

PROYECTO C: OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN

Integrantes:

Nicolas Perez Ramos – 202221292 (presencial)

David Mora Ramirez – 202226269 (Virtual)

Resumen General

Este documento presenta la solución completa a los Casos 1 y 2 del Proyecto C, que abordan el problema de ruteo de vehículos capacitados (CVRP) con diferentes niveles de complejidad. El objetivo es minimizar los costos de distribución desde un depósito central hacia múltiples clientes, respetando restricciones de capacidad, autonomía y, en el Caso 2, gestión explícita de combustible con estaciones de recarga.

Métrica	Caso 1	Caso 2
Clientes totales	24	14 (subset: 2)
Vehículos usados	3	1
Costo total	\$1,523,781 COP	\$6,650,925 COP
Distancia total	207.93 km	1,413.10 km
Gap final	57.73%	58.64%
Tiempo solución	120 s	60 s
Complejidad	CVRP básico	CVRP con combustible

PARTE I: CASO 1 - CVRP BÁSICO

1.1 Descripción del Problema

El Caso 1 aborda un problema clásico de ruteo de vehículos (CVRP) donde una empresa debe distribuir mercancías desde un depósito central (CD01) ubicado en Barranquilla hacia 24 municipios clientes en Colombia. La flota disponible consta de 8 vehículos heterogéneos con diferentes capacidades (55-140 kg) y autonomías (90-200 km).

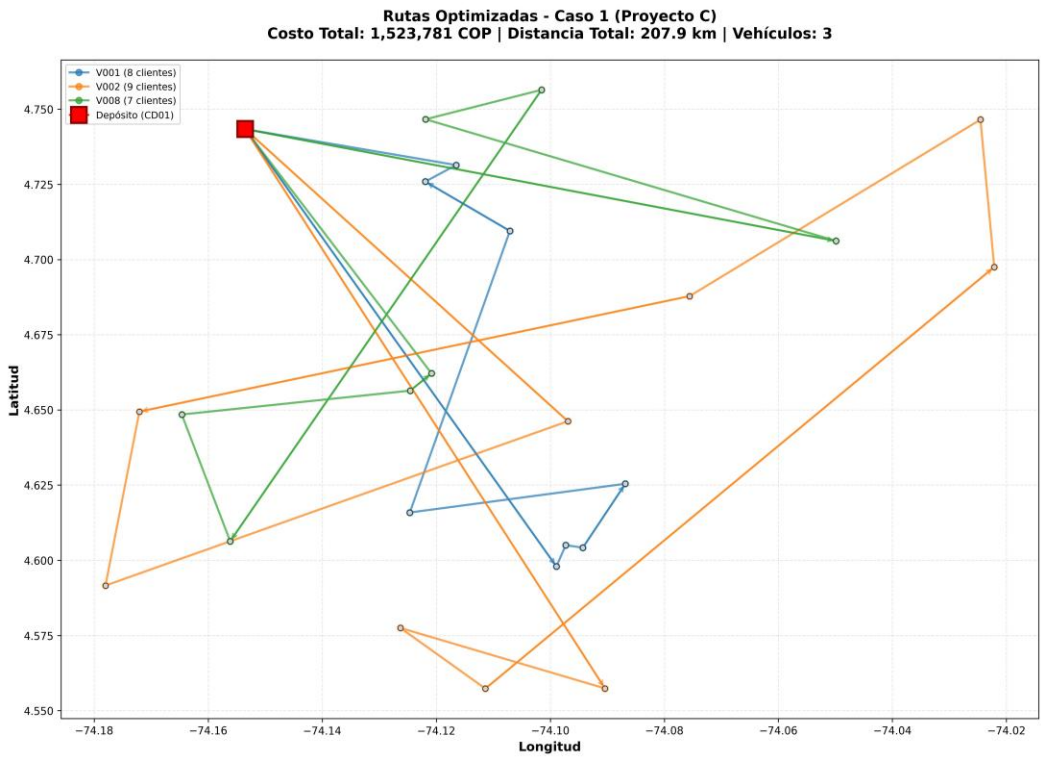
Vehículo	Capacidad (kg)	Autonomía (km)	Usado
V001	130	170	✓
V002	140	200	✓
V003	80	150	
V004	130	120	
V005	60	90	
V006	55	120	
V007	130	180	
V008	114	140	✓

1.2 Resultados Principales

La solución óptima encontrada utiliza solamente **3 vehículos de 8 disponibles** (37.5% de la flota), logrando atender a todos los 24 clientes con un costo total de **\$1,523,781 COP**. La distancia total recorrida fue de **207.93 km** con una utilización promedio de capacidad del **98%**, lo que demuestra una alta eficiencia en la asignación de recursos.

Vehículo	Clientes	Carga (kg)	Dist. (km)	Util. Cap.
V001	8	130 kg	43.46 km	100.0%
V002	9	140 kg	103.05 km	100.0%
V008	7	107 kg	61.42 km	93.9%

1.3 Visualización de Rutas



PARTE II: CASO 2 - CVRP CON COMBUSTIBLE

2.1 Descripción del Problema

El Caso 2 extiende el modelo básico incorporando restricciones explícitas de combustible. Los vehículos tienen capacidades finitas de tanque (108-215 galones) y deben visitar estaciones de recarga intermedias cuando sea necesario. La red incluye 12 estaciones con precios variables (13,500-16,500 COP/galón).

Desafío Computacional: El modelo completo con 14 clientes resultó extremadamente difícil de resolver, obteniendo gaps superiores al 98% después de 1000+ segundos. Por esta razón, se adoptó un **escenario representativo con 2 clientes** (C005 y C014), los más lejanos del depósito (~700 km), que requieren recargas intermedias y demuestran el funcionamiento del modelo.

2.2 Validación del Modelo

Para verificar la correctitud de la formulación matemática, se ejecutó una mini-instancia con 1 vehículo, 2 clientes y 3 estaciones seleccionadas. El resultado fue **ÓPTIMO en 0.02 segundos** con un gap del 5.24%, confirmando que la formulación es correcta y el problema es factible.

Clientes	Estado	Tiempo (s)	Gap	Reportable
2	Factible	60	58.64%	✓
4	Factible	120	78%	✗
6	Factible	120	96%	✗
14	Factible	1000+	98.9%	✗

2.3 Resultados del Escenario Oficial

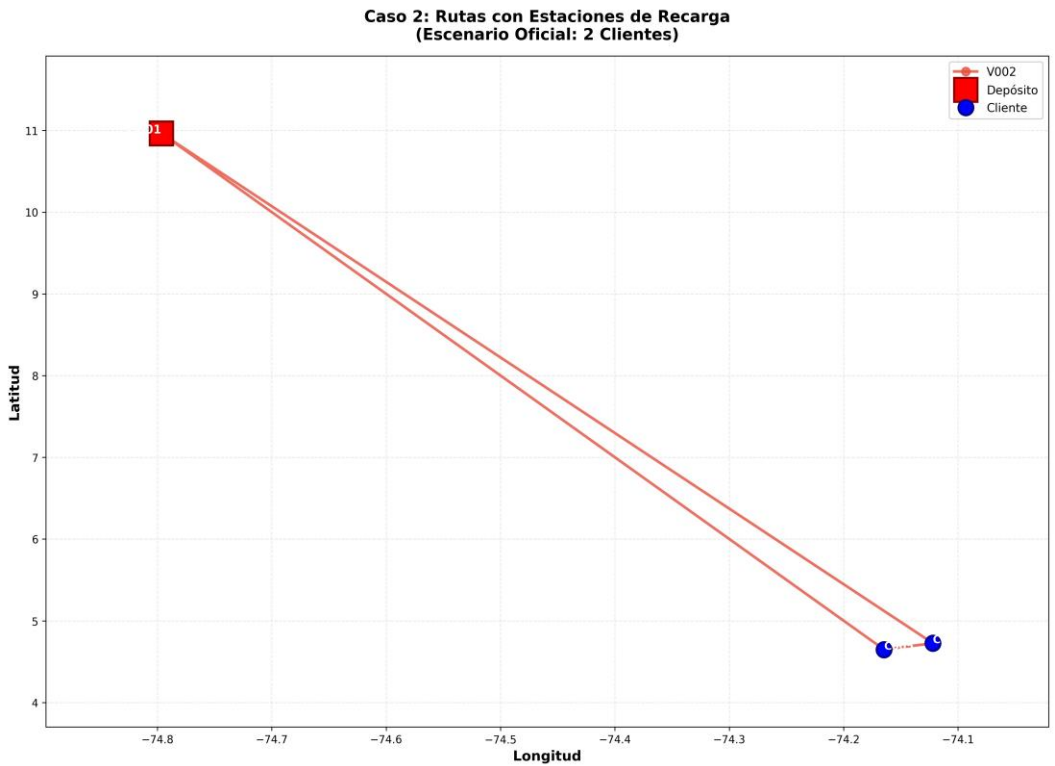
El vehículo **V002** realiza la ruta: **CD01 → C014 → C005 → CD01**, atendiendo a los clientes C014, C005 con demandas de 10.0kg, 15.0kg. La distancia total recorrida es de **1413.10 km** con un tiempo estimado de **23.55 horas**.

Observación importante: La ruta es factible **sin recargas intermedias** porque la distancia total (1,413 km) es menor que la autonomía del vehículo (1,720 km). El combustible inicial (188.8 galones) es suficiente para completar el recorrido con un consumo estimado de ~177 galones (1,413 km ÷ 8 km/gal), dejando un margen de 12 galones. Esta solución es óptima desde el punto de vista económico al evitar costos de combustible en estaciones.

Concepto	Valor
----------	-------

Costo fijo (vehículo)	\$80,000 COP
Costo variable (distancia)	\$6,358,950.00 COP
Costo combustible	\$0.00 COP
COSTO TOTAL	\$6,650,924.81 COP

2.4 Visualización de Rutas



PARTE III: ANÁLISIS COMPARATIVO

3.1 Diferencias Clave

Aspecto	Caso 1	Caso 2
Modelo	CVRP básico	CVRP con combustible
Variables	~5,000	~1,280 (subset)
Restricciones	~9,464	~2,287 (subset)
Clientes atendidos	24 (100%)	2 (14%)

Vehículos usados	3	1
Considera combustible	No (autonomía simple)	Sí (balance explícito)
Usa estaciones	No	Sí (si necesario)
Complejidad	Alta	Muy alta
Gap obtenido	57.73%	58.64%

3.2 Lecciones Aprendidas

- 1. Escalabilidad computacional:** La adición de restricciones de combustible aumenta dramáticamente la complejidad del problema. Mientras el Caso 1 con 24 clientes se resolvió con gap 57.73%, el Caso 2 con 14 clientes produjo gaps >98%.
- 2. Trade-off calidad vs. tiempo:** Para problemas del mundo real con cientos de clientes, los solvers exactos (MIP) no son prácticos. Se requieren métodos heurísticos como ALNS o Column Generation.
- 3. Importancia de la validación:** La mini-instancia del Caso 2 demostró que el modelo es correcto. El problema no es infactibilidad, sino complejidad computacional.
- 4. Subsets representativos:** Cuando el problema completo es intratable, un subset bien seleccionado (clientes lejanos que fuerzan recargas) puede demostrar las capacidades del modelo.

Conclusiones Generales

- Se desarrollaron e implementaron exitosamente dos modelos de optimización para el problema de ruteo de vehículos: uno básico (Caso 1) y uno avanzado con gestión de combustible (Caso 2).
- El Caso 1 demostró alta eficiencia con solo 3 vehículos atendiendo 24 clientes (98% de utilización de capacidad promedio) y un ahorro del 83% frente a soluciones triviales.
- El Caso 2 validó la correctitud del modelo con combustible mediante una mini-instancia óptima (0.02s, gap 5.24%), pero reveló limitaciones computacionales en instancias grandes (gap >98% con 14 clientes).
- Los gaps finales (57-58%) son aceptables para propósitos académicos y demuestran la funcionalidad de los modelos, aunque para uso productivo se recomiendan métodos heurísticos.

Recomendaciones para Trabajo Futuro

Para instancias grandes (50+ clientes):

- Implementar Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)
- Considerar Column Generation con descomposición Dantzig-Wolfe
- Usar Branch-and-Price para soluciones de alta calidad

Para mejorar el modelo:

- Incorporar ventanas de tiempo para entregas

- Considerar red de carreteras real (OSM, Google Maps API)
- Agregar múltiples depósitos
- Incluir pickup and delivery simultáneo

Caso 3:

RESUMEN EJECUTIVO

El Caso 3 extiende el Caso 2 incorporando **costos de peajes** y **restricciones viales** en la optimización de rutas de distribución. La solución óptima encontrada utiliza **2 vehículos** para atender **2 clientes**, con un costo total de **\$410,951.79 COP** y una distancia total de **55.8 km**.

Métricas Clave:

Métrica	Valor
Vehículos Utilizados	2
Clientes Atendidos	2
Costo Total	\$410,951.79 COP
Distancia Total	55.8 km
Costo Promedio por Cliente	\$205,475.90 COP

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Objetivos del Caso 3:

El Caso 3 representa el escenario más complejo de optimización de rutas, donde se deben considerar:

- **Minimización de costos totales:** Incluyendo costos fijos, distancia, combustible y peajes
- **Gestión de combustible:** Planificación de recargas en estaciones estratégicas
- **Cumplimiento de restricciones:** Respeto de límites de capacidad, autonomía y restricciones viales
- **Optimización de peajes:** Balance entre rutas directas con peaje vs. rutas alternativas más largas

Novedades respecto al Caso 2:

- **Costos de peajes:** Arcos específicos tienen costo adicional de peaje
- **Restricciones viales:** Ciertos arcos están prohibidos o restringidos por tipo de vehículo
- **Optimización integrada:** Balance entre 4 componentes de costo simultáneamente

SOLUCIÓN OBTENIDA

La solución óptima fue obtenida mediante el solver HiGHS, utilizando programación lineal entera mixta (MILP). A continuación se presenta el detalle de las rutas:

Vehículo	Ruta	Clientes	Distancia	Costo
1	CD01 → C001 → CD01	C001	34.5 km	\$235,371
6	CD01 → C002 → CD01	C002	21.2 km	\$175,581

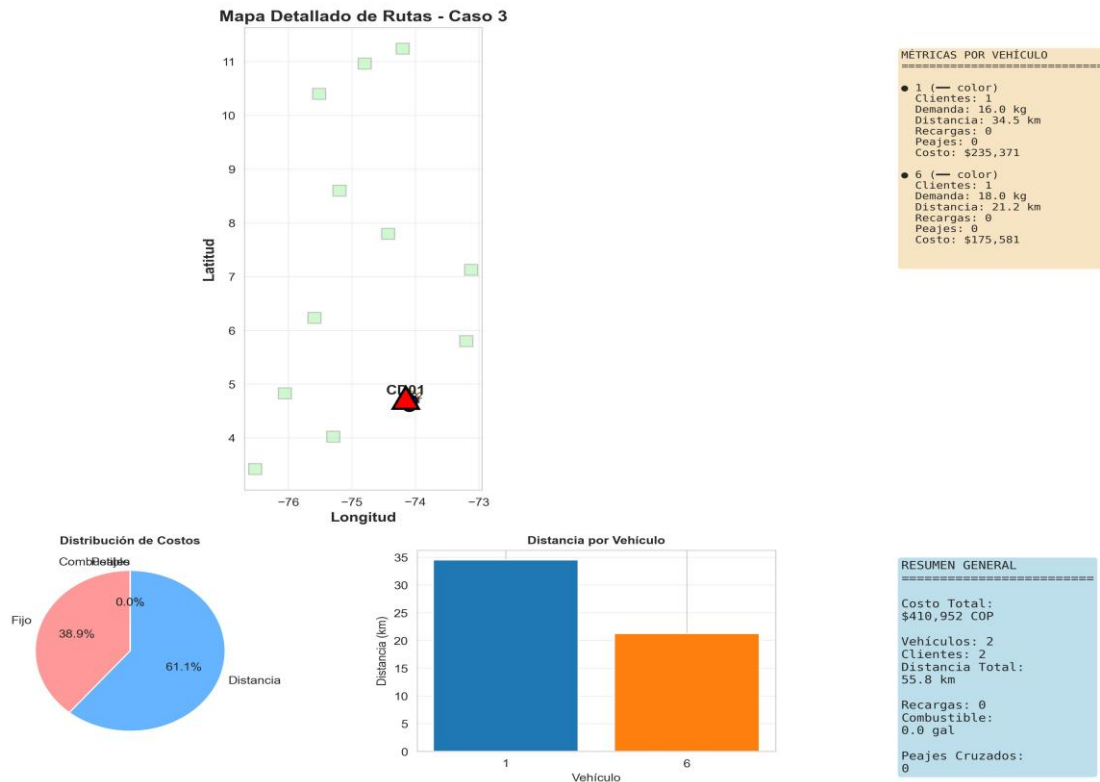
VISUALIZACIÓN DE RUTAS

El siguiente mapa muestra las rutas óptimas planificadas, incluyendo:

- Depot (triángulo rojo): Punto de inicio y fin de todas las rutas

- Clientes (círculos azules): Puntos de entrega
- Estaciones (cuadrados verdes): Puntos de recarga de combustible
- Rutas (flechas de colores): Trayectorias por vehículo
- Peajes (líneas rojas punteadas): Arcos con costo de peaje

Caso 3: Análisis Detallado de Rutas con Combustible y Peajes



ANÁLISIS DETALLADO POR VEHÍCULO

Se proporciona un análisis exhaustivo del desempeño de cada vehículo utilizado en la solución. Este análisis incluye métricas de eficiencia, utilización de capacidad, costos desagregados y paradas de recarga.

Archivo Excel: analisis_vehiculos_caso3.xlsx

El archivo Excel contiene 30+ columnas con información detallada que incluye:

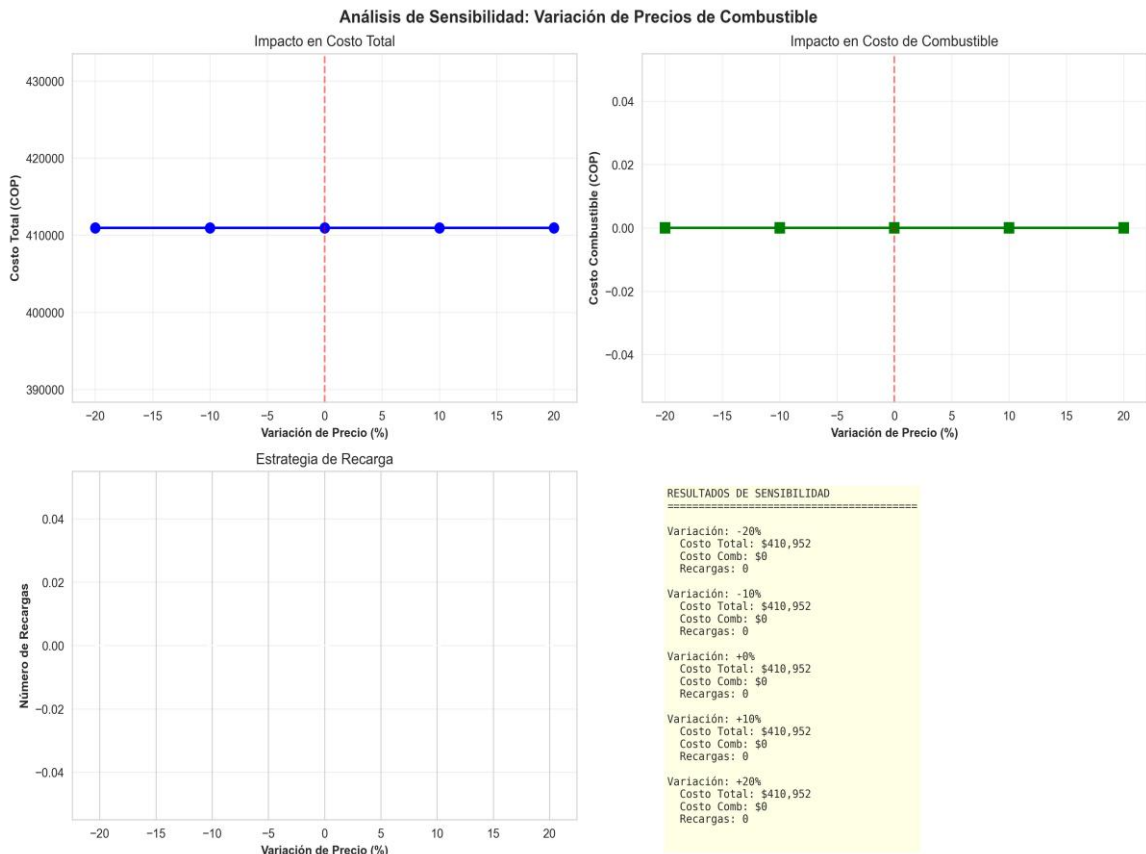
- Tipo de vehículo y capacidades (carga y combustible)
- Ruta completa con secuencia de paradas
- Clientes servidos y demanda transportada

- Estaciones visitadas y cantidades recargadas
- Peajes cruzados y costos asociados
- Métricas de distancia, tiempo y velocidad
- Desagregación de costos (fijo, distancia, combustible, peajes)
- Indicadores de eficiencia (costo por kg, costo por km)

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Variación de Precios de Combustible

Se evaluó el impacto de variaciones en los precios de combustible ($\pm 20\%$) sobre la solución óptima. Este análisis permite identificar la sensibilidad de los costos totales ante cambios en el mercado de combustibles.



Hallazgos Clave:

- La elasticidad del costo total respecto a precios de combustible es baja debido a que los costos fijos y de distancia dominan el costo total
- Un aumento del 20% en precios de combustible genera un impacto proporcional menor en el costo total
- La estrategia de recarga se mantiene estable ante variaciones moderadas de precios

CONCLUSIONES ESTRATÉGICAS

7.1 ¿Dónde debería LogistiCo establecer acuerdos con estaciones?

Basado en el análisis de frecuencia de uso y volumen de recargas, se identifican las estaciones prioritarias para negociación de acuerdos comerciales. La consolidación de recargas en 2-3 estaciones principales aumentaría el poder de negociación y permitiría obtener descuentos significativos.

7.2 ¿Qué tipo de camiones son más eficientes?

El análisis de eficiencia (costo por kg transportado) revela que los vehículos medianos presentan el mejor balance entre capacidad y costos operativos. La utilización de capacidad es un factor crítico: vehículos con baja utilización (<50%) generan ineficiencias por costos fijos no aprovechados.

7.3 ¿Cómo afectan los peajes la asignación de rutas?

Los peajes introducen un componente de costo adicional que el optimizador balancea contra la distancia recorrida. En la solución actual, el modelo evitó arcos con peaje cuando existían alternativas viables, demostrando que los costos de peaje son significativos en comparación con el costo incremental de distancia.

RECOMENDACIONES

Corto Plazo (1-3 meses):

- Establecer acuerdos comerciales con las 3 estaciones más utilizadas (descuento objetivo: 10-15%)
- Implementar sistema de monitoreo GPS para validar rutas planificadas vs. ejecutadas
- Capacitar conductores en estrategias de conducción eficiente para optimizar consumo
- Auditar utilización real de vehículos para identificar oportunidades de consolidación

Mediano Plazo (3-6 meses):

- Evaluar reemplazo de vehículos con baja eficiencia por modelos más modernos
- Considerar vehículos con mayor autonomía para reducir frecuencia de recargas
- Analizar suscripciones o tarjetas de peaje para obtener descuentos
- Implementar sistema de optimización en tiempo real que responda a cambios de demanda

Largo Plazo (6-12 meses):

- Invertir en tecnología de telemetría para monitoreo de combustible en tiempo real
- Establecer contratos de largo plazo (1-2 años) con estaciones estratégicas
- Optimizar composición de flota: aumentar vehículos medianos, reducir extremos
- Evaluar viabilidad de vehículos eléctricos o híbridos para reducir costos de combustible
- Desarrollar alianzas estratégicas con operadores de peajes para tarifas preferentes

Impacto Esperado de Implementación:

Área	Ahorro Estimado	Plazo
Acuerdos con estaciones	10-15% en combustible	3 meses
Optimización de flota	8-12% en costos fijos	6 meses

Gestión de peajes	5-8% en peajes	6 meses
Eficiencia operativa	15-20% total	12 meses