en la región A_3 se expande de capacidad media (2) a grande (3). Estos centros de acopio permiten el almacenamiento de tallos de café para garantizar suficiente materia prima para la apertura de la primera biorrefinería en la región 2 (P_2) con capacidad pequeña, durante el período de tiempo $t = 3$. En este mismo periodo se amplía la capacidad del centro de acopio ubicado en la región A_4 .

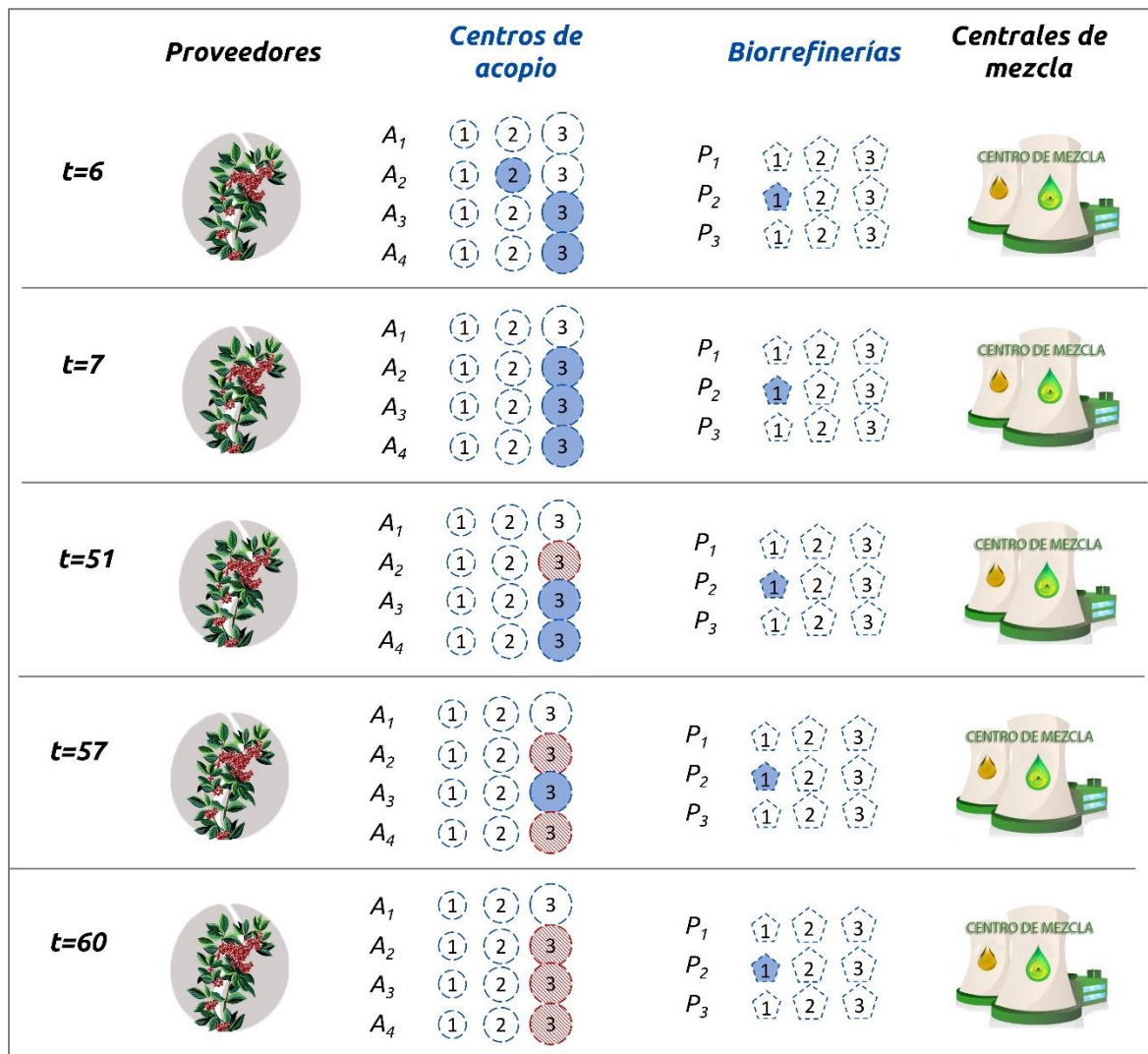
Figura 4-11: Evolución de la configuración de la cadena de suministro para los periodos 1, 2 y 3



Fuente: Elaboración propia

En los periodos de tiempo 4 y 5 la configuración de la cadena permanece sin cambios, hasta que en el periodo de tiempo 6 se abre el centro de acopio ubicado en la región A_2 con una capacidad media, la cual se expande en el periodo de tiempo 7 (Figura 4-12). La cadena de abastecimiento opera a lo largo de los siguientes periodos con esta configuración hasta los periodos de tiempo 51, 57 y 60, en los cuales se cierran los centros de acopio A_2 , A_4 y A_3 respectivamente (Figura 4-12). Esta decisión estratégica está directamente relacionada con los ingresos generados por el valor de salvamento considerado en el modelo. Finalmente, el plan de inversión a largo plazo se resume en la Tabla 4-7.

Figura 4-12: Configuración de la cadena de suministro en los periodos 6, 7, 51, 57, 60



Fuente: Elaboración propia

Continuando con los resultados obtenidos de la solución no dominada No.5, el costo de producción de bioetanol fue de 0,36 USD/L. Considerando que, en el mercado interno, el precio de venta del

bioetanol es de 0,77 USD/L⁵, este resultado parece factible desde el punto de vista económico. La Figura 4-13 muestra el costo de producción (USD/L) para todas las soluciones no dominadas.

Tabla 4-7: Plan de inversión para la quinta solución no dominada

Periodo	Decisión	Inversión (USD)
$t = 1$	Apertura del centro de acopio en la región 3 (A_3) Capacidad: Mediana (2)	\$2,751,325.61
$t = 2$	Apertura del centro de acopio en la región 4 (A_4) Capacidad: Mediana (2)	\$2,698,415.50
	Expansión del nivel de capacidad del centro de acopio A_3 Capacidad inicial: Mediana (2) Capacidad final: Grande (3)	\$2,118,718.34
$t = 3$	Apertura de la biorrefinería en la región 2 (P_2) Capacidad: Pequeña (1)	\$15,352,554.08
	Expansión del nivel de capacidad del centro de acopio A_4 Capacidad inicial: Mediana (2) Capacidad final: Grande (3)	\$2,077,973.75
$t = 6$	Apertura del centro de acopio en la región 2 (A_2) Capacidad: Mediana (2)	\$2,751,325.61
$t = 7$	Expansión del nivel de capacidad del centro de acopio A_2 Capacidad inicial: Mediana (2) Capacidad final: Grande (3)	\$2,118,718.34
$t = 51$	Cierre del centro de acopio A_2	\$487,004.40
$t = 57$	Cierre del centro de acopio A_4	\$477,638.93
$t = 60$	Cierre del centro de acopio A_3	\$487,004.40
Inversión total en instalaciones		\$31,320,678.96

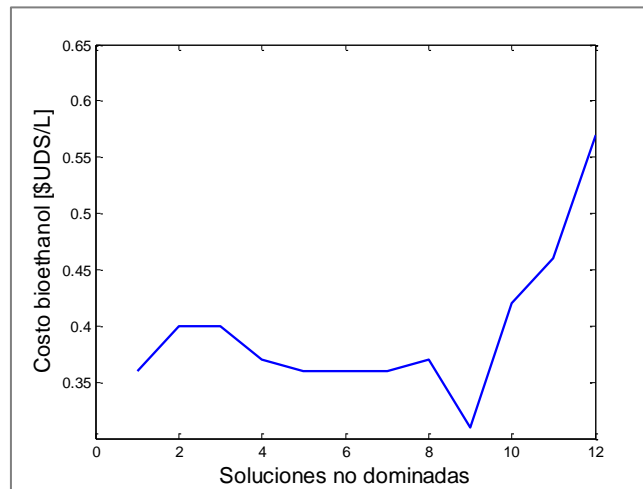
Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

Por otra parte, el NPV obtenido por es de 84.918.406,87 USD, con un impacto ambiental de 481.514671,4 USD. Como se muestra en la Figura 4-14, los residuos de café que no se utilizan como biomasa y las operaciones de transporte, son los más contaminantes en la cadena de suministro. Con

⁵ Información año 2017

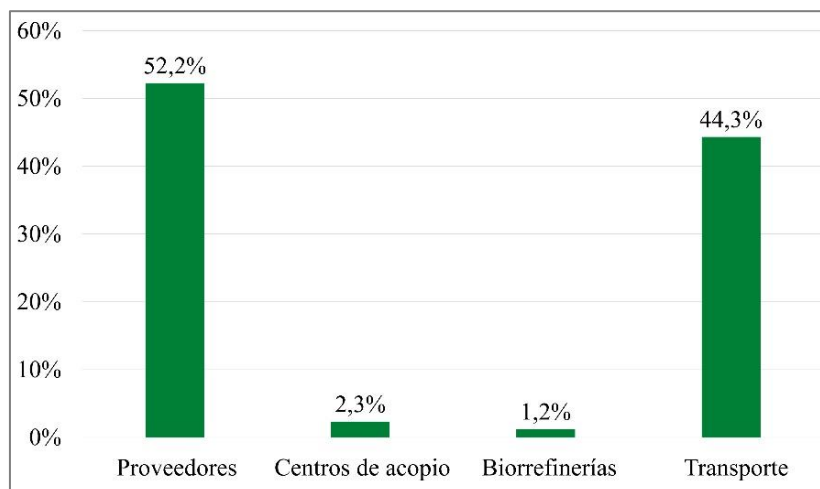
relación a los impactos sociales, además de los empleos generados, el bioetanol producido con residuos de café equivale a lo que se produciría con 43.608,2 hectáreas cultivadas con caña de azúcar (si se obtuviera el bioetanol de este tipo de biomasa). Esta cantidad de tierra puede ser utilizada para contribuir a la seguridad alimentaria de la población.

Figura 4-13: Costo de producción de bioetanol (soluciones no dominadas)



Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

Figura 4-14: Porcentaje de costo de impactos ambientales (solución no dominada 5)



Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

La disponibilidad de biomasa, el precio y la demanda del bioetanol son factores que inciden en la viabilidad de la cadena de suministro. La cantidad de residuos disponibles depende directamente de la producción de café, que a su vez está sujeta a varios factores, como el clima, las plagas, la

renovación de cafetales y el rendimiento de los cultivos. Por otro lado, teniendo en cuenta la normativa colombiana, la mezcla de bioetanol y combustible fósil debe incrementarse gradualmente para cumplir con las metas ambientales definidas por el gobierno nacional. Por tanto, se realizó un análisis de sensibilidad considerando los cuatro escenarios descritos en la Tabla 4-8.

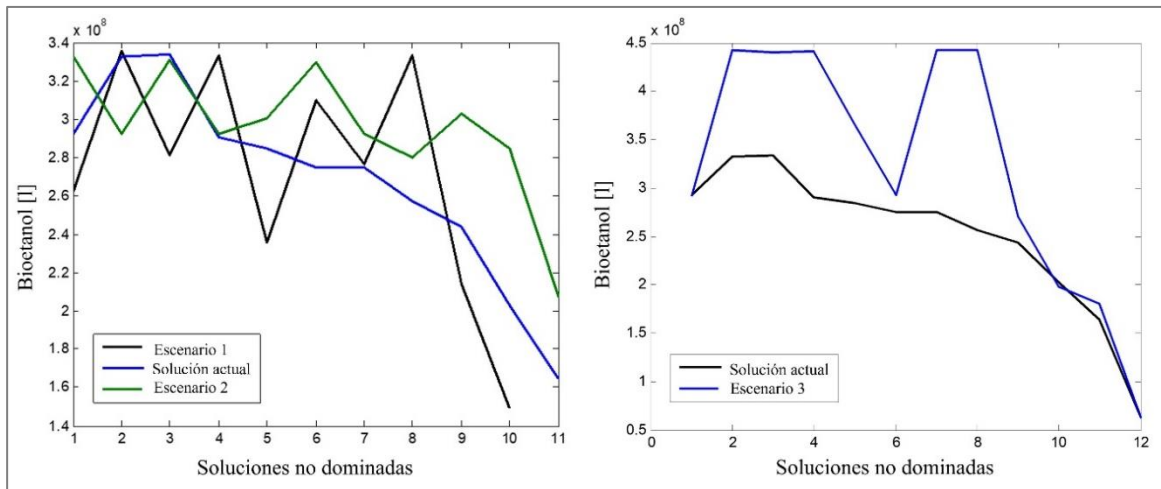
Tabla 4-8: Descripción de escenarios para el análisis de sensibilidad

Escenario	Descripción
1	Disminución anual del 10% en la cantidad disponible de residuos
2	Aumento anual del 10% en la cantidad disponible de residuos
3	Aumento anual del 15% en la demanda del bioetanol
4	Aumento anual del 10% en el precio del bioetanol

Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

En la Figura 4-15 se presentan los resultados obtenidos para los tres primeros escenarios propuestos, los cuales relacionan variaciones de oferta (disponibilidad del suministro) y demanda. Como se puede observar, la fluctuación de la cantidad de suministro disponible (10% de disminución y aumento, escenario 1 y 2) no genera cambios significativos en la producción de biocombustible. Por su parte, el escenario 3 considera un incremento anual del 15% en la demanda de bioetanol, el cual genera una mayor producción en 9 soluciones no dominadas (75%), manteniendo el costo unitario (USD/l) en el intervalo [0,34 - 0,59] similar a la solución inicial.

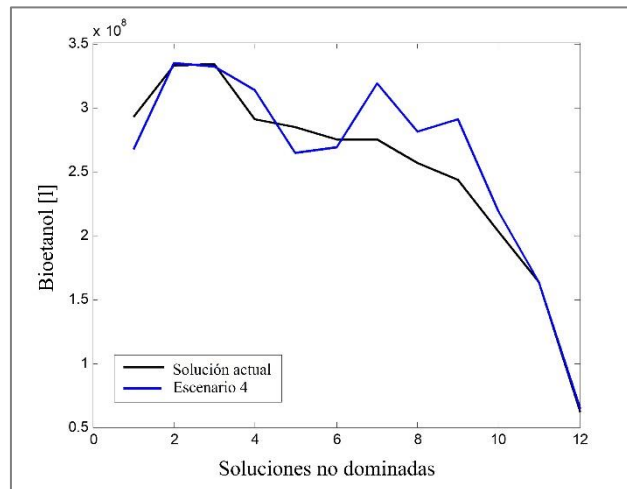
Figura 4-15: Análisis de sensibilidad para escenarios 1,2 y 3



Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

En el escenario 4, se abordó la sensibilidad de la solución con respecto al incremento anual del 10% del precio del bioetanol. Como se puede observar en la Figura 4-16, los resultados son similares a los obtenidos con la solución actual. Sin embargo, en algunas de las soluciones no dominadas (7 de 12) se evidencia un incremento en la producción.

Figura 4-16: Análisis de sensibilidad para escenario 4 - Precio de bioetanol



Fuente: Morales-Chávez et al. (2018)

4.3 Discusión de resultados

La hipótesis general de investigación en la cual se enmarca el desarrollo de esta tesis doctoral es:

H_1 : *El diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, mediante la integración sostenible de las decisiones de instalaciones, ruteo e inventario, permite lograr un desempeño equilibrado entre la eficiencia económica, la eficiencia ambiental y la eficiencia social.*

De acuerdo con esto, las variables que subyacen a la hipótesis son las siguientes:

Variable dependiente: desempeño de la cadena de abastecimiento en términos de eficiencia económica, ambiental y social (sostenibilidad).

Variable independiente: Estructura de la cadena de abastecimiento considerando de forma simultánea y sostenible las decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios.

Adicionalmente, como resultado de la identificación de vacíos de conocimiento, se pudo determinar que en el campo del *SCND* existe una falencia importante en el sentido de que todos los modelos que siguen una formulación *ILRP* asumen una estrategia de configuración estática, lo cual no resulta

realista en el proceso de toma de decisiones, por tanto, como complemento a la hipótesis que dio origen a la investigación, y con el fin de mejorar el proceso experimental se decidió proponer la siguiente hipótesis adicional:

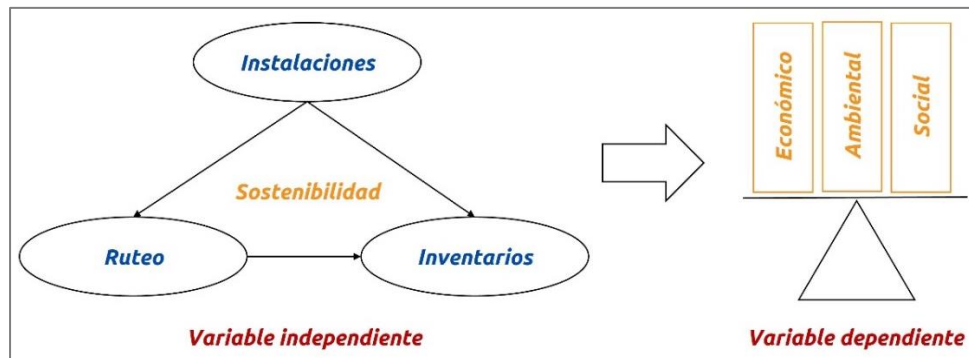
H₂ : “Una estrategia de configuración dinámica de instalaciones (apertura, expansión y cierre en cualquier período de tiempo), aplicada al diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos agrícolas, permite obtener mejor desempeño económico, ambiental y social en comparación con una estrategia de configuración estática”.

Con el objetivo de contrastar las hipótesis planteadas, se realizan una serie de experimentos tanto para el caso de estudio de la región cafetera de Colombia, como para el conjunto de datos de prueba. Los experimentos realizados se enfocan en el análisis de las medidas de desempeño sostenible (económico, ambiental, social) al comparar las estrategias de configuración de instalaciones (estática vs dinámica), el modo de transporte para la recolección de residuos (transporte directo vs ruteo de vehículos), las funciones objetivo consideradas (mono objetivo vs multiobjetivo) y el enfoque de modelación matemática (determinístico vs estocástico).

4.3.1 Discusión conjuntos de datos de prueba

La hipótesis general de investigación busca demostrar que la *integración sostenible* de las decisiones de instalaciones, ruteo e inventario (variable independiente), logra que el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café tenga un *desempeño equilibrado* en términos económicos, ambientales y sociales (variable dependiente) (Figura 4-17).

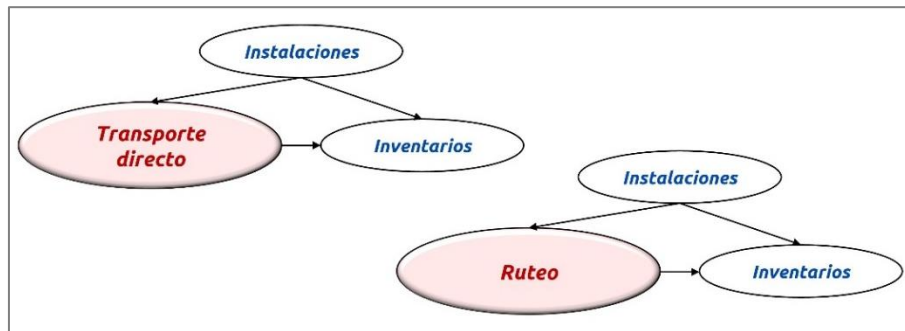
Figura 4-17: Hipótesis general de investigación



Fuente: Elaboración propia

Para demostrar la hipótesis de investigación, inicialmente se analizará el impacto que tiene en el diseño de la cadena de suministro considerar transporte directo o ruteamiento de vehículos para la recolección de los residuos agrícolas (Figura 4-18). Con este fin, se ajusta el modelo matemático propuesto y se utiliza en los conjuntos de pequeña escala (P1 a P5) bajo un enfoque determinístico. Para este análisis se generan dos versiones del modelo, en la primera versión se recolectan los residuos a través de transporte directo y en la segunda por medio de vehículos que pueden visitar a varios proveedores en una misma ruta.

Figura 4-18: Transporte directo vs ruteo de vehículo



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que los resultados de cada versión presentan diferencias significativas en la cantidad de biocombustible producido, para poder realizar la comparación, se divide cada costo por el número de litros de biocombustible obtenido en cada caso. En la Tabla 4-9 se observa que indudablemente los costos asociados al ruteo de vehículos son inferiores en gran medida a los que resultan de utilizar transporte directo. No obstante, el impacto ambiental relacionado con la generación de CO₂ presenta niveles más altos. Esto se debe a que el CO₂ emitido por el transporte no solo depende del kilometraje recorrido, también considera la carga que lleva el vehículo en cada trayecto.

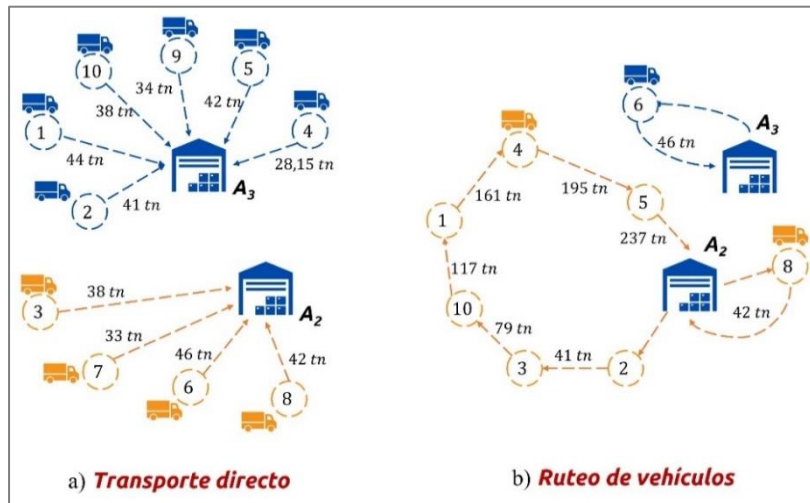
La Figura 4-19 ilustra las dos soluciones (transporte directo vs ruteo de vehículos) para la recolección del residuo 1 en el periodo de tiempo 1 para el conjunto de datos 3. En la Figura 4-19b se puede evidenciar cómo los vehículos acumulan la carga en la medida que van realizando la ruta, lo que hace que cuando se calcula el CO₂ generado se obtengan valores más altos. Por el contrario, al realizar el transporte directo cada vehículo solo carga la entrega de un proveedor y por tanto su generación de CO₂ es menor (Figura 4-19a).

Tabla 4-9: Comparación de costos de transporte para recolección de residuos - transporte directo vs ruteo de vehículos

	Conjuntos de datos	Transporte directo	Ruteo	Diferencia [%]
Costo de transporte desde los proveedores a los centros de acopio	Conjunto 1	\$ 0,08	\$ 0,0024	-3085%
	Conjunto 2	\$ 0,06	\$ 0,0021	-2557%
	Conjunto 3	\$ 0,04	\$ 0,0020	-2041%
	Conjunto 4	\$ 0,07	\$ 0,0023	-2833%
	Conjunto 5	\$ 0,04	\$ 0,0020	-1871%
Costo de CO ₂ generado por el transporte desde los proveedores a los centros de acopio	Conjunto 1	\$ 0,00012	\$ 0,00025	52%
	Conjunto 2	\$ 0,00011	\$ 0,00020	47%
	Conjunto 3	\$ 0,00011	\$ 0,00028	60%
	Conjunto 4	\$ 0,00011	\$ 0,00023	51%
	Conjunto 5	\$ 0,00010	\$ 0,00028	64%

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-19: Asignación de transporte para la recolección del residuo 1 en el periodo de tiempo 1 para el conjunto 3



Fuente: Elaboración propia

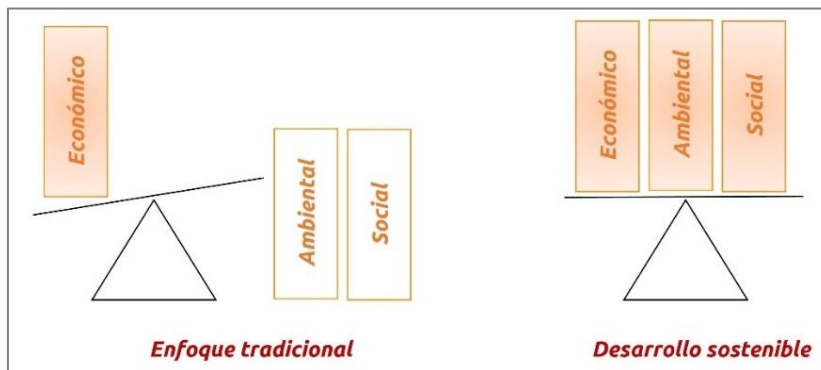
Debido a que los proveedores de residuos de café son un conjunto de granjas geográficamente dispersas en donde la cantidad de biomasa generada es inferior a la capacidad de los vehículos, utilizar transporte directo para la recolección es poco realista. Sin embargo, los resultados anteriores muestran la necesidad de incorporar un enfoque sostenible en el diseño de la cadena de suministro, que no solo tome decisiones considerando métricas económicas sino también los impactos

medioambientales que se generan inevitablemente de los procesos de operación de la cadena de abastecimiento.

Por otro lado, es importante resaltar que la hipótesis de investigación no solo habla de la integración de las decisiones (*ILRP*), sino de su integración sostenible, que permita obtener el equilibrio en los tres pilares de la sostenibilidad. Como se determinó en la revisión sistemática de la literatura, un porcentaje mínimo (9%) de las contribuciones que consideran estas tres decisiones en conjunto lo hacen incorporando objetivos económicos, ambientales y sociales. Por el contrario, el 73% de los artículos se enfocan solo en la optimización de la dimensión económica.

Con el fin de observar la brecha que se genera al utilizar la optimización tradicional de un solo objetivo en contraste con técnicas matemáticas diseñadas para un enfoque multicriterio (Figura 4-20), se utiliza el modelo matemático y la metodología de solución propuesta en los conjuntos de datos de pequeña escala (P1 a P5) para los tres niveles de incertidumbre (5%, 10% y 25%) buscando el mejor rendimiento económico. Para tal fin los pesos utilizados en la PHeu fueron (1 – 0 – 0) para la dimensión económica, ambiental y social respectivamente.

Figura 4-20: Optimización dimensión económica vs enfoque multicriterio

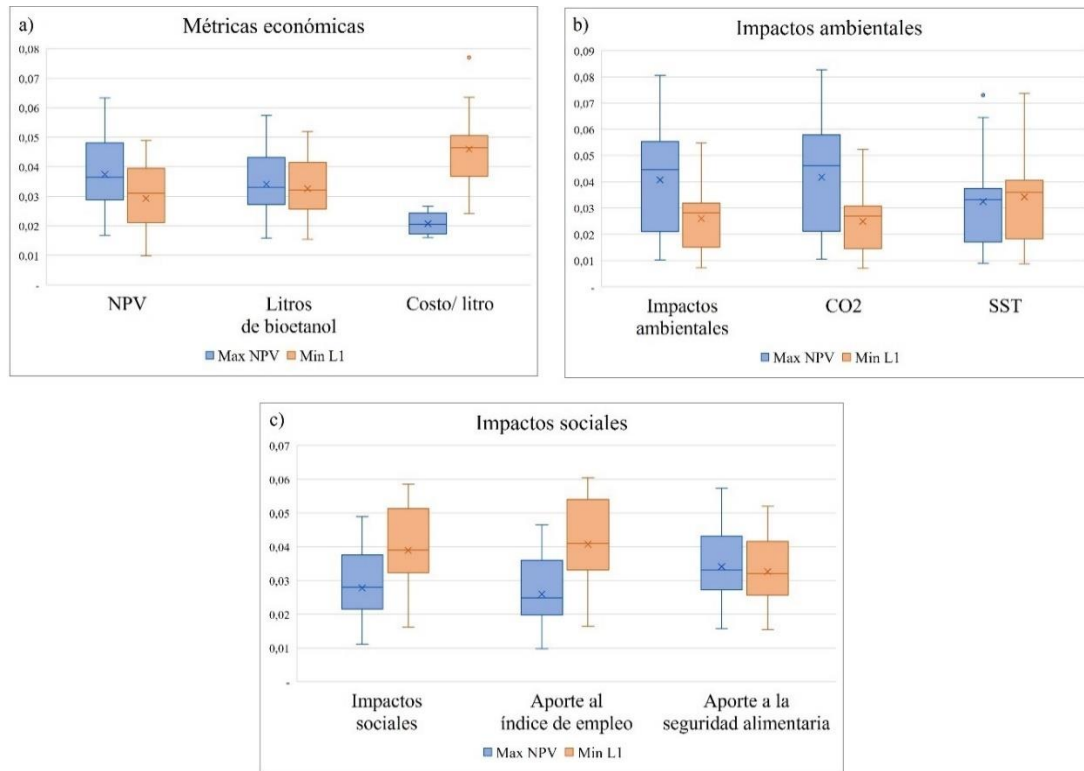


Fuente: Elaboración propia

Al comparar los resultados obtenidos (Maximización del *NPV*) con los presentados en la Sección 4.1, en donde se minimiza la métrica L_1 (programación compromiso) se observa una notable discrepancia entre las tres dimensiones de la sostenibilidad (Figura 4-21⁶). Como se puede observar en la Figura 4-21a los dos enfoques logran un nivel de producción de biocombustible muy similar.

⁶ Para visualizar los indicadores de desempeño en la gráfica, se determina el porcentaje relativo de cada indicador (cada valor de desempeño/suma de todos los valores del conjunto de datos).

Figura 4-21: Resultados de la comparación mono objetivo (minimizando costo) vs enfoque multiobjetivo (CP)



Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, el *NPV* como era lo esperado, tiene un mejor desempeño al igual que el costo/ litro de biocombustible cuando la dimensión económica es la que se optimiza. Sin embargo, obtener un mejor rendimiento económico ignorando las implicaciones ambientales y sociales tiene grandes efectos en el desempeño de toda la cadena de abastecimiento.

La Figura 4-21b muestra cómo los impactos ambientales se incrementan considerablemente cuando no se consideran dentro del diseño de la red de suministro. En particular el CO₂ es el indicador que más efecto tiene en el aumento de estos los impactos. Por otro lado, la Figura 4-21c ilustra la disminución en los impactos sociales, disminución que depende directamente del aporte a índice de empleo. En cuanto a la seguridad alimentaria, como está en función de los litros producidos, no se nota una diferencia significativa.

En la Tabla 4-10 se presenta la diferencia que se obtiene al buscar un equilibrio en las tres dimensiones de la sostenibilidad. Aunque el *NPV* sacrifica un 28% su rendimiento, se observa como

los impactos ambientales mejoran en un 57%. De igual manera el aporte al índice de empleo aumenta en un 36%, lo que lleva a mejorar los impactos sociales en general. Es importante tener en cuenta que estos dos enfoques son los extremos de una diversidad de soluciones que el centro decisor puede considerar al combinar diferentes pesos para los objetivos económicos, ambientales y sociales. De este análisis se puede concluir que la integración sostenible de las decisiones de instalaciones, ruteo e inventario permite lograr un desempeño equilibrado entre los tres pilares del desarrollo sostenible, demostrando la hipótesis general de esta tesis doctoral.

Tabla 4-10: Comparación de los promedios de los resultados obtenidos (Max *NPV* vs Min *L*₁)

Términos	Max <i>NPV</i>	Min <i>L</i> ₁	Diferencia [%]
<i>NPV</i>	\$ 19.771.950,14	\$ 15.502.297,97	-28%
Litros de bioetanol	975.291,15	933.380,97	-4%
Costo/ litro	\$ 3,59	\$ 7,95	55%
Impactos ambientales	\$ 89.031,41	\$ 56.841,81	-57%
CO ₂	\$ 80.658,87	\$ 48.021,03	-68%
SST	\$ 8.372,54	\$ 8.820,79	5%
Impactos sociales	541,21	58,36	29%
Aporte al índice de empleo	391,74	615,32	36%
Aporte a la seguridad alimentaria	149,47	143,05	-4%

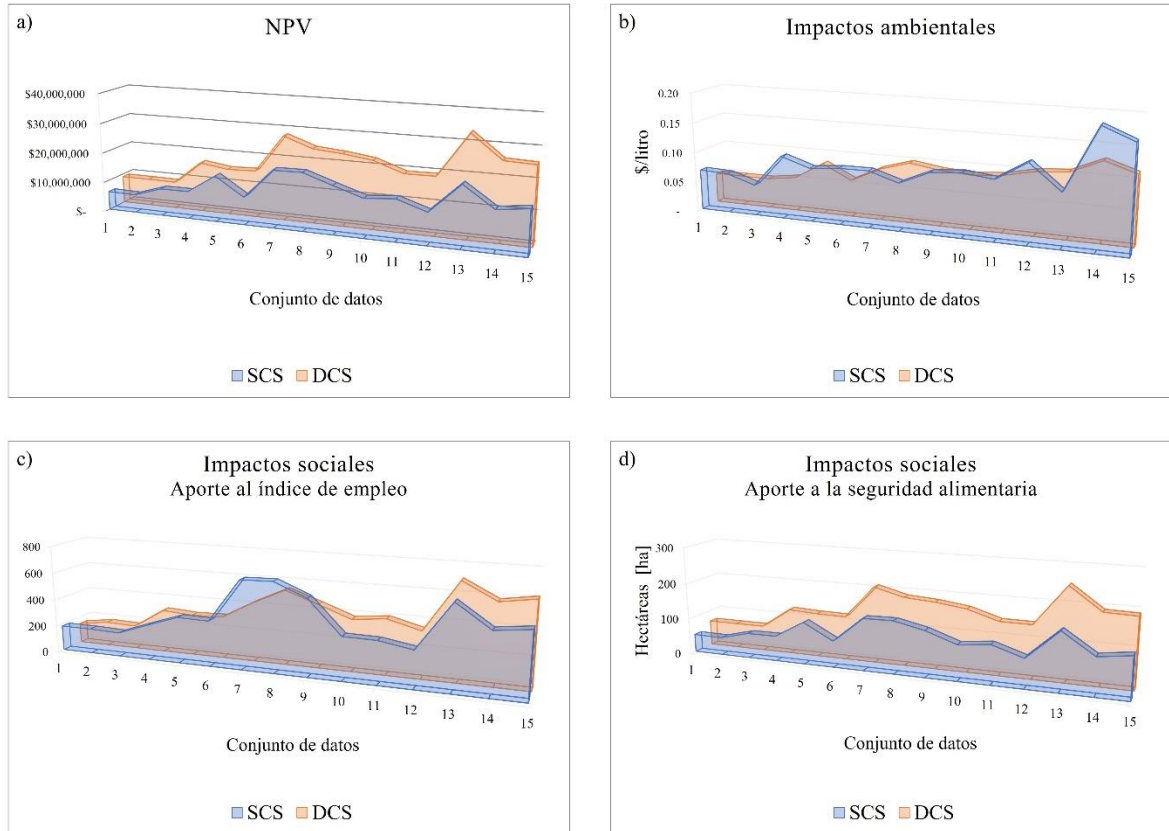
Fuente: Elaboración propia

Continuando con los análisis de las hipótesis de investigación planteadas, en la Figura 4-22 se pueden observar las ventajas de implementar la novedad más relevante de esta tesis doctoral en términos de configuración de instalaciones, la denominada Estrategia de Configuración Dinámicas (*DCS*). Para este análisis se utiliza además del modelo matemático propuesto, una versión ajustada que considera una estrategia de configuración estática (*SCS*). Los conjuntos de datos considerados son los de tamaño pequeño (P1-P5) con sus respectivos tres niveles de incertidumbre (15 conjuntos de datos en total).

La Figura 4-22a muestra que la *DCS* genera en todos los casos un *NPV* mayor. Alcanzar este objetivo económico conlleva unos impactos ambientales más bajos que si se utilizara una estrategia de configuración estática (Figura 4-22b). Por otro lado, teniendo en cuenta el comportamiento de los impactos sociales identificado en el caso de estudio de la región cafetera de Colombia, se decide analizar además de los impactos totales, cada uno de forma independiente (aporte al índice de empleo, seguridad alimentaria). En consecuencia, se observa en la Figura 4-22c que el aporte al

índice de empleo no tiene un comportamiento de mejora en todos los casos para ninguna de las estrategias de configuración. Por el contrario, un *SCND* que sigue *DCS* obtiene un aporte a la seguridad alimentaria más alto (Figura 4-22d).

Figura 4-22: Comparación estrategias de configuración Dinámica vs Estática



Fuente: Elaboración propia

Para corroborar este análisis descriptivo se realizan las pruebas de hipótesis correspondientes que permitan demostrar si existe diferencia significativa entre las soluciones obtenidas. De acuerdo con la prueba de normalidad, para el caso del *NPV* y los impactos sociales se utiliza la prueba T pareada y para analizar los impactos ambientales la prueba de Wilcoxon.

De la Tabla 4-11 se puede concluir que para las medidas de desempeño *NPV* e impactos ambientales la *DCS* permite obtener un mejor desempeño. Con relación a los impactos sociales no hay una diferencia significativa entre las dos estrategias de configuración. Por tanto, de acuerdo con el concepto de optimalidad paretiana (ver Sección 3.1), la solución obtenida al utilizar la estrategia de configuración dinámica domina a la solución generada cuando el *SCND* sigue una estrategia de configuración estática. Por otra parte, al analizar las componentes que integran el impacto social, se

observa una dominancia completa (superioridad en los tres componentes) en el caso del aporte a la seguridad alimentaria. Con relación al aporte al índice de empleo se mantiene la dominancia puesto que no difieren significativamente. En consecuencia, la hipótesis H_2 queda demostrada.

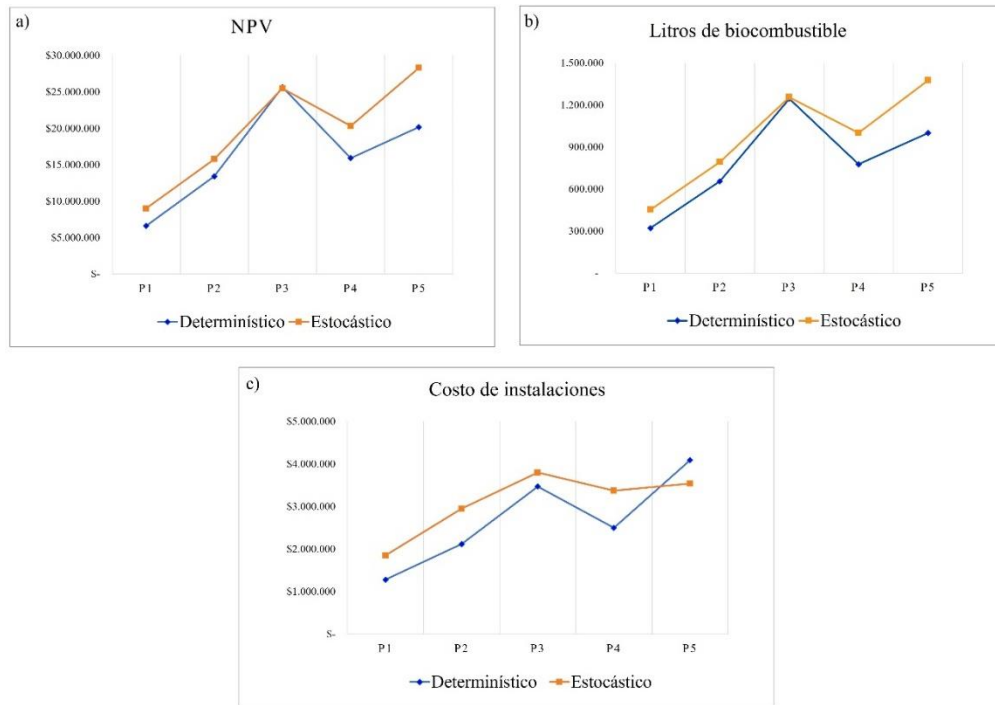
Tabla 4-11: Prueba de hipótesis comparación entre estrategias *DCS* y *SCS*

<i>NPV</i>	Impactos ambientales	Impactos sociales
Valor $p = 0,000017$ (Prueba T) $H_0 \rightarrow$ se rechaza	Valor $p = 0,018780$ (Prueba Wilcoxon) $H_0 \rightarrow$ se rechaza	Impactos sociales totales Valor $p = 0,065256$ (Prueba T) $H_0 \rightarrow$ no se rechaza
		Impactos sociales: aporte al índice de empleo Valor $p = 0,765992$ (Prueba T) $H_0 \rightarrow$ no se rechaza
		Impactos sociales: aporte a la seguridad alimentaria Valor $p = 0,000010$ (Prueba T) $H_0 \rightarrow$ se rechaza

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se realizó un experimento con el fin de observar el comportamiento de un diseño de cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos agrícolas, bajo una modelación estocástica frente a una determinística. Al comparar los resultados obtenidos (para los conjuntos de datos P1 al P5), se observa que incorporar la incertidumbre en el diseño de la cadena de abastecimiento, genera costos más altos con relación a la apertura, expansión y cierre de instalaciones (decisiones de primera etapa en la programación estocástica – ver Sección 2.4) como se evidencia en la Figura 4-23c. Este incremento en los costos indica que la red de suministro tiene mayor capacidad, debido a que considera variaciones inesperadas en la cantidad de biomasa disponible por parte de los proveedores (parámetro incierto). Debido a esto, se logra una producción de biocombustible mayor que si no se considerara este parámetro incierto (Figura 4-23b), lo que la lleva a obtener un mejor rendimiento del *NPV* (Figura 4-23a). Adicionalmente, una modelación que incorpora en su estructura el componente estocástico resulta más realista para el centro decisor en el sentido que toma en consideración fenómenos de variación que son inevitables en la cotidianidad.

Figura 4-23: Comparación modelación matemática determinística vs estocástica



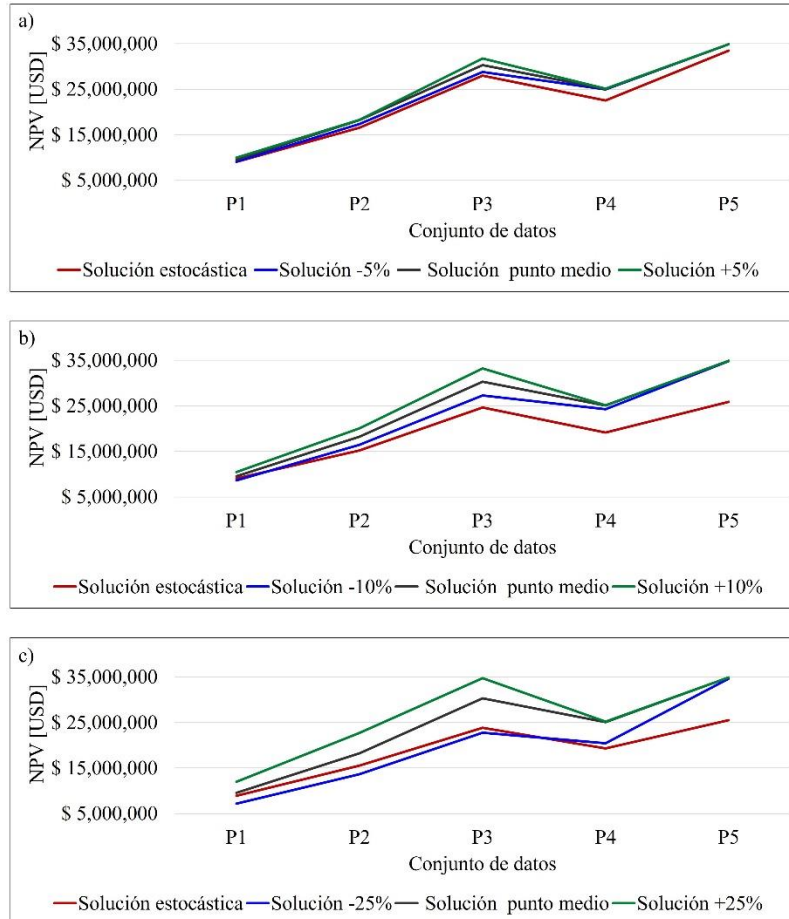
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se realiza un último experimento para evaluar el valor esperado de la información perfecta. Para esto, se compara el valor de la solución estocástica (maximizando el NPV) con la solución si se contara con información perfecta acerca de qué estado ocurrió antes de tomar la decisión. Para los 5 conjuntos de datos de tamaño pequeño se realiza la comparación para los 3 niveles de incertidumbre (5%, 10%, 25%) y los 3 escenarios: 1) si el suministro corresponde al valor medio menos el nivel de incertidumbre; 2) si el suministro corresponde al valor medio; y 3) si el suministro corresponde a valor medio más el nivel de incertidumbre.

La Figura 4-24 muestra que para el nivel de incertidumbre del 5% (Figura 4-24a) el NPV de las soluciones de la información perfecta supera el valor de las soluciones estocásticas, con una diferencia entre el 1% y el 13%. En el caso del 10% de incertidumbre (Figura 4-24b) el comportamiento es similar con diferencias entre el 6% y el 35%, exceptuando el escenario 1 del conjunto de datos 1(P1), en el cual la solución estocástica genera un 4.59% más del NPV. Por último, para el 25% de incertidumbre (Figura 4-24c) se observan 3 casos en los que la solución estocástica obtiene un NPV mayor con diferencias entre el 4.51% y 19%, en los casos restantes la solución generada por la información perfecta da como resultado incrementos entre 6% y 46% (El Anexo P

presenta las soluciones obtenidas). También se observa que entre más se incrementa el valor esperado del suministro mayor es el NPV que se obtiene.

Figura 4-24: Comparación solución estocástica vs solución información perfecta



Fuente: Elaboración propia

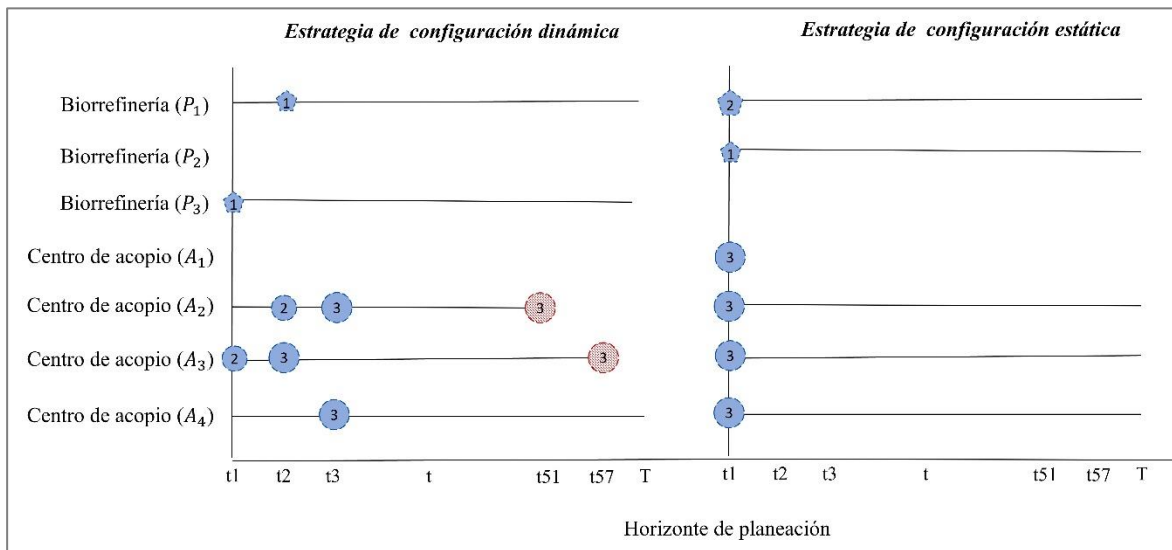
4.3.2 Discusión caso de estudio región cafetera de Colombia

Con el fin de observar el desempeño de la estrategia de configuración dinámica (*DCS*) propuesta en esta tesis doctoral, se resuelve el caso de estudio de la región cafetera de Colombia bajo una estrategia de configuración estática. En la estrategia de configuración estática (*SCS*) las instalaciones solo pueden abrirse en el periodo $t = 1$. Además, no pueden ampliar su nivel de capacidad ni cerrarse. Según la revisión de la literatura, la *SCS* es la estrategia utilizada en todos artículos que abordan el diseño de cadenas de abastecimiento (*SCND: Supply Chain Network Design*) bajo el enfoque del Problema de inventario localización ruteamiento (*ILRP: Inventory Location Routing Problem*).

Una de las bondades de la *DCS* es la flexibilidad en la toma de decisiones estratégicas en instalaciones. Flexibilidad que tiene relevancia en escenarios en donde los parámetros de entrada sufren cambios a lo largo del periodo de planificación. Debido a esto y considerando que en el análisis de sensibilidad realizado (Sección 4.2) se identificó que las soluciones obtenidas son sensibles tanto a la demanda como al precio del bioetanol, se generó un nuevo escenario para la comparación entre la *DCS* y la *SCS*. En este nuevo escenario la demanda se incrementa en un 50% en el periodo $t = 37$ con un incremento adicional del 10% en el periodo $t = 49$. De igual manera, se consideró un incremento anual del 10% en el precio del bioetanol.

La Figura 4-25 presenta las diferencias estructurales en *SCND* derivadas de las dos estrategias de configuración. Se puede observar cómo mientras la *DCS* permite que algunas instalaciones lleguen a su máxima capacidad a lo largo del horizonte de planificación. La *SCS* no tiene más opción que tener capacidad instalada desde el periodo inicial, aun cuando no se requiera en todos los periodos de tiempo.

Figura 4-25: Comparación de la configuración de la cadena de suministro con *DCS* y *SCS*



Fuente: Elaboración propia

Otros hallazgos del análisis se pueden observar en la Tabla 4-12, en donde se evidencia que, en el contexto del escenario propuesto, la estrategia de configuración dinámica muestra un mejor desempeño en el *SCND* en términos de *NPV*, costos e impacto ambiental. En cuanto al *NPV*, se obtuvo un 6% adicional. Esta diferencia se debe a la disminución de los costos de apertura y costos fijos en 38.7%. Cabe resaltar que el valor de los costos de apertura para la *DCS* que se presentan en

la Tabla 4-12 incluyen los valores de expansión de capacidad. Con relación a los impactos ambientales, se logra un 10.7% menos en la contaminación del aire y agua a lo largo de la cadena de suministro.

Por otro lado, los impactos sociales disminuyen, resultado que parece no ser lo adecuado. No obstante, esta situación puede explicarse desde la perspectiva de la generación de empleo. Es decir, en la estrategia de configuración estática el número de puestos de trabajo generados también es fijo y, por tanto, el exceso de mano de obra es evidente cuando la demanda es baja. Si bien, a largo plazo, la preservación del empleo es una meta atractiva para las comunidades, esta decisión afecta el desempeño financiero en términos de *NPV* y costo operativo.

Tabla 4-12: Estrategia *DCS* vs estrategia *SCS*

Términos	<i>DCS</i>	<i>SCS</i>	Diferencia	Porcentaje
NVP	\$148,719,341.02	\$139,791,064.46	\$8,928,276.56	6.0
Impactos ambientales	\$565,762,806.80	\$626,523,274.30	-\$60,760,467.50	-10.7
Impactos sociales (unidades)	64,139.65	70,162.49	-6,022.84	-9.4
Costo total	\$152,403,013.70	\$181,173,749.18	-\$28,770,735.48	-18.9
Costos fijos	\$22,587,450.51	\$31,336,600.20	-\$8,749,149.69	-38.7
Costos de apertura	\$44,926,343.90	\$62,299,158.62	-\$17,372,814.72	-38.7

Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, se puede concluir que, para el caso de estudio de la región cafetera de Colombia, la estrategia de configuración dinámica muestra un mejor desempeño en el *SCND* en términos de *NPV*, costos e impacto ambiental con relación a la estrategia de configuración estática. Por tanto, se hace una comprobación parcial de la hipótesis H_2 .

4.4 Conclusiones parciales

El modelo matemático propuesto se utilizó en un caso de estudio en la región cafetera de Colombia para diseñar una cadena de producción de bioetanol a partir de tres tipos de residuos de café (tallo, pulpa y mucílago). Como resultado, se determinó la configuración de la cadena de suministro y sus cambios estructurales en el tiempo (apertura, expansión y cierre de instalaciones). Considerando el precio del bioetanol en el mercado colombiano, los resultados indican que la cadena de suministro propuesta es factible desde el punto de vista económico.

Por otro lado, el impacto ambiental más representativo para este caso de estudio fue el generado por los residuos de café que se quedan en las fincas y no se utilizan como materia prima para la producción de biocombustible. Por tanto, aprovechar estos residuos como biomasa contribuye no solo a la generación de bioenergía, sino también a la disminución de los impactos ambientales como el CO₂ y la contaminación de las fuentes hídricas. En cuanto a la dimensión social, si bien la generación de empleo es muy importante para las comunidades, el impacto positivo más relevante proviene de las 43.608,2 hectáreas de tierra que podrían liberarse para la producción de alimentos en lugar de cultivar caña de azúcar para obtener biocombustible.

Al analizar los diferentes escenarios de variación del precio del bioetanol y disponibilidad de biomasa, se observó que, a pesar de las fluctuaciones en los parámetros de entrada, la configuración de la cadena de suministro se mantuvo estable en la mayoría de los casos. Así mismo, al contrastar la estrategia de configuración dinámica contra la estrategia de configuración estática, la primera mostró un mejor desempeño de la cadena de suministro en términos de *NPV*, costos e impacto ambiental.

Además del caso de estudio de la región cafetera de Colombia, el modelo matemático propuesto se utilizó en 15 conjuntos de datos tomados de la literatura y adaptados al problema abordado en esta tesis doctoral. Para los conjuntos de datos de tamaño pequeño, se comparó el rendimiento de la heurística de dos fases con las soluciones obtenidas por métodos exactos. Los resultados computacionales muestran que la heurística propuesta es muy competitiva en términos de la calidad de la solución (mejor métrica de distancia de Manhattan L_1).

Adicionalmente, los resultados obtenidos con la metodología de solución propuesta superan a los generados por el paquete de software de optimización comercial GAMS. Sin embargo, con el uso de GAMS, se encontró la mejor solución compromiso posible para cada conjunto de datos de tamaño pequeño (límite inferior para la métrica L_1). Más importante aún, las soluciones compromiso alcanzadas por la heurística propuesta no difieren significativamente del límite inferior encontrado para cada conjunto de datos de tamaño pequeño.

Así mismo, se analiza la eficiencia de la heurística propuesta para resolver conjuntos de datos de mayor tamaño. Los resultados muestran que la propuesta algorítmica funciona eficientemente consumiendo un tiempo de CPU razonable para los conjuntos de mediana y gran escala. El método

propuesto también muestra robustez cuando su tiempo de cálculo es muy similar, cualquiera que sea el nivel de incertidumbre.

Con el objetivo de demostrar las hipótesis de investigación, se realizaron una serie de experimentos de contrastación. Inicialmente se analizó el efecto de considerar ruteamiento de vehículos para el proceso de recolección de los residuos agrícolas. Los resultados computacionales para los conjuntos de pequeña escala muestran que los costos asociados al ruteo son muy inferiores en comparación con los del transporte directo. Sin embargo, la acumulación de carga en los vehículos que realizan las rutas produce una generación más alta de CO₂.

Por otra parte, se evaluó la diferencia que se genera al optimizar solo las tradicionales métricas económicas en contraste con un enfoque de desarrollo sostenible. De acuerdo con los resultados, se observa que obtener un mejor rendimiento económico ignorando las implicaciones ambientales y sociales tiene grandes efectos en el desempeño de toda la cadena de abastecimiento. Adicionalmente, se evidencia que la integración sostenible de las decisiones de instalaciones, ruteo e inventario logra un desempeño equilibrado entre los tres pilares de la sostenibilidad. Demostrando así la hipótesis general de investigación de esta tesis doctoral.

Una de las principales contribuciones de este trabajo, radica en la formulación de la denominada Estrategia de Configuración Dinámica (*DCS*). Esta novedosa formulación permite una configuración flexible de las instalaciones dentro del horizonte de planificación de la cadena de suministro. En esta investigación se implementa la *DCS* para centros de acopio y biorrefinerías en el contexto del *BSCND*. En este sentido, se llevó a cabo un experimento computacional en el que se compara el enfoque tradicional de establecimiento de instalaciones (estrategia de configuración estática *SCS*) con la implementación de *DCS*. Los resultados muestran claramente que la implementación de *DCS* genera una solución más eficiente con relación a una *SCS*, haciendo posible una mayor producción de biocombustible, una cadena de suministro más rentable, menores impactos ambientales y una mayor utilización de la tierra para la producción de alimentos.

Finalmente, se analizó el efecto que genera una modelación estocástica frente a una determinística en el diseño de la cadena de suministro de biocombustible. De acuerdo con los resultados, considerar la incertidumbre en la capacidad de suministro de los proveedores logra una red de suministro más robusta y realista en términos de capacidad de instalaciones, lo que reditúa en mayor producción de biocombustible y por tanto mayor *NPV*.

5. Conclusiones finales y recomendaciones

5.1 Conclusiones finales

La producción de combustible a partir de biomasa lignocelulósica surge como una estrategia de energía prometedora. En particular, los residuos de café se han identificado como una fuente importante de materia prima. No obstante, los grandes desafíos para su producción y comercialización están asociados al diseño de su cadena de suministro (*SCND*). Dado que los biocombustibles se generan desde los denominados procesos agroindustriales factores como la incertidumbre en la disponibilidad de suministro y las características de los proveedores de biomasa requieren que para un *SCND* adecuado se consideren simultáneamente decisiones de localización, ruteo e inventarios (*ILRP*).

Después del análisis de la literatura sobre el *SCND* bajo una formulación *ILRP*, se pueden enunciar algunos vacíos de investigación importantes: (1) existen pocos trabajos que aborden el *SCND* de biocombustibles integrando decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios; (2) los *ILRP* de biocombustibles se resuelven en entornos menos realistas (período y residuo único); (3) la estrategia de configuración estática es la única utilizada para abordar el *SCND* bajo una formulación *ILRP*. (4) Las contribuciones que abordan la estrategia de configuración dinámica (*DCS*) son escasas y solo abarcan las decisiones de localización de instalaciones. (5) La mayoría de los modelos matemáticos propuestos no consideran el estudio del *ILRP* vinculados a la optimización de métricas de desempeño sostenible; (6) generalmente la incertidumbre se considera desde los análisis de post-optimalidad y no como parte del modelo matemático. (7) Los modelos relacionados con *SCND* de biocombustibles a partir de residuos de café, utilizan solo una materia prima y ninguna contribución ha abordado la integración de múltiples decisiones (*ILRP*), ni optimizado simultáneamente las tres dimensiones de la sostenibilidad.

Para abordar los vacíos de conocimiento identificados en la revisión de la literatura, se presenta la formulación de un conjunto de modelos matemáticos para el diseño de una cadena de suministro de

biocombustible a partir de residuos de café, que integra las decisiones de localización, ruteo e inventario (*DCS-ILRP*) bajo un enfoque sostenible y estocástico. El modelo matemático determina el número y ubicación de los centros de acopio y biorrefinerías, las rutas por las cuales una flota heterogénea de vehículos recolectará los residuos agrícolas, el nivel de inventario en los centros de acopio y el flujo de material a lo largo de la red de suministro. El modelo matemático propuesto es el primero en abordar una estrategia de configuración dinámica en un *ILRP*. La formulación del modelo original incluye algunas ecuaciones no lineales debido a la interacción entre las variables de cambio de capacidad y el flujo de los materiales. Para abordar esta situación, se propone una estrategia de linealización.

Se considera un equilibrio entre el desempeño económico, ambiental y social. Para tal fin, el modelo propuesto incorpora los estándares *GRI (Global Reporting Initiative)*. La función objetivo económica está enfocada en maximizar el valor presente neto (*NPV*). Con relación a la dimensión ambiental, se minimiza la contaminación del agua en términos de sólidos suspendidos totales (*SST*) y del aire con relación al CO_2 generado. Adicionalmente, se contempla la contaminación en las granjas que depende de la biomasa no demandada por la cadena de abastecimiento. Finalmente, en el pilar social se maximizan los impactos en la seguridad alimentaria y en la generación de empleo, que considera además del número de puestos de trabajo generados, el índice de desempleo en las zonas de influencia.

El modelo matemático propuesto ha considerado, por primera vez, la utilización de múltiples residuos de cultivos de café para la producción de bioetanol y la incertidumbre en la disponibilidad de suministro. Por tanto, la capacidad de generación de biomasa de las fincas se asume como un parámetro incierto. Para abordar esta característica, se utiliza la programación estocástica de dos etapas. En la primera etapa se define la estructura de la red de suministro considerando la apertura, expansión y cierre de las instalaciones (centros de acopio y biorrefinerías). En la segunda etapa se optimizan las variables relacionadas con el flujo de materiales (biomasa y biocombustible).

Teniendo en cuenta que el modelo de optimización propuesto pertenece a la clase de problemas *NP-Hard*, se proponen dos enfoques de solución: 1) métodos exactos y 2) métodos aproximados. Dentro de los enfoques de modelamiento utilizados para ser resueltos con métodos exactos está la programación compromiso y el método de las restricciones, aplicados a problemas de tamaño pequeño. Por otra parte, dando respuesta a la necesidad evidenciada en la revisión de la literatura, sobre el desarrollo de algoritmos eficientes para hacer frente a la complejidad computacional. Como

contribución metodológica se diseña para un problema de gran tamaño, una heurística personalizada que consta de dos etapas. En la primera etapa se construye una solución inicial factible. En la segunda etapa, la solución se mejora iterativamente (mejor solución compromiso) utilizando una adaptación de la técnica metaheurística de recocido simulado.

Con el fin de analizar el desempeño del modelo matemático y la metodología de solución propuesta, se presentan los resultados computacionales para un caso de estudio de la región cafetera de Colombia y para 15 conjuntos de datos de referencia tomados de la literatura y adaptados al problema abordado en esta tesis doctoral. Un análisis profundo del desempeño general proporciona evidencia suficiente para hacer los siguientes planteamientos:

- El impacto ambiental más representativo es el generado por los residuos de café que se quedan en las fincas cafeteras y no se utilizan como materia prima para la producción de biocombustible. Por tanto, aprovechar estos residuos como biomasa contribuye no solo a la generación de bioenergía, sino también a la disminución de los impactos ambientales como el CO₂ y la contaminación de las fuentes hídricas.
- La heurística propuesta es muy competitiva en términos de la calidad de la solución y tiempo computacional. Las soluciones compromiso alcanzadas por la heurística no difieren significativamente del límite inferior encontrado por el método exacto para cada conjunto de datos de tamaño pequeño.
- La solución inicial que se obtiene en la etapa de construcción de la heurística propuesta va disminuyendo para cada temperatura de refrigeración en la etapa de mejoramiento, lo que indica que la estrategia del algoritmo para incrementar la calidad de la solución es apropiada y que la heurística es convergente.
- Los costos asociados al ruteo de vehículos para la recolección de los residuos agrícolas son muy inferiores en comparación a los que se incurre cuando se utiliza transporte directo para esta operación. Sin embargo, la acumulación de carga en los vehículos que realizan las rutas produce una generación más alta de CO₂.
- Considerar la incertidumbre en la capacidad de suministro de los proveedores de biomasa en el diseño de la cadena de abastecimiento de biocombustible, logra una red de suministro más robusta

en términos de capacidad de instalaciones, lo que reditúa en mayor producción de biocombustible y por tanto mayor *NPV*.

Con relación a las hipótesis de investigación se concluye lo siguiente:

- Optimizar solo las tradicionales métricas económicas ignorando las implicaciones ambientales y sociales tiene grandes efectos en el desempeño de toda la cadena de abastecimiento. En contraste, la integración sostenible de las decisiones de instalaciones, ruteo e inventario logra un desempeño equilibrado entre los tres pilares de la sostenibilidad. Demostrando así la hipótesis general de investigación de esta tesis doctoral.
- El *SCND* que sigue una formulación *ILRP* bajo una estrategia de configuración dinámica (*DCS*) es más eficiente (bajo el concepto de optimalidad Pareto) que bajo una estrategia de configuración estática (*SCS*), en donde las métricas económicas y ambientales tienen un mejor desempeño y los impactos sociales no difieren significativamente. Sin embargo, se alcanza una dominancia en las tres medidas de desempeño (económica, ambiental y social) al considerar sólo la componente del aporte a la seguridad alimentaria como impacto social. Demostrando la hipótesis H_2 de esta investigación doctoral.
- Con la implementación de la *DCS*, la producción de biocombustible es mayor, lo que hace posible una cadena de suministro más rentable. Adicionalmente, se generan menores impactos ambientales. Todo esto conlleva a una participación más activa de biocombustibles de segunda generación y por tanto más tierra se libera para la producción de alimentos (seguridad alimentaria).

Teniendo en cuenta lo expuesto hasta aquí, todo lo desarrollado da respuesta a los vacíos de conocimiento abordados en esta tesis doctoral; 1) un *SCND* que integre de manera sostenible decisiones estratégicas, tácticas y operativas bajo una estrategia de configuración dinámica y, 2) el diseño de una metodología de solución que hiciera frente a la complejidad computacional derivada del modelo matemático.

5.2 Recomendaciones

Considerando las limitaciones de la presente investigación y, más allá, las aportaciones que se han llevado a cabo desde lo teórico, lo metodológico y lo práctico, las recomendaciones que se derivan son las siguientes:

En primer lugar, dado que el diseño de cadenas de suministro implica un desafío matemático complejo que genera varias oportunidades de investigación, se sugiere para futuras líneas de investigación avanzar en la incorporación de métricas sostenibles. Los aspectos relacionados con los impactos ambientales positivos generados por el aprovechamiento de los residuos, así como la incorporación de nuevos indicadores sociales, plantean importantes desafíos, desde la perspectiva matemática.

De igual manera, considerar más fuentes de riesgo en el diseño de la cadena de suministro con el fin de generar configuraciones de red más confiables. Adicionalmente, se debería abordar la inclusión del enfoque de programación posibilístico (*possibilistic programming*) (Tavakkoli-Moghaddam & Razi, 2016; Zhalechian et al., 2016) para modelar algunos parámetros de entrada que muestran escasez de información, por ejemplo, la tasa de conversión de biomasa-biocombustible.

Así mismo, es imprescindible el desarrollo de metodologías de solución robustas para hacer frente a la complejidad computacional. Evaluar propiedades matemáticas del modelo que podrían ser explotadas para resolver el problema, no solo desde los enfoques aproximados, sino también con métodos de solución exacta como la descomposición de *Dantzig Wolfe*.

Adicionalmente, incorporar en el diseño de la cadena de suministro las cadenas de biocombustibles existentes considerando el producto que se podría importar y/o exportar, lo que conduciría a soluciones más cercanas a la realidad y una toma de decisiones más confiable. A su vez, teniendo en cuenta la importancia de los efectos en los costos y la amplia utilización de la tercerización en las cadenas de suministro actual, se sugiere considerar la tercerización de procesos como el almacenamiento y el transporte en el *DCS-ILRP*.

De acuerdo con el estado del arte, es una debilidad latente en las contribuciones de diseño de cadenas de suministro la ausencia de consideraciones tributarias y de indicadores financieros como el Valor Económico Agregado (EVA) e indicadores de riesgo, [rentabilidad](#), endeudamiento, y

apalancamiento. Criterios que permitirían al decisor una mirada holística, que considere el objetivo financiero básico de creación de valor para los *stakeholders*. Se sugiere incorporar estos indicadores y consideraciones en el diseño de las cadenas de suministro.

Por otro lado, de acuerdo con la ONU (2018) la generación de residuos en América Latina y el Caribe está en constante aumento, cada día se generan 541.000 t de residuos urbanos que aumentarán en al menos un 25% para el año 2050. El 50% de estos residuos son orgánicos de los cuales el 90% no se aprovechan. Por tanto, es necesario promover la transición hacia una economía circular, en donde los residuos sean utilizados como materia prima para un nuevo proceso industrial, como en el caso de esta tesis doctoral para generar energía alternativa. Este tipo de proyectos de inversión no solo contribuye a la gestión adecuada de residuos con todos los beneficios para la salud humana y del planeta que conlleva, sino también a la generación de empleos y desarrollo económico.

Adicionalmente, son grandes los retos que enfrentan los países después de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2021, en donde se comprometen a reducir los gases de efecto invernadero, acelerar la producción de energía renovable y reducir el calentamiento global «muy por debajo» de los 2°C. En este aspecto, Colombia en el marco de la COP26, lanzó el plan @E2050C, una estrategia para lograr la reducción de GEI y emisiones contaminantes, a través de nueve líneas entre las que se destaca tener una matriz energética diversificada (Fedebiocombustibles, 2022). Para tal fin, el país cuenta con dos fuentes de biomasa; caña de azúcar y palma de cera. No obstante, teniendo en cuenta que Colombia cuenta con la tercera producción más alta de café a nivel mundial, promover iniciativas que aborden la generación de biocombustible a partir de los residuos de este cultivo es una alternativa que aporta al cumplimiento de las metas establecidas.

Por otra parte, a lo largo de casi 3.000 kilómetros de valles interandinos viven las 540,000 familias cafeteras colombianas. La gran mayoría viven en pequeñas fincas o parcelas cuyos cultivos de café, en promedio, no superan las 2 hectáreas, con características de economía de subsistencia, niveles de satisfacción de necesidades básicas y bajo nivel educativo, frecuentes en el agro latinoamericano, lo que las hace vulnerables a los cambios del entorno (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2022) y ávidos de proyectos que les permitan mejorar su nivel de vida.

Según el Programa Mundial de Alimentos (2020), alrededor de 135 millones de personas padecen hambre severa, debido principalmente a los conflictos causados por los seres humanos, el cambio climático y las recesiones económicas. Por tanto, el aumento de la productividad agrícola y la

producción alimentaria sostenible son cruciales para ayudar a aliviar los riesgos del hambre. Bajo este marco, es importante que el cumplimiento de las metas energéticas no lleve a agudizar la situación de la seguridad alimentaria. Es así como se fomenta la producción de bicomcombustible de segunda generación (residuos agrícolas y forestales) evitando el uso de biomásas que se utilizan para el consumo humano y animal (biocombustibles de primera generación).

El estudio de biomásas de segunda generación se ha convertido en una línea de investigación de alta relevancia debido a las implicaciones en la seguridad alimentaria y en la biodiversidad que presentan los biocombustibles de primera generación. En particular, los tallos, la pulpa y el mucílago de café son biomásas potenciales para la producción de bioetanol. No obstante, para llevar a cabo este tipo de proyectos de inversión hay que garantizar además del proceso de transformación químico, el suministro de la biomasa y la sostenibilidad de la cadena de suministro. Con respecto a la disponibilidad de suministro, Colombia al ser el tercer productor de café a nivel mundial tiene capacidad de generación de este tipo de biomasa. Por otro lado, el modelo matemático propuesto en esta tesis doctoral permite un *SCND* integrando las decisiones estratégicas, tácticas y operativas logrando que el centro decisor garantice la rentabilidad económica que todo inversionista espera, cuidando los impactos ambientales y sociales que demandan los actores gubernamentales y la sociedad en general.