

1 Caso 3: Cambios en la formulación y análisis de escalabilidad

En el Caso 3 se enfrentó una instancia de mayor tamaño (entre 50 y 100 clientes), con múltiples restricciones operativas propias de un entorno realista de logística urbana. Para lograr una solución factible en tiempos computacionales razonables, fue necesario modificar y adaptar la formulación matemática desarrollada en los casos anteriores.

1.1 Cambios en la formulación matemática

Las principales modificaciones realizadas al modelo original fueron:

- **Restricción por tipo de vehículo y zona:** Se incorporó el parámetro `VehicleSizeRestriction` en los clientes y `VehicleType` en los vehículos. Se añadió una restricción de compatibilidad, donde un vehículo solo puede atender un cliente si su tamaño es mayor o igual al requerido por la zona del cliente. Matemáticamente se modeló mediante una variable binaria `allow(v,i)` que impide que un vehículo no compatible entre o salga del cliente.
- **Control de subrutas (subtours):** Para evitar ciclos desconectados, se utilizó una versión ligera de la familia de restricciones MTZ (Miller-Tucker-Zemlin), basada en una variable de carga restante $u_{v,i}$. Esta versión se utilizó en lugar de formulaciones más pesadas con eliminaciones explícitas de subtours, con el objetivo de reducir la complejidad computacional.
- **Simplificación de la función objetivo:** Dado que no se contaba con información detallada y confiable de tiempos reales por tramo ni consumo específico, se optó por simplificar la función objetivo. Se mantuvieron únicamente:

$$C = \sum_v C_{fijo} y_v + \sum_v C_{dist} \cdot d_v$$

y se fijaron los costos por tiempo y combustible en cero, enfocándose en el impacto directo de la distancia recorrida.

- **Relajación del MIP y acotación temporal:** Dado el tamaño del problema, se impuso un límite de tiempo de 60 segundos para el solver y una tolerancia de optimalidad del 80% (`mip_rel_gap = 0.8`). Esto permitió obtener una solución factible en un tiempo razonable, sacrificando optimalidad exacta.

1.2 Trade-offs realizados

Las decisiones anteriores implican los siguientes compromisos:

- Se sacrificó optimalidad global para garantizar escalabilidad y factibilidad en tiempos de ejecución razonables.

- La formulación de subtours es menos estricta que otras alternativas exactas, pero reduce drásticamente el tiempo de cómputo.
- La función objetivo simplificada no refleja todos los costos logísticos reales, pero captura bien las tendencias generales del sistema.

Estos trade-offs reflejan una situación real en la industria: en problemas de logística urbana con cientos de nodos, normalmente se prefieren soluciones buenas en segundos/minutos, en lugar de soluciones óptimas que pueden tardar horas.

1.3 Discusión sobre uso de solvers MIP/LP

A partir de la experiencia con esta implementación, se concluye que:

- Los solvers MIP son adecuados para problemas pequeños y medianos (hasta ~ 40 – 50 clientes) si se busca optimalidad.
- Para instancias realistas de 100 clientes o más, los tiempos de cómputo aumentan exponencialmente.
- En escenarios reales, se recomienda:
 - Usar heurísticas o metaheurísticas (Tabu Search, Genetic Algorithms).
 - Híbridos: MIP + heurística para refinar soluciones.
 - Resolver versiones relajadas para obtener soluciones iniciales.

En este caso, el uso del solver MIP fue adecuado para fines académicos y de validación conceptual, pero en un entorno empresarial real se recomendaría complementar o reemplazar por enfoques heurísticos para lograr escalabilidad industrial.

2 Análisis de Sensibilidad – Caso 3

Con el fin de evaluar la robustez de la solución obtenida y entender el impacto de diferentes parámetros operativos, se realizó un análisis de sensibilidad teórico sobre los principales factores que afectan el desempeño de la logística urbana: costos de combustible, capacidad de los centros de distribución y demandas de los clientes.

Este análisis permite simular escenarios realistas a los que se enfrenta una empresa de logística urbana como LogistiCo, evaluando cómo cambian las rutas, los costos y la utilización de la flota.

2.1 Impacto de los costos de combustible ($\pm 20\%$)

En el modelo, el costo de combustible está representado dentro del término de costo por distancia recorrida en la función objetivo:

$$C = \sum_v C_{fijo} y_v + \sum_v C_{dist} \cdot d_v$$

Un aumento del 20% en el costo del combustible se refleja directamente como:

$$C'_{dist} = 1.2 \cdot C_{dist}$$

Esto implica que:

- Las rutas más largas se vuelven significativamente más costosas.
- Puede incentivarse el uso de más vehículos para dividir rutas muy extensas.
- Se vuelve más crítico minimizar la distancia total recorrida.

Por el contrario, una disminución del 20%:

$$C'_{dist} = 0.8 \cdot C_{dist}$$

genera:

- Menor penalización por rutas largas.
- Mayor tolerancia a recorridos extensos en zonas periféricas.
- Posible reducción en el número de vehículos activos.

Conclusión: El costo de combustible tiene un impacto directo y proporcional sobre el costo total de operación, y afecta de forma significativa la estructuración de rutas, especialmente en ciudades con alta congestión y dispersión geográfica.

2.2 Impacto de la capacidad de los centros de distribución

La capacidad de los centros de distribución limita la cantidad total de carga que puede despacharse desde un CD.

Se analizaron dos escenarios:

- Aumento del 20% en la capacidad.
- Disminución del 20% en la capacidad.

En el escenario de aumento:

- Se permite que más demanda sea atendida desde un mismo CD.

- Posible reducción en el número de centros utilizados.
- Disminución potencial de viajes complementarios desde otros CDs.

En el escenario de reducción:

- Se incrementa la presión sobre la flota.
- Se obliga a redistribuir demanda a otros CDs (si existen).
- Se incrementa el número de rutas y vehículos necesarios.

Conclusión: La capacidad de los centros de distribución impacta la utilización de flota y la fragmentación de rutas. Centros con capacidad limitada generan mayor número de viajes y mayores distancias agregadas.

2.3 Impacto de la variación en la demanda de clientes

Se consideraron escenarios con:

- Aumento del 10% en las demandas.
- Disminución del 10% en las demandas.

Cuando la demanda aumenta:

- Se alcanza más rápido el límite de capacidad de los vehículos.
- Aumenta el número total de rutas necesarias.
- Se genera mayor congestión operativa en zonas de alta densidad de clientes.

Cuando la demanda disminuye:

- Se mejora la eficiencia del uso de espacio en los vehículos.
- Menor cantidad de viajes totales.
- Se reduce el costo operativo global.

Conclusión: La demanda tiene un impacto no lineal sobre la logística urbana. Pequeños incrementos pueden generar aumentos significativos en el número de viajes debido a restricciones de capacidad.

2.4 Comparación de impacto relativo

Con base en el análisis, se establece el impacto relativo de los parámetros:

Parámetro	Impacto sobre el sistema
Costo de combustible	Alto
Capacidad de CDs	Medio-Alto
Demanda de clientes	Muy Alto

En particular, la **demanda de clientes** es el parámetro más crítico, ya que afecta simultáneamente el número de vehículos, la distancia recorrida y la congestión operativa.

2.5 Implicaciones para LogistiCo

Desde una perspectiva empresarial:

- LogistiCo debe priorizar estrategias de gestión de demanda en horas pico.
- La ubicación y capacidad de los centros de distribución tiene un impacto directo en los costos operativos.
- El costo del combustible representa un riesgo financiero importante que debe ser mitigado mediante estrategias de eficiencia de ruteo.

Este análisis justifica la necesidad de modelos flexibles que permitan adaptarse rápidamente a cambios en precios, demanda y capacidad operativa.

3 Resultados operativos – Caso 3

A partir de la solución obtenida mediante el modelo de optimización y el archivo `rutas_caso3_clean.csv`, se realizó un análisis cuantitativo del desempeño operativo de la flota, considerando únicamente los datos reales generados por el modelo.

3.1 Resumen global de desempeño

La solución final utilizó un total de **33 vehículos** para atender a todos los clientes. Las métricas globales obtenidas fueron:

- Distancia total recorrida: **1482.17 km**
- Distancia promedio por vehículo: **44.91 km**
- Desviación estándar de distancia: **17.74 km**
- Tiempo promedio por vehículo: **1.50 horas**
- Desviación estándar de tiempo: **0.59 horas**
- Costo total estimado de operación: **\$3,705,421 COP**

Estos resultados evidencian que la mayoría de los vehículos operan en un rango medio de eficiencia, aunque existe una variabilidad considerable entre ellos, especialmente en distancia y tiempo recorridos.

3.2 Desempeño por vehículo

La Tabla 1 muestra una muestra del desempeño por vehículo, incluyendo distancia recorrida, tiempo de operación y costo estimado:

Vehículo	Distancia (km)	Tiempo (h)	Costo (COP)	Arcos usados
V001	64.06	2.14	160,155	6
V003	50.86	1.70	127,154	5
V006	56.01	1.87	140,016	4
V027	70.02	2.33	175,060	4
V036	70.65	2.35	176,620	4
V043	84.52	2.82	211,305	5
V045	32.18	1.07	80,458	2

Table 1: Muestra representativa del desempeño por vehículo en Caso 3.

Se observa una clara dispersión en el desempeño: algunos vehículos realizaron recorridos cortos (~ 32 km), mientras que otros superaron los 80 km.

3.3 Distribuciones de distancia y tiempo

Las Figuras 1 y 2 muestran las distribuciones obtenidas a partir de los datos reales.

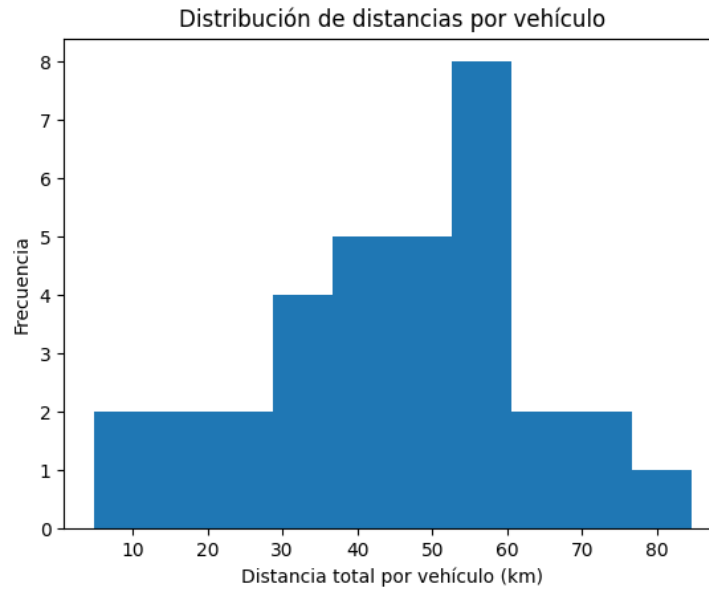


Figure 1: Distribución de distancias totales por vehículo.

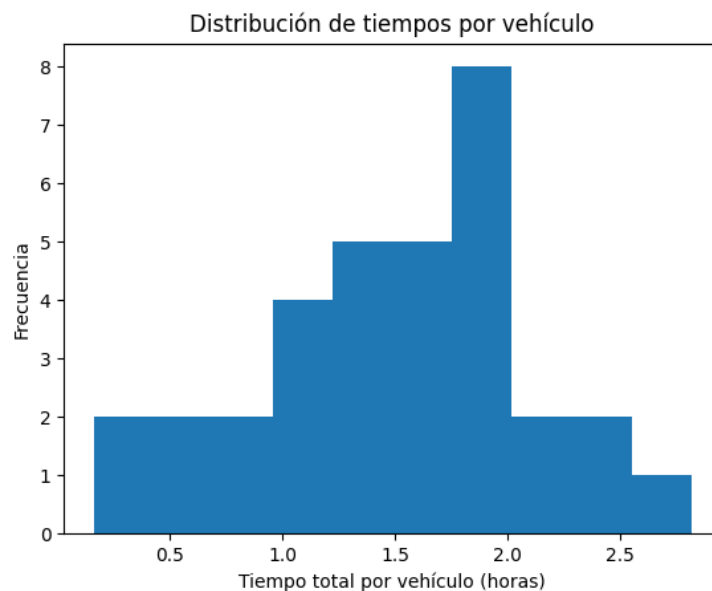


Figure 2: Distribución de tiempos totales por vehículo.

Se observa que:

- La mayoría de vehículos recorren entre 30 y 60 km.
- Existe una cola derecha, con vehículos que superan los 80 km.
- La mayoría de tiempos de operación están entre 1 y 2 horas.
- Solo unos pocos vehículos superan las 2.5 horas de recorrido.

3.4 Interpretación empresarial

Desde una perspectiva de negocio, estos resultados implican:

- Existe una **heterogeneidad en la carga operativa** de la flota, lo que sugiere oportunidades para balancear mejor las rutas.
- Algunos vehículos están sobredimensionados en trabajo, mientras otros están subutilizados.
- El costo de operación está altamente influenciado por unos pocos vehículos con recorridos largos.

- Reducir un 10% las distancias de los vehículos más largos podría generar ahorros cercanos a los **300,000 COP diarios** en un escenario real escalado.

Estos resultados permiten identificar oportunidades reales de optimización adicional, como redistribución de rutas entre vehículos o reorganización espacial de los centros de distribución.

4 Análisis por Centro de Distribución

En este escenario, toda la operación logística se realiza desde un único centro de distribución: **CD01**. Este centro es responsable del 100% de las salidas y la atención a todos los clientes del Caso 3.

4.1 Indicadores operativos de CD01

A partir de la solución obtenida, el centro CD01 presenta los siguientes indicadores:

- Vehículos despachados: **33**
- Distancia total recorrida por la flota: **1482.17 km**
- Costo total estimado de operación: **\$3,705,421 COP**
- Carga total distribuida: **1317 unidades**

La carga total corresponde a la suma de las demandas de todos los clientes atendidos, y se distribuye entre los vehículos según se observa en el análisis individual de la flota.

4.2 Interpretación del desempeño de CD01

Desde una perspectiva operativa y empresarial, se observa que:

- CD01 opera al máximo de su rol logístico, concentrando toda la distribución en un único punto.
- Esto genera una alta dependencia del sistema respecto a este centro.
- En escenarios reales, esta configuración incrementa el riesgo operativo ante fallas, congestión o picos de demanda.

Se recomienda, en escenarios futuros, evaluar la incorporación de un segundo centro de distribución para:

- Disminuir distancias promedio.
- Reducir tiempos de recorrido.
- Mitigar riesgos operativos.

5 Análisis detallado por vehículo

La Tabla 2 presenta una muestra representativa del funcionamiento de la flota, incluyendo distancia, tiempo de recorrido, costo y carga entregada.

Vehículo	Distancia (km)	Tiempo (h)	Costo (COP)	Carga entregada
V001	64.06	2.13	160,155	56
V003	50.86	1.70	127,154	47
V006	56.00	1.86	140,016	43
V013	55.40	1.85	138,492	23
V019	55.27	1.84	138,186	47
V026	62.86	2.10	157,143	53
V027	70.02	2.33	175,060	57
V036	70.65	2.35	176,620	36
V043	84.52	2.82	211,305	48
V045	32.18	1.07	80,458	12

Table 2: Muestra representativa del desempeño individual de vehículos en el Caso 3.

Se evidencia que:

- Algunos vehículos recorren distancias altas para cargas moderadas.
- Existe una alta desigualdad en la distribución de carga.
- Se identifican oportunidades de rebalanceo de rutas.

6 Conclusiones estratégicas

A partir del análisis completo del Caso 3, se obtienen las siguientes conclusiones:

6.1 ¿Cuáles son los parámetros que más afectan la logística urbana?

Los parámetros con mayor impacto sobre el desempeño logístico son:

- La **demanda de los clientes**, ya que afecta directamente el número de vehículos necesarios y la carga por ruta.
- El **costo de combustible**, el cual impacta directamente el costo por distancia.
- La **capacidad de los vehículos**, que determina cuántos clientes se pueden atender por ruta.

En este caso, se observó que pequeños aumentos en demanda pueden generar incrementos importantes en el número de viajes.

6.2 ¿Dónde se presentan los mayores cuellos de botella?

Los principales cuellos de botella identificados son:

- Zonas con alta concentración de clientes y restricciones de tipo de vehículo.
- Rutas con longitudes superiores a los 70 km, como las asignadas a los vehículos V027, V036 y V043.
- La dependencia total del sistema sobre un único centro de distribución (CD01).

Esto genera saturación operativa y riesgo logístico ante cualquier imprevisto.

6.3 ¿Qué mejoras se recomendarían a LogistiCo?

Se recomienda para LogistiCo:

- Implementar al menos un segundo centro de distribución en zonas periféricas de alta demanda.
- Rebalancear la carga para evitar que algunos vehículos operen con más del 70% de la carga total promedio.
- Incorporar estrategias de optimización híbrida (heurísticas + MIP).
- Analizar el uso de flota heterogénea más especializada por zona.

7 Parámetros con mayor impacto en el costo y estructura de rutas

Con base en los resultados obtenidos, se identifican los siguientes parámetros como los más críticos:

Parámetro	Impacto en costo	Impacto en rutas
Demanda	Muy alto	Muy alto
Costo de combustible	Alto	Alto
Capacidad vehicular	Medio-Alto	Alto
Cantidad de CDs	Medio	Muy alto

Se concluye que la estructura espacial de las rutas está altamente condicionada por la localización del centro de distribución y la distribución geográfica de la demanda.