



Universidad de la República

Facultad de Ingeniería

CADENAS DE SUMINISTRO CON LOGÍSTICA VERDE

Autores:

Catalina BONET

Gonzalo CASTRO

Florencia PEREYRA

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniería de Producción.

Tutor:

Víctor VIANA

Tribunal:

Víctor VIANA

Lorena SILVEIRA

Mariana CORENGIA

Montevideo, Uruguay

Octubre de 2023

Resumen

El presente trabajo aborda la implementación de un modelo de programación lineal para el análisis de ruteo de vehículos centrado en la sostenibilidad y el medio ambiente, examinando el uso de vehículos de alto desempeño (como bitrenes y tritrenes), además de los camiones convencionales.

El transporte forestal en Uruguay ha crecido ampliamente en los últimos años; por lo tanto, es importante poner foco en el sector, buscando disminuir el impacto ambiental que este genera. A través de un modelo matemático basado en el ruteo ecológico de vehículos, se evaluaron diferentes casos en donde se asignaron vehículos a las diferentes rutas, de manera tal de minimizar las emisiones de CO_2 que se generan al realizar la actividad. Este modelo tiene en cuenta las capacidades de los tres tipos de vehículos utilizados, las emisiones que genera cada uno, las rutas disponibles (distinguiendo las habilitadas para vehículos de mayor porte de las que no), los puntos de cosecha y el lugar de destino, los meses del año, la demanda, y las distancias entre los diferentes nodos del problema: origen, puntos de cosecha, y destinos. A partir de esto se logró representar de manera simplificada la cadena de suministro de madera para las plantas celulósicas del país, obteniendo una asignación óptima de camiones, bitrenes y tritrenes para minimizar las emisiones de CO_2 .

Se llevó a cabo el análisis de diferentes escenarios con el objetivo de estudiar el comportamiento del modelo, analizar las variaciones de las emisiones, así como la eficiencia y precisión del modelo. Finalmente, se buscó la viabilidad económica de este proyecto, para lo cual se realizó un análisis económico del mismo.

Este trabajo introduce un análisis exhaustivo del transporte forestal en Uruguay, donde la innovación y el cuidado ambiental convergen. La incorporación de un modelo matemático para optimizar las emisiones de CO_2 conlleva a la toma de decisiones de manera estratégica e informada. Además, el enfoque en vehículos de alto desempeño subraya la importancia de la innovación en el sector. La evaluación económica realizada respalda la viabilidad de este enfoque sostenible.

Palabras clave: Transporte forestal, programación lineal, green VRP, sostenibilidad, vehículos de alto desempeño.

Agradecimientos

En primer lugar, deseamos expresar nuestro agradecimiento al tutor Víctor Viana, quien nos dedicó su tiempo a lo largo de todo este proceso, nos proporcionó las herramientas necesarias para abordar este proyecto, y nos motivó en todo momento para superar las dificultades que se fueron presentando.

Queremos reconocer la generosidad de Diego Bianchi, funcionario del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, quien nos brindó información acerca de las rutas habilitadas para bitrenes y tritrenes en Uruguay, así como otra información enriquecedora para el problema planteado.

También agradecemos a los contadores familiares de Gonzalo Castro que nos brindaron la información y nos proporcionaron desde su conocimiento algunos puntos relevantes necesarios para poder abordar el análisis económico del proyecto.

Finalmente y no menos importante, nos gustaría agradecer a nuestras familias y amigos, que con su apoyo incondicional nos han brindado la fortaleza suficiente para completar con éxito este recorrido.

Índice

1. Introducción	8
1.1. Objetivos del proyecto	9
1.2. Organización del informe	9
2. Revisión bibliográfica	11
2.1. Análisis bibliométrico	11
2.2. Cadenas de suministro	15
2.3. Sostenibilidad y logística	16
2.4. Green VRP	26
2.5. Métodos de resolución	29
3. Contexto del caso de estudio	39
4. Definición del problema	50
4.1. Escenario y suposiciones	51
5. Modelo Matemático	54
5.1. Formulación matemática	54
5.2. Relevamiento y generación de datos	58
5.2.1. Selección de nodos	59
5.2.2. Obtención de parámetros	61
5.3. Validación del modelo	64
6. Experimentación numérica	76
7. Análisis económico	84
8. Conclusiones y trabajos a futuro	89
9. Anexos	99
9.1. Anexo I - Modelado matemático	99
9.2. Anexo II - Matrices y parámetros	99
9.3. Anexo III - Análisis económico	114

Índice de figuras

1.	Filtros de la búsqueda bibliográfica. Fuente: elaboración propia.	12
2.	Cantidad de artículos por año. Fuente: elaboración propia.	12
3.	Cantidad de artículos por año en los últimos 5 años. Fuente: elaboración propia.	13
4.	Porcentaje de artículos por método de resolución. Fuente: elaboración propia.	14
5.	Distribución según cantidad de artículos por método de resolución (heurísticas, meta- heurísticas e híbridos). Fuente: elaboración propia.	15
6.	Dimensiones de la sostenibilidad. Fuente: [72].	16
7.	Comparación entre la logística verde y logística inversa. Fuente: [83].	20
8.	Variantes del GVRP. Fuente: elaboración propia.	27
9.	Clasificación del GVRP. Fuente: [86].	28
10.	Cadena de suministro con múltiples depósitos. Fuente: [18].	32
11.	Algoritmo ALNS. Fuente: [29].	33
12.	Algoritmo TS. Fuente: [14].	36
13.	Actividades del sector forestal. Fuente: [50].	39
14.	Porcentaje de exportaciones correspondientes al sector forestal. Fuente: [50].	40
15.	Exportaciones del sector forestal por año. Fuente: [50].	41
16.	Áreas de prioridad forestal. Fuente: [69].	42
17.	Superficie acumulada de plantaciones forestales. Fuente: [52].	43
18.	Mapa de la red de transporte de Uruguay. Fuente: [50].	44
19.	Camión convencional. Fuente: [87].	46
20.	Camión bitrén. Fuente: [59].	46
21.	Camión tritrén. Fuente: [56].	47
22.	Mapa de rutas del Uruguay. Fuente: elaboración propia.	49
23.	Esquema general del problema. Fuente: elaboración propia.	56
24.	Ubicación de los nodos del problema. Fuente: elaboración propia.	61
25.	Esquema general con 10 puntos de cosecha. Fuente: elaboración propia.	65
26.	Esquema general con 20 puntos de cosecha. Fuente: elaboración propia.	67
27.	Esquema general con 30 puntos de cosecha. Fuente: elaboración propia.	69
28.	Esquema general con 40 puntos de cosecha. Fuente: elaboración propia.	71
29.	Emisiones totales agrupado por distribución de flota, expresadas en kilogramos de CO ₂ . Fuente: elaboración propia.	74
30.	Tiempo de resolución agrupado por distribución de flota. Fuente: elaboración propia.	74
31.	Mapa de nodos antes y después, para el Escenario 1. Fuente: elaboración propia.	76
32.	Emisiones totales por escenario vs Emisiones del caso base. Fuente: elaboración propia.	82
33.	Tiempo de ejecución por escenario vs Tiempo de ejecución del caso base. Fuente: elab- oración propia.	83

Índice de cuadros

1.	Criterios de sostenibilidad por dimensión. Fuente: [72]	18
2.	Comparación entre Logística Verde y Logística Inversa. Fuente: elaboración propia.	21
3.	Superficie de bosques en Uruguay. Fuente: [64].	41
4.	Características y medidas de los distintos tipos de vehículos. Fuente: elaboración propia.	48
5.	Volumen producido por las plantas de celulosa en millones de toneladas al año.	62
6.	Emisiones de CO ₂ expresadas en <i>kg de CO₂/km recorrido</i> .	63
7.	Instancia definida para el Caso de prueba 1.	65
8.	Instancia definida para el Caso de prueba 2.	66
9.	Instancia definida para el Caso de prueba 3.	66
10.	Instancia definida para el Caso de prueba 4.	67
11.	Instancia definida para el Caso de prueba 5.	68
12.	Instancia definida para el Caso de prueba 6.	68
13.	Instancia definida para el Caso de prueba 7.	69
14.	Instancia definida para el Caso de prueba 8.	70
15.	Instancia definida para el Caso de prueba 9.	70
16.	Instancia definida para el Caso de prueba 10.	71
17.	Instancia definida para el Caso de prueba 11.	72
18.	Instancia definida para el Caso de prueba 12.	72
19.	Oferta y demanda para el caso borde, expresadas en toneladas.	73
20.	Resultados obtenidos - Escenario 1.	77
21.	Resultados obtenidos - Escenario 2.	77
22.	Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 3	78
23.	Resultados obtenidos - Escenario 3.	78
24.	Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 4.	79
25.	Resultados obtenidos - Escenario 4.	79
26.	Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 5.	79
27.	Resultados obtenidos - Escenario 5.	80
28.	Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 6.	80
29.	Resultados obtenidos - Escenario 6.	80
30.	Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 7.	81
31.	Resultados obtenidos - Escenario 7.	81
32.	Comparación de los distintos escenarios.	82
33.	Inversión inicial.	84
34.	Intereses anuales calculados a partir del sistema alemán.	84
35.	Costos fijos.	85
36.	Costos de mano de obra.	86
37.	Costos de mantenimiento.	86
38.	Costos variables.	87
39.	Tarifa de precios de transporte de madera.	87
40.	Flujo de fondos.	88

41.	Oferta (en toneladas) de los puntos de cosecha 1 al 20 desde el período 1 al 6.	99
42.	Oferta (en toneladas) de los puntos de cosecha 1 al 20 desde el período 7 al 12.	100
43.	Oferta (en toneladas) de los puntos de cosecha 21 al 40 desde el período 1 al 6.	101
44.	Oferta (en toneladas) de los puntos de cosecha 21 al 40 desde el período 7 al 12.	102
45.	Demanda de las plantas A y B expresada en toneladas.	102
46.	Distancia en kilómetros entre los puntos de cosecha 1 al 20 y los destinos A y B para camiones convencionales.	103
47.	Distancia en kilómetros entre los puntos de cosecha 21 al 40 y los destinos A y B para camiones convencionales.	104
48.	Distancia en kilómetros entre los puntos de cosecha 1 al 20 y los destinos A y B para bitrén y tritrén.	105
49.	Distancia en kilómetros entre los puntos de cosecha 21 al 40 y los destinos A y B para bitrén y tritrén.	106
50.	Distancia en kilómetros entre el depósito y los puntos de cosecha 1 al 20 para camiones convencionales.	107
51.	Distancia en kilómetros entre el depósito y los puntos de cosecha 21 al 40 para camiones convencionales.	108
52.	Distancia en kilómetros entre el depósito y los puntos de cosecha 1 al 20 para bitrén y tritrén.	109
53.	Distancia en kilómetros entre el depósito y los puntos de cosecha 21 al 40 para bitrén y tritrén.	110
54.	Distancia en kilómetros entre las plantas y el depósito para camiones convencionales. .	110
55.	Distancia en kilómetros entre las plantas y el depósito para bitrén y tritrén.	110
56.	Cantidad máxima de viajes por período desde los puntos de cosecha 1 al 20 hasta las plantas A y B para camiones convencionales.	111
57.	Cantidad máxima de viajes por período desde los puntos de cosecha 21 al 40 hasta las plantas A y B para camiones convencionales.	112
58.	Cantidad máxima de viajes por período desde los puntos de cosecha 1 al 20 hasta las plantas A y B para bitrén y tritrén.	113
59.	Cantidad máxima de viajes por período desde los puntos de cosecha 21 al 40 hasta las plantas A y B para bitrén y tritrén.	114

1. Introducción

El presente informe tiene como objetivo exponer el trabajo realizado sobre el análisis de enrutamiento de vehículos con foco en la sostenibilidad y la responsabilidad con el medio ambiente, analizando el uso de vehículos de mayor capacidad. El ruteo de vehículos es un aspecto sumamente relevante e importante para las empresas dedicadas al transporte y la distribución de bienes. El mismo tiene el objetivo de optimizar el uso de recursos y las rutas realizadas, colaborando a que las operaciones de las empresas sean lo más eficientes posible. En este sentido, se presenta el estudio realizado sobre una variante del problema de enrutamiento de vehículos; en particular, el enrutamiento de vehículos ecológico utilizando una flota heterogénea.

En la actualidad, el problema de enrutamiento de vehículos ecológico (GVRP, por sus siglas en inglés) es un concepto clave que ha surgido de la necesidad por cuidar el medio ambiente. Este problema, además de buscar optimizar las rutas y permitir a las empresas una gestión logística eficiente, busca minimizar el impacto ambiental de la actividad de transporte. Según el estudio realizado en el trabajo [12], el GVRP tiene muchas variantes distintas para atacar y todas ellas contribuyen de una forma u otra con prácticas amigables para el entorno. Entre las distintas variantes se pueden encontrar casos donde se consideran flotas de vehículos homogéneas o heterogéneas, con diferentes capacidades, consumos de combustible y emisiones, problemas donde se consideran vehículos eléctricos, otros donde se estudia la posibilidad de utilizar combustibles alternativos, entre otros. El presente informe pretende brindar un análisis exhaustivo sobre la bibliografía del tema, analizando diversos trabajos académicos al respecto y analizando los métodos de resolución propuestos.

Cuando se habla de GVRP, se introduce el concepto de logística verde, el cual apunta al equilibrio en términos de sostenibilidad, y más aún, comprende un enfoque ambiental sobre las actividades logísticas de las empresas. Dentro de las actividades logísticas, el transporte es considerada como una de las principales actividades para estos servicios. En este sentido, como consecuencia de la industrialización a nivel mundial, las actividades del transporte han aumentado considerablemente, y por lo tanto esto supone un aumento en las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI, por sus siglas) generados por la actividad, tal como se visualiza en los datos del Balance Energético Nacional [92]. En el estudio presentado en [73] se analiza este suceso y se propone una posible solución que reduce el impacto ambiental en este ámbito. En ese estudio, los autores aseguran que al sustituir los vehículos de transporte de mercancías por vehículos que tengan mayor capacidad de carga, se reducirán los kilómetros recorridos por vehículo, además del uso de combustible y las emisiones de CO₂. Esto plantea las siguientes interrogantes:

- ¿Qué beneficios tiene para las empresas transportistas sustituir sus vehículos por otros de mayor capacidad y menores emisiones de GEI, en especial el CO₂?
- ¿Existe la posibilidad en Uruguay de tener mejores prácticas de transporte de manera de cuidar y minimizar el impacto ambiental actual?

Con base en estas preguntas y en vista del aumento de la actividad forestal que Uruguay experimentaría como consecuencia de la llegada de una nueva planta de celulosa al momento de comenzar

este trabajo, se encontró interesante poder analizar esta realidad. Se planteó entonces un modelo matemático, teniendo en cuenta la sustitución de vehículos convencionales para el transporte de madera a las industrias por vehículos de mayor capacidad y menores emisiones de los GEI a la atmósfera, en especial el CO_2 . El mismo consiste en la planificación anual del transporte forestal desde diversos puntos de cosecha hacia plantas de tratamiento de madera. Además, si bien no se tuvo contacto con una empresa real que haya sido contraparte y con la que se haya trabajado para analizar el escenario, se obtuvo información de distintas fuentes que permitió modelar el caso de estudio de la manera más real posible.

1.1. Objetivos del proyecto

El proyecto que se presenta tuvo múltiples objetivos, algunos generales y otros específicos. El primer objetivo general fue la realización de una revisión bibliográfica sobre el problema de GVRP. El segundo consistió en plantear un modelado matemático para el ruteo de vehículos aplicado a un tipo de transporte en el Uruguay. El último objetivo general se basó en realizar un análisis económico una vez modelado y analizado el escenario descrito anteriormente.

En cuanto a los objetivos específicos se decidió enfocar la revisión bibliográfica en aquellos trabajos realizados recientemente, prestando especial atención a la aplicación que tienen en las diferentes cadenas de suministro, los modelados matemáticos que se proponen, las metodologías de resolución y los resultados de cada uno. Además, se tuvo también el objetivo específico para el modelo matemático de contemplar los distintos puntos de cosecha y destinos de la madera a transportar, y los vehículos a utilizar, sabiendo que se tiene una flota heterogénea. Asimismo, el objetivo del modelado fue brindar una asignación de vehículos optimizando las rutas (al igual que el problema de ruteo tradicional, VRP), teniendo como foco el impacto ambiental que tiene la actividad del transporte forestal. De esta manera, el objetivo del problema planteado fue encontrar la asignación de vehículos que minimiza las emisiones de CO_2 a la atmósfera. Otro de los objetivos específicos que se planteó fue, para el análisis económico, poder identificar la rentabilidad de realizar la inversión de sustitución de vehículos para una empresa transportista del país.

Se espera que este trabajo sirva como punto de partida para cualquier empresa transportista que esté buscando mejorar sus prácticas para que sean más amigables con el medio ambiente, y así optimizar los impactos ambientales de sus actividades de transporte.

1.2. Organización del informe

El informe se organiza de manera tal que en el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica de todos los trabajos encontrados sobre el tema, con el fin de obtener una primera idea de los temas abordados y los métodos de resolución. Se realiza la presentación de dichos trabajos, incluyendo la definición de los conceptos más relevantes. En el capítulo 3 se analiza el contexto actual del caso de estudio que se abordará. En el capítulo 4 se definen los objetivos, detallando el caso de estudio que se quiere analizar y las suposiciones necesarias para modelar la realidad. Luego, en el capítulo

5 se desarrolla el modelado matemático, se describe cada restricción según la realidad buscada, se presentan los parámetros y el relevamiento de los datos utilizados, seguido de la validación del modelo. La experimentación numérica con los diferentes análisis de sensibilidad se pueden encontrar en el capítulo 6. Una vez realizado este análisis, se presenta en el capítulo 7 un análisis económico sobre la realidad planteada que estudia la rentabilidad del caso de estudio para una empresa de transporte. Para finalizar, las conclusiones obtenidas se presentan en el capítulo 8 junto con los trabajos a futuro que se desprenden de este proyecto.

2. Revisión bibliográfica

El objetivo de este capítulo es proporcionar una revisión de la temática abordada, de manera de establecer algunos puntos relevantes y definir los términos utilizados. Por otro lado, luego de presentar los conceptos principales de este proyecto de grado, se realizó una revisión bibliográfica sobre los trabajos académicos incluidos en el análisis bibliométrico que estudian el problema ecológico de enrutamiento de vehículos, presentando los distintos métodos de resolución para los problemas de optimización que se plantean.

2.1. Análisis bibliométrico

El punto de partida para este proyecto de grado fue una búsqueda bibliográfica sobre trabajos relacionados con el problema de ruteo de vehículos ecológico. En esta sección se describe el paso a paso realizado con tal fin, así como también se presenta un breve análisis de la bibliografía encontrada sobre este punto.

Para esta investigación se accedió a distintas bases de datos de publicaciones académicas como *Hindawi*, *IEEE*, *ScienceDirect*, *Scopus*, *SpringerLink*, *MDPI*, *JSTOR* y *SAGE*, así como los repositorios de tesis *Colibrí* y *Silo*. En todas estas se utilizaron palabras clave de búsqueda como “VRP”, “green VRP”, “logística verde”. A raíz de esta búsqueda se encontraron en total unos 85 trabajos entre los cuales hay artículos, tesis y/o proyectos finales de grado, entre otros. Luego de filtrar estos trabajos por su año de publicación, descartando los de 2016 y anteriores, quedaron así los artículos entre 2017 y 2022 que son 72 artículos (ver Figura 1). De todos estos se volvió a realizar un filtro en base a los temas tratados en cada uno, quedando finalmente 43 trabajos para estudiar. Este último fue el más importante y se enfocó en mantener únicamente los trabajos que refieren a problemas de optimización que contemplen el impacto ambiental. En base a todos estos, se realizó un estudio general del tema y una clasificación la cual se presenta en la siguiente sección.



Figura 1: Filtros de la búsqueda bibliográfica. Fuente: elaboración propia.

Comenzando el análisis bibliométrico, se estudia la cantidad de artículos obtenidos por año. Para eso, se presenta la gráfica de la Figura 2, donde puede verse la evolución año a año de la cantidad de artículos y otro tipo de trabajos publicados. Es sencillo notar cómo a medida que pasan los años la cantidad de trabajos va aumentando, llegando al pico en el año 2021 donde se encontraron 22 artículos. Es posible ver además, que entre los años 2017 a 2022 es donde existe la mayor cantidad de información obtenida. A raíz de esto, se decide acotar la búsqueda, manteniendo todos aquellos artículos académicos, proyectos finales de grado y otros trabajos que hayan sido publicados desde el año 2017 en adelante. Cabe aclarar que esta revisión bibliográfica fue realizada en mayo de 2022, lo que puede verse reflejado en la baja cantidad de trabajos encontrados para dicho año.

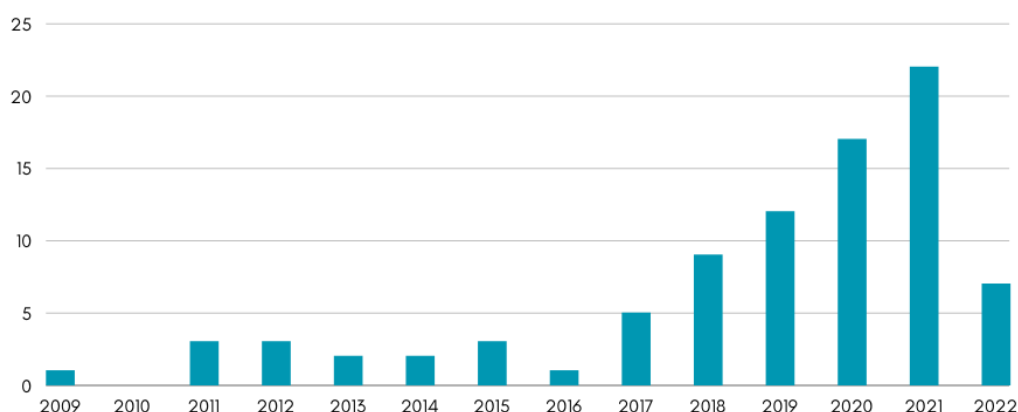


Figura 2: Cantidad de artículos por año. Fuente: elaboración propia.

Una vez acotada la búsqueda, se llega al segundo paso de la Figura 1, quedando aún el tercer paso por avanzar. Observando la cantidad de artículos, se realiza entonces un filtro más, como se indicó anteriormente, enfocándose en la temática abordada. De esta forma, se vuelve a realizar la gráfica de cantidad de artículos por año, pero únicamente con los 43 artículos finales a analizar (Ver Figura 3).

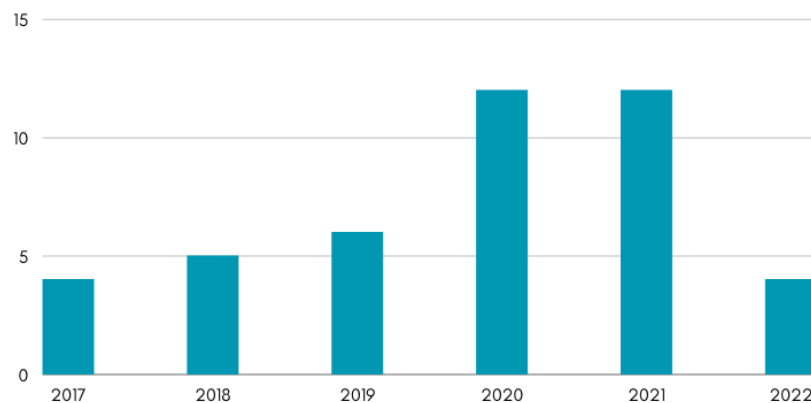


Figura 3: Cantidad de artículos por año en los últimos 5 años. Fuente: elaboración propia.

Con base en todos estos artículos encontrados se propone clasificar los problemas de ruteo en 4 grupos dependiendo del enfoque de solución propuesta. Los diferentes grupos y, por ende, las diferentes metodologías de resolución son las que se detallan a continuación. Para cada categoría se presentarán más adelante, en la Sección 2.5, los trabajos clasificados haciendo mención del método utilizado.

- **Métodos Exactos:** Incluye todos aquellos problemas modelados con enfoques algorítmicos que aseguran, en caso de que exista, encontrar una solución óptima. Utilizan cálculos y procedimientos matemáticos precisos para explorar todas las posibles soluciones y seleccionar la mejor. Un ejemplo de estos métodos es el de programación lineal, posteriormente utilizado en este proyecto.
- **Métodos Heurísticos:** Se trata de procedimientos para encontrar buenas soluciones de problemas complejos de optimización. No garantizan la solución óptima, pero sí una cercana. Además son más rápidos y pueden encontrar soluciones aceptables en un tiempo razonable, lo cual puede verse afectado por la cantidad de datos a tratar. Estos métodos se basan en reglas empíricas, intuiciones y conocimiento experto para guiar la búsqueda hacia soluciones prometedoras.
- **Métodos Metaheurísticos:** Son técnicas generales que se usan para resolver problemas complejos de optimización y guían la búsqueda a través de un espacio de soluciones de manera más eficiente que los métodos exactos.
- **Métodos Híbridos:** Se consideran como híbridos aquellos métodos que utilicen una combinación de dos o más de los métodos anteriores. Este tipo de resolución es la más utilizada dentro de los trabajos analizados.

Se presenta en la Figura 4 un gráfico que permite visualizar los porcentajes de trabajos académicos que utilizan tales métodos de resolución. Para este punto, no se tiene una totalidad de 43 artículos ya que varios de estos no abordan la temática mediante problemas y sus resoluciones, sino que presentan al GVRP cualitativamente, sin presentar un modelo matemático.

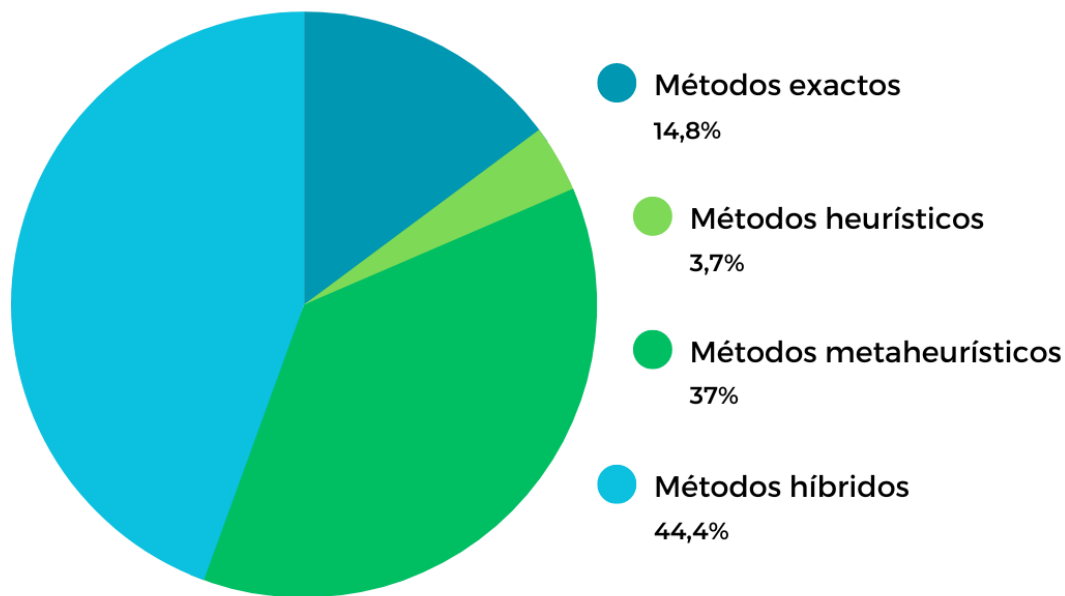


Figura 4: Porcentaje de artículos por método de resolución. Fuente: elaboración propia.

Se destaca que la mayoría de los artículos encontrados utilizan como método de resolución heurísticas, metaheurísticas o métodos híbridos. Esto puede deberse a que la mayoría de los problemas de ruteo son computacionalmente complejos (*NP-hard*¹). En estos casos, las heurísticas y las metaheurísticas proporcionan soluciones satisfactorias dentro de un tiempo razonable, aunque no necesariamente se obtengan soluciones óptimas. Por otro lado, los métodos exactos funcionan mejor para los problemas de instancias pequeñas que para los de instancias grandes, mientras que las heurísticas y metaheurísticas pueden ser escalables y manejar problemas de mayor tamaño.

Dando un paso más en el análisis bibliométrico, las heurísticas y metaheurísticas que se encontraron son: *Ant Colony System* (ACS, por sus siglas), *Genetic Algorithm* (GA), *Tabu Search* (TS), *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Simulated Annealing* (SA), *Variable Neighborhood Search* (VNS), *Adaptive Large Neighbourhood Search* (ALNS), *Butterfly Optimization Algorithm* (BOA), *Memetic Algorithm* (MA), *Parallel Banding Algorithm* (PBA). Por otro lado, para los métodos exactos se utiliza la programación lineal entera mixta. Teniendo en cuenta únicamente los métodos más utilizados (heurísticas, metaheurísticas e híbridos), se presenta en la Figura 5 un gráfico de árbol que permite visualizar la distribución según la cantidad de artículos de cada uno de estos métodos encontrados. Se aclara que las metodologías fueron contabilizadas cada vez que fueron mencionadas en los trabajos, por lo que los artículos que utilizan métodos híbridos fueron contabilizados la misma cantidad de veces que la cantidad de algoritmos que utilizan.

¹Un problema es *NP-hard* si un algoritmo para resolverlo puede traducirse en uno para resolver cualquier problema NP (problema de tiempo polinomial no determinista).

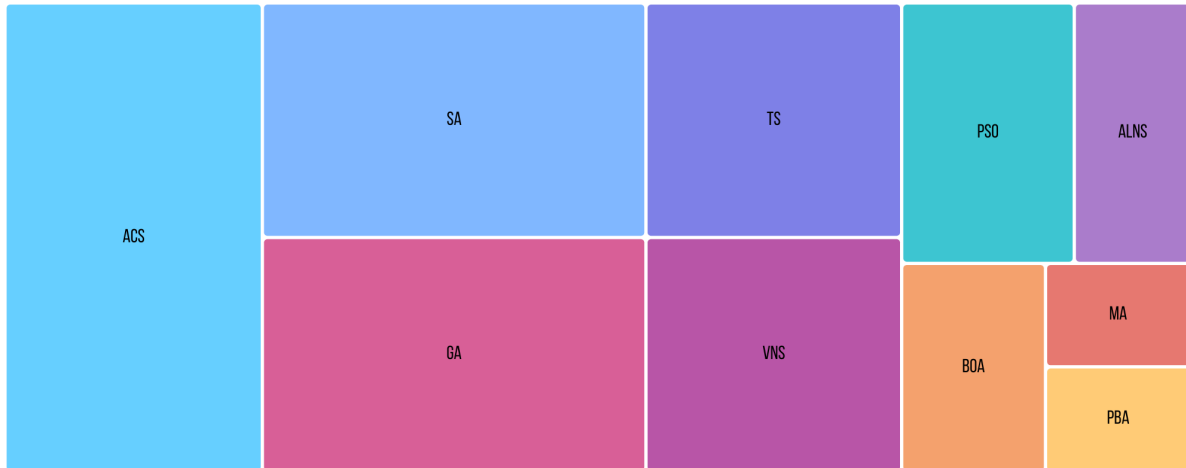


Figura 5: Distribución según cantidad de artículos por método de resolución (heurísticas, metaheurísticas e híbridos). Fuente: elaboración propia.

Para finalizar, cabe destacar que la elección del método utilizado para resolver el GVRP depende de los objetivos y restricciones específicas del problema, así como de la disponibilidad de recursos computacionales. En cualquier caso, según el análisis anteriormente presentado se demuestra que existe una amplia variedad de enfoques y métodos de resolución para abordar el problema de GVRP. Además, se demuestra que las metodologías más utilizadas son las híbridas, lo cual se debe a los altos costos computacionales que implican los problemas de ruteo de vehículos, sobre todo en instancias grandes. Dentro de los métodos híbridos y metaheurísticos, el más utilizado es el ACS.

2.2. Cadenas de suministro

Como se define en [84], la gestión de la cadena de suministro (GCS, por sus siglas) es la gestión del flujo de bienes y servicios. La cadena de suministro incluye el movimiento y almacenamiento de materias primas, el inventario de trabajo en proceso y el transporte de mercancías desde el punto de origen hasta el punto de consumo. La optimización de la cadena de suministro puede dar como resultado un ahorro de energía significativo y la reducción de las emisiones de carbono relacionadas.

Las empresas utilizan los principios de la GCS para planificar, ensamblar, almacenar, enviar y rastrear productos desde el principio hasta el final de la cadena de suministro. La GCS abarca todas las áreas de una organización, sea cual sea el rubro en el que se desempeña. En el área de compras, la GCS se enfoca en la selección de proveedores, la mejora de costos de abastecimiento y la gestión de riesgos de abastecimiento. Por otro lado, en el área de fabricación, se centra en la planificación y el control de la producción, la investigación y desarrollo de la producción, el mantenimiento y el diagnóstico, y la gestión de la calidad. En el área de logística y transporte, se enfoca en la planificación logística, el inventario en tránsito y la gestión. A su vez, en el área de almacenamiento, la GCS se enfoca en la asignación de almacenamiento, preparación de pedidos y control de inventario. En el área de gestión de la demanda, se enfoca en detectar la demanda actual, dar forma a la demanda futura y pronosticar la demanda.

2.3. Sostenibilidad y logística

Los términos de sostenibilidad y desarrollo sostenible fueron definidos por primera vez en la comisión Brundtland en 1987 [71]. El desarrollo sostenible fue definido como:

”Un desarrollo que trata de satisfacer las necesidades humanas presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades.”

Por otro lado, en esta comisión también se define que la sostenibilidad está compuesta por tres dimensiones principales: social, ambiental y económica. Esto se puede ver diagramado en la Figura 6, de donde se concluye que para que un sistema pueda ser sostenible, el mismo debe ser sostenible en cada una de las tres dimensiones contempladas.

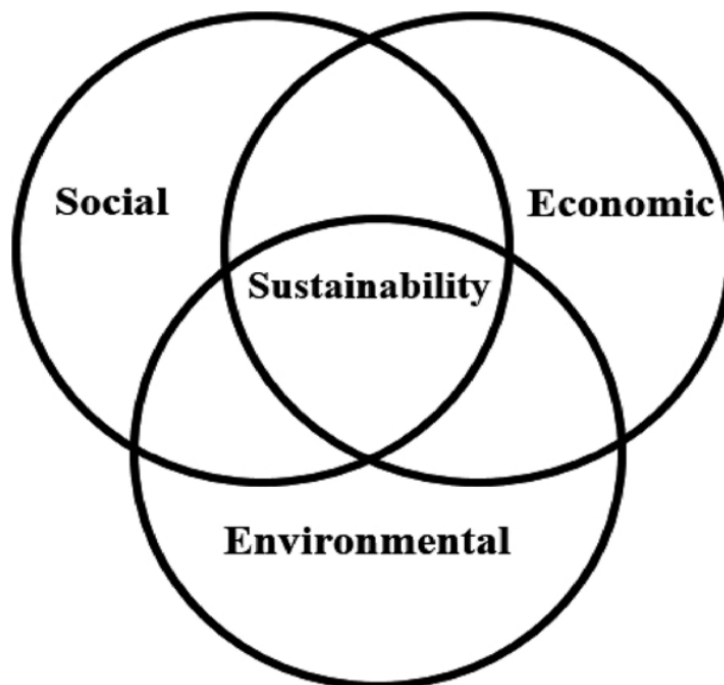


Figura 6: Dimensiones de la sostenibilidad. Fuente: [72].

En [72], se analizan estos conceptos y se aplican en el sector del transporte, más particularmente en sistemas de redes de transporte urbano. Los autores afirman que la calidad del desempeño de una red de transporte urbano influye significativamente en las actividades sociales, la equidad social, la satisfacción económica, las emisiones, y otros diferentes aspectos que impactan directamente sobre la calidad de vida de los ciudadanos afectados. Con el objetivo de querer alcanzar la sostenibilidad, quienes gestionan las redes de transporte urbano buscan constantemente tener en cuenta todas estas dimensiones a la hora de la toma de decisiones.

Aplicando entonces el concepto de la sostenibilidad diagramado anteriormente, para que un sistema de transporte sea sostenible, el mismo debe:

- Proporcionar las necesidades básicas de acceso para cada usuario de la red de forma segura.

- Ser asequible y funcionar de manera eficiente.
- Minimizar los residuos, el uso del suelo, las emisiones de GEI, la contaminación acústica y el consumo de recursos no renovables.

Otro aspecto a destacar mencionado en [72], son los criterios de la sostenibilidad relacionados con las redes de transporte urbano para cada una de las dimensiones contempladas. En este sentido, en el Cuadro 1 se presentan los criterios de sostenibilidad más utilizados.

Analizando las tres dimensiones de la sostenibilidad y sus criterios, los autores afirman que, si bien para los usuarios la dimensión más importante es la económica, la estabilidad ambiental toma un papel más fuerte y protagónico para los expertos en el sector del transporte cuando se habla de sostenibilidad. A raíz de esto, se analizan y comparan los pesos de dichas dimensiones, descubriendo que las diferencias no son significativas. Esto conduce a concluir que todos están alineados en que la situación ambiental, como puede ser la contaminación del aire y las emisiones de GEI, se encuentra en estado crítico. Es decir, que si bien se conoce que una red de transporte eficiente tiene efectos positivos para el desarrollo económico y el rendimiento de las industrias, lograr un buen nivel en términos de la dimensión ambiental conducirá a un nivel aún mayor de sostenibilidad.

Profundizando en el concepto anterior y estudiando los diferentes criterios listados como los más importantes en el Cuadro 1, se resaltan la seguridad, el tiempo de viaje y las emisiones de GEI como los criterios más relevantes para las dimensiones social, económica y ambiental, respectivamente.

Es importante destacar que la sostenibilidad es considerada cada vez más como condición indispensable para la rentabilidad a largo plazo, ayudando a mantener una buena calidad de los activos ambientales de la producción en las cadenas de suministro. Esto además, trae consigo el concepto de desarrollo sostenible, el cual es introducido en el estudio de El-Berishy y otros autores [71] y se destaca por involucrar a los gobiernos como principales responsables de la mejora y protección del medio ambiente tanto en el presente como en el futuro.

Otro de los conceptos que resulta necesario analizar es el de logística, más aún el de logística verde, que fueron la base del estudio realizado en este proyecto de grado. Según el artículo [82], la logística se considera como las acciones cuyo objetivo es minimizar costos y maximizar ganancias. El término se usaba principalmente en áreas comerciales, empresas y en informes financieros. Pero, durante muchos años, el término logística se utilizó en conjunto con el término “verde” al crear la logística verde: un concepto que involucra costos, pero que no aparece en los informes financieros y se centra en el medio ambiente y la sociedad.

El término logística verde se define como estrategias de GCS que reducen la huella ambiental, centrándose en la manipulación de materiales, la gestión de residuos, el embalaje y el transporte. Abarca todas las actividades relacionadas con la gestión ecoeficiente de los flujos de productos e información entre el punto de origen y el punto de consumo, cuyo propósito es satisfacer la demanda del cliente. También se describe a la logística verde como una “gestión verde de la cadena de suministro“, una

Dimensión	Criterio
Social	Accesibilidad al empleo
	Accesibilidad a los principales servicios públicos
	Equidad espacial
	Satisfacción
	Cohesión comunitaria
	Seguridad
	Calidad visual
	Variedad de transporte
	Interacción social
	Recursos arqueológicos
	Igualdad social
	Capacidad de reserva
	Robustez y fiabilidad
	Congestión de tránsito
	Comodidad del transporte público
Económica	Tiempo de viaje
	Superávit mundial
	Variación del excedente de los actores económicos
	Evolución del empleo
	Costos de viaje/Costos de movilidad
	Costos de transporte del gobierno
	Costos indirectos de transporte para el usuario
	Eficiencia económica
	Asequibilidad
	Desarrollo económico
Ambiental	Biodiversidad y sectores protegidos
	Emisiones de GEI
	Calidad del aire local
	Contaminación acústica
	Uso de energía
	Contaminación del agua
	Calidad del aire regional
	Uso de la calidad del agua
	Riesgos naturales y tecnológicos
	Perturbación acústica y lumínica
	Sitio, paisaje y patrimonio creado por el hombre
	Consumo del espacio
	Consumo de materiales no renovables

Cuadro 1: Criterios de sostenibilidad por dimensión. Fuente: [72]

actividad de las organizaciones que tiene en cuenta cuestiones ambientales e integra estas cuestiones en la GCS para cambiar el desempeño ambiental de proveedores y clientes. Las actividades de logística verde incluyen la medición del impacto ambiental de diferentes estrategias de distribución, la reducción del consumo de energía en las actividades logísticas, la reducción de residuos y su gestión. Desde el punto de vista del desarrollo sostenible, la logística verde se puede definir como la producción y distribución de bienes de manera sostenible, teniendo en cuenta los factores ambientales y sociales. Esta definición está alineada con la definición del desarrollo sostenible que se menciona en el artículo [83] y las definiciones de la responsabilidad corporativa. Por otro lado, se puede definir de la siguiente manera:

”Disciplina multifacética que comprende elementos económicos, ambientales y sociales (Mintcheva, 2005). Se centra en acciones para minimizar los efectos nocivos sobre el medio ambiente e introduce las herramientas y comportamientos que contribuyen a mejorar la sociedad y su nivel económico.” – [71]

Como se mencionó en las definiciones anteriores de logística verde, en el pasado, las empresas coordinaban sus actividades logísticas que incluían transporte de carga, almacenamiento, embalaje, manejo de materiales, recopilación y gestión de datos para satisfacer los requisitos del cliente a un costo mínimo. Ahora, el medio ambiente se ha convertido en una gran preocupación a nivel mundial. Tal como se menciona en [71], algunas empresas ya han tenido en cuenta los costos externos de logística asociados especialmente con cuestiones ambientales, como el cambio climático, la contaminación y el ruido. Por lo tanto, la logística verde se define como esfuerzos para examinar formas de reducir estas externalidades y lograr un equilibrio más sostenible entre los objetivos ambientales, económicos y sociales. Todos los esfuerzos en el área de logística verde se centran en contribuir y garantizar la sostenibilidad. En consecuencia del estudio de la logística verde, durante los últimos años, han surgido los siguientes conceptos:

- Reducción de costos de transporte.
- Logística urbana.
- Estrategias ambientales corporativas orientadas hacia la logística.
- Logística inversa.
- Gestión de la cadena de suministro verde.

Además, continuando con el concepto de sostenibilidad, en el estudio [71], los autores indican que la logística verde está relacionada con aspectos sociales, económicos y ambientales. Esto se conecta directamente con las dimensiones contempladas para la sostenibilidad. No obstante, al profundizar sobre la logística, resulta complejo establecer el equilibrio necesario entre estas dimensiones debido a la naturaleza multifacética de esta disciplina. En este estudio, los autores definen la gestión logística como sigue:

“Disciplina de la cadena de suministro que planifica, organiza, implementa y controla el flujo de recursos (bienes, servicios e información relacionada) desde el punto de origen hasta el punto de consumo de manera que cumple con los requisitos de los clientes eficiente y efectivamente.” – [71]

Con base en esto, la logística implica la integración entre la información, transporte, inventario, almacenamiento, manejo de materiales, empaque y seguridad. De todas estas actividades, los autores consideran como la más importante al transporte, siendo el eslabón principal para la mayoría de los servicios de logística.

En este sentido, todos los conceptos “verdes” comprenden un enfoque ambiental en las actividades logísticas para el desarrollo de la sociedad, y por ende, la implementación de todos estos conceptos logra llevar a las empresas a ser sostenibles. Esto conduce a alinear todos los esfuerzos para equilibrar los beneficios sociales, económicos y ambientales, asegurando la competitividad en el entorno. De esta forma, para alcanzar la sostenibilidad económica, por ejemplo, las empresas logísticas deben impulsar desarrollos de servicios logísticos que resulten innovadores y eficientes.

Vale la pena introducir el concepto de logística inversa, que forma parte de la logística verde. En el artículo [83] se consideran brevemente las diferencias entre la logística inversa y la logística verde. La logística inversa es un componente esencial de la GCS. Se refiere a la planificación, implementación y control de los flujos de productos, materiales y residuos que se mueven en sentido contrario a través de la cadena de suministro, desde el consumidor final hasta el fabricante o incluso más allá. Su enfoque principal es recuperar valor de los productos y materiales al final de su ciclo de vida útil, en lugar de simplemente desecharlos.

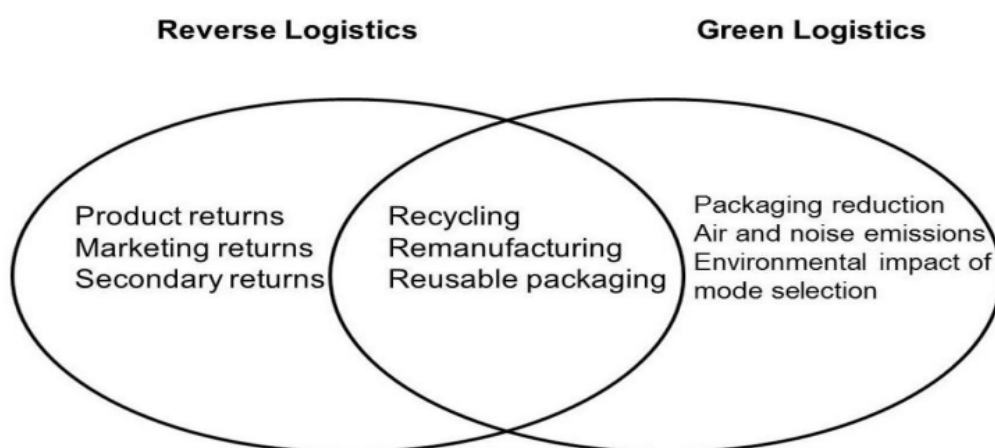


Figura 7: Comparación entre la logística verde y logística inversa. Fuente: [83].

La reducción de residuos que esto implica significa que la logística inversa comparte algunos aspectos con la logística verde, tal como se muestra en la Figura 7. El término logística verde a menudo se utiliza indistintamente con logística inversa, pero a diferencia de la logística inversa, la logística verde

resume las actividades logísticas que están motivadas principalmente por consideraciones ambientales.

En primer lugar, la diferencia más significativa es que la logística inversa se concentra en ahorrar dinero y aumentar el valor mediante la reutilización o reventa de materiales para recuperar beneficios perdidos y reducir costos operativos. La logística verde se centra en cuestiones de transporte, reciclaje y reutilización. Se trata de utilizar opciones amigables con el medio ambiente para el transporte y se centra en ahorrar dinero, pero da prioridad a la imagen de la empresa. En el artículo [83] se aclara que la logística verde se centra en el flujo hacia adelante de la cadena de suministro, mientras que la logística inversa se percibe como desarrollo sostenible. El siguiente cuadro comparativo, Cuadro 2, muestra las principales diferencias entre la Logística Inversa y la Logística Verde.

	Logística Verde	Logística Inversa
Enfoque principal	Consideraciones ambientales	Recuperación de valor y materiales
Objetivo	Reducción de impacto ambiental, eficiencia	Reciclaje, reutilización, reducción de costos
Flujo de productos	Del fabricante al consumidor	Del consumidor al fabricante
Actividades clave	Transporte sostenible, reciclaje, reutilización	Devoluciones, reparación, reciclaje, reacondicionamiento
Impacto económico	Reducción de costos, mejora de la imagen	Recuperación de materiales valiosos, ahorro de costos
Impacto ambiental	Reducción de la huella ambiental	Reutilización y reciclaje, reducción de residuos
Tecnologías y enfoques	Uso de combustibles limpios, tecnologías verdes	Gestión de la calidad de devoluciones, trazabilidad
Colaboración	Cadena de suministro sostenible	Colaboración entre actores de la cadena

Cuadro 2: Comparación entre Logística Verde y Logística Inversa. Fuente: elaboración propia.

Pasando a lo que son los objetivos ambientales de las empresas, es posible lograrlos utilizando principalmente una gestión ambiental que tenga como foco mantener un equilibrio entre el uso de recursos naturales y requisitos humanos, teniendo en cuenta las posibilidades que ofrece el medio ambiente. Todas las actividades que realizan los humanos tienen o pueden tener un impacto negativo para el medio ambiente, por ejemplo el agotamiento del ozono, la acumulación de GEI, la generación de desechos, entre otros. Por lo tanto, todos los beneficios ambientales que pueden lograr las empresas incluyen la reducción de los efectos anteriormente mencionados. Esto incluye la reducción de desechos, del consumo de combustibles fósiles, del uso del aire y del agua, de emisiones de GEI, así como también se incluye un uso eficiente de la energía.

En general, el transporte es una de las actividades principales para la mayoría de los servicios de

logística. Con el aumento de la industrialización a nivel mundial aumentan las actividades logísticas necesarias, entre ellas el transporte, lo que hace aumentar en consecuencia las emisiones de CO₂, principalmente. Existe entonces una necesidad cada vez mayor para las empresas de lograr acciones que sean respetuosas con el medio ambiente, en especial con las actividades de transporte logístico. De esta manera, las empresas podrían reducir las emisiones de esta área de manera significativa optimizando el diseño de las redes de transporte, usando el transporte más adecuado y gestionando eficientemente las capacidades de carga de los vehículos y las rutas recorridas. Aplicando estas acciones es posible que las empresas, además de observar una disminución en el impacto ambiental, experimenten en consecuencia una disminución de los costos asociados a las actividades del transporte, atacando entonces las dimensiones económica y ambiental de la sostenibilidad al mismo tiempo.

Todos los temas de logística verde son considerados como una versión más evolucionada del concepto antes introducido de sostenibilidad. Todo indicaría que las acciones responsables ambientalmente estarán acompañadas cada vez más de un desarrollo económico, aunque es un tema que comenzó a ser recurrente hace no mucho tiempo atrás y, por lo tanto, sigue quedando un largo camino por explorar en este sentido. Los estudios existentes hasta el momento, indican que toda práctica y aplicación de logística verde trae consigo mejoras tanto en la dimensión ambiental como en la económica.

En resumen, que las empresas implementen una logística verde tiene como consecuencia que las mismas logren ser más sostenibles. Este último concepto aplicado a la logística trae como objetivo lograr la rentabilidad de las empresas a largo plazo. Por último, la logística verde forma parte de un área de investigación que se encuentra hace unos años en constante expansión y cada vez gana mayor interés, especialmente en cuanto a los aspectos ambientales de los servicios de logística en las industrias, como puede ser la cadena de suministro.

Transporte ecológico de mercancías

Al medir los efectos ambientales de la logística, según el artículo [91], es importante distinguir entre impactos de primer y segundo orden. Los impactos ambientales de primer orden están directamente relacionados con el transporte de carga, el almacenamiento y las operaciones de manejo de materiales. Los impactos de segundo orden resultan indirectamente de estas operaciones logísticas y toman diversas formas. Por ejemplo, los avances en logística han facilitado el proceso de globalización, de manera que los bienes ahora se obtienen de partes del mundo que antes estaban poco desarrolladas. En parte, para acomodar el consiguiente crecimiento del tráfico de carga en estas áreas, los gobiernos han expandido la infraestructura de transporte, lo que a menudo ha afectado entornos sensibles. El aumento del tráfico de carga aérea y otros medios debido a la obtención global es un efecto de primer orden, mientras que la expansión de infraestructura, como la construcción de carreteras en áreas sensibles, es un efecto de segundo orden.

El transporte de mercancías por carretera es una de las actividades que contribuyen mayormente a las emisiones de CO₂ y es probable que su importancia aumente cada vez más a medida que siga avanzando la industrialización. No obstante, los objetivos de reducción de emisiones establecidos a ni-

vel regional y nacional suelen ser generales y no proporcionan objetivos específicos para el sector del transporte. Por ejemplo, el objetivo de la Unión Europea de reducir sus emisiones anuales de GEI no apunta específicamente a las emisiones del transporte.

Para analizar esta situación, en [74] se lleva a cabo una comparación entre distintas estrategias de mitigación para dos modelos de emisiones viales. Uno de ellos es el modelo mundial EcoTransIT y el otro utilizado es el modelo holandés propuesto en [79]. Dentro de las estrategias de mitigación que plantean se encuentra cambiar el enrutamiento de los vehículos, haciendo de la distancia un parámetro modificable. Otra alternativa para reducir el impacto negativo a nivel medioambiental es reducir la carga útil de los vehículos, la cual es la menos eficiente de las distintas estrategias planteadas. Por último, se plantea el aumentar la velocidad de los vehículos, siendo esta la más efectiva.

Durante una investigación en el artículo [78] se identificaron varias necesidades y oportunidades sobre prácticas de eficiencia energética entre los transportistas de mercancías por carretera. Entre ellas, se destaca una aplicación más estricta del límite de velocidad. Según el análisis, un aumento de la misma ahorraría combustible. También se propone hacer obligatorio el apagado automático del motor cuando el vehículo no se encuentra en movimiento y los sistemas de monitoreo de inflado de llantas. Además, plantean la obligatoriedad de las pruebas de resistencia a la rodadura para los neumáticos nuevos de servicio pesado.

Según la revisión de la literatura realizada sobre esta temática, se cree que hay muy poca investigación disponible sobre las acciones y actitudes de eficiencia energética de los transportistas. Estos problemas también evolucionan constantemente con el desarrollo de nuevas tecnologías de ahorro de combustible y la implementación de nuevas medidas políticas.

Para mitigar este impacto del transporte, en [73] se indica que es posible implementar un cambio en los vehículos, de manera que las empresas comiencen a utilizar vehículos más largos y pesados. Esta afirmación sigue el principio de que resulta más eficiente transportar volúmenes más grandes en vehículos grandes y completos, en lugar de transportar volúmenes mas chicos en cargas parcializadas. En este estudio, los autores mencionan que ya existen evidencias de que a mayor tamaño del vehículo, resulta más eficiente la utilización de los recursos. Esto significa que usar vehículos más grandes conduce a aumentar la eficiencia del transporte. Además, se realiza un análisis de los impactos que tuvo Finlandia al realizar el cambio de vehículos de 60 toneladas por combinaciones de 90 toneladas. A modo de ejemplo, mencionan que en Suecia un estudio similar logró asegurar que el cambio de vehículos reduciría los kilómetros recorridos por vehículo en un 21 %.

No obstante, implementar el cambio para trabajar con grandes configuraciones de vehículos tiene algunos impactos que pueden resultar negativos. Entre los más importantes se encuentra la posibilidad del cambio del ferrocarril a la carretera, algunos problemas en la seguridad e impactos sobre la infraestructura vial dado que no todas las carreteras pueden soportar grandes volúmenes de carga. De todas maneras, teniendo en cuenta estos impactos negativos, se presenta en el estudio anteriormente

mencionado una estimación realizada por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Finlandia en cuanto a los impactos económicos de este plan de cambio. En este sentido, los autores mencionan ahorros en los costos del transporte de mercancías de aproximadamente unos 1600 a 3200 millones de euros en un período de 20 años. Más allá del ahorro económico, el ahorro de kilómetros por vehículo, y el ahorro de combustible, es posible también lograr una reducción de las emisiones de CO₂. Por lo tanto, aumentar los límites de pesos en los vehículos de transporte de mercancías parecería tener como consecuencia resultados positivos en general, dado que los demás impactos negativos no serían restrictivos para implementar dicho cambio. En este sentido, Liimatainen y los demás autores concluyen que el aumento del tamaño y el peso de los vehículos puede llegar a ser difícil en un futuro aunque no imposible, y aseguran que las emisiones de CO₂ se ven considerablemente disminuidas.

Impactos del transporte de mercancías por carretera

La movilidad es uno de los aspectos clave que influyen en la calidad de la vida cotidiana. Sin embargo, impone costos a la sociedad y puede tener un impacto ambiental significativo. El crecimiento de las emisiones del transporte ha sido resultado, entre otros, de la globalización, que ha dado lugar a un aumento de la circulación de mercancías, y de las personas que se trasladan a vivir a zonas suburbanas, lo que se traduce en un mayor uso del automóvil, como se menciona en [77].

El número de kilómetros recorridos por transporte de mercancías por carretera es un indicador principal para medir las emisiones de GEI y contaminantes atmosféricos de los camiones, junto con la edad media de la flota de vehículos. De hecho, muchas estimaciones sugieren que el sector del transporte de mercancías por carretera ha contribuido más al aumento de las emisiones del transporte que los automóviles. Estos aumentos están relacionados con el crecimiento continuo en los volúmenes de transporte, a pesar de las políticas diseñadas para ayudar a cambiar el tráfico de las carreteras a otros modos. Los desarrollos de fabricación pueden ayudar a reducir el consumo de energía y las emisiones en el futuro, incluidos: nuevos tipos de motores de combustión interna (inyección directa de línea de gasolina, autoencendido controlado, híbridos); nuevos combustibles, como biocombustibles, grados reformulados y la probable introducción de hidrógeno; o el uso de vehículos de pila de combustible.

La flexibilidad es la principal ventaja del transporte de mercancías por carretera en comparación con otros modos. El transporte por carretera no solo constituye una gran parte de todas las cadenas de transporte, sino que también es un modo dominante, ya que muchos productos solo se transportan en camiones. Los transportes por carretera también son más flexibles desde una perspectiva temporal. Esto se refiere a la velocidad del servicio como tal, pero igualmente importante establece que las rutas y los horarios se pueden ajustar y cambiar según los requisitos individuales. Por último, el transporte por carretera es flexible desde la perspectiva de la capacidad. Los camiones pueden manejar pequeños volúmenes, pero también volúmenes muy grandes a través de la cantidad de vehículos utilizados y/o la frecuencia.

Un entorno cambiante causado por el desarrollo tecnológico exige un uso inteligente de los recursos. Las mejoras en el transporte de mercancías por carretera se pueden realizar en muchas dimensiones.

En el artículo [75] se destaca un modelo que podría ayudar a lograr una mejor comprensión del papel de las carreteras en el sistema de transporte de mercancías y cómo podría desarrollarse más. Las dimensiones discutidas son la infraestructura y logística, las leyes y políticas, el comportamiento social y la tecnología. Debe entenderse que las dimensiones se entrelazan y viven en una relación simbiótica entre sí. Los ejemplos muestran que es necesario utilizar las carreteras y todo el sistema de transporte de una manera más óptima y eficiente para enfrentar el desafío de una mayor presión sobre el sistema de transporte en el futuro.

Los impactos del transporte de mercancías por carretera pueden clasificarse en cuatro categorías, que se basan principalmente en los aspectos de los tres pilares de la sostenibilidad: ambiental, social y económico.

Externalidades ambientales:

- Contaminación del agua. El transporte de mercancías por carretera puede generar derrames de combustible y productos químicos, lo que contamina las fuentes de agua cercanas y afecta la calidad del agua potable y de los ecosistemas acuáticos.
- Cambio climático. El transporte de mercancías por carretera emite GEI que contribuyen al cambio climático.
- Destrucción de la biodiversidad. La expansión de infraestructuras para el transporte de mercancías, como la construcción de carreteras, puede provocar la degradación y fragmentación de hábitats naturales, lo que afecta negativamente a la biodiversidad local.

Externalidades sociales:

- Contaminación acústica. El tráfico de camiones y vehículos pesados en carreteras puede generar altos niveles de ruido que afectan negativamente la calidad de vida de las personas que viven cerca de las carreteras.
- Accidentes e intrusión visual. El transporte de mercancías por carretera conlleva un mayor riesgo de accidentes de tráfico, lo que puede afectar la seguridad de los conductores y peatones. Además, el desarrollo de infraestructuras para el transporte puede generar una intrusión visual en paisajes naturales y áreas urbanas.

Externalidades económicas:

- Congestión. El transporte de mercancías por carretera puede contribuir a la congestión del tráfico, especialmente en áreas urbanas y en rutas de transporte intensas. Esto puede provocar retrasos en la entrega de mercancías y aumentar los costos operativos para las empresas de logística.
- Daños en carreteras y tiempos de viaje más largos. El tráfico pesado de camiones puede causar daños en las carreteras, lo que resulta en costos adicionales de mantenimiento para las autoridades viales. Además, los tiempos de viaje más largos debido a la congestión también pueden afectar la eficiencia y rentabilidad del transporte de mercancías.

Estas externalidades resaltan la necesidad de adoptar medidas y prácticas de transporte más sostenibles para reducir los impactos negativos del transporte de mercancías por carretera en el medio ambiente, la sociedad y la economía. Algunas de las soluciones incluyen la promoción del transporte multimodal, el fomento del uso de vehículos más limpios y eficientes, la planificación adecuada de infraestructuras y la implementación de políticas que incentiven prácticas logísticas más respetuosas con el medio ambiente.

2.4. Green VRP

En esta sección se desarrollará con mayor detalle el concepto de *Green Vehicle Routing Problem* (GVRP), el cual es clave entender para continuar con el desarrollo de este proyecto de grado. El *Vehicle Routing Problem* (VRP, por sus siglas en inglés) es un problema clásico de optimización, que tiene como objetivo encontrar la ruta óptima tal que se minimicen los costos totales asociados al transporte. Más allá del objetivo, con estos problemas se busca atender los pedidos de un conjunto de ubicaciones con una determinada flota de vehículos, teniendo en cuenta ciertas restricciones como pueden ser la capacidad de carga de los vehículos, así como la demanda de las ubicaciones, entre otras.

El GVRP mantiene el mismo objetivo antes planteado, pero integrando al problema la dimensión ambiental, apuntando a lograr la sostenibilidad. En este sentido, el GVRP no solo busca la ruta óptima, sino que apunta a minimizar los impactos ambientales. Algunos ejemplos de esto pueden ser la reducción del consumo de combustible o la reducción de las emisiones de CO_2 que se generan como consecuencia de la actividad de transporte necesaria para atender la demanda. Por lo tanto, el GVRP es una variante del VRP clásico, que se enfoca en minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente que son provocados por el uso de vehículos, como se menciona en [15].

El efecto nocivo de las emisiones de CO_2 es una de las principales preocupaciones y, según la Agencia Internacional de la Energía [18], el sector del transporte por carretera es uno de los principales emisores de este gas. En este sentido, el GVRP ayuda a los centros de distribución a mejorar sus planes de rutas con el objetivo de reducir el consumo de combustible, y consecuentemente, los gases de CO_2 emitidos por sus flotas de vehículos. Algunas de las consideraciones ambientales que se incluyen en el GVRP son:

- Utilización de vehículos ecológicos que tengan bajas emisiones de carbono. Algunos ejemplos de estos pueden ser vehículos eléctricos, híbridos o propulsados por energías no contaminantes.
- Optimización de rutas de manera de minimizar las distancias recorridas y el tiempo de viaje, lo que implica una reducción en el consumo de combustible, así como en las emisiones de CO_2 a la atmósfera.
- Consolidación de entregas en una misma ruta para evitar viajes innecesarios, optimizando además la capacidad de carga de los vehículos utilizados.
- Restricciones en determinadas zonas para evitar que circulen vehículos pesados en lugares congestionados.

Los problemas de GVRP pueden tener múltiples variantes, dependiendo de los objetivos planteados, el VRP que buscan resolver, los tipos de vehículos utilizados y los diferentes escenarios de la realidad modelada. En la Figura 8 se muestra un diagrama que presenta algunos ejemplos para cada una de las dimensiones.

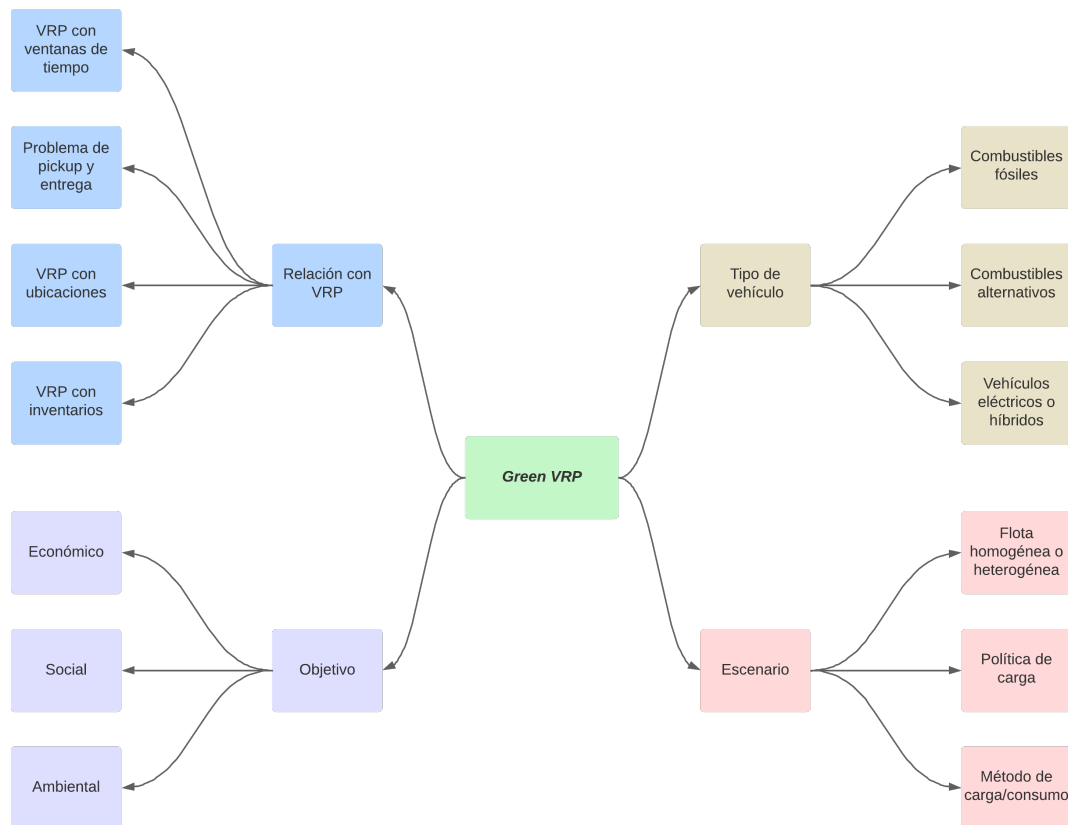


Figura 8: Variantes del GVRP. Fuente: elaboración propia.

A raíz de todas estas variantes, es común que el GVRP se vea clasificado en tres clases de problemas: problema de enrutamiento de vehículos por contaminación (PRP, por sus siglas en inglés), GVRP en un sentido más estricto y VRP en logística inversa (VRP-RL, por sus siglas en inglés). Esta clasificación se presenta en la Figura 9.

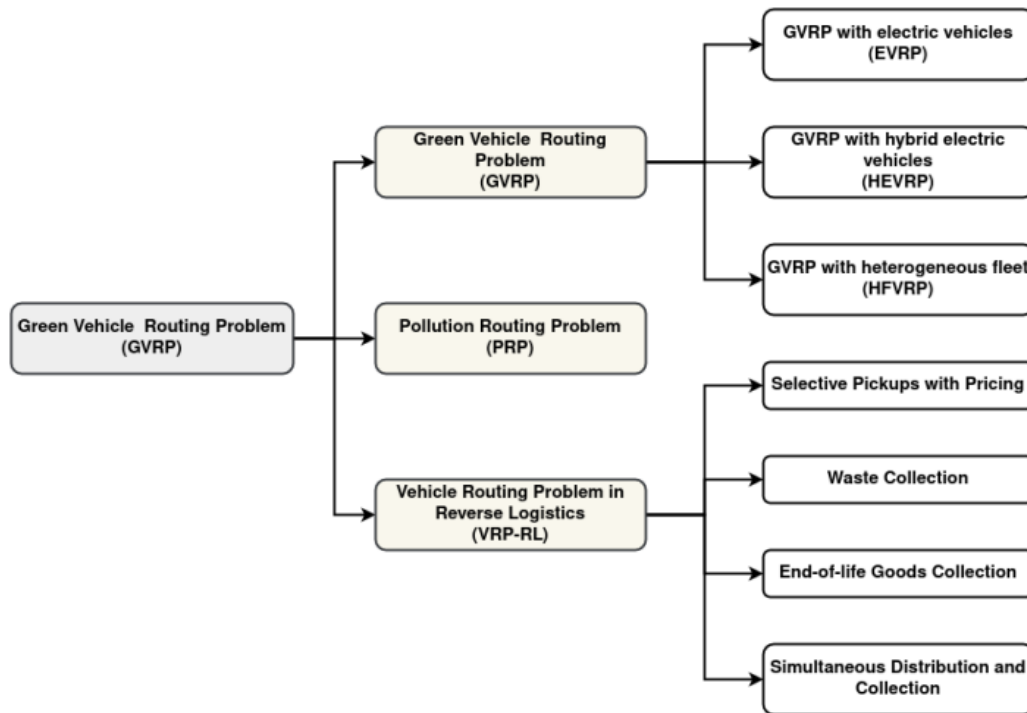


Figura 9: Clasificación del GVRP. Fuente: [86].

Según [86], el PRP considera una flota de vehículos con motores de combustión interna. Los autores incluyen una función objetivo teniendo en cuenta la distancia recorrida y las emisiones de GEI, las cuales dependen de varios factores como la velocidad del vehículo, la carga y la pendiente de la carretera. Este problema se plantea en general como un problema multiobjetivo, buscando el equilibrio entre las emisiones de CO_2 y los costos económicos.

El GVRP en un sentido más estricto tiene el objetivo de minimizar las emisiones generadas por la flota de vehículos. Esta flota puede tener distintas características como vehículos con motores de combustión interna y/o vehículos de combustibles alternativos. En los casos donde los vehículos utilizados tienen motores de combustión interna, el problema se asemeja mucho al problema PRP. Otra alternativa que se tiene para los GVRP es considerar vehículos con fuentes de energía alternativas, por ejemplo vehículos eléctricos e híbridos. En estos casos los vehículos pueden tener la necesidad de visitar estaciones de recarga, por lo que resulta importante que los mismos tengan acceso a una en cualquier momento del recorrido, de manera de asegurar que se tenga el suficiente combustible para cumplir con la ruta planificada.

Por otro lado, la logística inversa se refiere a la GCS que implica el movimiento de productos, materiales y recursos desde el consumidor final de vuelta hacia los fabricantes o proveedores, con el objetivo principal de recuperar valor a través de actividades como devoluciones, reciclaje, reacondicionamiento o eliminación adecuada. En la sección anterior se puede ver un análisis más profundo de este tema.

2.5. Métodos de resolución

La revisión bibliográfica realizada para este trabajo se centró principalmente en los problemas clasificados como GVRP. En esta sección se presentan los artículos encontrados sobre el tema y se clasifican según los distintos métodos de resolución utilizados. Esto permite conocer en qué punto se encuentra la temática desarrollada a nivel mundial, lo que se utilizó como punto de partida para elegir el caso de estudio de este proyecto de grado. Como se mencionó anteriormente, los distintos métodos de resolución son: exactos, heurísticos, metaheurísticos e híbridos.

Métodos Exactos

En el trabajo [23] se presenta el VRP para vehículos eléctricos considerando el estado de carga de las baterías de litio. El objetivo es determinar los recorridos realizados con el mínimo costo posible, buscando visitar las estaciones de recarga la cantidad de veces que sea posible evitando sobrecargas y descargas profundas que puedan degradar la batería. La función objetivo busca minimizar el tiempo total de recorrer las rutas, considerando el tiempo de recorrido entre nodos (clientes y estaciones), el tiempo necesario para recargar las baterías y el tiempo de servicio. Además, el modelo decide si el tamaño de la flota utilizada es óptimo para la solución o si se puede reducir la cantidad de vehículos eléctricos a utilizar. Con base en lo anterior, se proponen cuatro modelos de programación lineal entera mixta para evaluar el impacto que tienen las recargas parciales, analizando el escenario en el que la batería debe recargarse por completo para resolver el problema.

Los modelos propuestos exponen con precisión los diferentes comportamientos en los estados de carga de las baterías y pueden encontrar rápidamente soluciones óptimas a las pequeñas instancias. También se pudo verificar que permitir que los vehículos se recarguen reduce parcialmente el tiempo total dedicado a las rutas de entrega y contribuye al uso eficiente de la energía. Es posible mencionar que el tiempo de cómputo, que depende del tamaño de la instancia, también se debe directamente a la ubicación tanto de los clientes como de las estaciones de carga. Por lo tanto, para instancias grandes y una mayor concentración de elementos, es necesario implementar técnicas heurísticas o metaheurísticas que permitan resolver el problema mediante soluciones aproximadas de buena calidad en poco tiempo.

En [27] se propuso un método *Branch and Price* (BAP, por sus siglas), motivado por el desarrollo de la logística china. En este artículo, se estudia el GVRP multidepósito con ventanas de tiempo (MDGVRPTW, por sus siglas en inglés) para reducir las emisiones totales de CO_2 al programar vehículos para servicios logísticos. El alcance de este estudio es identificar el MDGVRPTW, programar rutas de vehículos para servir a un conjunto de clientes y minimizar las emisiones totales de CO_2 , sujetas a las restricciones del problema, como pueden ser la carga, la velocidad, las ventanas de tiempo y la cantidad de depósitos. Además del algoritmo, se utiliza el modelo de Bektas y Laporte para calcular las emisiones de CO_2 [43], y un modelo de partición en conjuntos. El BAP requiere mucho tiempo y no puede obtener la solución óptima dentro del tiempo límite. Además, se realizaron numerosos experimentos y se logró una reducción máxima del 37,6 % en las emisiones de CO_2 utilizando el modo multidepósito con otros factores. El modo de depósito único se beneficia más de la mejora de la velocidad del vehículo para reducir las emisiones de CO_2 y, como máximo, se puede lograr una reducción

del 7,1 % cambiando la velocidad del vehículo.

En el artículo [33] se comparan las resoluciones entre un problema de enrutamiento de inventario multiperíodo (MIRP, por sus siglas en inglés) y un MIRP teniendo en cuenta el consumo del combustible (FCMIRP, por sus siglas en inglés), mediante el algoritmo *Branch and Cut*. En la mayoría de los casos, el consumo de combustible del FCMIRP es menor y puede lograr un ahorro del 2,21 % en promedio. Para algunas instancias, el ahorro supera el 6 %. Además, en todos los casos, genera soluciones de menor costo total, lo que origina un ahorro promedio de 1,09 %. Por lo tanto, el FCMIRP es capaz de ahorrar no solamente costos generales, sino también puede reducir el consumo de combustible y emisiones de CO_2 .

Por otra parte, el trabajo [11] proporciona un estudio teórico del GVRP. En el GVRP, los vehículos eléctricos con capacidad limitada pueden recargarse en estaciones de combustible alternativo (ECA, por sus siglas) para seguir visitando a los clientes. En este trabajo, se investigan dos versiones de GVRP, en la primera no se permiten visitas consecutivas de ECA, y en la segunda sí se permiten, es decir, una solución puede tener una ventaja entre dos ECA. Esta investigación propone propiedades combinatorias y límites inferiores que tienen el potencial de fortalecer las formulaciones matemáticas mejorando las metodologías de soluciones exactas.

Las propiedades combinatorias se dividen en tres categorías: propiedades de ECA, relativas a límites en el número de visitas a las ECA; propiedades de consumo de combustible, que limitan el consumo de combustible para cualquier ruta del vehículo; y propiedades de ruta, que utiliza las propiedades anteriores para derivar límites en el número total de rutas y su costo total.

Métodos Heurísticos

En [30] se utiliza un PBA² para resolver el problema de enrutamiento de vehículos con más de un depósito (MDVRP). El PBA obtuvo la solución óptima para solo cuatro instancias, y la brecha (de ahora en adelante *GAP*) entre la solución PBA y la solución óptima es 35,84 %. La solución óptima no se puede obtener para un problema de mayor tamaño. Por lo tanto, este autor utiliza una desviación porcentual relativa para evaluar el rendimiento. La desviación promedio de PBA es 132,56 %. El PBA puede resolver el problema en menos de un segundo para todas las instancias. La principal desventaja de este algoritmo es la mala calidad de la solución producida por el mismo.

Métodos Metaheurísticos

En [13] se busca resolver un VRP que maximice las ventas y reduzca los costos de distribución. Para esto se utiliza en principio un modelo matemático robusto, pero dado que el problema es *NP-hard*, no es posible obtener soluciones para grandes instancias de problemas, por lo que se plantea un algoritmo metaheurístico para resolverlo. En base a esto, los autores utilizan un PSO y lo comparan con una

²El PBA se basa en la idea de dividir a los clientes en clientes límite y no límite, propuesto por Nagy y otros autores [44]. Un cliente límite es un cliente que se encuentra aproximadamente a medio camino entre dos depósitos.

metaheurística basada en un algoritmo *Differential Evolution* mejorado (IDE, por sus siglas en inglés). Una vez resueltos los distintos problemas propuestos, los resultados obtenidos indican que el algoritmo IDE tiene un desempeño mejor en términos de resultados que el PSO, el cual además requiere de mayor tiempo computacional para resolver problemas de gran tamaño.

En [15] se presentan dos resoluciones para el problema de enrutamiento de vehículos ecológicos teniendo en cuenta las capacidades (CGVRP, por sus siglas en inglés). Este problema busca optimizar las rutas de entrega de los vehículos propulsados por combustibles alternativos (AFV, por sus siglas en inglés) considerando: capacidad de carga limitada, capacidad del tanque de combustible limitada y escasa disponibilidad de ECA. Como los AFV tienen una baja capacidad del tanque, durante la distribución es necesario que pasen por alguna ECA.

Se propone entonces, una metaheurística de dos fases para buscar rápidamente las soluciones a instancias de problemas de gran tamaño. En la primera fase se resuelve un *Travelling Salesman Problem* (TSP) utilizando el criterio del vecino más cercano. En la segunda fase, de acuerdo al nivel de consumo del combustible y los productos restantes, las ECA y el depósito de origen de los AFV se incluyen en la ruta del problema TSP para lograr una solución factible. Sin embargo, la calidad de las soluciones obtenidas por esta heurística no es lo suficientemente alta, por lo que se decide utilizar el ACS para resolver el problema y comparar ambos métodos. Los resultados muestran que el algoritmo ACS es mejor que la heurística de dos fases para obtener soluciones de calidad, teniendo el primero un rendimiento de 38,27 % superior que el del segundo. Aún así, se requiere más tiempo de cálculo para usar el algoritmo ACS.

Por otro lado, se presenta en [17] un análisis de las construcciones iniciales de soluciones factibles para el problema CGVRP. La mayoría de las construcciones presentadas en este documento se dividen en dos fases. La primera fase crea una solución factible para un TSP, ya sea total o selectivamente sin tener en cuenta los nodos ECA y las restricciones de carga y energía. El resultado de la primera fase suele ser un recorrido CGVRP no válido, por lo tanto, la segunda fase puede verse como un procedimiento de reparación. La metaheurística de dos fases es aplicable a cualquier vehículo que utilice combustible alternativo o vehículo eléctrico, así como también los modelos propuestos en este trabajo podrían extenderse a otras variantes del VRP.

En [18] se desarrolla un SA modificado para abordar el problema de suministro logístico. Se considera una red de suministro, como se muestra en la Figura 10, en un problema de rutas de vehículos verdes con multidepósito (GVRPMD, por sus siglas en inglés). Se desarrolló un modelo multiobjetivo que minimiza la emisión de los vehículos y el costo total. El uso de SA modificado para GVRPMD puede ayudar a los gerentes de la organización a diseñar una red de distribución ecológica. Además, mediante una comparación del SA modificado con otros resultados existentes en la literatura, los autores indican que el SA realiza una solución de mejor calidad que otras metaheurísticas.

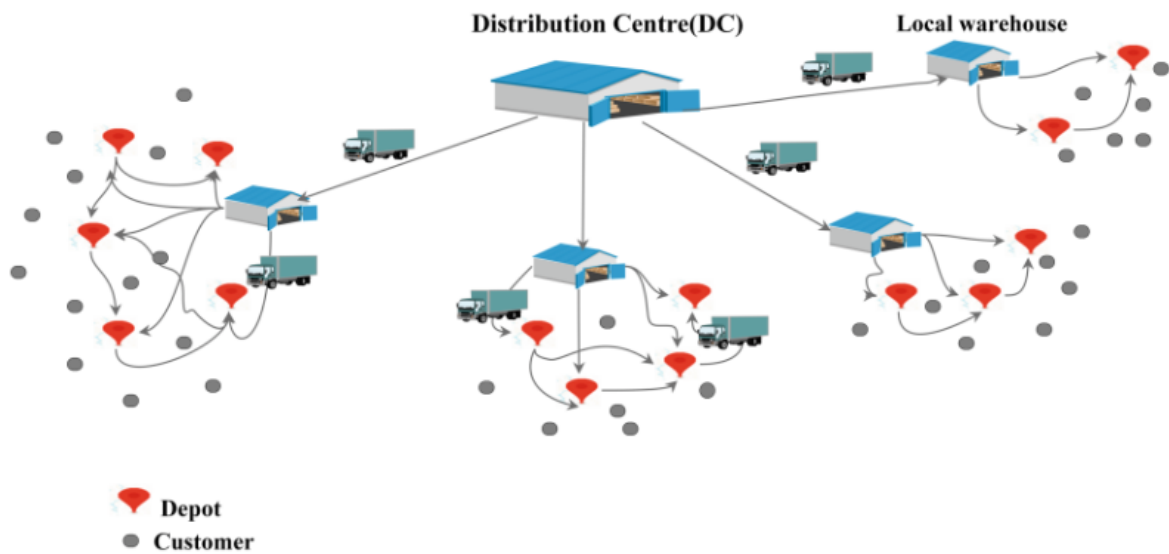


Figura 10: Cadena de suministro con múltiples depósitos. Fuente: [18].

Pasando al artículo [29], se aborda el problema de enrutamiento de ubicación de vehículos eléctricos (EVLRP, por sus siglas en inglés) en fincas de mandioca, donde los mismos tienen una distancia de viaje restringida. El propósito de esta investigación es definir las fincas de mandioca que oficiarán de depósitos, asignarlas a los centros de acopio más cercanos y a las rutas de transporte con distancias restringidas. Se utilizó el algoritmo ALNS para resolver el EVLRP. Generalmente, estos algoritmos comienzan con la generación de una solución inicial, y luego se seleccionan métodos de destrucción y reparación para mejorar dicha solución (Ver Figura 11).

El marco experimental fue una comparación entre soluciones obtenidas por los algoritmos ALNS y soluciones proporcionadas por el software *Lingo*. Se utilizaron los siguientes algoritmos: *Greedy Acceptance*, SA, *Threshold Acceptance* (TA), *Old Bachelor Acceptance* (OBA). Según el autor de este trabajo, para instancias de tamaño pequeño, tanto *Lingo* como todos los ALNS propuestos podrían generar soluciones óptimas en un corto período de tiempo computacional. Se fijó un tiempo límite de 72 horas para *Lingo*, alcanzando el óptimo con los algoritmos en aproximadamente 3 minutos, siendo además mejores soluciones. Los algoritmos SA y OBA resultaron mejores en términos de calidad. En instancias más grandes los algoritmos llegaron a una solución en 7 minutos promedio, siendo OBA el más preciso. El primer caso muestra que SA y ACS funcionan mejor que PSO y GA en términos de distancia recorrida y tiempo de cálculo.

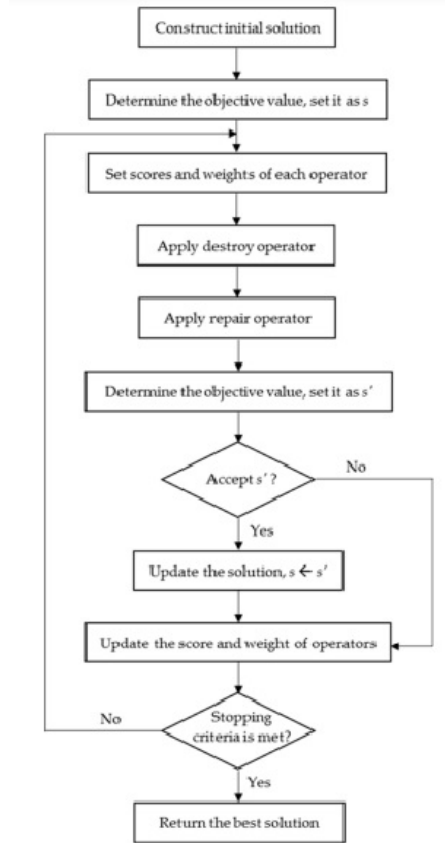


Figura 11: Algoritmo ALNS. Fuente: [29].

En el trabajo [36] se busca comparar el rendimiento de las metaheurísticas GA, ACS, PSO y SA, para resolver un problema de entrega empírica en Yogyakarta. Para esto se desarrollan dos casos con el fin de abarcar diferentes tipos de datos. El primer caso consiste en instancias de un operador logístico con 58 minoristas, mientras que el segundo caso utiliza dos operadores logísticos con un total de 142 minoristas. Para esto se utilizan datos hipotéticos y empíricos, con el objetivo de comparar las soluciones obtenidas al optimizar las rutas. Los resultados muestran que ACO y SA se desempeñan mejor al enfrentarse a menores distancias recorridas para el primer caso, y a mayor utilidad del camión y menor número de rutas para el segundo caso. Además, para los datos hipotéticos, GA supera a los demás enfoques. Sin embargo, en el estudio con datos empíricos, GA tiene un rendimiento inferior al de ACS e incluso al de SA.

En [30] se utiliza una variante del ACS, el algoritmo *Two Stages Ant Colony System* (TSACS). En TSACS, hay dos tipos de hormigas, hormigas de depósito y hormigas de ruta. Las hormigas de depósito se utilizan para asignar clientes a un depósito y las hormigas de ruta se utilizan para generar rutas. En este estudio se generaron aleatoriamente 17 instancias de problemas pequeños y 60 instancias de problemas grandes. El algoritmo propuesto es capaz de encontrar la solución óptima para todas las instancias de tamaño pequeño. Sin embargo, para instancias de mayor tamaño, el TSACS no garantiza una solución óptima.

En el artículo [6] se presenta un método metaheurístico para la resolución del problema GVRP. Los autores modelan este problema con base en el problema de enrutamiento de vehículos capacitados

(CVRP), y proponen la resolución mediante un algoritmo evolutivo multiobjetivo para obtener el conjunto de soluciones óptimas. Se contemplan la distancia total recorrida y las emisiones de CO_2 como funciones objetivo del problema. En particular, el algoritmo utilizado en este trabajo se basa en el *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA). Una vez implementado el algoritmo, se realizan las pruebas de validez correspondientes. Los resultados indican que la distancia recorrida y las emisiones de CO_2 están correlacionadas positivamente, y dependen fuertemente de las diferencias entre niveles de emisión cuando el vehículo está vacío o con carga completa. Más aún, en los casos donde esta diferencia es pequeña, la correlación es pequeña y es posible resolver el GVRP con un solo objetivo; cuando la diferencia aumenta, la correlación también y los métodos multiobjetivo se vuelven más útiles para resolver estos casos.

En [31] se propone un MA, un algoritmo basado en la población, para abordar el problema de enrutamiento de vehículos eléctricos. Un MA es un enfoque metaheurístico de propósito general que normalmente combina un procedimiento de optimización de búsqueda local con un marco basado en la población. Para evaluaciones experimentales, se emplean dos conjuntos de datos. El primer conjunto de instancias de referencia consta de 52 instancias de 20 a 500 clientes y 3 a 28 estaciones de servicio. Se evalúa el desempeño de MA para resolver GVRP en comparación con los siguientes algoritmos: *Adaptive Variable Neighborhood Search* (AVNS), *Multi-Space Sampling Heuristic* (MSH) y *Multi-Start Local Search* (MSLS). El algoritmo MA propuesto puede obtener los mejores resultados para 38 de 40 instancias a pequeña escala con solo 20 clientes. En escenarios de 109 a 471 clientes, MA logra mejores resultados en términos de obtener el mejor valor objetivo para 9 de los 12 casos.

En el estudio [35] realizado por Quan y otros autores, se construye un modelo de optimización de rutas que incorpora varios factores, incluyendo el costo de las emisiones de CO_2 generadas por los vehículos de distribución, y se diseña un algoritmo ACS mejorado para abordar el problema. Luego, para evaluar la efectividad del modelo y del algoritmo, los autores utilizan un ejemplo práctico basado en una empresa de logística. Los resultados muestran que el modelo no solo logra reducir los costos totales de distribución de las empresas de logística, sino que también considera los beneficios económicos y sociales asociados. De todas formas, los autores destacan que al construir el modelo de optimización de rutas para minimizar las emisiones de CO_2 cumpliendo con las restricciones de ventana de tiempo, no se tuvieron en cuenta algunos factores que influyen en las emisiones, como el estado en tiempo real de las carreteras y la velocidad del vehículo.

Métodos Híbridos

El artículo [5] representa el estudio de las estrategias de distribución adoptadas por las empresas con un enfoque principal en la reducción de costos económicos y satisfacción. En este estudio se menciona que dentro de la literatura revisada, los algoritmos GA son los que se utilizan comúnmente para resolver problemas GVRP. En la mayoría de los artículos, la programación lineal se combinó con otros enfoques para proporcionar soluciones óptimas.

En [8] se considera el problema GVRP estocástico multiobjetivo. Los objetivos que se buscan resol-

ver contemplan aspectos económicos, sociales y ambientales; más particularmente, se quiere minimizar el costo operativo total, maximizar la satisfacción del cliente, y minimizar el costo ambiental, respectivamente. Todos los modelos que se plantean consideran incertidumbres en los tiempos de viaje, los tiempos de servicio y las demandas. Para la resolución de este problema se plantea un algoritmo híbrido que combina el algoritmo GA con una búsqueda local que calcula un resultante híbrido según la distancia recorrida y la demanda asociada del cliente. El modelo responde contemplando todos los objetivos. Sin embargo, los autores afirman que este es el primer modelo que contempla estos objetivos simultáneamente, por lo que no hay resultados en la literatura que permitan comparar los resultados obtenidos.

En [21] se busca resolver un GVRP en el que se supone que la capacidad del tanque de combustible de los vehículos es limitada, y se incorpora a la planificación de rutas la decisión sobre el momento y el lugar donde recargar el tanque para que los conductores no se enfrenten a quedarse sin combustible mientras conducen. En este artículo se considera este problema GVRP en simultáneo con el ruteo de vehículos dependiente del tiempo (TDVRP, por sus siglas en inglés). En principio, el problema se presenta y formula como un modelo de problemas lineales enteros mixtos (MILP, por sus siglas en inglés). Dado que el problema es *NP-hard*, para resolver grandes instancias se presenta un algoritmo heurístico híbrido que consta de dos fases. La primera fase descompone el problema en etapas de agrupación y enrutamiento. Luego, se genera un corte para eliminar la asignación actual de la región factible del modelo de agrupamiento y, en consecuencia, las etapas de agrupamiento y enrutamiento se repiten nuevamente. La mejor solución encontrada dentro de la primera fase se utiliza como input de la segunda fase para mejorar aún más la solución.

Para esta formulación, los autores tienen en cuenta dos enfoques. Uno independiente del tiempo, en el que no se tiene en cuenta la congestión del tránsito al planificar las rutas y se asume que el vehículo siempre puede conducir a gran velocidad. Y otro enfoque dependiente del tiempo, en el que sí se tiene en cuenta la congestión del tránsito. Como conclusión, en los resultados obtenidos para instancias pequeñas, se observa que las soluciones derivadas del enfoque independiente del tiempo fueron inviables, mientras que el ahorro de usar la formulación dependiente del tiempo fue en promedio del 11,71 %.

En [14] se presenta el *Hybrid Butterfly Optimization Algorithm* (HBOA) para minimizar los costos de distribución que incluyen el consumo de combustible, la emisión de CO_2 y los costos de uso del vehículo. Este estudio propone un modelo matemático para describir el problema, el cual se utiliza para minimizar los costos de distribución. El algoritmo propuesto se inspira en el BOA, al combinar el algoritmo TS (ver Figura 12) y la estrategia de búsqueda local para mejorar el rendimiento.

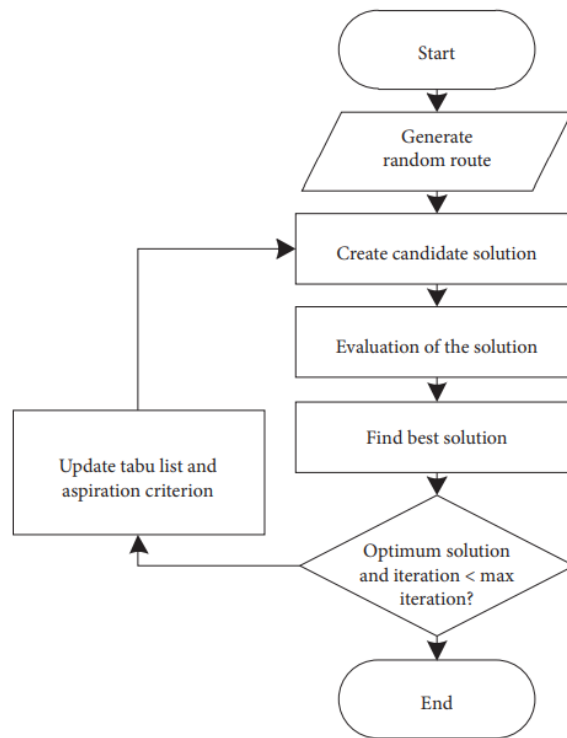


Figura 12: Algoritmo TS. Fuente: [14].

Como conclusión, se obtiene que el HBOA produce un costo total de distribución menor que otros algoritmos. El número de nodos afecta significativamente el tiempo computacional en HBOA. Sin embargo, el algoritmo propuesto proporciona un tiempo de cálculo relativamente mayor en comparación con otros algoritmos.

En [26] se propone un método híbrido que mezcla el algoritmo MA con una búsqueda local para lograr minimizar las distancias en la distribución logística intraurbana con vehículos híbridos eléctricos (PHEV, por sus siglas en inglés). Para que la solución sea más aplicable al VRP de PHEV, se realizan los siguientes cambios en cuanto al MA tradicional. Primero, para la inicialización de la población se propone un nuevo algoritmo basado en la heurística de vecindad más cercana. En segundo lugar, se introduce un mecanismo de penalización para mantener la diversidad de la población. Por último, se modifica el método tradicional 2_opt^3 , añadiendo una técnica de comparación cíclica. La metodología híbrida propuesta exhibe un desempeño competitivo en términos de precisión y robustez, logrando resultados superiores en comparación al SA.

En el artículo [2] se estudia el problema VRP con tiempo de viaje difusos, múltiples depósitos, y se analiza la entrega dividida y los vehículos heterogéneos, capacitados, impulsados por combustibles alternativos. Se evalúan cinco vehículos de combustible alternativo (eléctricos, híbridos, diésel, biodiésel y gas natural comprimido) frente a múltiples criterios utilizando *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). Se utiliza con esta técnica, el algoritmo GA para una asignación sustentable, apta y de bajo costo. El algoritmo se ejecuta para múltiples combinaciones de instancias.

³Propuesto por Lin junto a más autores en el año 1973 [45]

Los resultados indican que el enfoque propuesto es sólido y proporciona soluciones pragmáticas.

En [7] se introduce una metodología para optimizar la ruta de los AFV con el objetivo de minimizar los costos operativos y las emisiones de CO_2 . El trabajo de investigación propone una solución basada en GA para resolver el problema de GVRP que puede considerarse como un modelo básico para la optimización de rutas de vehículos de combustibles alternativos. La investigación se centra en el diseño de un algoritmo GA y optimización para abordar la formulación del problema utilizando casos de muestra. También se utiliza el algoritmo ALNS para resolver el problema y el enfoque de resolución demuestra considerables mejoras en los medios de reducción de la distancia, que a su vez produce una reducción en el consumo de combustible y emisiones de CO_2 .

En el artículo [9] se combinan dos variantes de VRP: problema dinámico de ruteo de vehículos (DVRP) y GVRP, combinación llamada DGVRP. Para estudiar este problema se combinan dos algoritmos, el algoritmo ACS con ALNS. La eficacia de este enfoque se prueba en un conjunto de instancias dinámicas de problemas verdes, que se adaptan en este trabajo a partir de los conjuntos de datos de referencia GVRP estáticos. Como resultado, se comparan las emisiones totales del caso estático con el dinámico, concluyendo que para el caso dinámico las mismas aumentan. En este caso en particular, esto podría deberse al aumento de demandas de clientes que se reciben en el correr del día y hacen aumentar el objetivo.

En [28] se estudia el problema de distribución logística de flotas mixtas bajo el tope de emisiones de CO_2 . Se utilizan múltiples vehículos convencionales y ecológicos heterogéneos ubicados en un solo depósito para atender a los clientes. Se indica el límite de emisiones de CO_2 en kilogramos por kilómetro de distancia recorrida. Los clientes pueden ser atendidos por cada tipo de vehículo, pero las emisiones totales de los vehículos deben satisfacer el límite de emisiones de CO_2 para la red. Así, los desafíos radican en el problema de obtener la mejor composición de los vehículos además de una distancia mínima de recorrido para los mismos. Se utiliza un enfoque ACS híbrido, siendo una combinación de algoritmos ACS y AVNS estándar.

El primer criterio para evaluar este método es en cuántos casos el algoritmo encuentra una solución mejor que la solución conocida encontrada en la literatura hasta el momento (BKS, por sus siglas en inglés). El segundo criterio es el porcentaje de desviación relativa de la solución del algoritmo en comparación con el BKS. La comparación muestra que el algoritmo ACS híbrido propuesto obtiene un total de 21 nuevos BKS de 56 instancias. El resultado del ACS es 3,82 %, 4,19 % y 4,47 % superior al algoritmo de HS⁴, CGH⁵ y ACS híbrido⁶, respectivamente.

Ghezavati junto a otros autores proponen en [34] un algoritmo SA, que está equipado con un método auxiliar, denominado *Self-Modifier of Probability of Section Approach* (SMPSA). Para analizar el

⁴HS (por sus siglas en inglés) es un método propuesto por Oliveira y Vasconcelos en [46].

⁵CGH (por sus siglas en inglés) es una heurística de generación de columnas de Alvarenga y otros autores propuesta en [47].

⁶ACS híbrido es un sistema híbrido propuesto en el estudio [48].

rendimiento de esta metodología híbrida se comparan los resultados de 46 instancias utilizando el algoritmo SA con y sin SMPSA. Este método mejora el rendimiento del SA tradicional, reduciendo el tiempo de convergencia del algoritmo, así como lograr soluciones de mejor calidad.

De esta revisión de la literatura se lograron desprender algunas conclusiones. El GVRP es un tema que ha cobrado relevancia en los últimos años, ya que globalmente se está poniendo énfasis en la búsqueda de prácticas cada vez más amigables con el medio ambiente. Esto se ve reflejado en el crecimiento de la cantidad de artículos, investigaciones y otro tipo de trabajos poniendo foco en el ruteo de vehículos ecológico. Por otro lado, como se vio en la sección 2.1 la mayor parte de estos trabajos utilizan métodos de resolución metaheurísticos e híbridos para resolver los problemas que se plantean. Sin embargo, para este trabajo se utilizó un método de programación lineal entera. Esto se debe principalmente a la ventaja de obtener soluciones óptimas, así como también a la limitación del conocimiento que se tiene en referencia a la implementación de metodologías de otro tipo. Se destaca que esta elección tiene como desventaja la poca escalabilidad en cuanto al tamaño de las instancias de datos a estudiar. Otro aspecto que se debe tener en consideración al aplicar este tipo de métodos es la ineficiencia que presenta para problemas *NP-hard* con grandes instancias. De todas formas, las instancias utilizadas no fueron de gran tamaño, lo que permitió la utilización de este método de resolución garantizando la precisión de los resultados obtenidos.

3. Contexto del caso de estudio

Se presenta en este capítulo un marco sobre la forestación en Uruguay. Se analizan diferentes aspectos, entre ellos el transporte y la infraestructura disponible para la actividad en el país.

El análisis que se presenta a continuación, tendrá como foco la cadena celulósico-papelera ya que es la de mayor peso cuando se habla del sector forestal del país. En Uruguay, este sector combina distintas actividades, desde la obtención de semillas hasta el transporte final de los productos terminados para ser exportados. Como primera clasificación, las actividades que se encuentran en el sector forestal se agrupan de la siguiente manera:

1. **Fase primaria:** producción de semillas y plantines en viveros, implantación y tratamientos en bosques y cosecha.
2. **Fase secundaria:** actividades industriales de transformación de madera. En esta categoría se encuentra la cadena celulósica del país.
3. **Logística, transporte y servicios asociados:** En Uruguay, la industria forestal está compuesta de grandes empresas integradas verticalmente, encargadas de la actividad agraria, industrial y de procesos intermedios hasta que se comercializa el producto terminado.

La Figura 13 muestra lo antedicho. Aquí puede verse como las actividades de transporte y logística acompañan en todo el proceso a las fases primaria y secundaria, que corresponden a las actividades agrarias e industriales, respectivamente, hasta que el producto es comercializado. Es importante destacar estas actividades de logística ya que juegan un papel fundamental para satisfacer las necesidades eficientemente, tanto de las industrias como de los clientes finales, sea que se hable de la cadena forestal, como es el caso, o de cualquier cadena de suministro.



Figura 13: Actividades del sector forestal. Fuente: [50].

Entrando un poco más en detalle sobre cuáles son las fases que involucra la cadena forestal, se pueden encontrar las siguientes, detalladas brevemente:

- **Viveros:** Plantines y mejoramiento.
- **Silvicultura:** Plantaciones y manejo forestal.
- **Cosecha:** Acopio de madera, incluyendo tala.
- **Carga y transporte de madera:** Transporte de madera hacia las industrias ya sea vía terrestre o fluvial.
- **Transformación industrial:** Aquí se encuentran las plantas de celulosa.
- **Producción de energía:** Generación de energía a partir de la quema de biomasa, por ejemplo.
- **Exportación:** Exportación del producto terminado.

Comercio exterior

Siguiendo con el foco en la industria celulósica, se analizarán las consecuencias económicas a raíz de la llegada de estas industrias. Es notorio que las exportaciones del sector forestal se vieron aumentadas gracias a las ventas externas de madera y el aumento del valor agregado del sector, que surgen por la instalación de las plantas de celulosa en el país. En la Figura 14 se puede ver el porcentaje de exportaciones vinculadas al sector cada 10 años y, con ello, el claro aumento que hubo en las exportaciones hasta el año 2021.

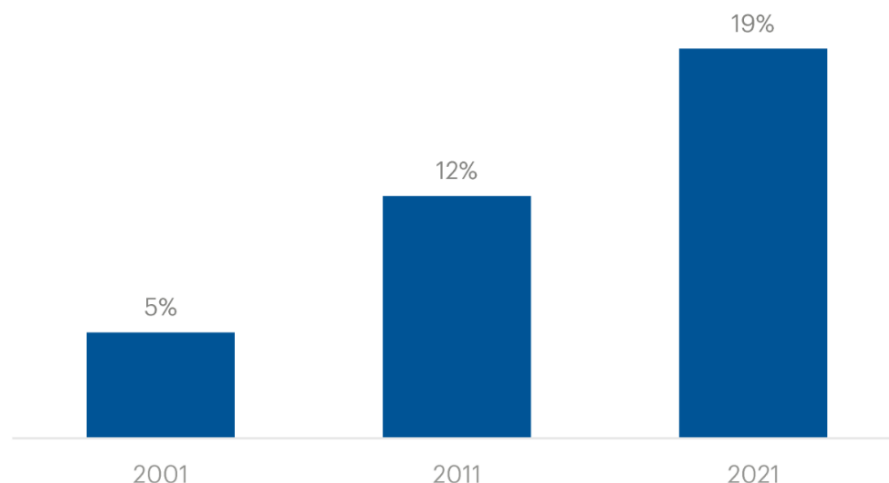


Figura 14: Porcentaje de exportaciones correspondientes al sector forestal. Fuente: [50].

Como puede verse, en el 2021 las exportaciones del sector representaron un 19 % del total de exportaciones del país. Esto incluye ventas y productos de la madera, papel, cartón, y sobre todo celulosa, y se debe principalmente al aumento de las exportaciones de esta última y de las exportaciones de madera.

En el gráfico de la Figura 15 esto puede verse reflejado, además de ver cómo, en el año 2021, la celulosa representa un 73 % de las exportaciones de la actividad forestal, lo que quiere decir que es el principal producto del sector en términos de exportación (además de ser el segundo producto más exportado en el Uruguay). Por otro lado, se ve como también las exportaciones de madera aumentaron, experimentando un aumento del 63 %.

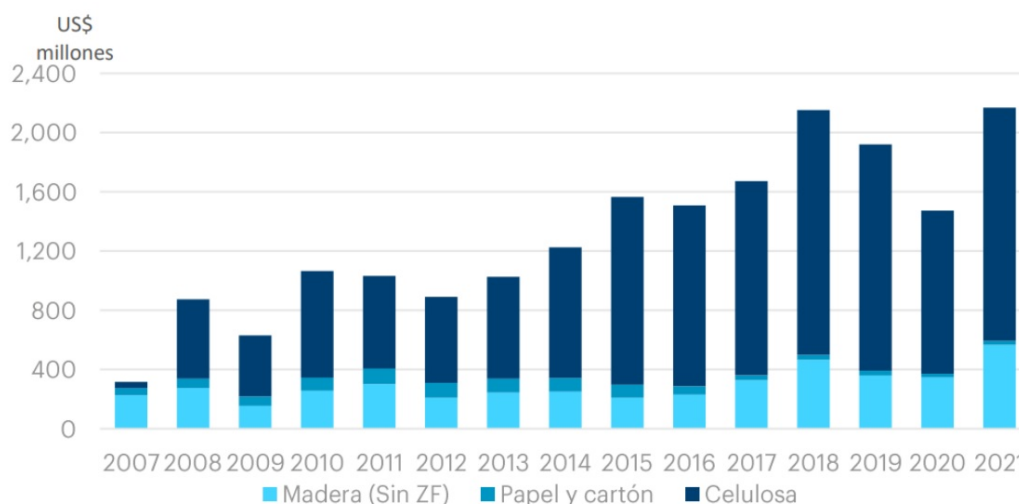


Figura 15: Exportaciones del sector forestal por año. Fuente: [50].

Recursos forestales

Por otro lado, observando que para satisfacer a las plantas de celulosa, la principal actividad es la forestación, resulta interesante abarcar este tema y estudiar el área forestada del Uruguay. En el Cuadro 3 se presenta un desglose del área forestada del Uruguay. Según estos datos de la Dirección Nacional Forestal [64], el área total forestada corresponde a un 6,21 % del área total del país. Aún así, según información del Informe Forestal de Abril 2022 [50], el área total habilitada y con prioridad para forestación se encuentra en el orden de unas 4 millones de hectáreas, lo que significa que todavía hay una amplia superficie disponible destinada al crecimiento de plantaciones, mostrada en la Figura 16.

	Hectáreas	Porcentaje
Superficie de Uruguay	17.502.000	100 %
Superficie de bosque plantado	1.087.109	6,21 %
Superficie de bosque nativo	835.349	4,77 %
Superficie total de bosques	1.922.458	10,98 %

Cuadro 3: Superficie de bosques en Uruguay. Fuente: [64].

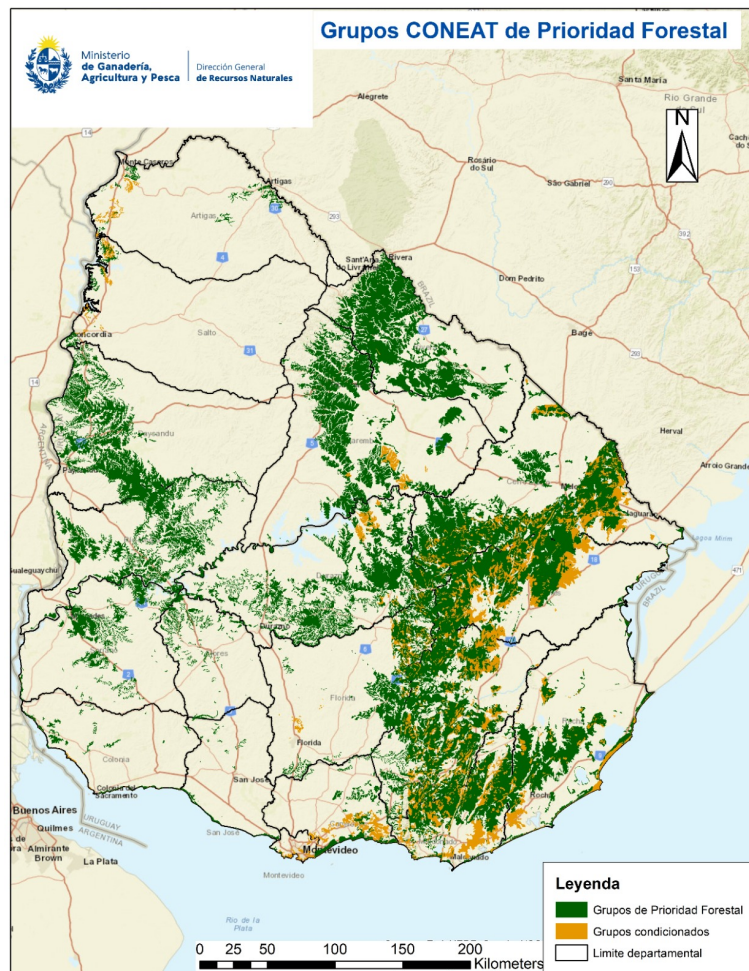


Figura 16: Áreas de prioridad forestal. Fuente: [69].

Según el anterior análisis sobre el sector forestal del Uruguay, se hace claro el crecimiento que tuvo el sector en los últimos años. Dado el gran aumento en las exportaciones de productos provenientes de la madera que se ve hasta el año 2021, es evidente también el aumento en la demanda de materia prima por parte de las industrias forestales. Acompañado de esto, se presenta el gráfico de la Figura 17, que busca plasmar el incremento en el área de las zonas forestadas reflejando el aumento de la demanda de materias primas, buscando satisfacer las necesidades de las industrias.

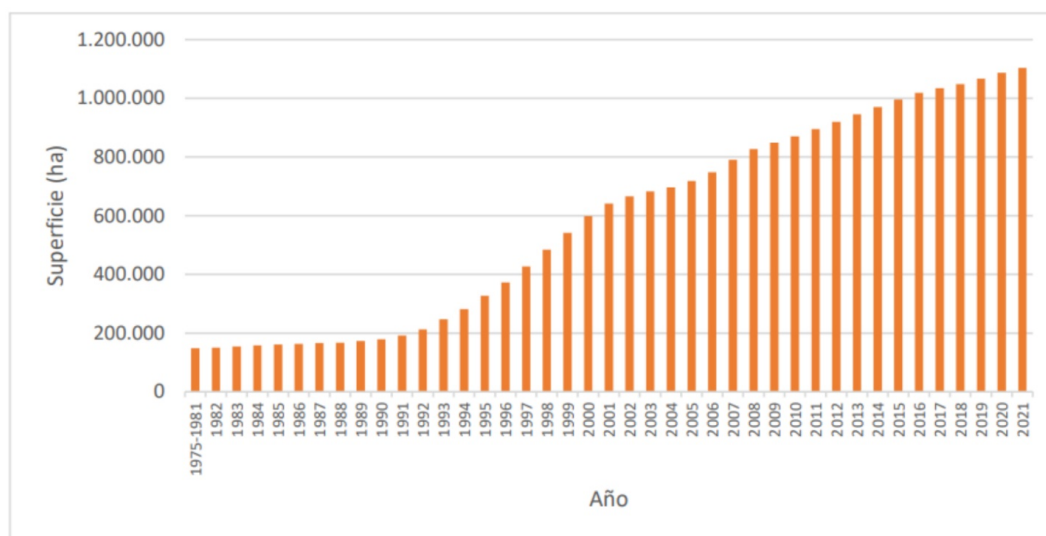


Figura 17: Superficie acumulada de plantaciones forestales. Fuente: [52].

Más allá de que los datos sobre exportaciones y superficie del sector forestal correspondan al año 2021, es de público conocimiento la incorporación de la nueva planta de celulosa en el país que comenzó a operar en abril del año 2023. Es por esto que, si se toma de base la información recabada del sector y se proyecta teniendo en cuenta una producción de aproximadamente 2,1 millones de toneladas de celulosa como fue estimado para la nueva planta, es de esperar que todas las actividades relacionadas con la cadena de suministro del sector forestal aumenten para poder abastecer adecuadamente esta nueva planta sin descuidar las demás.

Infraestructura

Pasando ahora a la infraestructura que presenta el país, se tiene una red vial de aproximadamente 8776 *km*, de los cuales hay pavimentados unos 7977 *km*. Esto se podría traducir en 45 *km* de rutas pavimentadas cada 1000 *km*² de superficie, según se plantea en [50], además de representar la red vial más densa de América Latina. Las carreteras son fundamentales en toda la logística y el transporte del sector forestal ya que son la principal vía de transporte de madera en el país. Una red vial como la de Uruguay, permite que los montes de acopio y las plantas de celulosa estén conectadas a los principales puntos de exportación del país.

Como se dijo anteriormente, el sector forestal se ha visto en constante crecimiento en los últimos años, lo que implica un inevitable aumento del transporte que mueve cargas dentro del país. Además, esto genera ciertas exigencias sobre las condiciones de las carreteras y la infraestructura. En el mapa de la Figura 18 se pueden ver las principales rutas, vías férreas, puntos de exportación, y tiempos de traslado que hay entre Montevideo y algunos de los principales puntos forestados del país.

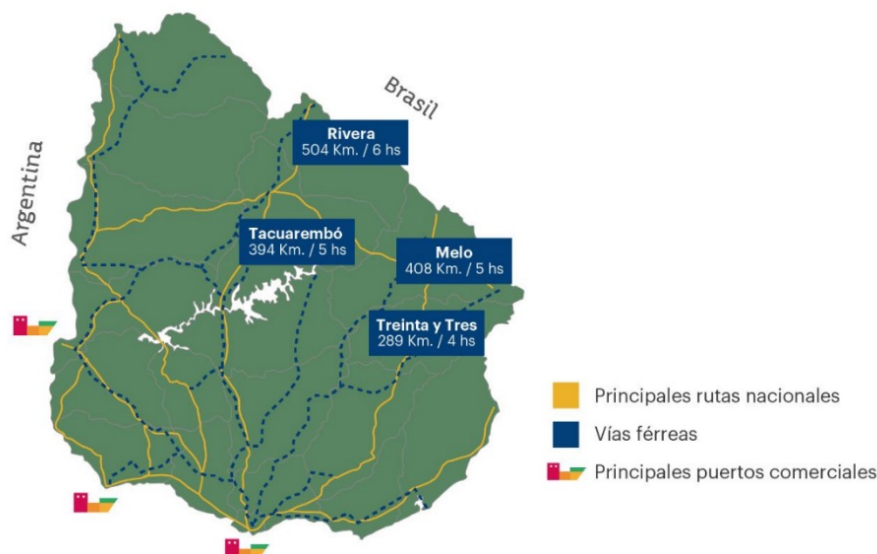


Figura 18: Mapa de la red de transporte de Uruguay. Fuente: [50].

En Uruguay, la mayor parte de la movilización de la materia prima se realiza a través del transporte por carretera. Es por esto, que las actividades logísticas y de transporte (claves en la eficiencia del negocio forestal) se ven directamente afectadas con el aumento de las exportaciones y de la actividad del sector, viéndose obligadas las empresas transportistas a evolucionar paralelamente al desarrollo de la industria, aumentando la capacidad de la flota de vehículos y la cantidad de viajes para lograr aumentar su eficiencia y satisfacer la demanda de las industrias forestales.

Transporte forestal

El transporte forestal, según el artículo [85], se refiere al proceso de movilizar diversos productos forestales, como troncos, madera aserrada, astillas y productos finales, desde los lugares de origen en el bosque hasta los destinos finales, que pueden incluir aserraderos, fábricas de papel, plantas de calefacción y mercados nacionales e internacionales. Este proceso involucra el uso de varios modos de transporte, como camiones, trenes y barcos, y requiere una planificación cuidadosa que considera factores como la infraestructura vial, la gestión forestal, las condiciones operativas y los impactos ambientales. El transporte forestal desempeña un papel crucial en la cadena de suministro forestal y puede tener un impacto significativo en la eficiencia, los costos y la sostenibilidad de la industria forestal en su conjunto.

Las cadenas de suministro forestales abarcan un número significativo de nodos, principalmente puntos de cosecha y plantas, cuyas operaciones deben estar adecuadamente coordinadas para un adecuado desempeño. Teniendo en cuenta el volumen de material a transportar y la distancia entre nodos, la planificación del transporte de trozas juega un papel fundamental para conseguir la rentabilidad de la cadena de suministro.

El problema del transporte de trozas de madera está asociado a decisiones sobre asignación, programación y enrutamiento. El problema de asignación consiste en asignar al área de cosecha los diferentes tipos de madera que va a abastecer, y el dato del problema es la disponibilidad de material en cada punto

de cosecha y los requerimientos de las unidades de producción. En el caso de la programación, existen diferentes interpretaciones del problema. En su definición más simple, toda la operación de abastecimiento está destinada a realizarse cumpliendo las condiciones relativas a los horarios de operación: apertura y cierre de operaciones en los puntos de cosecha y en plantas, y tiempo diario de operación de los vehículos. El problema de enrutamiento asegura que este suministro se proporcione al optimizar el costo de transportar el material entre los nodos del sistema [80].

Varios modos de transporte se utilizan en el sector forestal en todo el mundo y el transporte por camión constituye una parte importante de la cadena de suministro. El transporte de la madera desde el bosque hasta las industrias se realiza mediante camiones de diferentes marcas y modelos. La diferencia suele estar dada por el número y el espacio entre ejes, la tara del camión y la posición del motor en relación con el eje delantero. El transporte forestal tradicionalmente se ha realizado en camiones, ya que reúnen los requisitos de robustez y versatilidad para acceder a la exigente topografía de los bosques y la flexibilidad necesaria para atender la extensa red de centros de carga y descarga.

Los camiones madereros tienen unas estructuras formadas por perfiles cuadrados de acero de alta resistencia fijados perpendicularmente al chasis del camión y una viga en cada extremo, que en conjunto se denominan rejilla para troncos, con características y estándares debidamente establecidos por ley. Estos camiones tienen de cuatro a seis estantes en su chasis, que pueden ser fijos o móviles y están equipados con remolques de una longitud fija promedio de 7,2 m para transportar troncos largos entre 2,0 y 8,0 m [81]. En Uruguay, se utilizan tres tipos diferentes de camiones para tal actividad:

1. Camión convencional
2. Bitrén
3. Tritrén

Cada uno de ellos presenta diferentes características así como distintas capacidades, además de tener asociado un determinado efecto sobre el pavimento de las carreteras debido a las distintas cargas que pueden trasladar, y diferentes consecuencias sobre el medio ambiente al estar en movimiento.

Los camiones convencionales (ver Figura 19) son los vehículos de carga más utilizados para el transporte por carretera en Uruguay, así como los más antiguos. Sus dimensiones, en promedio, son de 2,4 m de ancho, 2,7 m de alto y 13,2 m de largo, y tienen la capacidad de transportar hasta 45 toneladas de carga. En cuanto a los efectos ambientales, este es el vehículo con mayor consumo de combustible por km recorrido. Al ser de los tres el vehículo más antiguo en términos de utilización para transporte de carga, todas las carreteras del Uruguay están preparadas y habilitadas para la circulación de estos.



Figura 19: Camión convencional. Fuente: [87].

Por otra parte, para los bitrenes (ver Figura 20) se tiene la siguiente definición, según el Decreto N°303/020:

“Se denomina bitrén a la combinación de vehículos de carga compuesta por un tractor de tres ejes y dos unidades remolcadas del tipo semirremolque de ejes tándem, conectadas entre sí por conexiones tipo B.” – [68]

Estos son vehículos de carga que suelen medir 2,4 m de ancho, 4,3 m como máximo de alto y 22,5 m como máximo de largo. Además, tienen la capacidad de cargar hasta 57 toneladas (26 % más que el camión convencional). Analizando los efectos ambientales, estos vehículos consumen menos combustible que el camión convencional por cada tonelada que transporta, por lo que las emisiones de CO₂ a la atmósfera son menores.



Figura 20: Camión bitrén. Fuente: [59].

Para finalizar, se tiene la siguiente definición para los tritrenes (ver Figura 21), según el Decreto N°303/020:

“Se denomina tritrén a la combinación de vehículos de carga compuesta por un tractor de tres ejes y tres unidades remolcadas del tipo semirremolque de ejes tándem, conectadas entre sí por conexiones tipo B.” – [68]

Estos vehículos suelen medir 2,6 m de ancho, 4,3 m como máximo de alto y 30 m como máximo de largo, y cuentan con una capacidad de carga de 74 toneladas, 29 % más que el bitrén y 64 % más que el camión convencional. Consumen menor cantidad de combustible que los bitrenes, lo que también se traduce en menores emisiones de CO₂ a la atmósfera.



Figura 21: Camión tritrén. Fuente: [56].

Tanto los bitrenes como los tritrenes tienen menores emisiones de CO₂ frente a los camiones convencionales. Si se analiza la definición que ofrece el Decreto N°303/020 para Vehículo de Alto Desempeño (VAD), este es:

”Combinación de vehículos de transporte de cargas diseñados para transportar más carga útil que los vehículos convencionales, superando el peso bruto total de 45t y/o la longitud máxima permitida para dichos vehículos.” – [68]

En consecuencia, tanto los bitrenes como los tritrenes están dentro de esta categoría de VAD. Se puede pensar en primera instancia que estos vehículos, en términos ambientales, son mejores que los camiones convencionales para el transporte de la madera ya que tienen mayores capacidades y menores emisiones de CO₂ a la atmósfera por kilómetro recorrido, lo que hace que sean ideales para el transporte de materia prima a largas distancias. Sin embargo, en Uruguay existen algunas restricciones para la circulación de los mismos, lo que hace que no sea tan directa la decisión de comenzar a utilizar este medio de transporte para la materia prima.

Siguiendo con el Decreto N°303/020, que habla sobre los requisitos para la circulación de VAD, se establece que los mismos deben:

- Tener ancho menor a 3,0 m.
- Tener altura menor a 4,3 m.
- Deben operar dentro de los límites de pesos establecidos en el Decreto N°311/007.

- Circular con previa autorización del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP), únicamente en aquellas rutas habilitadas para soportar el mayor peso bruto total y la mayor longitud.

Para completar este análisis, se presenta en el Cuadro 4 las características principales de cada uno de los vehículos mencionados, de donde es notorio que la principal diferencia entre ellos es la capacidad de carga. En concordancia con lo antedicho, los bitrenes y tritrenes tienen capacidad para transportar mucha más carga que los camiones convencionales, como resultado de la cantidad de semirremolques que presentan. Por último, se destaca que estos vehículos tienen un diseño que permite mayor estabilidad en carretera que los camiones convencionales, lo que los hace por consecuencia más seguros.

	Camión convencional	Bitrén	Titrén
Largo (m)	13,2	22,5	30,0
Ancho (m)	2,4	2,4	2,6
Alto (m)	2,7	4,3	4,3
Cantidad de semirremolques	1	2	3
Capacidad (ton)	45	57	74

Cuadro 4: Características y medidas de los distintos tipos de vehículos. Fuente: elaboración propia.

Se puede afirmar entonces, que tanto los bitrenes como los tritrenes cumplen con los valores máximos especificados por el decreto. No obstante, estos VAD no están habilitados para circular en cualquier tramo de ruta del Uruguay, sino que hay normativas que habilitan a ciertos tramos de la red. Las rutas del Uruguay en su mayoría soportan pesos como los de los camiones convencionales. Esto quiere decir que al comenzar a operar con vehículos más grandes y pesados, es necesario realizar estudios y acondicionamientos sobre las rutas para permitir que los mismos circulen sin poner en riesgo la infraestructura ni la seguridad vial.

Según informó Diego Biachi, funcionario del MTOP, recientemente en 2023 fue actualizada la lista de rutas y tramos para circular con grandes configuraciones de transporte pesado. En el mapa de la Figura 22, es posible ver cuáles son los tramos de rutas y dónde se ubican dentro del territorio nacional.



Figura 22: Mapa de rutas del Uruguay. Fuente: elaboración propia.

4. Definición del problema

Se presenta a continuación una descripción detallada del caso de estudio, teniendo en cuenta el contexto presentado en el capítulo anterior: situación actual del sector forestal en Uruguay, los vehículos con los que se dispone y la infraestructura existente para tal actividad.

Como se presentó en el capítulo 3, la actividad forestal del país se ha visto en considerable aumento en los últimos años. Si se tiene en cuenta la incorporación de la nueva planta de celulosa que comenzó a operar en 2023, es de esperar que como consecuencia se tenga un crecimiento aún mayor del sector y de las exportaciones. Todo esto recae directamente en un aumento paralelo de las actividades de logística y transporte, generando una mayor circulación de vehículos en carretera para transportar madera y satisfacer la demanda de las industrias.

Es evidente que un aumento en las exportaciones tiene incidencia positiva para la economía de cualquier país. Sin embargo, hay efectos secundarios sobre este aumento de la actividad que no se deben perder de vista. En este caso, el efecto negativo más claro que tiene el incremento de la actividad forestal es la contaminación. Un aumento del flujo de vehículos en carretera implica un incremento de las emisiones GEI generadas por el transporte, en particular de CO_2 , que son contaminantes para la atmósfera.

El problema de la contaminación es un tema que de a poco va cobrando mayor interés a nivel mundial, sobre todo en las últimas décadas, lo que obliga cada vez más a las empresas a tener prácticas sostenibles y amigables con el medio ambiente. Todo esto motivó a estudiar el impacto ambiental de esta actividad, considerando la posibilidad de incorporar vehículos con mayor capacidad, más eficientes, y sobre todo con menos emisiones de CO_2 por kilómetro recorrido. En el análisis que se presentó en el capítulo anterior, es posible ver que en Uruguay ya existen dos vehículos de este tipo tales como bitrenes y tritrenes. Que las empresas transportistas comiencen a utilizar estos vehículos podría generar una reducción significativa de las emisiones de CO_2 generadas por el transporte forestal, logrando así minimizar el impacto ambiental.

No obstante, es importante tener en cuenta que el transporte de madera debe hacerse con vehículos habilitados y con una planificación adecuada, de manera de garantizar el cuidado de las carreteras y la seguridad de quienes trabajan en el rubro. Es fundamental considerar que estos nuevos vehículos no tienen la habilitación del MTOP para circular por cualquier carretera, lo que implica que hay ciertos puntos del país a los que no es posible acceder con ellos. Esto implica que una empresa que desea incorporar nuevos vehículos como bitrenes y tritrenes (o cualquier otro VAD) deba realizar el cambio de la flota cuidadosamente y considerando las ubicaciones de los puntos de cosecha y de las industrias a las que es necesario abastecer. Así se podrá asegurar luego una asignación de vehículos de manera estratégica y sostenible, considerando la infraestructura vial disponible para cada uno de los vehículos.

En conclusión, el caso de estudio que se presenta tuvo como objetivo principal la asignación de diferentes tipos de vehículos como camiones convencionales, bitrenes y tritrenes, para el transporte de

madera desde distintos puntos de cosecha dispersos en el territorio nacional hasta las plantas productoras de celulosa, satisfaciendo su demanda. Se buscó que la asignación se realice de tal forma que se minimicen las emisiones de CO_2 generadas por el transporte, lo que contribuirá fuertemente con el cuidado del medio ambiente y la reducción de GEI. Es necesario destacar además que la asignación se realizó teniendo en cuenta diversas variables y parámetros como puede ser la capacidad de los vehículos, las distancias entre los nodos del sistema (puntos de cosecha y destinos), cantidad de viajes requeridos para cumplir con la demanda, infraestructura disponible, emisiones promedio de los vehículos, entre otros. Todos estos se presentan detalladamente más adelante en la sección 5.2. Con base en todo lo anterior, se buscó modelar matemáticamente este escenario intentando ser lo más realista posible y garantizar que es factible asignar eficientemente los vehículos sin perder de vista el impacto ambiental.

En este sentido, la elección del tipo de vehículo a utilizar para cada ruta es de vital importancia. Cada vehículo tiene características diferentes, así como capacidades y emisiones por kilómetro recorrido, por lo que elegir un vehículo u otro afecta directamente a las emisiones totales generadas por la actividad. Adicionalmente, se sabe que los bitrenes y tritrenes no tienen acceso a todos los puntos del país y aquí es donde se vuelve crucial la utilización de camiones convencionales por más que la capacidad de carga sea menor.

Para finalizar con la motivación de este caso de estudio, luego de todo el análisis realizado sobre la situación forestal, el problema de la contaminación y las diferentes formas y metodologías de abordar el tema para reducir el impacto ambiental, queda claro que la asignación de vehículos para el transporte forestal es un proceso sumamente importante para lograr la reducción de las emisiones de CO_2 generadas por esta actividad. Una correcta asignación de los vehículos de la flota permitirá a las empresas transportistas, además de optimizar los recursos para sus actividades, contribuir positivamente en la reducción de emisiones y así, desde su lugar, ayudar a proteger el medio ambiente.

4.1. Escenario y suposiciones

Antes de comenzar con la formulación del problema, es fundamental presentar una descripción general y detallar cuáles son los distintos agentes que forman parte de la cadena de suministro en el ámbito forestal para el caso de estudio que se abordó.

Por un lado, están las industrias productoras de celulosa que utilizan la madera como materia prima. Si se piensa desde el punto de vista de la cadena de suministro de esta materia prima, las productoras de celulosa son quienes generan la demanda, y por ende es el destino final al que debe llegar la madera.

Por otro lado, se tienen los lugares que ofrecen la materia prima. En este caso hay diversas zonas forestadas donde se encuentran los puntos de cosecha que tienen la madera para transportar. Desde los puntos de cosecha la madera viaja hacia las plantas de celulosa para ser utilizada para la producción. Estos puntos de cosecha se encuentran distribuidos por todo el territorio nacional en zonas habilitadas especialmente para tal actividad.

Para este problema se puso foco en el transporte de madera desde los puntos de cosecha hasta el destino final en las industrias de celulosa. En el Uruguay, el principal medio de transporte utilizado para esto es el transporte por carretera, en particular en camión o cualquiera de sus variantes.

Los camiones son resguardados en un galpón o depósito para su seguridad y desde allí realizan todos sus viajes. El camión parte desde su depósito, se dirige hacia el punto de cosecha para recoger la madera y la traslada hacia su destino final según corresponda. Una vez que toda la madera fue trasladada, el camión regresa a su depósito para volver a ser almacenado. En este escenario, se consideró que todas las rutas son de doble vía, por lo que el camión realiza el mismo camino tanto de ida como de vuelta para los recorridos entre el punto de cosecha y el destino.

Por último, el análisis se realizó para un período de tiempo determinado que puede variar dependiendo de lo que sea más conveniente para los datos de oferta y demanda que se tengan. En este caso se utilizó un período de tiempo de un mes, teniendo como resultado la planificación de los viajes de un año completo.

A continuación se listan algunas suposiciones que se tuvieron en cuenta con el fin de simplificar la realidad modelada:

1. Si bien se sabe que los vehículos van disminuyendo su eficiencia con el paso de los años y dependiendo de la cantidad de carga que llevan, para este modelado se estableció la suposición de que todos los vehículos del mismo tipo (camiones, bitrenes o tritrenes) están en igualdad de condiciones y, por lo tanto, el consumo de combustible por kilómetro recorrido siempre es el mismo.
2. Para cada tipo de vehículo se considera que las emisiones por kilómetro recorrido no varían con la antigüedad.
3. Otra suposición que fue necesario tener en consideración es que todos los vehículos que son enviados desde el punto de cosecha hasta el destino, van cargados a máxima capacidad.
4. Si bien la asignación se realizó para cada mes a lo largo de todo un año, la demanda de cada una de las plantas de celulosa fue establecida para todo el año y dividida en los 12 meses correspondientes.
5. Los vehículos toman la madera de un único punto de cosecha al ser asignados. Es decir, el vehículo sale de su depósito, visita el punto de cosecha asignado y va directo a destino, sin pasar previamente por otro punto de cosecha para recoger más materia prima. Esto fue válido para cada período y cada asignación.
6. Si bien existen diferentes tipos de madera para lograr atender a las industrias, en este caso se modeló la realidad suponiendo que se trabaja con un solo y único tipo.

7. Las emisiones de GEI constituyen una variedad de gases como pueden ser el dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4). De todos estos, el CO_2 es el que se encuentra en mayor cantidad⁷, teniendo mayor correlación con la actividad y más fuentes de registros, por lo que se calcularon únicamente las emisiones generadas por este gas.

⁷El dióxido de carbono es el gas que mayormente contamina, correspondiéndole un 86 % del total a la actividad del transporte.[88]

5. Modelo Matemático

Se presenta y describe en este capítulo el modelado matemático utilizado para la solución del problema planteado. Dicho modelado fue utilizado más adelante para el análisis de diversos escenarios que se presentan en el capítulo 6.

Siguiendo la consigna de la logística verde, el objetivo fue obtener la asignación de vehículos y la planificación de viajes, de manera que se cumpla con la demanda minimizando las emisiones de CO_2 de los vehículos que transportan madera en Uruguay. El problema planteado contempló las capacidades de los distintos tipos de transporte que se utilizan y los puntos de cosecha ubicados en diversas zonas del territorio nacional.

5.1. Formulación matemática

Aquí se puede encontrar, en primer lugar, un detalle de los conjuntos, parámetros y variables de decisión que se tuvieron en cuenta. Luego de esto, se presenta la formulación completa donde se encuentran las restricciones, función objetivo del problema y una breve descripción de lo que se buscó representar en cada expresión planteada.

Conjuntos

- L : Puntos de cosecha.
- D : Puntos de destino.
- P : Períodos de tiempo, en este caso meses del año.
- K : Tipos de vehículos: camión convencional, bitrén o titrén.
- C : Conjunto de camiones convencionales.
- B : Conjunto de bitrenes.
- T : Conjunto de tritrenes.
- V : Unión de los tres conjuntos de vehículos, $C \cup B \cup T$.

Parámetros

- u_k : Capacidad en toneladas de cada tipo de vehículo k , con $k \in K$.
- $d_{j,p}$: Demanda en toneladas del lugar de destino j en el período p , con $j \in D$ y $p \in P$.
- ec : Emisiones de CO_2 de los camiones, expresadas en kilogramos de CO_2 generados por kilómetro recorrido.

- eb : Emisiones de CO_2 de los bitrenes, expresadas en kilogramos de CO_2 generados por kilómetro recorrido.
- et : Emisiones de CO_2 de los tritrenes, expresadas en kilogramos de CO_2 generados por kilómetro recorrido.
- $rc_{i,j}$: Distancia en kilómetros desde el punto de cosecha i hasta el destino j en camión, con $i \in L$ y $j \in D$.
- $rbt_{i,j}$: Distancia en kilómetros desde el punto de cosecha i hasta el destino j en bitrén o tritrén, con $i \in L$ y $j \in D$.
- $rc1_i$: Distancia en kilómetros desde el origen de los vehículos hasta el punto de cosecha i en camión, con $i \in L$.
- $rbt1_i$: Distancia en kilómetros desde el origen de los vehículos hasta el punto de cosecha i en bitrén o tritrén, con $i \in L$.
- $rc3_j$: Distancia en kilómetros desde el destino j hasta el origen de los vehículos en camión, con $j \in D$.
- $rbt3_j$: Distancia en kilómetros desde el destino j hasta el origen de los vehículos en bitrén o tritrén, con $j \in D$.
- M : Parámetro auxiliar para la activación de las variables de decisión.
- $VCmax_{i,j}$: Cantidad máxima de viajes que pueden realizar los camiones en un mismo período desde el punto de cosecha i hasta el destino j , con $i \in L$ y $j \in D$.
- $VBTmax_{i,j}$: Cantidad máxima de viajes que pueden realizar los bitrenes y tritrenes en un mismo período desde el punto de cosecha i hasta el destino j , con $i \in L$ y $j \in D$.
- $w_{i,p}$: Cantidad disponible de madera en toneladas en el punto de cosecha i en el período p , con $i \in L$ y $p \in P$.

Variables de decisión

- $x_{v,i,j,p} \in \{0, 1\}$: Vale 1 si el vehículo v realiza la ruta $i - j$ en el período p , 0 en caso contrario, con $v \in V$, $i \in L$, $j \in D$ y $p \in P$.
- $y_{v,i,j,p}$: Cantidad de viajes que el vehículo v realiza en la ruta $i - j$ en el período p , con $v \in V$, $i \in L$, $j \in D$ y $p \in P$.

A continuación, en la Figura 23, se presenta un esquema de la realidad que se plantea para que sea de apoyo en la interpretación del modelado.

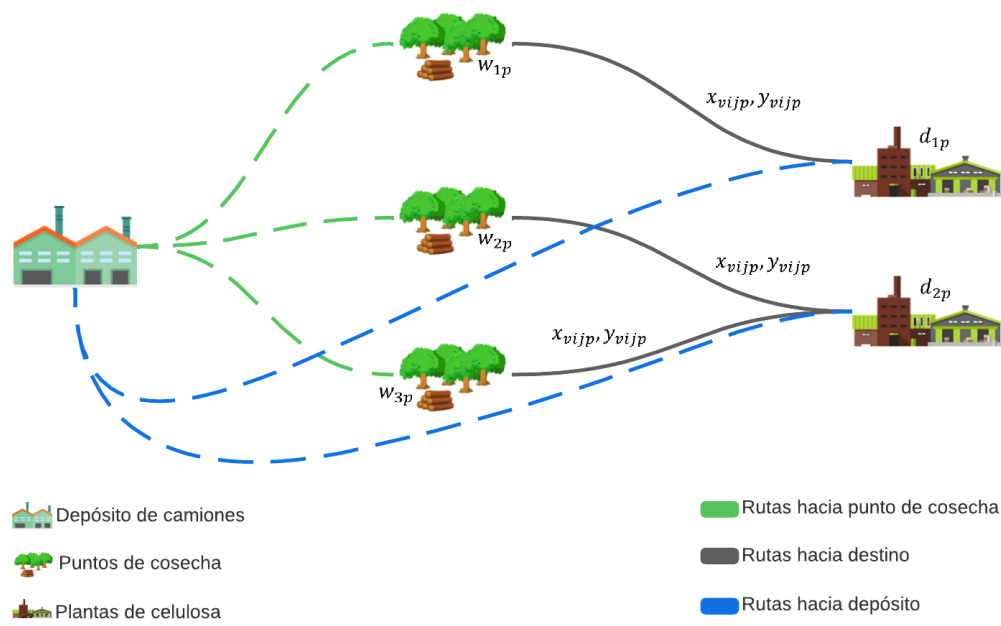


Figura 23: Esquema general del problema. Fuente: elaboración propia.

Función objetivo y restricciones

A continuación se presentará la formulación matemática completa del problema. Previo a comenzar con la validación del modelo, se dará una breve descripción de las restricciones y la función objetivo con el fin de explicar en palabras lo que se buscó plasmar con las ecuaciones.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{c,i,j,p} (y_{v,i,j,p} * e_c * rc_{i,j}) + \sum_{c,i,j,p} (x_{c,i,j,p} * e_c * (rc1_i + rc3_j)) + \sum_{b,i,j,p} (y_{b,i,j,p} * e_b * rbt_{i,j}) + \\ & + \sum_{b,i,j,p} (x_{b,i,j,p} * e_b * (rbt1_i + rbt3_j)) + \sum_{t,i,j,p} (y_{t,i,j,p} * e_t * rbt_{i,j}) + \sum_{t,i,j,p} (x_{t,i,j,p} * e_t * (rbt1_i + rbt3_j)) \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{c,i} (u_{camión} * y_{c,i,j,p}) + \sum_{b,i} (u_{bitrén} * y_{b,i,j,p}) + \sum_{t,i} (u_{tritrén} * y_{t,i,j,p}) \geq dem_{j,p}, \forall j \in D, \quad \forall p \in P \quad (2)$$

$$y_{v,i,j,p} \leq x_{v,i,j,p} * M, \forall v \in V, \quad \forall i \in L, \quad \forall j \in D, \quad \forall p \in P \quad (3)$$

$$y_{v,i,j,p} - x_{v,i,j,p} * M \geq 1 - M, \forall v \in V, \quad \forall i \in L, \quad \forall j \in D, \quad \forall p \in P \quad (4)$$

$$\sum_{i,j} (x_{v,i,j,p}) \leq 1, \forall v \in V, \quad \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{c,j} (u_{camión} * y_{c,i,j,p}) + \sum_{b,j} (u_{bitrén} * y_{b,i,j,p}) + \sum_{t,j} (u_{tritrén} * y_{t,i,j,p}) \leq w_{i,p}, \forall i \in L, \quad \forall p \in P \quad (6)$$

$$y_{c,i,j,p} \leq VCmax_{i,j}, \forall c \in C, \quad \forall i \in L, \quad \forall j \in D, \quad \forall p \in P \quad (7)$$

$$y_{b,i,j,p} \leq VBTmax_{i,j}, \forall b \in B, \quad \forall i \in L, \quad \forall j \in D, \quad \forall p \in P \quad (8)$$

$$y_{t,i,j,p} \leq VBTmax_{i,j}, \forall t \in T, \quad \forall i \in L, \quad \forall j \in D, \quad \forall p \in P \quad (9)$$

El objetivo de este modelado matemático, como se mencionó anteriormente, es minimizar las emisiones de CO₂ producidas en el sector forestal debido al transporte de madera desde los puntos de cosecha hasta las plantas de celulosa, que son los destinos finales. Este modelado además, contempla diferentes tipos de vehículos como camiones convencionales, bitrenes y tritrenes, así como diversos puntos de cosecha, lo que genera que se tengan diferentes rutas a recorrer. En este sentido, la función

objetivo (1) del problema está conformada por diferentes sumatorias que representan las emisiones totales de la actividad partiendo del depósito, atendiendo a los destinos finales y volviendo al origen, para cada uno de los distintos tipos de vehículos. De esta forma, al minimizar el valor obtenido en esta expresión, se logra minimizar las emisiones de CO₂ generadas por la actividad con una flota de vehículos heterogénea, lo que se alinea con el objetivo planteado para el estudio.

Pasando ahora a las restricciones tenidas en cuenta para modelar la realidad, la primera de ellas (2) garantiza la satisfacción de la demanda de cada uno de los puntos de entrega. Más aún, esta restricción asegura que la suma de los volúmenes transportados por cada vehículo que llega a la industria para descargar, sea igual o mayor a la demanda de la industria correspondiente. Esto es necesario cumplirlo para cada destino o planta industrial, y para cada uno de los períodos definidos.

Las restricciones (3) y (4) se utilizan para asegurar que si un vehículo no está asignado en determinado período para atender la demanda de determinada planta desde cierto punto de cosecha, entonces la cantidad de viajes necesariamente debe ser cero.

Por otro lado, la restricción (5) garantiza que cada vehículo realice únicamente una ruta en cada período, o ninguna. Esto asegura que los vehículos no sean asignados para pasar por más de un punto de cosecha en un mismo período, ni atender a más de un destino.

La restricción (6) permite limitar la cantidad de volumen a transportar desde cada punto de cosecha en cada período. Esta restricción busca que no se asignen más viajes ni carga a transportar de la que hay realmente disponible en el punto de cosecha. Nuevamente, es tenida en cuenta para cada punto de cosecha y para cada período.

Por último, la familia de las últimas tres restricciones (7, 8 y 9), limita el número de viajes que cada vehículo puede realizar para cada período. Los viajes se pueden traducir en tiempo, los días también, y en consecuencia un período también. Por lo tanto, dependiendo de los kilómetros de cada ruta, la cantidad de viajes se limita para que los vehículos no sean asignados a una mayor cantidad de la que pueden realmente realizar dentro de cada período de asignación.

5.2. Relevamiento y generación de datos

Se presentan a continuación las fuentes y metodologías utilizadas con el fin de relevar los distintos datos para el problema. Luego, se presentará la selección de los nodos para finalmente pasar a la obtención de los distintos parámetros tenidos en cuenta.

Fuentes de información

Las principales fuentes para la recolección de los datos fueron las siguientes:

- Consultas e investigación en páginas gubernamentales, como por ejemplo:
 - Geoportal - del MTOP.

- Publicaciones del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP).
- Publicaciones sobre camiones, bitrenes, tritrenes y otros aspectos logísticos del transporte en el portal de la Revista Forestal.
- Plataforma *Google Earth* para ubicar los puntos de cosecha, plantas de celulosa y depósito de vehículos para calcular distancias.
- Intercambios vía mail con Diego Bianchi, funcionario del MTOP, para conocer detalles de las rutas habilitadas para bitrenes y tritrenes.
- Intercambios vía mail y reuniones con el tutor, quien brindó información acerca de los puntos de cosecha y volúmenes asociados de las empresas forestales.

5.2.1. Selección de nodos

Como fue mencionado anteriormente, el tutor del proyecto facilitó datos como ubicaciones de los puntos de cosecha junto con su oferta aproximada por período. Una vez obtenidos estos puntos, se calcularon las distancias entre las posibles combinaciones entre ellos. Se presenta entonces, en primera instancia, cada conjunto distinto de nodos obtenido. Los mismos son presentados en orden desde el origen hasta el destino visitado por los vehículos. Los mismos sirvieron como base para el cálculo de los demás parámetros del sistema, en especial la distancia entre nodos.

Punto de origen

Los vehículos son la principal herramienta de transporte de la madera y es importante que estén correctamente guardados para su cuidado. Es por esto que, dentro del recorrido que realizan para abastecer a las industrias, no se puede perder de vista el recorrido que realizan desde su depósito hasta el destino final, ni tampoco el recorrido de regreso.

Muchas veces las empresas transportistas deciden estratégicamente la ubicación de sus depósitos de manera de encontrarse lo más cerca posible de los puntos de cosecha para recolectar la madera. Sabiendo que los puntos de cosecha pueden encontrarse en muchas zonas dentro de todo el territorio nacional, es de esperar que las empresas transportistas tengan más de un depósito y que se ubiquen cerca de las zonas donde hay puntos de cosecha de donde recolectar.

En el caso de este proyecto, se buscó obtener una planificación de los viajes para una única empresa transportista y el problema se simplificó asumiendo que se tiene un único origen para todos los vehículos. Lo anterior equivale a suponer que todos ellos parten de un mismo lugar. Esto permitió además facilitar la resolución del mismo, ya que no se tiene un conjunto de índices que representen varios orígenes.

Cabe aclarar que las distancias que se deben recorrer para llegar hasta el punto de cosecha y para regresar al depósito sí son tenidas en cuenta al momento de calcular la función objetivo del problema. Además, también se contemplaron las rutas habilitadas para transporte de cargas con grandes configuraciones de vehículos que serán presentadas más adelante.

Puntos de cosecha

El primero de los conjuntos de nodos a tener en cuenta, y definido en el modelado, es el de los puntos de cosecha. Como ya se mencionó anteriormente, estos se definen como todos los montes que abastecen con materia prima a las plantas de celulosa.

A raíz del estudio abordado para presentar el contexto del caso de estudio y definir el problema, fue posible relevar y conocer cuáles son las áreas forestadas dentro del territorio nacional. La información de la ubicación de los puntos de cosecha fue obtenida de manera aproximada por la información brindada por las principales empresas forestales. En total, se tuvieron en cuenta unos 40 puntos de cosecha para abastecer a los diferentes puntos de destino que se contemplaron.

Puntos de destino

Los puntos de destino son los puntos que consumen la madera como materia prima. Desde los puntos de cosecha, los vehículos trasladan la madera vía carretera para satisfacer la demanda de los destinos.

Estos puntos corresponden a las plantas de celulosa del país que se encontraban en producción al correr el año 2022, de manera de seguir siendo coherentes con el resto de los datos reales que se relevaron (puntos de cosecha y ofertas). Si bien no se darán nombres de estas empresas, es de público conocimiento la ubicación de cada una de ellas, lo que hizo posible ubicarlas fácilmente en el escenario del problema planteado.

A modo de plasmar todo lo anterior, se muestra en la Figura 24 un mapa del Uruguay con los diferentes nodos definidos ubicados en el territorio.

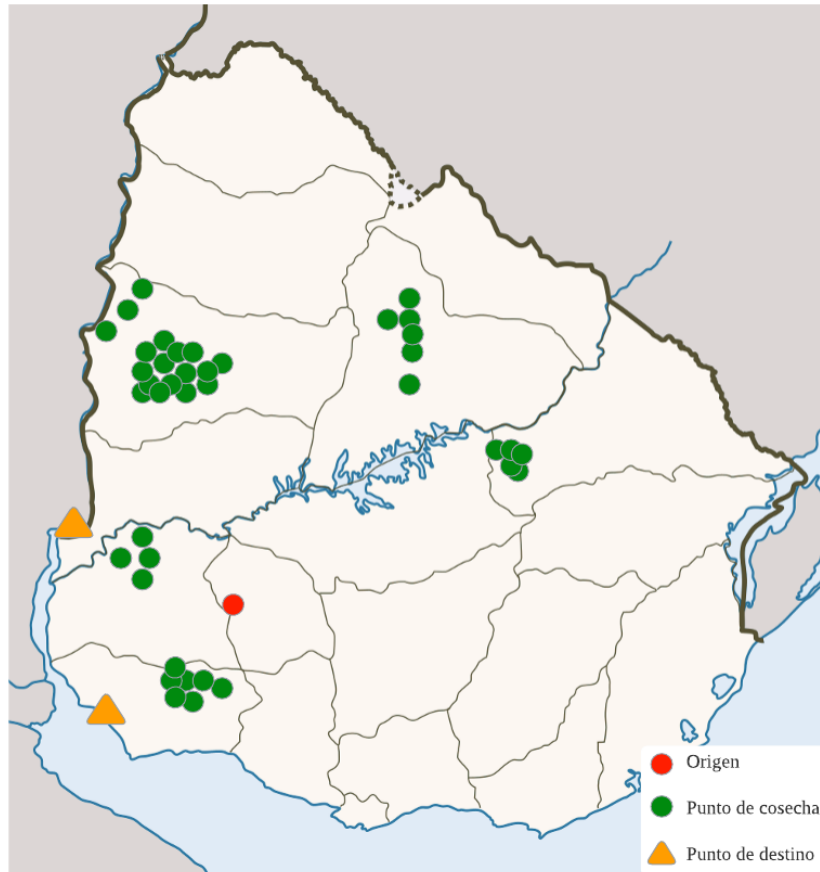


Figura 24: Ubicación de los nodos del problema. Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Obtención de parámetros

Una vez definidos los principales nodos del sistema, se procede a la obtención de los parámetros. En general, estos fueron calculados en función de la ubicación de los nodos, los tipos de vehículos y las producciones promedio de las industrias, con el apoyo de las herramientas y fuentes de información detalladas anteriormente. Se presentará de la misma manera que para los nodos la metodología de obtención de cada parámetro, pudiendo encontrar definidos en el camino otros conjuntos del sistema.

Capacidad de vehículos

Los vehículos tenidos en cuenta se pueden clasificar en tres tipos. Estos corresponden a los elementos del conjunto K definido en el problema y son:

- Camión convencional
- Bitrén
- Tritrén

Todos ellos tienen diferentes capacidades, la cual se utiliza como parámetro para calcular cuántos viajes son los necesarios con cada tipo para satisfacer la demanda de los puntos de destino. Este dato fue recolectado de la Revista Forestal [57] y corresponde en cada caso a los datos presentados en el Cuadro 4.

Oferta de madera en puntos de cosecha

Este parámetro es determinado en base a la información proporcionada por las empresas forestales. Junto con cada punto de cosecha ubicado, se tiene el volumen de madera existente en cada uno para cada período (correspondiendo a la planificación de una empresa transportista en el año 2022). El conjunto de períodos dentro de un año, corresponde al conjunto P definido en el problema.

Se presentan tabulados los valores de la oferta en la sección 9.2 en los Cuadros 41, 42, 43 y 44. Como puede verse, los mismos dependen no solo del punto de cosecha del que se trate sino también del período, que en este caso corresponden a los meses del año en orden del 1 (Enero) al 12 (Diciembre).

Demanda de los destinos

Este parámetro es el que determina cuánta madera se debe llevar a cada una de las industrias productoras de celulosa para cada período.

Para calcular este parámetro fue necesario realizar algunas suposiciones que permitieran llegar a un valor que tenga sentido:

- La oferta, es decir, el volumen disponible en los puntos de cosecha, es suficiente para cubrir toda la demanda que se tiene.
- Ambas industrias tienen el mismo consumo y las diferencias en el volumen producido corresponde a la capacidad de cada una.

Al ser dos industrias conocidas, los datos de volúmenes producidos es información pública que se puede encontrar en las páginas oficiales de las mismas. Es así como se logró obtener los valores tabulados a continuación (Cuadro 5), llamando a cada una como “Planta A” y “Planta B” respectivamente, expresando el volumen en millones de toneladas al año.

Planta A	Planta B
1,3	1,4

Cuadro 5: Volumen producido por las plantas de celulosa en millones de toneladas al año.

Se parte de la base que la cantidad de puntos de cosecha que abastecen estas industrias no están contempladas en su totalidad, por lo que la oferta de trozas de madera en este estudio se consume en su totalidad. Se ponderó utilizando los volúmenes de producción de el Cuadro 5, para así calcular los valores de demanda de las instancias. Al finalizar los cálculos, se definió una demanda un poco menor a la oferta, lo que se puede visualizar en sección 9.2 en el Cuadro 45.

Emisiones

Dado que se quieren minimizar las emisiones de CO_2 generadas por la actividad de transporte forestal, el valor de las emisiones de los distintos vehículos es un parámetro crucial para el sistema.

En este caso, como se vio anteriormente, los vehículos utilizados tienen distintas características que terminan impactando en el rendimiento y en las emisiones por kilómetro recorrido de cada uno. En particular, luego de una búsqueda general que se realizó en internet, el rendimiento para cada uno de los distintos tipos de los vehículos, en promedio, es el siguiente:

- Camión convencional: $2,5 \text{ km/l}$
- Bitrén: $3,0 \text{ km/l}$
- Tritrén: $4,0 \text{ km/l}$

Según un estudio de 2022 [90], se establece que las emisiones de CO_2 para un camión convencional resultan en $1,04 \text{ kg de CO}_2/\text{km recorrido}$. A partir de este dato y con el rendimiento promedio de los camiones, se estiman las emisiones en $2,6 \text{ kg de CO}_2/\text{l combustible}$. Realizando proporcionalmente los cálculos para los demás vehículos, se lograron obtener los valores de emisiones expresados en $\text{kg de CO}_2/\text{km recorrido}$ que se presentan tabulados en el Cuadro 6.

Camión convencional	1,04
Bitrén	0,87
Tritrén	0,65

Cuadro 6: Emisiones de CO_2 expresadas en $\text{kg de CO}_2/\text{km recorrido}$.

Distancias entre nodos

Una vez definidos los nodos del modelo (Figura 24), se utilizó la herramienta Google Earth para determinar la distancia entre las diferentes combinaciones posibles de todos ellos.

Sabiendo que la herramienta devuelve como resultado la ruta óptima, además de otras alternativas posibles, se eligió en todos los casos la ruta más corta; es decir, con menor cantidad de kilómetros, entendiendo que esta es la ruta que minimiza las emisiones para ese trayecto. Las distancias son presentadas en los Cuadros 46, 47, 50, 51 y 54 de la Sección 9.2.

Cantidad máxima de viajes

Para establecer la cantidad máxima de viajes por trayecto, se tomó como referencia que una ruta de 500 km en Uruguay es recorrida en aproximadamente 8 horas por un camión forestal cargado. Con esta relación entre la longitud de un camino y el tiempo aproximado para realizarlo, es posible traducir las diferentes rutas que se tienen entre nodos a tiempo de recorrido.

Además, teniendo en cuenta que los meses tienen 30 días y las jornadas son de 8 horas, es posible llegar así a los datos del parámetro en cuestión. De esta forma, se presentan estos valores nuevamente en la sección 9.2 en los Cuadros 56 y 57.

5.3. Validación del modelo

Con el fin de verificar la validez del modelado y un correcto funcionamiento del mismo, se presentan en esta sección algunos casos de prueba realizados con ese fin. Las características del dispositivo utilizado para estas pruebas, y luego también para la experimentación numérica, son las siguientes:

- Procesador: 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1165G7 @ 2.80GHz 2.80 GHz
- RAM: 8 GB
- S.Operativo: Windows, sistema operativo de 64bits

Adicionalmente, se utilizó un software para implementar los distintos modelos, del cual se presentan las características a continuación:

- Software: AMPL IDE
- Versión: 3.6.10.202208131811
- Solver: CPLEX 22.1.1.0

Se presentarán a continuación los casos de prueba analizados para validar el modelo. Estas pruebas se basaron en el aumento de la instancia de datos de manera gradual, lo que permite ver y analizar cómo responde el modelado a dichos cambios. Para cada instancia se fueron incorporando cada vez más puntos de cosecha, incrementando la cantidad de 10 y, proporcionalmente, la cantidad de vehículos de la flota. Las flotas se establecieron en función a la cantidad de puntos de cosecha y se definieron previamente los porcentajes para las distribuciones de las mismas. De esta manera, independientemente de la cantidad de puntos de cosecha y el número de vehículos de la flota, se mantuvieron las mismas distribuciones definidas para los distintos casos. La demanda de los destinos también crece proporcionalmente con el aumento de los puntos de cosecha ya que esto genera que aumente la oferta de madera, de manera de que la oferta siempre sea un poco mayor a la demanda. En resumen, para una cierta cantidad de puntos de cosecha, se presentarán tres casos de prueba. Cada uno de ellos tendrá una distribución de la flota diferente, para lograr analizar la respuesta en los resultados obtenidos.

Por otra parte, además de evaluar como responde el modelado a los aumentos en las instancias y las distintas distribuciones de las flotas, resultó interesante estudiar un caso límite o caso borde. Se implementó entonces, luego del aumento de las instancias, una instancia más en la que la oferta no fue suficiente para cubrir con la demanda y se analizaron los resultados obtenidos.

A modo de simplificar el entendimiento de cada uno de los casos de prueba realizados, se irá presentando un diagrama de cómo evoluciona la instancia utilizada a medida que se avanza en cada una. Para comenzar, se tomaron en cuenta únicamente 10 puntos de cosecha y, en base a esto, se realizaron modificaciones en la distribución de la flota. En la Figura 25 se puede ver un esquema de esta realidad, tomando en cuenta que cada “monte” del diagrama representa 10 puntos de cosecha.

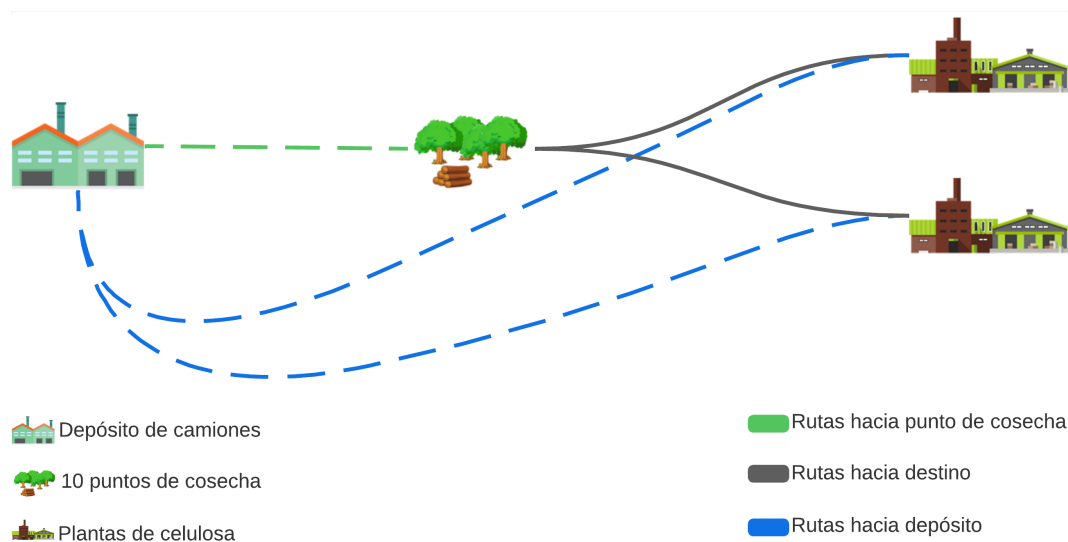


Figura 25: Esquema general con 10 puntos de cosecha. Fuente: elaboración propia.

Caso 1: 10 puntos de cosecha - 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes

La primera instancia que se llevó a cabo fue una prueba con tan solo 10 puntos de cosecha, y una flota de vehículos distribuida de la siguiente manera: 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes. Como se mencionó anteriormente, para la misma cantidad de puntos de cosecha se presentarán los Casos 2 y 3, los que tiene una variación en la distribución de la flota. Para este primer caso se presenta el Cuadro 7, con la cantidad de puntos de cosecha de la instancia y los distintos tipos de vehículos.

Cantidad de puntos de cosecha	10
Cantidad camiones	10
Cantidad de bitrenes	3
Cantidad de tritrenes	3

Cuadro 7: Instancia definida para el Caso de prueba 1.

La instancia completa y los resultados obtenidos para este caso se pueden encontrar en el Anexo 9.1. Como puede verse, el mismo fue resuelto con éxito, llegando a una solución factible además de óptima. Los principales resultados analizados fueron: las emisiones totales, que se encuentran en 215 563 kg de CO₂, el tiempo de resolución que fue de 1,22 s, el GAP de 0,87 %. El tiempo de resolución y el GAP brindan información acerca de la eficiencia del modelo y la precisión con respecto a los datos observados. A priori, se podría decir que son resultados aceptables, incluso prometedores. Sin embargo, es importante resaltar que las conclusiones de estas pruebas se podrán conocer una vez evaluados todos los casos.

Caso 2: 10 puntos de cosecha - 75 % camiones, 12,5 % bitrenes y 12,5 % tritrenes

Con la misma instancia de 10 puntos de cosecha, se realizó la primera variación en la distribución de la flota. En este caso la misma está distribuida de la siguiente manera: 75 % camiones, 12,5 % bitrenes

y 12,5 % tritrenes. Se presentan en el Cuadro 8 la cantidad definida de elementos para los conjuntos de vehículos y puntos de cosecha.

Cantidad de puntos de cosecha	10
Cantidad camiones	12
Cantidad de bitrenes	2
Cantidad de tritrenes	2

Cuadro 8: Instancia definida para el Caso de prueba 2.

Nuevamente, la instancia y los resultados son presentados en en Anexo 9.1. Se llegó a una solución óptima de manera satisfactoria. Las emisiones totales se encuentran en 217 248 kg de CO_2 , el tiempo de resolución fue de 1,22 s y el GAP de 0,80 %. Comparando estos resultados con los del caso anterior, las emisiones totales se incrementaron en una pequeña cantidad, probablemente debido a que se tiene más cantidad de camiones convencionales y menor cantidad de VAD, los cuales tienen un menor factor de emisión. De todas formas, el tiempo de resolución y el GAP parecen ser buenos. Estos últimos no se vieron afectados en gran medida, aunque el GAP sí se vio mejorado.

Caso 3: 10 puntos de cosecha - 100 % camiones

Para finalizar con la instancia de 10 puntos de cosecha, se volvió a variar la distribución de la flota. Esta vez de tal manera que el 100 % de los vehículos corresponde a camiones convencionales. En el Cuadro 9 se puede ver la cantidad de elementos para los conjuntos de vehículos y puntos de cosecha de esta instancia.

Cantidad de puntos de cosecha	10
Cantidad camiones	16
Cantidad de bitrenes	0
Cantidad de tritrenes	0

Cuadro 9: Instancia definida para el Caso de prueba 3.

Esta instancia también fue resuelta con éxito, obteniendo una solución óptima. Más aún, se llegó a un valor para las emisiones totales de 277 548 kg de CO_2 , un tiempo de resolución de 0,66 s y un GAP de 0,91 %. Se puede observar que las emisiones se incrementaron nuevamente con respecto a la instancia anterior, lo cual está asociado a que se tiene una flota únicamente conformada por camiones convencionales, los cuales tienen un factor de emisión mayor a los VAD. El tiempo de resolución disminuyó considerablemente. Esto se debe a que, al disminuir a cero la cantidad de bitrenes y trenes, el dominio de las soluciones resulta considerablemente menor y permite entonces una solución más rápida del modelo. Por último, el GAP asciende, aunque lo hace en pequeña cantidad.

Una vez analizados estos casos donde se varía la distribución de la flota teniendo 10 puntos de cosecha, se incrementó en 10 unidades el conjunto de montes y se realizaron nuevamente los mismos

estudios anteriores con la variación de la flota. Para ejemplificar esto se presenta en la Figura 26 un diagrama de la realidad, donde cada monte representa un conjunto de 10 puntos de cosecha.

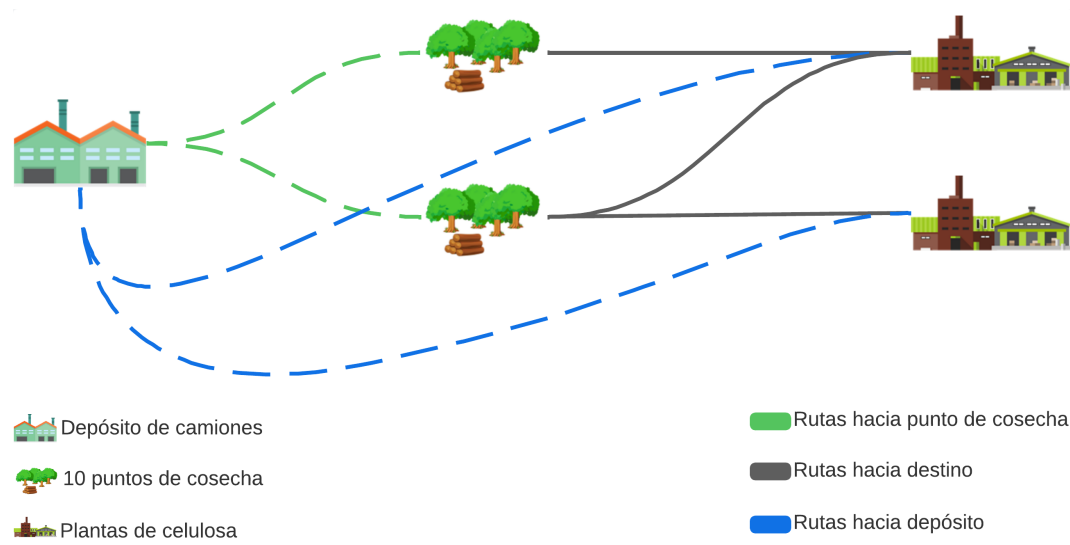


Figura 26: Esquema general con 20 puntos de cosecha. Fuente: elaboración propia.

Caso 4: 20 puntos de cosecha - 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes

Comenzando entonces con los casos de prueba para los 20 puntos de cosecha, se incrementó debidamente el tamaño de la flota y se repitieron las mismas distribuciones. El primer caso corresponde a un 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes, lo que puede verse reflejado en el Cuadro 10.

Cantidad de puntos de cosecha	20
Cantidad camiones	20
Cantidad de bitrenes	6
Cantidad de tritrenes	6

Cuadro 10: Instancia definida para el Caso de prueba 4.

Observando los resultados obtenidos (Ver Anexo 9.1), se puede decir que se obtuvo un total de emisiones de 1 977 793 kg de CO₂, un tiempo de resolución de 82,76 s, y un GAP de 0,68 %. Teniendo que es la misma distribución que para el Caso 1, es posible comparar estos resultados. El incremento en los puntos de cosecha hace que se deban realizar más viajes, lo que incrementa debidamente las emisiones totales de CO₂. Por otra parte, los indicadores de eficiencia y precisión del modelo, indican un mayor tiempo de resolución aunque un GAP menor, lo que indica que la solución obtenida se acerca más a la óptima.

Caso 5: 20 puntos de cosecha - 75 % camiones, 12,5 % bitrenes y 12,5 % tritrenes

De la misma manera que para el Caso 2, se llevó a cabo otra prueba con 20 puntos de cosecha pero con una flota de vehículos distribuida de la siguiente manera: 75 % camiones, 12,5 % bitrenes y 12,5 %

tritrenes. Se presentan en el Cuadro 11 los conjuntos definidos de vehículos y cantidad de puntos de cosecha para esta instancia.

Cantidad de puntos de cosecha	20
Cantidad camiones	24
Cantidad de bitrenes	4
Cantidad de tritrenes	4

Cuadro 11: Instancia definida para el Caso de prueba 5.

Nuevamente, se resolvió la instancia con éxito llevando a una solución factible. Las emisiones totales se encontraron en 1 993 139 kg de CO_2 , con un tiempo de resolución de 7,62 s, y un GAP de 0,63 %. Se puede observar que las emisiones se incrementaron con respecto a la instancia anterior ya que se tiene una menor cantidad de bitrenes y tritrenes pero mayor cantidad de camiones convencionales. El tiempo de resolución disminuyó considerablemente, siendo menor a una décima parte del tiempo obtenido para el Caso 4.

Caso 6: 20 puntos de cosecha - 100 % camiones

A continuación, se llevó a cabo otra prueba para los 20 puntos de cosecha con una flota de vehículos distribuida de tal manera que el 100 % sean camiones convencionales. Esto se ve reflejado en el Cuadro 12 donde se presentan los conjuntos definidos de vehículos y cantidad de puntos de cosecha.

Cantidad de puntos de cosecha	20
Cantidad camiones	32
Cantidad de bitrenes	0
Cantidad de tritrenes	0

Cuadro 12: Instancia definida para el Caso de prueba 6.

Una vez más, se obtuvo una solución factible para el problema. Observando los resultados, las emisiones totales aumentan a 2 318 490 kg de CO_2 , con un tiempo de resolución de 2,27 s, y un GAP de 0,59 %. Analizando lo anterior, las emisiones totales sufrieron un incremento debido a que se tiene una flota únicamente conformada por camiones (esto replica el comportamiento del Caso 3). Otro aspecto que replica los resultados obtenidos en el Caso 3 es el tiempo de ejecución, el cual es mucho menor que el obtenido para las instancias con bitrenes y tritrenes. Por último, en cuanto al GAP no hay grandes variaciones, por lo que no es posible sacar conclusiones significativas, además de afirmar que se está ligeramente más cerca de la solución óptima.

Al finalizar el estudio de los casos con 20 puntos de cosecha se incrementa en 10 unidades más el conjunto de montes para volver a realizar los análisis con la variación de la flota. Se diagrama esta realidad en la Figura 27, donde nuevamente cada monte representa un conjunto de 10 puntos de cosecha.

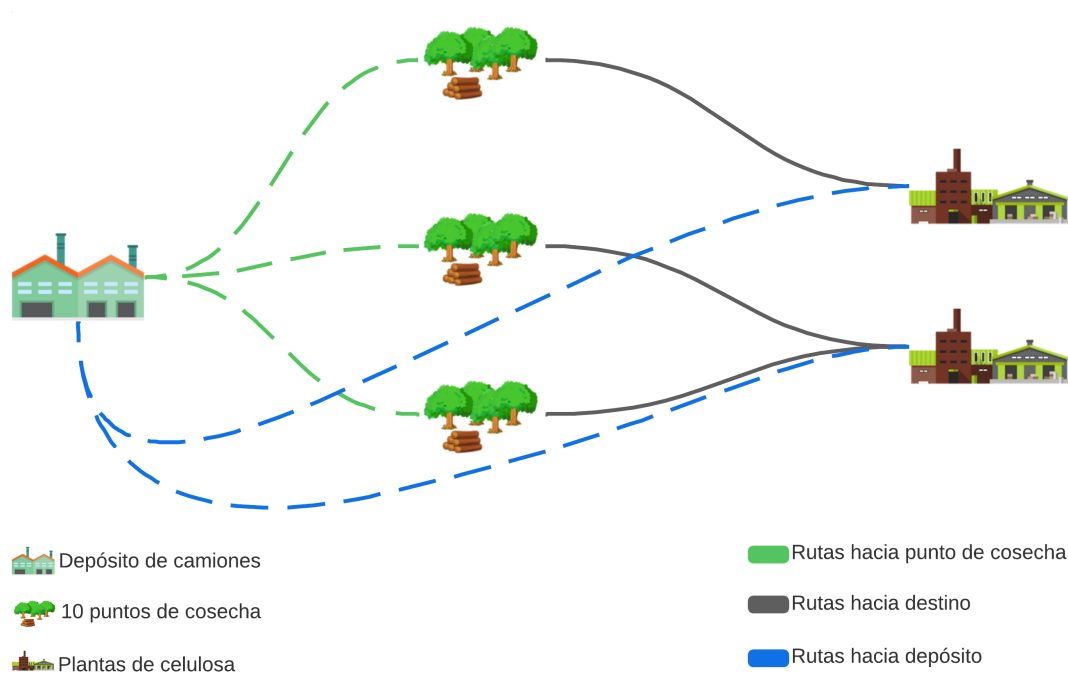


Figura 27: Esquema general con 30 puntos de cosecha. Fuente: elaboración propia.

Caso 7: 30 puntos de cosecha - 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes

Este caso fue el primero que se analizó para 30 puntos de cosecha. La flota utilizada sigue la misma distribución que los casos 1 y 4: 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes. Para presentar en números las cantidades utilizadas para cada tipo de vehículo en esta instancia, se presenta el siguiente cuadro (Cuadro 13).

Cantidad de puntos de cosecha	30
Cantidad camiones	30
Cantidad de bitrenes	9
Cantidad de tritrenes	9

Cuadro 13: Instancia definida para el Caso de prueba 7.

Al implementar este caso en el software, se logró obtener una solución factible para las emisiones totales de 3 032 869 kg de CO₂. Los valores que estudian la efectividad y precisión del modelo fueron de 29,11 s para el tiempo de resolución y de 0,88 % para el GAP. Teniendo este caso la misma distribución que el Caso 4, es posible que se comparen los resultados obtenidos para esta instancia más grande. El incremento en la instancia genera que sean necesarios más viajes para satisfacer la demanda, con lo cual tiene sentido que a su vez incrementen las emisiones totales de CO₂. Por otra parte, se observa que el tiempo de resolución es menor, mientras que el GAP es mayor.

Caso 8: 30 puntos de cosecha - 75 % camiones, 12,5 % bitrenes y 12,5 % tritrenes

De la misma manera que para el Caso 5, se llevó a cabo otra prueba con 30 puntos de cosecha pero distribuyendo la flota de la siguiente manera: 75 % camiones, 12,5 % bitrenes y 12,5 % tritrenes. En el

Cuadro 14 es posible visualizar tabulados los conjuntos definidos de vehículos y cantidad de puntos de cosecha para esta instancia.

Cantidad de puntos de cosecha	30
Cantidad camiones	36
Cantidad de bitrenes	6
Cantidad de tritrenes	6

Cuadro 14: Instancia definida para el Caso de prueba 8.

Para este caso la instancia fue resuelta con éxito. Se llegó a un valor para las emisiones totales de 3 061 013 *kg* de CO₂, con un tiempo de resolución de 133,67 s, y un GAP de 0,99 %. Al comparar los resultados con los obtenidos en los casos anteriores, se puede decir, en primer lugar, que las emisiones se incrementaron ligeramente. Además, el tiempo de resolución se vio aumentado, así como también el GAP. Esto implica que la solución obtenida está un poco más lejos de ser la solución óptima para este caso.

Caso 9: 30 puntos de cosecha - 100 % camiones

Luego se llevó a cabo otra prueba con los 30 puntos de cosecha y con una flota de vehículos distribuida de tal manera que el 100 % sean camiones convencionales. Se presenta en el Cuadro 15 los conjuntos definidos de vehículos y cantidad de puntos de cosecha para esta instancia.

Cantidad de puntos de cosecha	30
Cantidad camiones	48
Cantidad de bitrenes	0
Cantidad de tritrenes	0

Cuadro 15: Instancia definida para el Caso de prueba 9.

Las emisiones totales aumentan a 3 477 563 *kg* de CO₂, obteniendo además un tiempo de resolución de 6,66 s, y un GAP de 0,44 %. Analizando los resultados, se observa que las emisiones se incrementaron con respecto a los casos 7 y 8, debido a que se tiene una flota únicamente conformada por camiones (esto replica el comportamiento de los casos de prueba 3 y 6). Adicionalmente, el tiempo de resolución y el GAP disminuyeron considerablemente, mostrando que el modelo es más preciso para este caso.

Para los siguientes 3 casos de prueba que se realizaron, se incrementó por última vez el conjunto de montes anterior en 10 unidades y se volvió a realizar el estudio variando la flota. En la Figura 28 se ve nuevamente un diagrama de la realidad planteada, donde cada monte representa un conjunto de 10 puntos de cosecha.

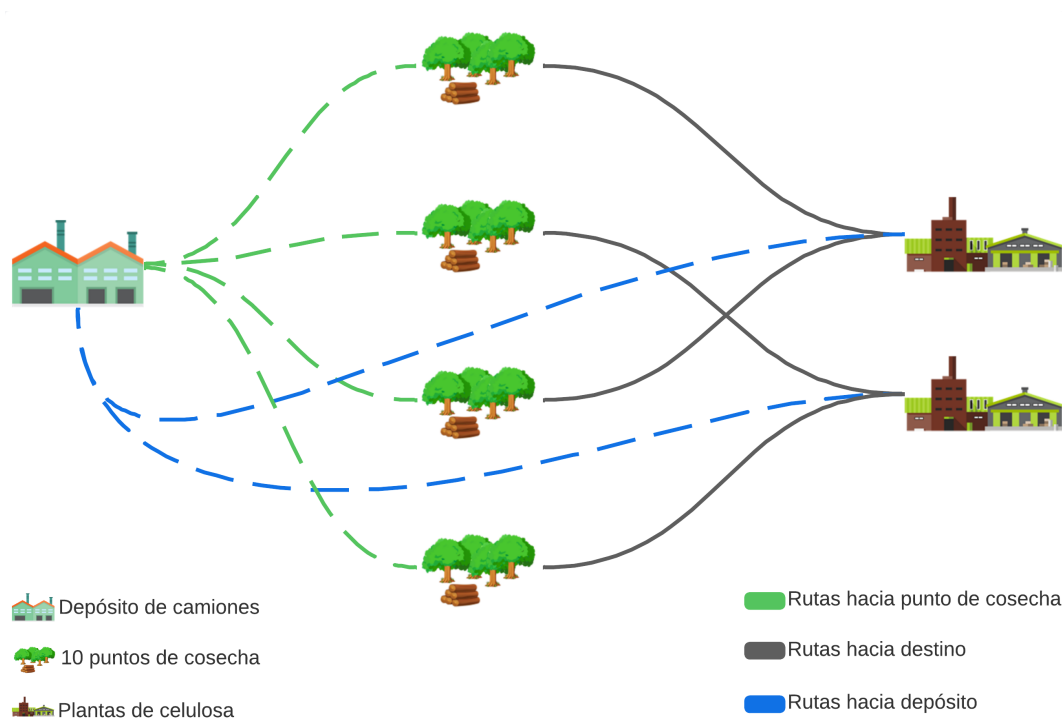


Figura 28: Esquema general con 40 puntos de cosecha. Fuente: elaboración propia.

Caso 10: 40 puntos de cosecha - 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes

El primero de los casos de prueba para los 40 puntos de cosecha fue realizado con la primera distribución de flota definida: 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes. En el Cuadro 16 se pueden ver los conjuntos definidos de vehículos y cantidad de puntos de cosecha para esta instancia.

Cantidad de puntos de cosecha	40
Cantidad camiones	40
Cantidad de bitrenes	12
Cantidad de tritrenes	12

Cuadro 16: Instancia definida para el Caso de prueba 10.

Al implementar esta instancia y ver los resultados obtenidos, se observó en primer lugar una solución factible. El valor de la función objetivo, es decir, de las emisiones totales fue de 4 011 460 kg de CO₂. Los valores para el tiempo de resolución y el GAP fueron de 354,36 s y 0,59 %, respectivamente. Con esto, es posible afirmar en primer lugar que se está aún más cerca de la solución óptima que pasa los casos anteriores similares (casos 1, 4 y 7). Además, el tiempo de resolución aumentó, como también aumentaron las emisiones totales, lo que se debe al tamaño de la instancia utilizada.

Caso 11: 40 puntos de cosecha - 75 % camiones, 12,5 % bitrenes y 12,5 % tritrenes

Para continuar con el mismo procedimiento que para los casos anteriores, se realizó otra prueba pero con una flota de vehículos distribuida de la siguiente manera: 75 % camiones, 12,5 % bitrenes y

12,5 % tritrenes. Se pueden ver en el Cuadro 17 los conjuntos definidos de vehículos y cantidad de puntos de cosecha.

Cantidad de puntos de cosecha	40
Cantidad camiones	48
Cantidad de bitrenes	8
Cantidad de tritrenes	8

Cuadro 17: Instancia definida para el Caso de prueba 11.

Esta instancia fue resuelta con éxito. Las emisiones totales llegaron a un valor de 4 054 463 *kg* de CO₂. Este valor es mayor al del caso anterior, lo cual se asocia con la cantidad de camiones convencionales y VAD. Por otra parte, el tiempo de resolución fue de 292,58 s, y el GAP de 0,55 %. Como se puede ver, estos valores son menores a los de tiempo y GAP para el Caso 10. Esto indica que se está más cerca de la solución óptima además de resolver la instancia en un menor tiempo, lo que habla de la eficiencia del modelo para estos datos.

Caso 12: 40 puntos de cosecha - 100 % camiones

El último caso de prueba analizado para los 40 puntos de cosecha se llevó a cabo con una flota únicamente conformada por camiones convencionales. La cantidad de vehículos y de puntos de cosecha tenidos en cuenta para esta instancia se puede ver en el Cuadro 18.

Cantidad de puntos de cosecha	40
Cantidad camiones	64
Cantidad de bitrenes	0
Cantidad de tritrenes	0

Cuadro 18: Instancia definida para el Caso de prueba 12.

Nuevamente, la instancia fue resuelta con éxito llegando a una solución óptima. A su vez, las emisiones totales aumentaron a 4 927 208 *kg* de CO₂, con un tiempo de resolución de 15,69 s, y un GAP de 0,26 %. Analizando estos resultados, las emisiones se incrementaron con respecto al resto de los casos de prueba implementados. Esto se debe a que el tamaño de la instancia es más grande a todas las demás y que se tienen únicamente camiones, los cuales tienen mayor factor de emisión. Debido a esto, además el dominio de las soluciones es menor, ya que los conjuntos de bitrenes y tritrenes son ahora vacíos. Esto puede verse reflejado en el tiempo de resolución que disminuye en gran cantidad con respecto al caso anterior, así como el GAP indica una mayor precisión de los resultados.

Caso borde

Además de los casos de prueba presentados anteriormente, fue necesario validar también que el modelo responda correctamente a instancias que se conocen con anterioridad como no factibles. Por

esto, se muestra a continuación el caso analizado donde se utiliza una instancia en la que la oferta no es suficiente para atender la totalidad de la demanda, independientemente de la cantidad máxima de viajes. Es decir, se utiliza una demanda mucho mayor a la oferta, para poder analizar cómo impacta esto en el modelo y sus resultados.

Para la generación de esta instancia se tomó como base el último caso de prueba analizado, el Caso 12. En este sentido, se parte de la instancia utilizada para este último, modificando la oferta y demanda para modelar el escenario deseado. En el Cuadro 19 se detallan los valores utilizados de oferta y demanda total para cada mes.

Meses	1	2	3	4	5	6
Oferta	73463	75663	73643	73463	80613	75663
Demanda	80000	80000	80000	80000	80000	80000

Meses	7	8	9	10	11	12
Oferta	81713	76213	70163	71813	62463	66863
Demanda	80000	80000	80000	80000	80000	80000

Cuadro 19: Oferta y demanda para el caso borde, expresadas en toneladas.

Al intentar resolver esta instancia con 100 % camiones convencionales, 40 puntos de cosecha y los datos que se muestran en los Cuadros anteriores, el modelo devuelve el resultado de “solución infactible” en tan solo 4,94s. Se puede concluir entonces, que el modelo se comportó correctamente, ya que la oferta dada no era suficiente para abastecer a las industrias, lo que significa que no era posible satisfacer todas las restricciones del sistema. En particular, las restricciones 2 y 6 son las que no fue posible cumplir simultáneamente, lo que el modelado resolvió con éxito casi instantáneamente.

Para finalizar con la validación del modelo, en las Figuras 29 y 30, se muestran dos gráficas con las emisiones totales y el tiempo de resolución para cada caso, respectivamente. A raíz de esto es posible sacar conclusiones generales acerca del comportamiento del modelo. Cabe aclarar que la instancia del caso borde no se muestra en las gráficas debido a haber obtenido una solución no factible. Lo que se quiere mostrar con los gráficos es una comparación entre los casos y cómo fue variando el resultado obtenido entre uno y otro, teniendo en cuenta las distintas configuraciones de flota:

- Distribución 1: 62,5 % camiones, 18,75 % bitrenes y 18,75 % tritrenes.
- Distribución 2: 75 % camiones, 12,5 % bitrenes y 12,5 % tritrenes.
- Distribución 3: 100 % camiones.

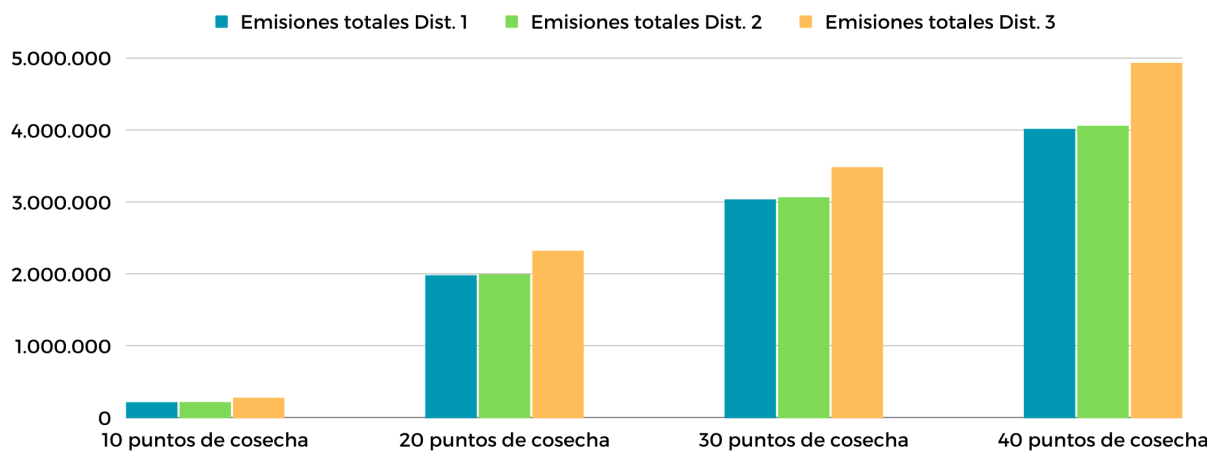


Figura 29: Emisiones totales agrupado por distribución de flota, expresadas en kilogramos de CO₂. Fuente: elaboración propia.

Analizando primero los valores obtenidos para la función objetivo en cada uno de los casos (Ver Figura 29), se puede ver claramente cómo a medida que se incrementa el tamaño de la instancia las emisiones totales van creciendo. Además, otro aspecto que varía entre un caso y el siguiente es la variación de la flota de vehículos. Esto también repercute en las emisiones totales obtenidas, lo que puede verse plasmado en la gráfica también. Un aspecto a destacar es que la mayor variación en las emisiones, además de ser el aumento de la instancia, se encuentra al variar la flota desde una distribución con bitrenes y tritrenes a una flota únicamente con camiones. En los casos en los que se varía la flota pero se mantienen los tres tipos de vehículos no es posible visualizar tan a simple vista las variaciones en la función objetivo. Lo anterior se puede ver entre los casos 1 y 2, 4 y 5, 7 y 8, y 10 y 11, casos que tienen la distribución 1 y 2 asociada, respectivamente.

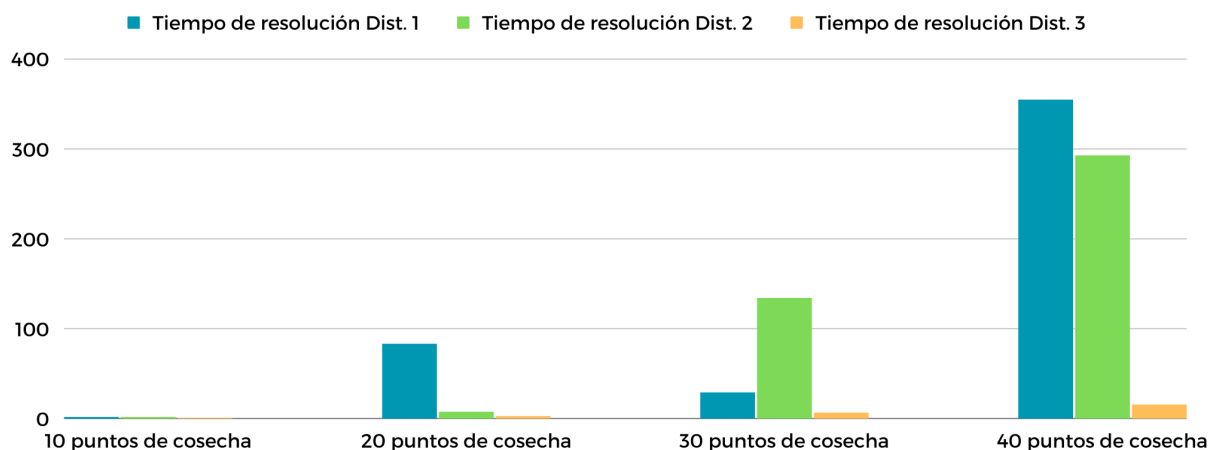


Figura 30: Tiempo de resolución agrupado por distribución de flota. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, analizando los tiempos de resolución de cada uno (Ver Figura 30), no es posible sacar conclusiones tan fácilmente de la gráfica. Sin embargo, al detenerse unos minutos en esta gráfica es posible observar dos aspectos. El primero es cómo el tiempo de resolución aumenta conforme aumenta la instancia utilizada, lo que se ve reflejado para cada una de las distribuciones. Al comparar los casos con mismas distribuciones (por ejemplo, la secuencia de casos 2, 5, 8 y 11 color verde claro) se ve cómo

el tiempo aumenta a medida que se avanza en cada uno. Esto se debe a que la instancia es mayor, por lo que se requiere mayor tiempo para llegar a obtener una solución que se acerque lo máximo posible a la óptima. El otro aspecto a destacar es el comportamiento que tiene la gráfica al variar la flota de vehículos. En los casos con 20 y 40 montes, se ve cómo disminuye el tiempo de resolución a medida que varía la distribución de la flota quitando bitrenes y tritrenes. La flota se varió de manera tal que cada vez se tengan menos VAD, hasta llegar a un 100 % de camiones convencionales. Esto implica que el dominio de las soluciones que contiene punto de cosecha, destino, vehículos y período, se vea disminuido al disminuir uno de los conjuntos de vehículos ($V = C \cup B \cup T$, según se definió en la sección 5.1).

Para terminar con este análisis, la ejecución coherente de todos casos de prueba implementados en esta validación constituyen un respaldo para la efectividad del modelado matemático realizado. Cada uno de los casos de prueba fue realizado para evaluar el modelo en una variedad de escenarios, y los resultados coherentes a lo largo de estos casos demuestran y validan la eficacia del mismo. La diversidad de configuraciones en los casos de prueba, que incluyeron variaciones en la cantidad de puntos de cosecha y en la distribución de la flota de vehículos, permitió una evaluación exhaustiva de los diferentes aspectos del modelo. En cada instancia, el modelo se resolvió conforme a lo previsto, demostrando capacidad para abordar situaciones más simples como desafíos logísticos más complejos. La consistencia de las emisiones totales y otros indicadores a lo largo de los casos de prueba confirma la validez de las suposiciones y parámetros incorporados en el modelo. La comparación de los resultados entre diferentes configuraciones de flota y puntos de cosecha permitió identificar patrones consistentes y razonables. Por lo tanto, luego de todos los casos implementados y resueltos exitosamente se valida la efectividad del modelo.

6. Experimentación numérica

En este capítulo, se documenta el análisis llevado a cabo para evaluar cómo las emisiones de CO₂ en el transporte forestal en Uruguay varían en respuesta a diferentes cambios realizados sobre algunos parámetros del problema. Se exploraron siete escenarios diferentes que tuvieron como objetivo evaluar el impacto de diferentes variaciones en los aspectos clave del modelo matemático utilizado. Estos escenarios se generaron a partir de modificaciones realizadas al Caso 11 analizado en la validación del modelo previamente presentado.

Al explorar estos escenarios, se buscó obtener una comprensión más completa de cómo las variaciones en los parámetros del modelo pueden afectar los resultados y la sostenibilidad del transporte forestal. Mediante el análisis de estos escenarios, se pudo determinar si las modificaciones realizadas resultan en mejoras, empeoramiento o cambios insignificantes en los aspectos evaluados. Para poder concluir esto, se comparó cada escenario con los resultados del Caso 11, al que se llamará "Caso base". Para cada una de las modificaciones se analizó el resultado de la función objetivo así como otros valores relevantes para determinar la eficiencia del modelo (al igual que se hizo con los casos de prueba). A continuación, se presenta cada escenario con los resultados obtenidos y una breve descripción de cada uno, para luego finalizar con un análisis integral de la experimentación numérica.

Escenario 1: Cambio en la ubicación del depósito

En primer lugar se evaluó el impacto de cambiar la ubicación del depósito. Esto implica, principalmente, cambios en las distancias de los viajes, lo que genera una asignación distinta de rutas y, en consecuencia, un cambio en las emisiones. Inicialmente, el depósito en el Caso base se encontraba en un punto neurálgico entre los nodos principales, los cuales son los puntos de cosecha y los destinos. De esta manera, se aseguraba que no existieran grandes distancias entre los mismos. En este escenario en particular, se analizó la eficiencia de la localización del depósito de vehículos, al mudar el mismo hacia una zona de alta densidad de montes de madera. Este cambio se puede observar en la Figura 31.

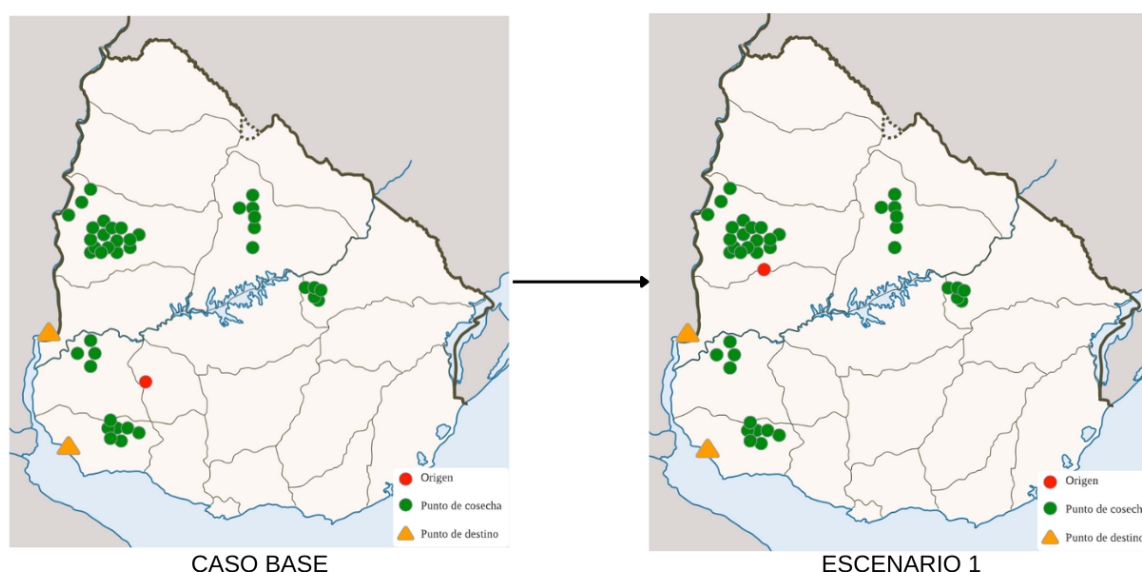


Figura 31: Mapa de nodos antes y después, para el Escenario 1. Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos en este escenario se presentan en el Cuadro 20 junto con los resultados del Caso base.

Escenario	Emisiones (kg de CO ₂)	Tiempo de ejecución (s)	GAP (%)
Caso base	4.054.463	292,6	0,55
1	4.115.471	920,3	1,00

Cuadro 20: Resultados obtenidos - Escenario 1.

Observando el Cuadro anterior, las variaciones en las emisiones no fueron significativas, ya que aumentan tan solo un 1 % respecto del Caso base. En relación al tiempo de ejecución, se puede observar que es más de tres veces mayor, además de que el GAP toma un valor cercano al doble. Dado este aumento significativo en el tiempo de ejecución y el GAP, y considerando también el incremento en las emisiones, se concluye entonces que resulta más favorable ubicar el depósito de los vehículos en un punto medio y estratégico entre los destinos y los puntos de cosecha. Al ubicarlo más cerca de una zona concentrada de montes puede quedar más alejado de los destinos (como en este caso), lo cual no resulta beneficioso.

Escenario 2: Habilitación de todas las rutas

Pasando al segundo escenario, se consideró la habilitación de todas las rutas disponibles en el sistema de transporte. Como se vio anteriormente, los VAD no están habilitados para circular por todas las rutas del país. Para poder evaluar el impacto se consideraron como habilitadas todas las rutas para la circulación de todos los tipos de vehículos. Este escenario se basó en una posible inversión en infraestructura a nivel nacional que permita que las rutas sean aptas para el transporte de vehículos de gran porte como los que se analizan en el modelo.

En el Cuadro 21 se muestran los resultados obtenidos al implementar este cambio comparados con los resultados del Caso base.

Escenario	Emisiones (kg de CO ₂)	Tiempo de ejecución (s)	GAP (%)
Caso base	4.054.463	292,6	0,55
2	2.847.211	2223,2	1,54

Cuadro 21: Resultados obtenidos - Escenario 2.

Este escenario tuvo varias particularidades. Al habilitar todas las rutas, la asignación de viajes para los vehículos tenía más posibilidades, así como la cantidad de viajes. Esto resultó en un tiempo de ejecución fue mucho mayor. En principio, se intentó resolver con un GAP de corte del 1 % (el utilizado hasta este momento) pero el tiempo de ejecución fue mayor a 6 horas. A raíz de esto se decidió aumentar el GAP a 2 %, con lo cual se logró ejecutar el escenario. A priori, se podría pensar que se asignarían solo bitrenes y tritrenes, dado que emiten menos CO₂ que los camiones convencionales. Sin embargo, la restricción de viajes máximos planteada en el modelado (restricción 8) no permite que se utilicen

únicamente este tipo de vehículos, debiendo recurrir a los camiones convencionales. De todas maneras, la habilitación de todas las rutas permite que se pueda acceder al destino de la Planta B con bitrenes y tritrenes, lo que reduce significativamente las emisiones. Todo esto se puede ver en los resultados obtenidos en el Cuadro 21: menores emisiones totales, mayor tiempo de resolución y mayor GAP.

Escenario 3: Reducción del 14,1 % en la flota

El siguiente análisis que se realizó fue el de reducir en un 14,1 % la flota de vehículos disponibles en el sistema, distribuyéndose la cantidad de camiones convencionales, bitrenes y tritrenes como se muestra en el Cuadro 22. El porcentaje presentado se debe a la intención de obtener números enteros en las cantidades resultantes de vehículos para cada tipo, partiendo de un tamaño de flota con 48 camiones convencionales, 8 bitrenes y 8 tritrenes.

Este escenario se sustenta en observar cómo cambian las emisiones totales en una empresa con un capital de vehículos menor, pero con la misma demanda a satisfacer.

Cantidad de camiones	41
Cantidad de bitrenes	7
Cantidad de tritrenes	7

Cuadro 22: Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 3

Los resultados se pueden ver en el Cuadro 23, comparados frente a los del Caso base.

Escenario	Emisiones (kg de CO ₂)	Tiempo de ejecución (s)	GAP (%)
Caso base	4.054.463	292,6	0,55
3	4.091.483	590,9	0,98

Cuadro 23: Resultados obtenidos - Escenario 3.

Este cambio en la flota resulta entonces en un aumento de tan solo el 0,9 % en las emisiones de CO₂. Este incremento se considera poco significativo en términos ambientales. Sin embargo, la disminución de la flota de vehículos podría ser beneficiosa si se analiza a nivel global. Al reducir la cantidad de vehículos, se logra una disminución en los costos asociados, como el mantenimiento y otros gastos operativos, lo que podría ser una buena opción para una empresa sabiendo que las emisiones totales no cambian significativamente. En relación al tiempo de ejecución y GAP, se observa que son ligeramente mayores que los del Caso base, como se indica en el Cuadro 23. De todas formas, se considera que este incremento no es significativo, siendo que corresponden a valores aceptables en términos de rendimiento computacional.

Escenario 4: Reducción del 28,1 % en la flota

Este análisis guarda similitudes con el escenario anterior. En este, fue considerada una reducción más pronunciada en la flota de vehículos, disminuyéndola en un 28,1 %. La cantidad de los distintos

tipos de vehículos que se utilizaron en este escenario se muestran en el Cuadro 24. Al igual que el escenario anterior, el porcentaje de reducción se estableció de manera de obtener números enteros en las cantidades de vehículos de cada tipo, partiendo de un tamaño de flota con 48 camiones convencionales, 8 bitrenes y 8 tritrenes.

Cantidad de camiones	34
Cantidad de bitrenes	6
Cantidad de tritrenes	6

Cuadro 24: Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 4.

Los resultados obtenidos junto con los del Caso base se presentan en el Cuadro 25

Escenario	Emisiones (kg de CO ₂)	Tiempo de ejecución (s)	GAP (%)
Caso base	4.054.463	292,6	0,55
4	4.107.330	495,2	0,68

Cuadro 25: Resultados obtenidos - Escenario 4.

Se puede inferir que este escenario es aún más favorable que el anterior. Aunque la disminución de la flota conlleva un aumento ligeramente mayor en las emisiones de CO₂, específicamente un 1,3 % más en comparación con el Caso base, se observa que la disminución de la flota es aún más significativa. Esto implica una mayor disminución en los costos asociados mencionados anteriormente. Entonces, la reducción del 28,1 % en la flota de vehículos puede ser una opción aún más favorable en términos de reducción de costos, aunque se tenga un impacto ambiental levemente mayor. Sin embargo, se debe tener cuidado con la reducción de la flota, ya que es importante poder satisfacer la demanda de todos los destinos. Para finalizar con el análisis de este escenario, se observa que los valores obtenidos para el tiempo de ejecución y el GAP no aumentan de manera significativa, lo que replica las mismas conclusiones que para el escenario anterior.

Escenario 5: Reducción del 50 % en la flota

Observando las conclusiones de los dos escenarios anteriores donde se reduce la flota en distintas medidas, resultó interesante estudiar cómo respondería el modelo a una reducción aún mayor. En este caso, se experimentó una reducción del 50 % en la flota. Esto permite analizar los resultados para una hipotética empresa de transporte que cuenta con un capital invertido en vehículos aún menor que en los casos anteriores. La distribución de los distintos tipos de vehículos se puede ver en el Cuadro 26, mientras que los resultados obtenidos se encuentran en el Cuadro 27.

Cantidad de camiones	24
Cantidad de bitrenes	4
Cantidad de tritrenes	4

Cuadro 26: Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 5.

Escenario	Emisiones (kg de CO ₂)	Tiempo de ejecución (s)	GAP (%)
Caso base	4.054.463	292,6	0,55
5	Infactible	3,2	-

Cuadro 27: Resultados obtenidos - Escenario 5.

Con esta reducción en la flota vehicular, tanto de camiones convencionales como de bitrenes y tritrenes, el problema no tiene una solución factible. Esto se debe a que no es posible cumplir con la demanda de madera para los distintos destinos, teniendo esa cantidad de vehículos. Por lo tanto, se concluye que no es recomendable reducir la flota en grandes cantidades. A pesar de que se reducirían los costos de mantenimiento y costos operativos, contar con un número muy bajo de vehículos puede restringir el cumplimiento de la demanda, no satisfaciendo a las industrias.

Escenario 6: Aumento del 14,1 % en la flota

Al igual que fue disminuida la flota para evaluar los impactos, se realizaron estudios en los que se aumentó. En este escenario se aumenta la misma en un 14,1 %, como se muestra en el Cuadro 28. Teniendo una mayor disponibilidad de transporte, se analizó si esto implicaba menos emisiones de CO₂, a pesar de los costos asociados a una mayor inversión de capital. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 29. El porcentaje de 14,1 % tiene el mismo sustento que para el Escenario 3, partiendo de un tamaño de flota con 48 camiones convencionales, 8 bitrenes y 8 tritrenes.

Cantidad de camiones	53
Cantidad de bitrenes	9
Cantidad de tritrenes	9

Cuadro 28: Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 6.

Escenario	Emisiones (kg de CO ₂)	Tiempo de ejecución (s)	GAP (%)
Caso base	4.054.463	292,6	0,55
6	4.050.333	390,4	0,85

Cuadro 29: Resultados obtenidos - Escenario 6.

Se puede ver en el Cuadro 29 una disminución casi imperceptible de las emisiones totales con respecto al Caso base, siendo esta del 0,1 %. En cuanto al tiempo de ejecución, se observó un leve aumento, al igual que sucede con el GAP. Esto permite afirmar que no resulta beneficioso aumentar la flota en la proporción que se estudia en este escenario. Las emisiones totales no cambian significativamente, los resultados de eficiencia y precisión del modelo son levemente peores, y además, implicaría mayores costos de mantenimiento y operativos por haber aumentado el tamaño de la flota.

Escenario 7: Aumento del 28,1 % en la flota

El último escenario analizado fue similar al anterior, como sucede con los escenarios 3 y 4. Se estudió un aumento del 28,1 % de los vehículos de la flota, como se encuentra detallado en el Cuadro 30. De la misma forma que en el Escenario 4, el porcentaje fue establecido para obtener números enteros en las cantidades de vehículos, partiendo de un tamaño de flota con 48 camiones convencionales, 8 bitrenes y 8 tritrenes.

Cantidad de camiones	62
Cantidad de bitrenes	10
Cantidad de tritrenes	10

Cuadro 30: Cantidad de los distintos vehículos en el Escenario 7.

Los resultados obtenidos en este último caso se muestran en el Cuadro 31, junto a los del Caso base.

Escenario	Emisiones (kg de CO ₂)	Tiempo de ejecución (s)	GAP (%)
Caso base	4.054.463	292,6	0,55
7	4.037.702	229,5	0,82

Cuadro 31: Resultados obtenidos - Escenario 7.

Analizando lo anterior, las emisiones disminuyen mínimamente respecto del Caso base. En particular, esta disminución corresponde al 0,4 %. El tiempo de ejecución también se ve disminuido, mientras que el GAP toma un valor algo mayor, aunque no en gran medida. Esto significa que para tiempo menor se obtuvo una solución más alejada de la óptima. Además, al aumentar la flota se tienen mayores costos de mantenimiento y operativos, como se ha explicado anteriormente, y teniendo en cuenta que los cambios en las emisiones totales no fueron significativos, se considera que aumentar la flota en mayor medida continúa sin ser favorable.

Análisis integral de escenarios

Comparando los resultados de todos los escenarios con el Caso base, se puede concluir que no se observaron cambios significativos en cuanto a la cantidad total de emisiones. Esto se presenta en el Cuadro 32 que reúne los siete escenarios de experimentación numérica. Cabe mencionar que la columna de “Desvío” corresponde a la variación de las emisiones totales con respecto a las del Caso base.

Escenario	Emisiones (kg de CO ₂)	Desvío (%)	Tiempo de ejecución (s)	GAP (%)
Caso base	4.054.463	-	292,6	0,55
1	4.115.471	1,5 %	920,3	1,00
2	2.847.211	-29,8 %	2223,2	1,54
3	4.091.483	0,9 %	590,9	0,98
4	4.107.330	1,3 %	495,2	0,68
5	Infactible	-	3,2	-
6	4.050.333	-0,1 %	390,4	0,85
7	4.037.702	-0,4 %	229,5	0,82

Cuadro 32: Comparación de los distintos escenarios.

Para lograr una mejor comparación y análisis de lo sucedido se presentan diferentes gráficos que comparan distintos aspectos de cada escenario con el Caso base. Se comenzará analizando el gráfico de la Figura 32.

El Escenario 2, el cual corresponde a habilitar todas las rutas para VAD, es el único escenario que sí disminuye significativamente las emisiones de CO₂. Por otra parte, todos los demás valores obtenidos en los escenarios para las emisiones, no se encuentran a más de un 1,5 % de las obtenidas para el Caso base. Esto da la idea de que, independientemente de los valores de eficiencia y precisión, ninguna de las demás variaciones de parámetros afectó significativamente al modelo en términos de la función objetivo. Por otra parte, es importante destacar el Escenario 5 que tuvo una solución no factible. Disminuir demasiado el tamaño de la flota no resulta ser beneficioso cuando se busca, además de disminuir las emisiones, cumplir con la demanda de clientes. De lo anterior se puede concluir que entre las distintas alternativas planteadas, que fueron: cambiar la ubicación del depósito, disminuir y aumentar el tamaño de la flota, y habilitar todas las rutas para vehículos de gran porte; esta última pareciera ser la más efectiva para reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. No obstante, se debe tener en cuenta que esto requiere que se acompañe con una gran inversión en términos de infraestructura para el país, lo cual no siempre es viable.

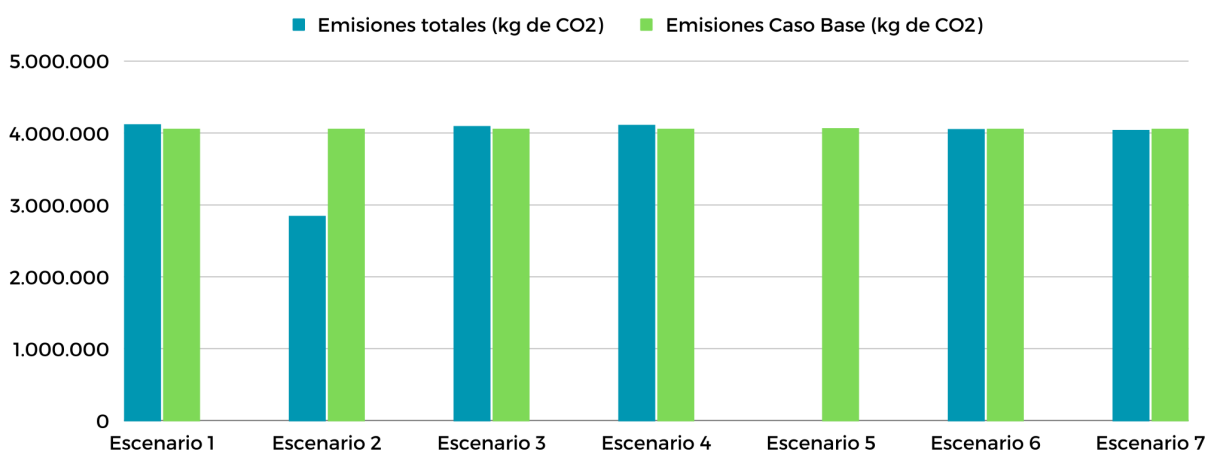


Figura 32: Emisiones totales por escenario vs Emisiones del caso base. Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 33, en lo que refiere a los tiempos de ejecución, los escenarios 1 y 2 son los que mayores desvíos presentan con respecto al Caso base. El Escenario 1 aumenta más de tres veces su tiempo de ejecución, mientras que el Escenario 2 es el que aumenta en mayor medida, siendo más de siete veces el tiempo del Caso base. El resto de los escenarios no tienen tiempos de ejecución muy fluctuantes. Analizando en mayor profundidad en Escenario 2, habilitar todas las rutas para los VAD hace que el sistema se vuelva más complejo en términos de rendimiento computacional ya que son más las posibilidades de resolución. Obviamente, como ya se mencionó anteriormente, esto logra una reducción importante de las emisiones, pero no se debe perder de vista el tiempo de ejecución. Este valor permite conocer la eficiencia del modelo para la instancia estudiada, tomando un valor bastante elevado para este escenario. En consecuencia, si bien las emisiones totales disminuyen considerablemente, el costo computacional aumenta significativamente. Sin embargo, utilizando un dispositivo con mejores características para su implementación o incluso un software más desarrollado, que soporte instancias más grandes, seguramente los resultados obtenidos sean mejores y más exactos, con tiempos de ejecución menores.

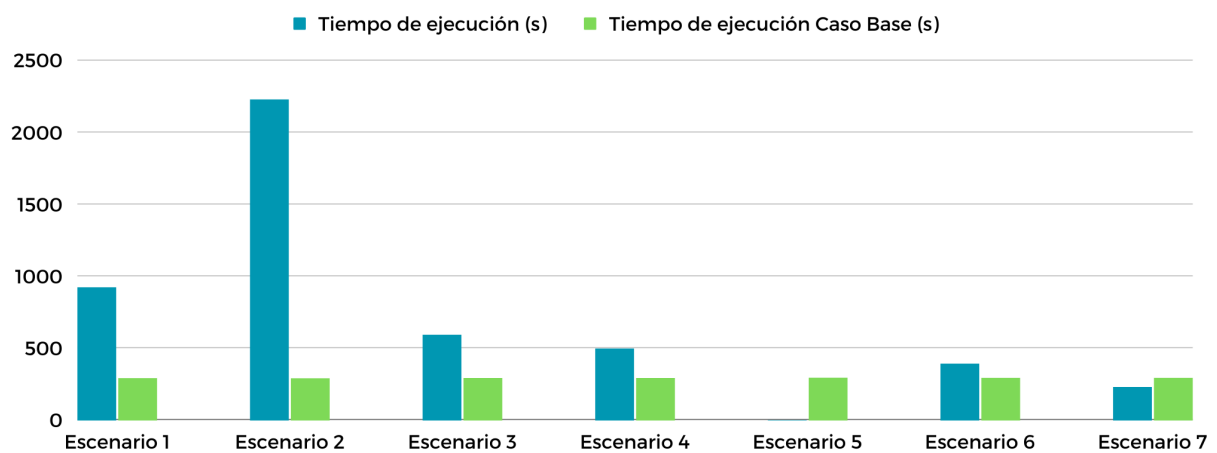


Figura 33: Tiempo de ejecución por escenario vs Tiempo de ejecución del caso base. Fuente: elaboración propia.

7. Análisis económico

Una vez finalizada la experimentación numérica se avanzó en un análisis económico en pos de evaluar la viabilidad económica y financiera del proyecto. Se partió de la base de una empresa que se encuentra en el Caso 12 mencionado en la Sección 5.3 con 64 camiones convencionales, la cual invertiría para adquirir 8 bitrenes y 8 tritrenes, vendiendo 16 camiones convencionales, ubicándose en el Caso 11 de dicha sección. En otras palabras, el número total de vehículos es el mismo, pero con una flota variada, con el 75 % de camiones convencionales, 12,5 % de bitrenes y 12,5 % de tritrenes. Se analizó entonces, la viabilidad económica de que una empresa pueda comenzar a utilizar estos vehículos de gran porte, no solo para minimizar el impacto ambiental, sino también obtener una buena rentabilidad económica. Es importante mencionar que en este análisis se consideró como criterio general que los precios utilizados no incluyen IVA.

Se fijó un horizonte de planificación para el proyecto en 5 años. Para adquirir los vehículos se requiere una inversión inicial de U\$S 4.944.000, la cual incluye los honorarios de los profesionales que se fija en un 3 % (ver Cuadro 33). Para financiar el 100 % de la misma se pide un préstamo bancario a pagar en lo que dura el proyecto. Las cuotas e intereses a pagar se calculan utilizando el sistema alemán⁸, y el cálculo se presenta en el Cuadro 34. Se tomó como tasa pactada un 6 % anual. El valor del dólar se fijó en \$38 (pesos uruguayos) para la totalidad del análisis durante todo el período.

	Precio (US\$)	Cantidad	Total (US\$)
Bitrén	300.000	8	2.400.000
Titrén	400.000	8	3.200.000
Camión convencional	-50.000	16	-800.000
Honorarios profesionales (3 %)	-	-	144.000
Total (US\$)	-	-	4.944.000

Cuadro 33: Inversión inicial.

N° de cuota	Capital al inicio del período (US\$)	Amortización (US\$)	Intereses del período (US\$)
1	4.944.000	988.800	269.448
2	3.955.200	988.800	210.120
3	2.966.400	988.800	150.792
4	1.977.600	988.800	91.464
5	988.800	988.800	32.136

Cuadro 34: Intereses anuales calculados a partir del sistema alemán.

⁸El sistema alemán implica que el costo de amortización es constante durante todo el período y el interés de cada cuota es decreciente mes a mes.

A efectos contables, la vida útil de los vehículos se consideró en 10 años. Con este dato se logró obtener como gasto no desembolsable la depreciación de los mismos. Para esto se supuso que los camiones convencionales que se vendieron no sobrepasan los 5 años de antigüedad, tomando un promedio de 3 años para todos ellos; mientras que para los bitrenes y tritrenes se supuso una compra de vehículos completamente nuevos, por lo que la vida útil corresponde a los 10 años considerados. De esta forma, se estableció la depreciación en U\$S 7.143, U\$S 30.000 y U\$S 40.000 para camiones convencionales, bitrenes y tritrenes, respectivamente.

Para todo proyecto de inversión es necesario contabilizar los costos incurridos en el período de tiempo analizado. En este caso en particular, se pueden dividir entre egresos fijos gravados por impuestos, egresos variables gravados y gastos no desembolsables. Para analizar estos datos y lograr la mayor realidad posible en un escenario ficticio, este análisis se respaldó con un estudio contable, tomando datos de empresas de transporte de carga y de personas.

Como principal gasto fijo, se encuentran los gastos administrativos. Aquí se incluyen egresos como luz, agua, teléfono, artículos de limpieza, servicio técnico, entre otros. Luego, se encuentran los seguros de los 64 camiones. Además, se toman en cuenta honorarios de profesionales como un contador, abogado, escribano, técnico prevencionista y médico laboral. Otro gasto importante es la patente de rodados de cada camión y su respectivo tráiler. Todos estos se ajustan año a año por IPC fijado en 9 % debido, a que todos ellos son pagos que se realizan con la moneda nacional, como se ve en el Cuadro 35. Por último, se encuentra el pago de un depósito para albergar los camiones y oficinas administrativas, no ajustado por IPC debido a su pago en U\$S.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Depósito (US\$)	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000
Patente (US\$)	113.684	123.916	135.068	147.224	160.475
Honorarios profesionales (US\$)	90.000	98.100	106.929	116.553	127.042
Seguro de la flota (US\$)	102.158	111.352	121.374	132.297	144.204
Gastos administrativos (US\$)	157.895	172.105	187.595	204.478	222.881
Egresos Fijos Gravados por impuestos (US\$)	523.737	565.473	610.966	660.553	714.602

Cuadro 35: Costos fijos.

Los costos de mano de obra se pueden considerar fijos y variables. Esto se debe a que los camioneros, en general, son jornaleros. Es decir, se podría considerar como un costo variable. Para calcular estos costos se tomó en cuenta el Caso 11 con sus respectivas asignaciones, teniendo la cantidad de km por camión. Se asume que cada camión es manejado por una persona, teniendo un total de 64 camioneros. Se fija una tasa de conversión en U\$S/km con el jornal fijado en el laudo del consejo de salarios del ministerio de trabajo en el rubro de transporte de madera y de ahí se deduce el pago por manejar un camión convencional. Para el caso de operarios que manejen bitrenes y tritrenes se aumenta un 20 %.

Este es el principal gasto en mano de obra pero no el único, como se puede ver en el Cuadro 36. Con la cantidad de camiones y viajes por período es necesario un coordinador, así como un auxiliar administrativo y un auxiliar contable. Además, se agregan un sereno, limpiador y cadete. A todos los sueldos se les agrega aguinaldo, licencias, salario vacacional y aportes patronales. Dentro de estos últimos se toma en cuenta la prima de riesgo por accidente de trabajo. Nuevamente, estos costos se ajustan con un IPC anual de 9 %.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Sueldo Personal (US\$)	378.936	413.040	450.214	490.733	534.899
Aguinaldos (US\$)	31.578	34.420	37.518	40.894	44.575
Licencias (US\$)	21.052	22.947	25.012	27.263	29.717
Total haberes gravados (US\$)	431.566	470.407	512.743	558.890	609.190
Aportes patronales (US\$)	71.208	77.617	84.603	92.217	100.516
Salario Vacacional (US\$)	16.842	18.357	20.009	21.810	23.773
Total de personal contratado (US\$)	519.616	566.381	617.356	672.917	733.480

Cuadro 36: Costos de mano de obra.

Los gastos en el mantenimiento de los vehículos se consideraron variables, debido a que el mismo depende de cuántos kilómetros recorren los vehículos. Se tomó en cuenta el gasto que se tiene en empresas similares, como se mencionó anteriormente. Otro gasto variable es el de cambio de cubiertas, un gasto importante teniendo en cuenta la cantidad de ruedas que pueden llegar a tener los tritrenes, por ejemplo (ver Cuadro 37).

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Gastos de mantenimiento (US\$)	1.178.947	1.285.053	1.400.707	1.526.771	1.664.180
Cambio de cubiertas (US\$)	451.368	451.368	451.368	451.368	451.368
Egreso total (US\$)	1.630.316	1.736.421	1.852.076	1.978.139	2.115.549

Cuadro 37: Costos de mantenimiento.

En el Cuadro 38 se encuentran los otros costos variables. Como principal gasto se encuentra el combustible. Para el cálculo de este parámetro se analizó la cantidad recorrida por cada tipo de vehículo y dependiendo de esto, el rendimiento en kilómetros por cada litro de gas oil. Luego, se encuentran los peajes, fijados en un promedio de 2 peajes por viaje, ida y vuelta, tomando las tarifas del MTOP. Todos estos gastos se ajustan con el IPC mencionado en párrafos anteriores. Es importante mencionar que los precios del combustible y los peajes fueron establecidos en referencia a los valores definidos en agosto de 2023, los cuales fueron de \$54,34 (pesos uruguayos) para el combustible y \$163,79; \$334,40 y \$559,61 (pesos uruguayos) para los peajes de camión convencional, bitrén y tritrén, respectivamente.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Combustible (US\$)	6.386.922	6.961.745	7.588.302	8.271.249	9.015.662
Peajes (US\$)	467.257	509.310	555.148	605.111	659.571
Egresos Variables Gravados por impuestos (US\$)	6.854.179	7.471.055	8.143.450	8.876.360	9.675.232

Cuadro 38: Costos variables.

Por otro lado, se encuentran los ingresos gravados por impuestos. Estos son los que se facturan para transportar la madera desde los puntos de cosecha hasta los destinos A y B. Para calcular la totalidad de este monto se utilizó como precio de referencia la tarifa de precios de la Unión de Transportistas de Carga del Uruguay para el año 2018, como se muestra en el Cuadro 39. Dados los volúmenes en la demanda y la cantidad de viajes, se estableció por contrato un 10 % de descuento al inicio para las empresas cliente. A su vez, todos los ingresos fueron ajustados un 7 % anual.

Distancia recorrida (km)	Precio por kilómetro (US\$)
Hasta 50	12,59
De 50 a 100	7,19
De 101 a 150	4,98
De 151 a 250	4,14
De 251 a 350	3,38
De 351 a 450	3,01
Más de 450	2,74

Cuadro 39: Tarifa de precios de transporte de madera.

Uniando estos datos se construye el flujo de fondos mostrado en el Cuadro 40. En él se encuentran los intereses financieros, cuotas del préstamo bancario, egresos fijos y variables gravados por impuestos, ingresos gravados, así como los gastos no desembolsables. Cabe destacar que no hay ingresos ni egresos no gravados por impuestos. Además se calcula el impuesto a las rentas de las actividades económicas, el cual se fija en 25 %. Sabiendo que en el caso del transporte este impuesto suele ser menor, los beneficios obtenidos en cada flujo neto anual serían mayores y en consecuencia la rentabilidad también.

A raíz del flujo, se calcularon el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), de manera de evaluar la rentabilidad del proyecto. La manera de evaluar los resultados es la siguiente: para que el proyecto sea rentable, el valor del VAN debe ser mayor a cero; mientras que la TIR debe ser mayor a la tasa de descuento.

De esta manera, utilizando un valor de descuento de 4 %, el VAN resulta en U\$S 1.414.300 y la TIR en 13,62 %. Por lo tanto, se concluye que el proyecto es rentable para una empresa transportista con características similares a la realidad analizada.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos gravados por impuestos (US\$)	0	12.521.266	13.397.754	14.335.597	15.339.089	16.412.825
Egresos fijos gravados por impuestos (US\$)	0	600.166	648.781	701.771	759.531	822.488
Egresos variables gravados por impuestos (US\$)	0	8.927.681	9.690.549	10.522.075	11.428.439	12.416.375
Gastos no desembolsables (US\$)	0	902.857	902.857	902.857	902.857	902.857
Intereses financieros (US\$)	0	269.448	210.120	150.792	91.464	32.136
Utilidad antes de impuestos (US\$)	0	1.821.114	1.945.447	2.058.101	2.156.798	2.238.968
Impuesto a la renta (US\$)	0	-455.278	-486.362	-514.525	-539.200	-559.742
Utilidad después de impuestos (US\$)	0	1.365.835	1.459.085	1.543.576	1.617.599	1.679.226
Gastos no desembolsables (US\$)	0	902.857	902.857	902.857	902.857	902.857
Ingresos no gravados por impuestos (US\$)	0	0	0	0	0	0
Egresos no gravados por impuestos (US\$)	0	0	0	0	0	0
Inversión inicial (US\$)	-4.944.000	0	0	0	0	0
Préstamo bancario (US\$)	4.944.000	-988.800	-988.800	-988.800	-988.800	-988.800
Flujo Neto (US\$)	0	1.279.892	1.373.142	1.457.633	1.531.656	1.593.283
Flujo Neto Acumulado (US\$)	0	1.279.892	2.653.035	4.110.668	5.642.324	7.235.607

Cuadro 40: Flujo de fondos.

8. Conclusiones y trabajos a futuro

Teniendo en cuenta los objetivos generales planteados en el capítulo 1, se puede concluir de la siguiente manera. En cuanto al primer objetivo general, de realizar una revisión bibliográfica sobre el tema de GVRP aplicado a cadenas de suministro, se puede afirmar que se cumplió con éxito. Como se muestra en el análisis bibliométrico realizado, se pudo acceder a diversas fuentes de datos, lo que permitió obtener una cantidad considerable de trabajos relacionados al tema. Si bien no todos fueron analizados debido a los diversos filtros aplicados, se entiende que la cantidad final de artículos, papers e investigaciones permitió un análisis exhaustivo del GVRP, estudiando sus variantes y sus distintas metodologías de resolución.

Por otro lado, se pudo formular un modelo matemático para el ruteo de vehículos aplicado a un tipo de transporte en el Uruguay. Más aún, en este modelo se logró minimizar las emisiones de CO_2 generadas por la actividad del transporte forestal en el país. Se analizó el contexto de la misma, observando que este sector estuvo en constante crecimiento a lo largo de los últimos años. Teniendo en cuenta la llegada de una nueva planta de celulosa, es de esperar que la actividad del sector aumente significativamente. Este crecimiento debe traer consigo una mejora en la infraestructura vial necesaria para la actividad. De esta manera, la cantidad de rutas habilitadas para bitrenes y tritrenes, debe acompañar este crecimiento, asegurando la posibilidad de abastecer a las industrias que utilizan trozas de madera como materia prima.

Al analizar los distintos escenarios planteados en el capítulo 6, se puede concluir de la siguiente manera. En general, las variantes que se plantearon no impactaron significativamente en las emisiones totales con respecto al caso base. La variación de la cantidad total de la flota, no influye de manera significativa en las emisiones totales de CO_2 . No obstante, se debe tener cuidado en la reducción de la misma, ya que esto puede ocasionar una infactibilidad en el problema, como es el caso del Escenario 5. Por otra parte, la habilitación de todas las rutas para el tránsito de bitrenes y tritrenes reducen en un 29,8 % las emisiones totales respecto del caso base. Dentro de las alternativas planteadas, esta es la que genera un menor impacto ambiental. Habilitar todas las rutas para vehículos de grandes configuraciones, invirtiendo en el mejoramiento de las mismas, parecería ser una buena alternativa en términos ambientales.

Para los casos de prueba, ubicados en la Sección 5.3, se varió la distribución de la flota para una misma cantidad de vehículos y puntos de cosecha. Se puede ver que al momento de variar la flota, de manera que se utilicen únicamente camiones convencionales, las emisiones totales aumentan en gran medida. En conclusión, es posible asegurar que para diferentes configuraciones de flota de vehículos, una flota con la presencia de bitrenes y tritrenes reduce las emisiones de CO_2 , resultando menos contaminante.

El último objetivo planteado fue la realización de un análisis económico, desde el punto de vista de una empresa transportista. Cabe destacar en este punto que no se contó con una contraparte que brindara información; Sin embargo, se pudo acceder a datos de empresas transportistas de otros rubros,

que se pudieron adaptar a esta realidad planteada. Como se vio en el capítulo 7, la sustitución de una flota de vehículos, adquiriendo vehículos de mayor porte, es rentable económicamente en un horizonte de planificación de 5 años. Esto quiere decir, que la incorporación de este tipo de vehículos a la flota no solo es beneficioso a nivel ambiental sino también a nivel económico para la empresa.

Realizando un análisis integral de los resultados y las conclusiones expuestas anteriormente, se observa que se abarcaron dos pilares fundamentales de la sostenibilidad. Por un lado, se contempló la dimensión ambiental, asegurando mediante el modelado matemático que se minimicen las emisiones de CO₂ generadas por el transporte. Por el otro, con base en el análisis económico, se asegura que el proyecto es rentable, contemplando así la dimensión económica. No obstante, resulta interesante analizar la dimensión social para esta realidad planteada, de manera de abarcar las tres dimensiones de la sostenibilidad, por lo que este trabajo puede ser una motivación para futuras investigaciones sobre el tema.

Otro aspecto relevante para analizar a futuro es la implementación del modelo para más de una empresa transportista. Se destaca de todas formas que esto implicaría más orígenes y más vehículos, lo que conlleva a un grado de mayor complejidad en la resolución del problema. Esto se traduce en un mayor costo computacional que con mejores características del dispositivo y el software a utilizar, podría ser posible obtener una buena solución en tiempo razonable.

La reciente incorporación de las vías de tren en Uruguay con el fin de transportar celulosa, hace que sea de gran interés analizar el impacto que este tiene. De esta manera, se podría ampliar el alcance de este estudio, abarcando el transporte tanto de materias primas como de pulpa de celulosa. Esto permite conocer las emisiones generadas a lo largo de toda la cadena de suministro. Además, existen diversas industrias que utilizan la madera como materia prima, no solo productoras de celulosa. Es por esto que, si bien esta industria tiene la mayor actividad en el sector forestal, este trabajo se podría aplicar para todas las empresas del mismo.

Continuando con foco en la sostenibilidad, otro aspecto que podría ser interesante abarcar es el del uso de vehículos propulsados por combustibles alternativos, como el hidrógeno verde y los vehículos eléctricos. Es importante tener en cuenta el desafío relacionado con la disponibilidad de estaciones de carga en comparación con las estaciones de combustibles fósiles. La ubicación de los puntos de carga es un factor clave en la planificación del transporte, asegurando que los vehículos siempre tengan acceso a la recarga necesaria. Por otra parte, estas cargas demoran un tiempo considerablemente mayor que las cargas de combustibles fósiles, lo que implica considerar los tiempos de abastecimiento además del tiempo requerido para el recorrido.

Referencias

- [1] WU, S., YAO, X., & WU, G. (2020) *Environmental Investment Decision of Green Supply Chain considering the Green Uncertainty*. Complexity, 2020, 1-13.
- [2] MEHLAWAT, M. K., GUPTA, P., KHAITAN, A., & PEDRYCZ, W. (2019) *A hybrid intelligent approach to integrated fuzzy multiple depot capacitated green vehicle routing problem with split delivery and vehicle selection*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 28(6), 1155-1166.
- [3] KIRCI, P. (2019) *A novel model for vehicle routing problem with minimizing CO2 emissions*. 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), 241-243.
- [4] NABIL, N., FAROUK, H. A., & EL-KILANY, K. S. (2017) *Green vehicle routing and scheduling problem with optimized travel speed*. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 1057-1061.
- [5] LARGO, S., SOUISSI, O., & EL AKKAOU, Z. (2020) *Green Vehicle Routing Problem: A short survey*. IEEE international conference on technology management, operations and decisions (ICT-MOD), 1-10.
- [6] WU, C. Y., VISUTARROM, T., & CHIANG, T. C. (2018) *Green Vehicle Routing Problem: The tradeoff between travel distance and carbon emissions*. 15th international conference on control, automation, robotics and vision (ICARCV), 1659-1664.
- [7] PRAKASH, R., & PUSHKAR, S. (2021) *Solution to Multi-Objective GVRP with Genetic Algorithm and Time Window*. 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), 1475-1482.
- [8] ELGHARABLY, N., EASA, S., NASSEF, A., & EL DAMATTY, A. (2022) *Stochastic multi-objective vehicle routing model in green environment with customer satisfaction*. Transactions on Intelligent Transportation Systems, 24(1), 1337-1355.
- [9] MESSAOUD, E., EL IDRISSE, A. E. B., & ALAOU, A. E. (2018) *The green dynamic vehicle routing problem in sustainable transport*. 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL), 1-6.
- [10] UTAMIMA, A., & DJUNAIDY, A. (2022) *Agricultural routing planning: A narrative review of literature*. Procedia Computer Science, 197, 693-700.
- [11] ANDRADE, M. D., & USBERTI, F. L. (2021) *Combinatorial properties for the green vehicle routing problem*. Procedia Computer Science, 195, 478-488.
- [12] ASGHARI, M., & AL-E, S. M. J. M. (2021) *Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review*. International Journal of Production Economics, 231, 107899.
- [13] FALLAH, M., TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R., SALAMATBAKHSH-VARJOVI, A., & ALI-NAGHIAN, M. (2019) *A green competitive vehicle routing problem under uncertainty solved by an improved differential evolution algorithm*. International journal of engineering, 32(7), 976-981.

- [14] UTAMA, D. M., WIDODO, D. S., IBRAHIM, M. F., & DEWI, S. K. (2020) *A new hybrid butterfly optimization algorithm for green vehicle routing problem*. Journal of Advanced Transportation, 2020, 1-14.
- [15] ZHANG, S., GAJPAL, Y., & APPADOO, S. S. (2018) *A meta-heuristic for capacitated green vehicle routing problem*. Annals of Operations Research, 269, 753-771.
- [16] MARREKCHI, E., BESBES, W., DHOUIB, D., & DEMIR, E. (2021) *A review of recent advances in the operations research literature on the green routing problem and its variants*. Annals of Operations Research, 304, 529-574.
- [17] KOZÁK, V., WOLLER, D., VÁVRA, V., & KULICH, M. (2021) *Initial solution constructors for capacitated green vehicle routing problem*. Modelling and Simulation for Autonomous Systems: 7th International Conference, MESAS 2020, Prague, Czech Republic, October 21, 2020, Revised Selected Papers 7, 250-268.
- [18] DAGNE, T. B., JAYAPRAKASH, J., HAILE, B., & GEREMEW, S. (2019) *Optimization of green logistic distribution routing problem with multi depot using improved simulated annealing*. Advances of Science and Technology: 6th EAI International Conference, ICAST 2018, Bahir Dar, Ethiopia, October 5-7, 2018, Proceedings 6, 183-197.
- [19] MACRINA, G., PUGLIESE, L. D. P., & GUERRIERO, F. (2020) *The green-vehicle routing problem: a survey*. Modeling and Optimization in Green Logistics, 1-26.
- [20] SANTOS, M. J., AMORIM, P., MARQUES, A., CARVALHO, A., & PÓVOA, A. (2020) *The vehicle routing problem with backhauls towards a sustainability perspective: A review*. Top, 28(2), 358-401.
- [21] HOOSHMAND, F., & MIRHASSANI, S. A. (2019) *Time dependent green VRP with alternative fuel powered vehicles*. Energy Systems, 10, 721-756.
- [22] KONSTANTAKOPOULOS, G. D., GAYIALIS, S. P., & KECHAGIAS, E. P. (2020) *Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification*. Operational research, 1-30.
- [23] CATALDO-DÍAZ, C., LINFATI, R., & ESCOBAR, J. W. (2022) *Mathematical model for the electric vehicle routing problem considering the state of charge of the batteries*. Sustainability, 14(3), 1645.
- [24] GHORBANI, E., ALINAGHIAN, M., GHAREHPETIAN, G. B., MOHAMMADI, S., & PERBOLI, G. (2022) *A survey on environmentally friendly vehicle routing problem and a proposal of its classification*. Sustainability, 12(21), 9079.
- [25] WANG, S., TAO, F., SHI, Y., & WEN, H. (2017) *Optimization of vehicle routing problem with time windows for cold chain logistics based on carbon tax*. Sustainability, 9(5), 694.
- [26] LI, X., SHI, X., ZHAO, Y., LIANG, H., & DONG, Y. (2020) *SVND enhanced metaheuristic for plug-in hybrid electric vehicle routing problem*. Applied Sciences, 10(2), 441.

- [27] WANG, S., HAN, C., YU, Y., HUANG, M., SUN, W., & KAKU, I. (2021) *Reducing carbon emissions for the vehicle routing problem by utilizing multiple depots*. Sustainability, 14(3), 1264.
- [28] ISLAM, M. A., & GAJPAL, Y. (2021) *Optimization of conventional and green vehicles composition under carbon emission cap*. Sustainability, 13(12), 6940.
- [29] THEERAVIRIYA, C., SIRIRAK, W., & PRASEERATASANG, N. (2020) *Location and routing planning considering electric vehicles with restricted distance in agriculture*. World Electric Vehicle Journal, 11(4), 61.
- [30] ZHANG, W., GAJPAL, Y., APPADOO, S. S., & WEI, Q. (2020) *Multi-depot green vehicle routing problem to minimize carbon emissions*. Sustainability, 12(8), 3500.
- [31] BO, P., YUAN, Z., YUVRAJ, G., & XIDING, C. (2019) *A memetic algorithm for the green vehicle routing problem*. Sustainability, 11(21), 6055.
- [32] WANG, P., ZHANG, J., DENG, H., & ZHANG, M. (2019) *Real-time urban regional route planning model for connected vehicles based on V2X communication*. Journal of Transport and Land Use, 13(1), 517-538.
- [33] CHENG, C., QI, M., & ROUSSEAU, L. M. (2018) *Fuel consumption optimization model for the multi-period inventory routing problem*. Transportation Research Record, 2672(9), 59-69.
- [34] GHEZAVATI, V. R., SAHIHI, A., & BARZEGAR, A. (2017) *Using an the intelligent self-modifier of probability of section approach to study the revenue influence of the pricing scheme of recyclable items in a green vehicle routing problem*. Simulation, 94(4), 359-372.
- [35] QUAN, C., HE, Q., YE, X., & CHENG, X. (2021) *Optimization of the Milk-run route for inbound logistics of auto parts under low-carbon economy*. Journal of Algorithms & Computational Technology, 15.
- [36] ASIH, A. M. S., SOPHA, B. M., & KRIPTANIADDEWA, G. (2017) *Comparison study of metaheuristics: Empirical application of delivery problems*. International Journal of Engineering Business Management, 9.
- [37] SABET, S., & FAROOQ, B. (2022) *Green Vehicle Routing Problem: State of the Art and Future Directions*. IEEE Access.
- [38] MOGHDANI, R., SALIMIFARD, K., DEMIR, E., & BENYETTOU, A. (2021) *The green vehicle routing problem: A systematic literature review*. Journal of Cleaner Production, 279.
- [39] PRADENAS, L., OPORTUS, B., & PARADA, V. (2012) *Disminucion de contaminación en el problema de ruteo de vehículos*. XVI Congreso Latino-Iberamericano de Investigación Operativa, 1892-1902.
- [40] ROCHA, V. & SALABERRY, J. (2019) *Un método de resolución para el problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos*. Ingeniería de producción. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay).

- [41] CAL, M, CHAVEZ, A & DURAN, D. (2021) *Cooperación logística aplicada al sector forestal*. Ingeniería de producción. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay).
- [42] GONZÁLEZ, C & DA CUNHA, I. (2020) *Problema de ruteo para flota de vehículos heterogénea con ventanas de tiempo y múltiples orígenes y destinos*. Ingeniería en computación. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay).
- [43] BEKTAŞ, T., & LAPORTE, G. (2011) *The pollution-routing problem*. Transportation Research Part B: Methodological, 45(8), 1232-1250.
- [44] NAGY, G., & SALHI, S. (2005) *Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries*. European journal of operational research, 162(1), 126-141.
- [45] LIN, S., & KERNIGHAN, B. W. (1973) *An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem*. Operations research, 21(2), 498-516.
- [46] BRANDÃO DE OLIVEIRA, H. C., & VASCONCELOS, G. C. (2010) *A hybrid search method for the vehicle routing problem with time windows*. Annals of Operations Research, 180, 125-144.
- [47] ALVARENGA, G. B., MATEUS, G. R., & DE TOMI, G. (2007) *A genetic and set partitioning two-phase approach for the vehicle routing problem with time windows*. Computers & Operations Research, 34(6), 1561-1584.
- [48] SHEN, Y., LIU, M., YANG, J., SHI, Y., & MIDDENDORF, M. (2020) *A hybrid swarm intelligence algorithm for vehicle routing problem with time windows*. IEEE Access, 8, 93882-93893.
- [49] MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS (19 de Noviembre de 2020) *Decreto N°303/020*. Montevideo, Uruguay.
- [50] URUGUAY XXI PROMOCIÓN DE INVERSIONES, EXPORTACIONES E IMAGEN PAÍS. (2022) *Sector forestal en Uruguay*.
- [51] SPF URUGUAY. *Uruguay Forestal*. <https://spf.com.uy/uruguay-forestal/>. Visitado: Febrero 2023.
- [52] MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA (MGAP). (2022) *Superficie Forestal de bosques plantados del Uruguay*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/superficie-forestal-bosques-plantados-del-uruguay>. Visitado: Febrero 2023.
- [53] GASTAÑAGA, L. (2022) *¿Cómo ha evolucionado la exportación de productos forestales?*, Revista Forestal. <http://www.revistaforestal.uy/economia/como-ha-evolucionado-la-exportacion-de-productos-forestales.html>. Visitado: Febrero 2023.

- [54] MIGUEL, F. (2021) *El valor del aire limpio*, Revista Forestal. <http://www.revistaforestal.uy/industria/bonos-de-carbono-el-valor-del-aire-limpio-urugua.html>.
Visitado: Febrero 2023.
- [55] RICO, V. (2021). *Vida de ruta*. Revista Forestal. <http://www.revistaforestal.uy/logistica/vida-de-ruta-la-evolucion-del-transporte-de-carga.html>.
Visitado: Febrero 2023.
- [56] FERMI, M. J. (2019). *Impulso forestal*, Revista Forestal. <http://www.revistaforestal.uy/logistica/impulso-forestal-al-transporte-uruguay.html>.
Visitado: Febrero 2023.
- [57] FERMI, M. J. (2019). *Por partida triple*, Revista Forestal. <http://www.revistaforestal.uy/logistica/por-partida-triple.html>.
Visitado: Febrero 2023.
- [58] GAMIO, P. (2014). *Estrategia en movimiento*, Revista Forestal. <http://www.revistaforestal.uy/logistica/estrategia-en-movimiento.html>.
Visitado: Febrero 2023.
- [59] PINTOS, I. (2012). *La Llegada del bitren a Uruguay*, Revista Forestal.. <http://www.revistaforestal.uy/logistica/la-llegada-del-bitren-a-uruguay.html>.
Visitado: Febrero 2023.
- [60] PINTOS, I. (2012). *La explosión forestal gestó una revolución logística*, Revista Forestal. <http://www.revistaforestal.uy/logistica/la-explosion-forestal-gesto-una-revolucion-logistica.html>.
Visitado: Febrero 2023.
- [61] PASEYRO, J. (2011). *Uruguay: la logística más cara de la región*, Revista Forestal. <http://www.revistaforestal.uy/logistica/uruguay-la-logistica-mas-cara-de-la-region.html>.
Visitado: Febrero 2023.
- [62] MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS. *Dimensiones y Pesos Máximos de Vehículos de Transporte*. <https://www.gub.uy/ministerio-transporte-obras-publicas/sites/ministerio-transporte-obras-publicas/files/documentos/publicaciones/Dimensiones%20y%20Pesos%20M%C3%A1ximos%20de%20Veh%C3%ADculos%20de%20Transporte.pdf>.
Visitado: Febrero 2023

- [63] *Decreto 134/1998*, (1998) <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-reglamento/134-1998>.
Visitado: Mayo 2023.
- [64] ARRIAGA, M. E. (2021). *Cartografía Forestal de bosques plantados 2021*, OPYPA. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2021/estudios/cartografia-forestal-bosques-plantados-2021>.
Visitado: Mayo 2023.
- [65] LAGUNA, H. (2022). *Evolución reciente y perspectivas del comercio exterior de productos forestales*, OPYPA. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2022/analisis-sectorial-cadenas-productivas/evolucion>.
Visitado: Mayo 2023.
- [66] ACADEMIA NACIONAL DE INGENIERÍA, URUGUAY., (2021) *Producción forestal en el Uruguay: balance y perspectivas*. <https://aniu.org.uy/documentos/produccion-forestal-en-el-uruguay-balance-y-perspectivas/>.
Visitado: Mayo 2023.
- [67] MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS. *Geoportal MTOP*. <https://geoportal.mtop.gub.uy/>.
Visitado: Mayo 2023
- [68] MINISTERIO DE TRANSPORTE Y OBRAS PÚBLICAS. *Decreto 303/2020*, (2020). <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/303-2020/10>.
Visitado: Mayo 2023.
- [69] MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. (2021). *Suelos de prioridad forestal*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/suelos-prioridad-forestal>.
Visitado: Mayo 2023.
- [70] CARABALLO, L., CORREA, F., CORDATTI, A. (2021) *Modelo para la planificación eficiente del transporte forestal: Un análisis del transporte bimodal de trozas en Uruguay*. Ingeniería de producción. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay).
- [71] CASSEN, R. H. (1987) *Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development*.
- [72] MAHMOUDI, R., SHETAB-BOUSHEHRI, S. N., HEJAZI, S. R., & EMROUZNEJAD, A. (2019) *Determining the relative importance of sustainability evaluation criteria of urban transportation network*. Sustainable Cities and Society, 47, 101493.

- [73] LIIMATAINEN, H., PÖLLÄNEN, M., & NYKÄNEN, L. (2020) *Impacts of increasing maximum truck weight—case Finland*. European Transport Research Review, 12, 1-12.
- [74] DENTE, S. M., & TAVASSZY, L. (2018) *Policy oriented emission factors for road freight transport*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 61, 33-41.
- [75] ENGSTRÖM, R. (2016) *The roads' role in the freight transport system*. Transportation Research Procedia, 14, 1443-1452.
- [76] DENANT-BOEMONT, L., FAULIN, J., HAMMICHE, S., & SERRANO-HERNANDEZ, A. (2018) *Managing transportation externalities in the Pyrenees region: Measuring the willingness-to-pay for road freight noise reduction using an experimental auction mechanism*. Journal of Cleaner Production, 202, 631-641.
- [77] EUROPEAN COMMISSION EUROSTAT. (2010) *Using official statistics to calculate greenhouse gas emissions: A statistical guide*. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5724229/KS-31-09-272-EN.PDF/16497950-fa38-465d-a1fc-fe6b50ac092c?version=1.0>
- [78] LIIMATAINEN, H., STENHOLM, P., TAPIO, P., & MCKINNON, A. (2012) *Energy efficiency practices among road freight hauliers*. Energy policy, 50, 833-842.
- [79] LIGTERINK, N. E., TAVASSZY, L. A., & DE LANGE, R. (2012) *A velocity and payload dependent emission model for heavy-duty road freight transportation*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 17(6), 487-491.
- [80] MELCHIORI, L., NASINI, G., MONTAGNA, J. M., & CORSANO, G. (2022) *A mathematical modeling for simultaneous routing and scheduling of logging trucks in the forest supply chain*. Forest Policy and Economics, 136, 102693.
- [81] LARENAS-BARRA, S., MÉNDEZ-DEDES, L., VALDÉS-GONZÁLEZ, H., REYES-BOZO, L., & SANDOVAL-YÁÑEZ, C. (2022) *Electromobility in Forest Transport. Is It Feasible? Perceptions Regarding Implementation in the Chilean Industry*. Revista científica, (45), 378-389.
- [82] SUREEYATANAPAS, P., POOPHIUKHOK, P., & PATHUMNAKUL, S. (2018) *Green initiatives for logistics service providers: An investigation of antecedent factors and the contributions to corporate goals*. Journal of cleaner production, 191, 1-14.
- [83] SEROKA-STOLKA, O. (2014) *The development of green logistics for implementation sustainable development strategy in companies*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 151, 302-309.
- [84] ZHIHUA ZHANG, JIANPING LI (2020) *Big Data Mining for Climate Change*. Chapter 10 - Big-data-driven low-carbon management, 287-299.
- [85] EPSTEIN, R., KARLSSON, J., RÖNNQVIST, M., WEINTRAUB, A., ROMERO, C., BJØRNDAL, T., & MIRANDA, J. (2007) *Handbook of operations research in natural resources*. 391–403.

- [86] MATIJEVIĆ, L. (2021) *Metaheuristic Approaches for the Green Vehicle Routing Problem*. Yugoslav Journal of Operations Research, 33(2), 153-198.
- [87] INTEREMPRESAS. *Grúas forestales y para reciclaje*.
<https://www.interempresas.net/Agricola/FeriaVirtual/Producto-Gruas-forestales-y-para-reciclaje-Tajfun-L120Z-163243.html>.
 Visitado: Mayo 2023.
- [88] INTENDENCIA DE MONTEVIDEO. *Principales Contaminantes del Aire*, (2020).
<https://montevideo.gub.uy/areas-tematicas/ambiente/calidad-del-aire/principales-contaminantes-del-aire>.
 Visitado: Agosto 2023.
- [89] ANNA PÉREZ. *Van y Tir: Dos herramientas para la viabilidad y rentabilidad de una inversión*, (2021). <https://bit.ly/3YSOd9L>.
 Visitado: Agosto 2023.
- [90] ESPINOSA, M., PACHECO, J., ALVAREZ, M., FLUES, V., PALMA, A. (2022) *Evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de transporte dominicano*. https://changing-transport.org/wp-content/uploads/2020_Evaluacion-de-GEI-en-el-Transporte-en-RepDom.pdf.
 Visitado: Agosto 2023.
- [91] MCKINNON, A., BROWNE, M., WHITEING, A., PIECYK, M. (EDS.) (2015) *Green logistics: Improving the environmental sustainability of logistics*. Kogan Page Publishers
- [92] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINERÍA. (2023) *Emisiones de CO2 por sector*. <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/miem-emisiones-de-co2-por-sector/resource/2db4588c-e84c-4a58-9a0d-81f54e431d48>.
 Visitado: Octubre 2023.

9. Anexos

9.1. Anexo I - Modelado matemático

Dadas las pruebas realizadas para validar el modelo, se pueden encontrar adjuntas las instancias y resultados obtenidos para cada uno en las siguientes carpetas compartidas:

- [Modelado matemático](#)
- [Casos de prueba](#)
- [Escenarios de experimentación numérica](#)

9.2. Anexo II - Matrices y parámetros

En esta sección se presentan las matrices de datos utilizadas.

Punto de cosecha	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
1	7104	7104	7104	7104	7104	7104
2	0	0	0	0	1100	1100
3	1054	1054	1054	1054	1054	1054
4	320	320	320	320	320	320
5	412	412	412	412	412	412
6	733	733	733	733	733	733
7	8296	8296	8296	8296	8296	8296
8	1604	1604	1604	1604	1604	1604
9	8250	11000	11000	11000	4950	0
10	2337	2337	2337	2337	2337	2337
11	687	687	687	687	687	687
12	138	138	138	138	138	138
13	3758	3758	3758	3758	3758	3758
14	1741	1741	1741	1741	1741	1741
15	1375	1375	1375	1375	1375	1375
16	0	0	0	0	0	0
17	2750	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	825	825	825	825	825	825
20	0	0	0	0	0	0

Cuadro 41: Oferta (en toneladas) de los puntos de cosecha 1 al 20 desde el período 1 al 6.

Punto de cosecha	Período 7	Período 8	Período 9	Período 10	Período 11	Período 12
1	7104	7104	7104	7104	7104	7104
2	0	0	0	0	0	0
3	1054	1054	1054	1054	1054	1054
4	320	320	320	320	320	320
5	412	412	412	412	412	412
6	733	733	733	733	733	733
7	8296	8296	8296	8296	8296	8296
8	1604	1604	1604	1604	1604	1604
9	0	0	0	0	0	0
10	2337	2337	2337	2337	2337	2337
11	687	687	687	687	687	687
12	138	138	138	138	138	138
13	3758	3758	3758	3758	3758	3758
14	1741	1741	1741	1741	1741	1741
15	1375	1375	1375	1375	1375	1375
16	0	0	0	0	0	1650
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	7700	9350	0	0
19	825	825	825	825	825	825
20	14300	13750	0	0	0	0

Cuadro 42: Oferta (en toneladas) de los puntos de cosecha 1 al 20 desde el período 7 al 12.

Punto de cosecha	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
21	321	321	321	321	321	321
22	0	0	0	0	3850	2750
23	0	0	0	0	8250	0
24	687	687	687	687	687	687
25	0	0	0	0	0	0
26	5408	5408	5408	5408	5408	5408
27	0	0	0	0	0	9350
28	595	595	595	595	595	595
29	321	321	321	321	321	321
30	2016	2016	2016	2016	2016	2016
31	0	2200	0	0	0	0
32	1283	1283	1283	1283	1283	1283
33	916	916	916	916	916	916
34	6783	6783	6783	6783	6783	6783
35	1833	1833	1833	1833	1833	1833
36	1512	1512	1512	1512	1512	1512
37	138	138	138	138	138	138
38	2108	2108	2108	2108	2108	2108
39	1100	1100	1100	1100	1100	1100
40	7058	7058	7058	7058	7058	7058

Cuadro 43: Oferta (en toneladas) de los puntos de cosecha 21 al 40 desde el período 1 al 6.

Punto de cosecha	Período 7	Período 8	Período 9	Período 10	Período 11	Período 12
21	321	321	321	321	321	321
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	687	687	687	687	687	687
25	0	0	0	0	0	2750
26	5408	5408	5408	5408	5408	5408
27	4950	0	0	0	0	0
28	595	595	595	595	595	595
29	321	321	321	321	321	321
30	2016	2016	2016	2016	2016	2016
31	0	0	0	0	0	0
32	1283	1283	1283	1283	1283	1283
33	916	916	916	916	916	916
34	6783	6783	6783	6783	6783	6783
35	1833	1833	1833	1833	1833	1833
36	1512	1512	1512	1512	1512	1512
37	138	138	138	138	138	138
38	2108	2108	2108	2108	2108	2108
39	1100	1100	1100	1100	1100	1100
40	7058	7058	7058	7058	7058	7058

Cuadro 44: Oferta (en toneladas) de los puntos de cosecha 21 al 40 desde el período 7 al 12.

Período	Planta A	Planta B
1	32000	36000
2	34000	37000
3	33000	36000
4	33000	36000
5	36000	39000
6	34000	37000
7	37000	40000
8	34000	37000
9	31000	34000
10	32000	35000
11	28000	30000
12	30000	32000

Cuadro 45: Demanda de las plantas A y B expresada en toneladas.

Punto de cosecha	Planta A	Planta B
1	323	366
2	170	76
3	166	63
4	179	69
5	195	75
6	173	117
7	427	411
8	429	413
9	422	406
10	436	420
11	325	367
12	151	88
13	332	375
14	345	387
15	372	395
16	424	408
17	170	314
18	169	313
19	55	127
20	160	304

Cuadro 46: Distancia en kilómetros entre los puntos de cosecha 1 al 20 y los destinos A y B para camiones convencionales.

Punto de cosecha	Planta A	Planta B
21	203	347
22	53	133
23	45	148
24	155	299
25	171	315
26	80	136
27	162	306
28	195	339
29	170	315
30	172	316
31	194	338
32	152	297
33	68	139
34	170	314
35	158	303
36	149	293
37	178	322
38	185	329
39	185	329
40	187	331

Cuadro 47: Distancia en kilómetros entre los puntos de cosecha 21 al 40 y los destinos A y B para camiones convencionales.

Punto de cosecha	Planta A	Planta B
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	-	-
7	-	-
8	-	-
9	-	-
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	-	-
14	-	-
15	-	-
16	-	-
17	170	-
18	169	-
19	55	-
20	160	-

Cuadro 48: Distancia en kilómetros entre los puntos de cosecha 1 al 20 y los destinos A y B para bitrén y tritrén.

Punto de cosecha	Planta A	Planta B
21	203	-
22	53	-
23	45	-
24	155	-
25	171	-
26	80	-
27	162	-
28	195	-
29	170	-
30	172	-
31	194	-
32	152	-
33	68	-
34	170	-
35	158	-
36	149	-
37	178	-
38	185	-
39	185	-
40	187	-

Cuadro 49: Distancia en kilómetros entre los puntos de cosecha 21 al 40 y los destinos A y B para bitrén y tritrén.

Punto de cosecha	Distancia
1	250
2	94
3	104
4	116
5	132
6	90
7	296
8	270
9	290
10	305
11	252
12	96
13	259
14	271
15	280
16	293
17	243
18	204
19	108
20	205

Cuadro 50: Distancia en kilómetros entre el depósito y los puntos de cosecha 1 al 20 para camiones convencionales.

Punto de cosecha	Distancia
21	277
22	116
23	131
24	192
25	209
26	87
27	215
28	268
29	208
30	210
31	268
32	190
33	90
34	243
35	196
36	187
37	252
38	259
39	259
40	260

Cuadro 51: Distancia en kilómetros entre el depósito y los puntos de cosecha 21 al 40 para camiones convencionales.

Punto de cosecha	Distancia
1	-
2	-
3	-
4	-
5	-
6	-
7	-
8	-
9	
10	-
11	-
12	-
13	-
14	-
15	-
16	-
17	243
18	204
19	108
20	205

Cuadro 52: Distancia en kilómetros entre el depósito y los puntos de cosecha 1 al 20 para bitrén y tritrén.

Punto de cosecha	Distancia
21	277
22	116
23	131
24	192
25	209
26	87
27	215
28	268
29	208
30	210
31	268
32	190
33	90
34	243
35	196
36	187
37	252
38	259
39	259
40	260

Cuadro 53: Distancia en kilómetros entre el depósito y los puntos de cosecha 21 al 40 para bitrén y tritrén.

Planta A	Planta B
165	159

Cuadro 54: Distancia en kilómetros entre las plantas y el depósito para camiones convencionales.

Planta A	Planta B
165	-

Cuadro 55: Distancia en kilómetros entre las plantas y el depósito para bitrén y tritrén.

Punto de cosecha	Planta A	Planta B
1	23	20
2	44	100
3	45	116
4	41	110
5	38	100
6	43	64
7	17	18
8	17	18
9	17	18
10	17	17
11	23	20
12	50	85
13	22	20
14	21	17
15	20	18
16	17	18
17	44	23
18	44	23
19	136	59
20	46	25

Cuadro 56: Cantidad máxima de viajes por período desde los puntos de cosecha 1 al 20 hasta las plantas A y B para camiones convencionales.

Punto de cosecha	Planta A	Planta B
21	36	21
22	141	56
23	165	50
24	48	25
25	43	23
26	93	55
27	81	153
28	36	22
29	44	23
30	43	23
31	36	22
32	46	25
33	110	53
34	44	23
35	46	25
36	50	25
37	42	23
38	40	22
39	40	22
40	40	22

Cuadro 57: Cantidad máxima de viajes por período desde los puntos de cosecha 21 al 40 hasta las plantas A y B para camiones convencionales.

Punto de cosecha	Planta A	Planta B
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	-	-
7	-	-
8	-	-
9	-	-
10	-	-
11	-	-
12	-	-
13	-	-
14	-	-
15	-	-
16	-	-
17	44	-
18	44	-
19	136	-
20	46	-

Cuadro 58: Cantidad máxima de viajes por período desde los puntos de cosecha 1 al 20 hasta las plantas A y B para bitrén y tritrén.

Punto de cosecha	Planta A	Planta B
21	36	-
22	141	-
23	165	-
24	48	-
25	43	-
26	93	-
27	81	-
28	36	-
29	44	-
30	43	-
31	36	-
32	46	-
33	110	-
34	44	-
35	46	-
36	50	-
37	42	-
38	40	-
39	40	-
40	40	-

Cuadro 59: Cantidad máxima de viajes por período desde los puntos de cosecha 21 al 40 hasta las plantas A y B para bitrén y tritrén.

9.3. Anexo III - Análisis económico

Todos los datos utilizados para llevar a cabo el análisis económico se presentan en el archivo adjunto a continuación:

- [Planillas de cálculo](#)