

Proyecto Etapa II **Implementación:** Optimización en logística para la empresa LogistiCo

Curso: ISIS-3302
Departamento de Ingeniería de Sistemas
Universidad de los Andes

Índice

1. Introducción General	3
2. Acerca de LogistiCo	3
3. Función Objetivo Unificada y Parámetros de Costo	4
3.1. Estructura General de la Función Objetivo	4
3.2. Parámetros de Costo por Proyecto	4
3.2.1. Proyecto A: Urban Logistics	4
3.2.2. Proyecto B: Rural/Offshore Logistics	5
3.2.3. Proyecto C: National Logistics	7
3.3. Notas Importantes sobre la Función Objetivo	8
4. Entregables	9
4.1. Bono por Excelencia Competitiva (Hasta +20% Adicional)	10
5. Instrucciones Generales	12
6. Proyecto A: Optimización en la Planeación de Transporte Vehicular Urbana Para LogistiCo	14
6.1. Resumen Ejecutivo	14
6.2. Objetivo	14
6.3. Contexto	14
6.4. Datos del Problema	14
6.5. Instrucciones	15

7. Proyecto B: Optimización en la Planificación de Entregas Salva Vi-das con Flota Híbrida para LogistiCo	19
7.1. Resumen Ejecutivo	19
7.2. Objetivo	19
7.3. Contexto	19
7.4. Datos del Problema	20
7.5. Instrucciones	20
8. Proyecto C: Optimización en la Planificación de Rutas Nacionales y Estrategia de Recarga para LogistiCo	24
8.1. Resumen Ejecutivo	24
8.2. Objetivo	24
8.3. Contexto	24
8.4. Datos del Problema	24
8.5. Instrucciones	25
9. Referencias	30
9.1. Fuentes Primarias - Colombia	30
9.2. Fuentes Internacionales y Estudios de Referencia	31
9.3. Notas Metodológicas	31

1 Introducción General

Este documento unifica los enunciados de **tres diferentes enunciados** para la realización del proyecto de optimización en logística, cada uno con un enfoque particular. En conjunto, los proyectos buscan mejorar la eficiencia operativa en distintos escenarios, considerando elementos comunes como la planificación de rutas, la asignación de vehículos y la minimización de costos, pero diferenciándose en aspectos específicos que se detallan a continuación.

2 Acerca de LogistiCo

LogistiCo es una empresa líder en soluciones logísticas, reconocida por su capacidad de innovar y adaptarse a entornos operativos complejos. Su misión es optimizar la distribución de mercancías y la entrega de insumos críticos mediante la aplicación de modelos matemáticos avanzados y tecnologías de punta. Con el fin de atender las distintas necesidades del mercado, LogistiCo se organiza en tres divisiones principales:

- **Urban Logistics:** Se enfoca en la distribución y gestión de mercancías dentro de áreas metropolitanas. Esta división aborda los desafíos inherentes a la alta densidad de tráfico, restricciones de espacio en entornos urbanos, el alto volumen de entregas.
- **Rural/Offshore Logistics:** Dedicada a la logística en zonas rurales y áreas de difícil acceso, esta división enfrenta retos relacionados con infraestructuras limitadas, distancias largas y condiciones ambientales adversas, garantizando la entrega oportuna en comunidades remotas o aisladas dentro de una ventana de tiempo específica.
- **National Logistics:** Responsable de la coordinación del transporte de mercancías a nivel nacional, esta división integra redes de transporte, optimizando rutas que conectan puertos con destinos finales en todo el país, cumpliendo con diversas normativas y restricciones operativas.

3 Función Objetivo Unificada y Parámetros de Costo

Para garantizar una evaluación justa y comparable entre todos los grupos, se establece una función objetivo unificada que todos los proyectos deben implementar. Esta función minimiza los costos operativos totales considerando componentes fijos y variables específicos para cada contexto logístico.

3.1 Estructura General de la Función Objetivo

La función objetivo para todos los proyectos sigue la siguiente estructura general:

$$\min Z = \sum_{v \in V} (C_v^{\text{fixed}} \cdot y_v) + \sum_{v \in V} (C_v^{\text{dist}} \cdot d_v) + \sum_{v \in V} (C_v^{\text{time}} \cdot t_v) + C^{\text{fuel}} + C^{\text{special}} \quad (1)$$

Donde:

- V : conjunto de vehículos disponibles
- $y_v \in \{0, 1\}$: variable binaria que indica si el vehículo v es utilizado
- d_v : distancia total recorrida por el vehículo v (en km)
- t_v : tiempo total de operación del vehículo v (en horas)
- C_v^{fixed} : costo fijo de activación del vehículo v (COP)
- C_v^{dist} : costo variable por kilómetro del vehículo v (COP/km)
- C_v^{time} : costo por hora de operación del vehículo v (COP/hora)
- C^{fuel} : costos totales de combustible (específico por proyecto)
- C^{special} : costos especiales según el proyecto (peajes, etc.)

3.2 Parámetros de Costo por Proyecto

3.2.1. Proyecto A: Urban Logistics

Para operaciones de logística urbana en Bogotá, se utilizan vehículos ligeros y medianos de reparto:

Parámetro	Valor	Descripción
C^{fixed}	\$50.000 COP/vehículo	Costo fijo de activación por vehículo
C^{dist}	\$2.500 COP/km	Mantenimiento y desgaste (última milla)
C^{time}	\$7.600 COP/hora	Costo de conductor urbano
C^{fuel}	\$ 16.300 COP/gal	Según tipo de vehículo y datos de entrada

Cuadro 1: Parámetros de costo para Proyecto A - Urban Logistics

Eficiencia de Combustible por Tipo de Vehículo:

La flota urbana de LogistiCo incluye vehículos ligeros y medianos con distintas eficiencias de combustible:

Tipo de Vehículo	Rendimiento (km/gal)	Rendimiento (L/100km)	Uso típico
Van pequeña	35-45	5.2-6.7	Entregas en zonas residenciales
Van mediana	25-35	6.7-9.4	Distribución comercial urbana
Camioneta ligera	22-28	8.4-10.7	Carga pesada en ciudad

Cuadro 2: Eficiencia de combustible para vehículos urbanos de reparto (Proyecto A)

Referencias:

- Costos de conductor: TuSalario.org Colombia (2025) - Salario promedio conductores urbanos
- Costos operacionales: DANE, Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC), incremento 9,1 % anual 2025
- Costos de última milla: Benchmarks internacionales de last-mile delivery ajustados a Colombia
- Eficiencia de combustible: Datos de vanes medianas y pequeñas europeas (Ford Transit Custom 44 MPG, Ford Transit Courier 54 MPG) ajustados para condiciones colombianas y conversión a sistema métrico

3.2.2. Proyecto B: Rural/Offshore Logistics

Para operaciones en zonas rurales de La Guajira utilizando flota híbrida:

Parámetro	Dron	Camioneta	Descripción
C^{fixed}	\$30.000 COP/vehículo	\$60.000 COP/vehículo	Costo fijo de activación
C^{dist}	\$800 COP/km	\$3.000 COP/km	Mantenimiento por km
C^{time}	\$2.000 COP/hora	\$8.000 COP/hora	Costo operador/conductor
C^{fuel}	\$ 937.81 COP/kWh	\$ 16.300 COP/gal	Energía vs. combustible

Cuadro 3: Parámetros de costo para Proyecto B - Rural/Offshore Logistics

Eficiencia Energética y de Combustible:

La flota híbrida de LogistiCo para zonas rurales opera con las siguientes eficiencias:

Tipo	Consumo Energético	Consumo Alternativo
Dron mediano	0.06-0.12 kWh/km	60-120 Wh/km
Camioneta 4x4	10-12 L/100km (26-31 gal/100km)	2.1-2.5 km/L (8-9.5 km/gal)

Cuadro 4: Eficiencia energética para flota híbrida en zonas rurales (Proyecto B)

Notas sobre eficiencia:

- El consumo de drones aumenta significativamente en condiciones de viento o lluvia (hasta 50 % más)
- El rendimiento de camionetas 4x4 en terreno off-road es aproximadamente 30-40 % menor que en carretera pavimentada
- La autonomía típica de drones de entrega es de 20-40 km con carga completa
- Las camionetas 4x4 pueden requerir tracción en las cuatro ruedas, reduciendo aún más la eficiencia

Referencias:

- Costos de drones: Estudios internacionales indican costos operacionales 70 % menores que vehículos terrestres (drone delivery research 2024-2025)
- Costos de camionetas off-road: Ajustados por condiciones de terreno difícil y mantenimiento incremental

-
- Salarios: TuSalario.org Colombia (2025) con ajuste por operación en zonas remotas
 - Eficiencia de drones: Nature Communications (2017-2018), estudios de consumo energético con cuadricópteros en entregas comerciales (0.019-0.12 kWh/km según condiciones y carga)
 - Eficiencia 4x4: Datos de camionetas pickup 4WD (10-12 L/100km en condiciones mixtas, ajustados para terreno difícil)

3.2.3. Proyecto C: National Logistics

Para operaciones de transporte nacional de carga pesada:

Parámetro	Valor	Descripción
C_{fixed}	\$80.000 COP/vehículo	Costo fijo de activación (tractomula)
C_{dist}	\$4.500 COP/km	Mantenimiento largo recorrido
C_{time}	\$9.000 COP/hora	Conductor especializado
C_{fuel}	Variable	Según estaciones y datos de entrada
C_{peaje}	Variable	Según tramos y datos de entrada

Cuadro 5: Parámetros de costo para Proyecto C - National Logistics

Eficiencia de Combustible para Tractomulas:

La flota de transporte nacional de LogistiCo opera con tractocamiones de alto tonelaje:

Tipo de Carga	Rendimiento (km/gal)	Rendimiento (L/100km)	Condiciones de Ruta	Capacidad Típica
Tractomula vacía	11-13	18-21	Carretera plana	-
Carga media (50 %)	9.5-11.5	20-25	Ruta mixta	16-20 ton
Carga completa	8-10	23.5-29.5	Terreno montañoso	23.5-35 ton

Cuadro 6: Eficiencia de combustible para tractomulas en Colombia (Proyecto C)

Notas sobre eficiencia: Para efectos prácticos utilicen la eficiencia de carga completa en sus cálculos de combustible.

Datos de Referencia Colombia:

-
- Consumo típico promedio: 2.5-3.5 km/L (9.5-13.2 km/gal) para tractomulas con carga de 23.5-35 toneladas
 - Consumo en condiciones óptimas: hasta 3.8 km/L (14.4 km/gal) con conducción eficiente y carga moderada

Referencias:

- Costos de mantenimiento: American Transportation Research Institute (ATRI) 2025 report ($\$0.123/\text{km} = \text{aprox. } \$615 \text{ COP}/\text{km}$ ajustado), escalado para condiciones colombianas
- Índice colombiano: DANE ICTC con incremento del 9,1 % en 2025
- Salarios: TuSalario.org Colombia (2025) - Conductores de tractomula
- Combustible y peajes: Datos actualizados de Ministerio de Transporte Colombia
- Eficiencia de tractomulas: Estudios colombianos (Kenworth T800 en ruta Medellín-Cartagena), datos de flota nacional con mejora del 22.5 % mediante conducción eficiente, consumo típico de 25-38 L/100km (2.5-3.5 km/L) según carga y topografía
- Composición de flota: 71 % camiones, 16 % tractocamiones, con edad promedio año 2000 y 80 % operando con diésel

3.3 Notas Importantes sobre la Función Objetivo

- **NO se incluyen penalizaciones** por incumplimiento de ventanas de tiempo. Las ventanas de tiempo deben ser restricciones duras en el modelo.
- **El costo fijo de activación** incentiva el uso eficiente de vehículos (menos vehículos, cargas más completas).
- **Todos los costos** deben ser claramente documentados en el código y en el informe.
- **La comparación entre grupos** se realizará usando esta función objetivo estandarizada.

4 Entregables

Para la entrega correspondiente a esta etapa, los estudiantes deberán presentar un documento en formato PDF o *Jupyter Notebook* que incluya el desarrollo completo de la implementación de los modelos previamente formulados utilizando Pyomo, acompañado de los archivos de código fuente. Los entregables se evaluarán conforme a los siguientes criterios:

1. Implementación del Modelo Matemático (10 %):

- Correcta traducción del modelo matemático a código en Pyomo, respetando fielmente la estructura formal desarrollada en la etapa anterior.
- Adecuada definición de conjuntos, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones.
- Manejo eficiente de la sintaxis y las características específicas de Pyomo.

2. Procesamiento de Datos (5 %):

- Correcta lectura e interpretación de los datos de entrada desde los archivos proporcionados en Bloque Neón.
- Preprocesamiento adecuado de la información para su utilización en el modelo.
- Cálculo correcto de parámetros derivados.

3. Resolución del Modelo para Casos de Estudio (60 %):

■ Caso 1 - CVRP Base (15 %):

- Implementación correcta del modelo fundamental (8 %)
- Métricas básicas de la solución y visualización simple (5 %)
- Archivo de verificación en formato correcto (2 %)
- **Propósito:** Verificar que su implementación funciona correctamente antes de agregar complejidad al modelo

■ Caso 2 - Simplificado Proyecto-Específico (25 %):

- Manejo correcto de las características específicas del proyecto asignado (15 %)
- Factibilidad y cumplimiento de todas las restricciones (7 %)
- Visualización y reporte básico de resultados (3 %)

-
- **Propósito:** Demostrar comprensión profunda de los desafíos específicos de su proyecto
 - **Caso 3 - Avanzado Realista (20 %):**
 - Escalabilidad del modelo y rendimiento computacional (8 %)
 - Análisis profundo con perspectivas de negocio accionables (7 %)
 - Visualizaciones completas y profesionales (5 %)
 - **Propósito:** Proveer inteligencia de negocio accionable que LogistiCo pueda implementar
 - **Nota:** Este caso tiene el mayor peso en análisis y califica para el bono competitivo

4. Análisis de Resultados y Visualización (15 %):

- Visualizaciones adecuadas para cada caso particular (rutas, flujos, niveles de carga, etc.).

5. Documentación y Calidad del Código (10 %):

- Código limpio, bien estructurado y adecuadamente comentado.
- Modularidad y reutilización de componentes.
- Manejo efectivo de excepciones y casos límite.
- Documentación clara que permita comprender la implementación.

4.1 Bono por Excelencia Competitiva (Hasta +20 % Adicional)

Los equipos cuyas soluciones para el **Caso 3** demuestren excelencia significativa por encima de sus pares podrán recibir hasta un 20 % de puntos adicionales sobre la nota final del proyecto. Este bono busca reconocer e incentivar la innovación, eficiencia y profundidad analítica.

Criterios de Evaluación del Bono:

1. Eficiencia de Costos (7 %):

- Solución con costo total operativo al menos 15 % menor que el promedio de su proyecto
- Uso eficiente de recursos: minimización del número de vehículos y distancias recorridas

-
- Documentación clara y detallada de las estrategias de optimización empleadas
 - Justificación técnica de por qué la solución es superior

2. Rendimiento Computacional (5 %):

- Tiempo de solución significativamente menor manteniendo o mejorando la calidad
- Implementación de técnicas de aceleración o formulaciones más eficientes
- Capacidad demostrada de resolver instancias de mayor tamaño
- Análisis comparativo de diferentes enfoques de solución probados

3. Innovación en el Enfoque (5 %):

- Formulaciones matemáticas alternativas o técnicas de relajación bien fundamentadas
- Métodos híbridos con justificación teórica
- Preprocesamiento inteligente de datos o reducción efectiva del espacio de búsqueda
- Estrategias creativas para manejar la complejidad computacional

4. Profundidad del Análisis (3 %):

- Perspectivas de negocio excepcionales que van más allá de lo solicitado
- Análisis de sensibilidad exhaustivo con recomendaciones estratégicas accionables
- Visualizaciones innovadoras que faciliten significativamente la toma de decisiones
- Identificación de oportunidades de mejora operativa no evidentes

Notas Importantes:

- El bono es **acumulativo** y puede alcanzar hasta el 20 % adicional sobre la nota final
- La evaluación será **relativa al desempeño del grupo respecto a sus pares** que trabajaron en el mismo proyecto (A, B o C)

-
- Se evaluará principalmente sobre el **Caso 3 - Avanzado Realista**
 - La documentación de las innovaciones y mejoras es **fundamental** para la asignación del bono
 - No es necesario cumplir todos los criterios; el bono se asigna proporcionalmente según el nivel de excelencia demostrado

5 Instrucciones Generales

Para completar satisfactoriamente esta segunda etapa del proyecto, los estudiantes deberán seguir estas instrucciones:

1. Organización de Repositorio:

- Crear una estructura clara de directorios que separe código, datos de entrada, resultados y documentación.
- Incluir un archivo README detallando la organización y los pasos para ejecutar el código.

2. Lectura de Datos:

- Desarrollar rutinas para importar los datos desde los archivos proporcionados en Bloque Neón.
- Implementar validaciones básicas para garantizar la integridad de los datos.

3. Implementación en Pyomo:

- Traducir el modelo matemático a código Pyomo siguiendo las mejores prácticas.
- Garantizar la correspondencia exacta entre la formulación matemática (etapa 1) y la implementación en código.

4. Ejecución y Análisis:

- Resolver el modelo para los tres casos de estudio propuestos.
- Documentar el proceso de solución, incluyendo tiempo de ejecución, métodos utilizados y convergencia.

-
- Analizar la sensibilidad del modelo ante cambios en parámetros críticos.

5. Formato Estándar de Identificadores:

- **IMPORTANTE:** Todos los archivos de verificación deben usar identificadores estandarizados:
 - **Clientes:** C001, C002, C003, etc. (independientemente del formato en archivos de entrada)
 - **Centros de Distribución:** CD01, CD02, CD03, etc.
 - **Estaciones de Servicio (Proyecto C):** E001, E002, E003, etc.
 - **Peajes (Proyecto C):** P001, P002, P003, etc.
- Si los archivos de entrada usan otros formatos (COM04, MUN03, etc.), debe realizar la conversión en su código.
- Esta estandarización permite una evaluación uniforme entre todos los grupos.

6. Visualización de Resultados:

- Desarrollar visualizaciones informativas y claras de las soluciones obtenidas.
- Para el Proyecto A: visualizar las rutas de vehículos, sus niveles de carga y el uso del inventario del centro de distribución.
- Para el Proyecto B: representar el cumplimiento de ventanas de tiempo y la evolución de la carga.
- Para el Proyecto C: ilustrar los puntos de recarga, niveles de combustible y las restricciones viales y peajes que se cursaron.

7. Documentación:

- Elaborar un informe técnico que detalle la implementación, los resultados y el análisis realizado.
- Incluir capturas de las visualizaciones y tablas resumen de los hallazgos principales.

6 Proyecto A: Optimización en la Planeación de Transporte Vehicular Urbana Para LogistiCo

6.1 Resumen Ejecutivo

Este proyecto aborda la optimización de operaciones de última milla en Bogotá, considerando múltiples centros de distribución, restricciones de capacidad, y limitaciones de acceso urbano por tipo de vehículo. Los estudiantes implementarán un modelo que minimiza costos operativos mientras gestiona eficientemente el inventario distribuido y las rutas multi-parada en un entorno urbano congestionado.

Características clave: Múltiples centros de distribución, restricciones de tipo de vehículo por zona, rutas multi-parada, gestión de inventario distribuido.

6.2 Objetivo

El objetivo principal de esta fase del proyecto es implementar en Pyomo el modelo de optimización previamente formulado para la asignación de inventario y planificación de rutas de transporte vehicular en Bogotá. La implementación debe permitir la minimización efectiva de los costos operativos y de transporte, garantizando entregas eficientes mientras se respetan las limitaciones operativas de LogistiCo.

6.3 Contexto

Esta fase se enfoca en la traducción del modelo matemático a código ejecutable que pueda ser utilizado en un entorno real de operaciones. La implementación debe capturar fielmente todas las complejidades del problema logístico urbano en Bogotá, incluyendo la gestión de múltiples centros de distribución con capacidades limitadas, la asignación óptima de vehículos con restricciones de autonomía, y la planificación de rutas eficientes en un entorno urbano caracterizado por alta congestión y restricciones de movilidad.

6.4 Datos del Problema

Los datos de entrada para los tres casos de estudio se encuentran disponibles en Bloque Neón con los nombres `Proyecto_Caso_Base`, `Proyecto_A_Caso2` y `Proyecto_A_Caso3`.
IMPORTANTE: Leer cuidadosamente el archivo `README.md` incluido en cada carpeta. Este contiene la descripción detallada de los archivos obligatorios, sus formatos y el contexto de cada conjunto de datos.

6.5 Instrucciones

1. Implementación del Modelo Base (Caso 1: CVRP Estándar):

- Implementar en Pyomo un modelo básico de CVRP con un único centro de distribución y vehículos homogéneos.
- Validar que la solución obtenida es factible y cumple con las restricciones.

2. Extensión a Múltiples Centros de Distribución (Caso 2):

- Incorporar los tres centros de distribución con capacidades limitadas.
- Se espera solamente comprobar validez y factibilidad de la solución obtenida.

3. Escenario Realista (Caso 3):

- Adaptar el modelo a un entorno más realista con entre 50 y 100 clientes.
- Incluir restricciones de tipo de vehículo por zona urbana.
- Generar un análisis exhaustivo con enfoque empresarial.

4. Análisis de Sensibilidad y Reportes:

- Para todos los casos:
 - Crear mapas interactivos con Folium que muestren:
 - Rutas completas por vehículo
 - Centros de distribución como nodos de salida
- Exclusivo para Caso 3:
 - Explicar a detalle los cambios en la formulación matemática que tuvieron que realizar para poder resolver un ejercicio de mayor tamaño, cuáles son los *trade-offs* que tuvieron que realizar para poder resolverlo y si recomendarían solvers *mip/lp* para resolver estos problemas de este tamaño.
 - Estudiar el impacto de variaciones en:
 - Costos de combustible ($\pm 20\%$)
 - Capacidad de los centros de distribución
 - Demandas de los clientes
 - Reportes detallados por centro de distribución y por vehículo:

-
- Costo total de operación (combustible, mantenimiento)
 - Distancia total recorrida
 - Tiempo total estimado de operación
 - Carga total entregada
 - Estadísticas globales:
 - Distancia, tiempo y carga promedio por vehículo
 - Desviaciones estándares y distribuciones de los datos
 - Estadísticas de desempeño del algoritmo
 - Conclusiones que respondan preguntas estratégicas:
 - "¿Cuáles son los parámetros iniciales que más afectan la logística urbana?"
 - "¿Dónde se presentan los mayores cuellos de botella?"
 - "¿Qué mejoras recomendaría a LogistiCo?"
 - Identificar los parámetros que generan mayor impacto en el costo total y estructura de rutas.

5. Verificación de Soluciones:

- Para cada caso, se debe generar un archivo de verificación `verificacion_casoX.csv` (donde X corresponde al número del caso).
- Este archivo permitirá el rastreo de las rutas que cada vehículo tomó y la carga inicial para cumplir con las demandas.
- **IMPORTANTE:** La ausencia del archivo de verificación o su incorrecto formato resultará en una penalización significativa en la nota final.
- El formato del archivo debe seguir estrictamente la estructura definida a continuación.

6. Formato del Archivo de Verificación:

Listing 1: Ejemplo de archivo `verificacion_caso1.csv`

1	<code>VehicleId , DepotId , InitialLoad , RouteSequence , ClientsServed , DemandsSatisfied , TotalDistance , TotalTime , FuelCost</code>
2	<code>V001 , CD01 , 750 , CD01-C005-C023-C017-CD01 , 3,215-320-215,28.4,67.2,98500</code>
3	<code>V002 , CD02 , 680 , CD02-C002-C009-C014-CD02 , 3,250-180-250,32.1,75.8,112300</code>
4	<code>V003 , CD01 , 920 , CD01-C001-C006-C012-C019-CD01 , 4,300-220-150-250,41.5,112.3,145200</code>

Nota sobre identificadores: Use el formato estándar C001, C002, etc. para clientes y CD01, CD02, etc. para centros de distribución, independientemente del formato en los archivos de entrada.

7. Explicación del Formato:

- **VehicleId:** Identificador único del vehículo, debe coincidir con el ID en el archivo de entrada.
- **DepotId:** Identificador del centro de distribución de origen, debe coincidir con los IDs en el archivo de entrada.
- **InitialLoad:** Carga inicial del vehículo al salir del centro de distribución (en unidades).
- **RouteSequence:** Secuencia completa de la ruta incluyendo el depot inicial y final, separada por guiones.
- **ClientsServed:** Número total de clientes atendidos en la ruta.
- **Demandssatisfied:** Lista de demandas satisfechas por cada cliente en el orden visitado, separadas por guiones.
- **TotalDistance:** Distancia total recorrida (en km).
- **TotalTime:** Tiempo total de la ruta (en minutos).
- **FuelCost:** Costo total de combustible para la ruta (en pesos colombianos).

8. Consideraciones Adicionales:

- Para el Caso 2 y 3, se debe especificar correctamente el centro de distribución asignado a cada vehículo.
- Los valores numéricos deben utilizar punto como separador decimal.
- Las secuencias de valores deben separarse con guiones (-) sin espacios.
- El archivo debe tener encabezados exactamente como se muestra en el ejemplo.
- Se verificará que la suma de demandas satisfechas para cada cliente coincida con la demanda total requerida.
- Se validará que las cargas iniciales no excedan la capacidad de los vehículos especificada en los datos de entrada.

9. Entregables:

-
- Código Pyomo modular y comentado.
 - Scripts para ejecutar cada caso.
 - Archivos de verificación para cada caso (verificacion_caso1.csv, verificacion_caso2.csv, verificacion_caso3.csv).
 - Visualizaciones y gráficos exportables (PDF o PNG).
 - Documento de análisis en PDF.
 - Carpeta con datos procesados y archivos README detallados.

7 Proyecto B: Optimización en la Planificación de Entregas Salva Vidas con Flota Híbrida para LogistiCo

7.1 Resumen Ejecutivo

Este proyecto optimiza entregas de insumos médicos en zonas rurales de La Guajira usando una flota híbrida (drones y vehículos todoterreno). El desafío principal es cumplir con ventanas de tiempo críticas mientras se gestionan ciclos de reabastecimiento necesarios debido a las largas distancias y capacidades limitadas. La elección entre drones y vehículos terrestres se basa únicamente en costos, capacidad y autonomía.

Características clave: Flota híbrida, ventanas de tiempo estrictas, ciclos de reabastecimiento, largas distancias en terreno difícil, operación desde depósito único.

Nota importante: Se asume que tanto drones como vehículos todoterreno pueden acceder a cualquier cliente/comunidad. La decisión del tipo de vehículo a utilizar se basa únicamente en costos operacionales, capacidad de carga y autonomía, NO en restricciones de accesibilidad.

7.2 Objetivo

El objetivo de esta fase es implementar en Pyomo el modelo de optimización para la planificación de entregas de insumos médicos y productos esenciales en comunidades remotas de La Guajira utilizando una flota híbrida de vehículos. La implementación debe permitir cumplir con las ventanas de tiempo establecidas minimizando costos operativos y maximizando el servicio a las comunidades.

7.3 Contexto

Esta implementación debe traducir a código ejecutable todas las complejidades asociadas con la operación en zonas remotas, incluyendo la gestión de ventanas de tiempo críticas para entregas médicas, la asignación **óptima entre drones y vehículos terrestres** (basada en costos y capacidades), y la posibilidad de **reabastecimiento** para completar todas las entregas requeridas. El sistema debe ser lo suficientemente flexible para adaptarse a condiciones cambiantes y proporcionar planes de entrega viables en un entorno operativamente desafiante.

7.4 Datos del Problema

Los datos de entrada para los tres casos de estudio se encuentran disponibles en Bloque Neón bajo las etiquetas `Proyecto_Caso_Base`, `Proyecto_B_Caso2` y `Proyecto_B_Caso3`. Cada conjunto de datos incluye:

- Centro de distribución con coordenadas geográficas
- Clientes con demandas, ubicación y ventanas de tiempo
- Flota híbrida (vehículos terrestres y drones) con capacidades y autonomía
- Parámetros operativos adicionales como costos de operación y tiempos de recarga

7.5 Instrucciones

1. Caso Base (Caso 1: CVRP Estándar sin ventanas de tiempo):

- Implementar un CVRP básico con un centro de distribución y un solo tipo de vehículo.
- No se consideran ventanas de tiempo ni reabastecimiento.
- Validar factibilidad y cumplimiento de restricciones básicas.

2. Ventanas de Tiempo con Flota Híbrida (Caso 2):

- Ampliar el modelo para incluir drones y camionetas con capacidades distintas.
- Incorporar ventanas de tiempo como restricciones duras.
- No se permite reabastecimiento.

3. Escenario Realista con Reabastecimiento (Caso 3):

- Permitir múltiples viajes por vehículo, incluyendo retornos al depósito.
- Respetar ventanas de tiempo incluso con la lógica de reabastecimiento.
- Analizar secuencias temporales y su impacto en nivel de servicio.

4. Verificación de Soluciones:

- Para cada caso, se debe generar un archivo de verificación `verificacion_casoX.csv` (donde X corresponde al número del caso).

-
- Este archivo permitirá el rastreo de las rutas que cada vehículo tomó, la carga, los tiempos de llegada y los reabastecimientos.
 - **IMPORTANTE:** La ausencia del archivo de verificación o su incorrecto formato resultará en una penalización significativa en la nota final.
 - **NOTA:** Para el Caso 1 (base) no es necesario incluir información sobre tiempos de llegada ya que no se consideran ventanas de tiempo en este caso.

5. Formato del Archivo de Verificación:

Listing 2: Ejemplo de archivo verificacion_caso2.csv (con ventanas de tiempo)

```

1 VehicleId,VehicleType,InitialLoad,RouteSequence,ClientsServed,DemandSatisfied,
   ↪ ArrivalTimes,TotalDistance,TotalTime,Cost
2 V001,Drone,35,CD01-C004-C011-CD01,2,15-20,10:35-11:15,28.5,55.0,185000
3 V002,Truck,150,CD01-C002-C007-C009-CD01
   ↪ ,3,45-60-45,09:45-10:30-11:15,42.8,120.0,275000
4 V003,Drone,40,CD01-C001-C005-CD01,2,25-15,09:15-10:05,32.1,65.0,200000

```

Nota sobre identificadores: Use el formato estándar C001, C002, etc. para clientes y CD01 para el centro de distribución, independientemente del formato en los archivos de entrada (por ejemplo, si el archivo dice "COM04", use C004.^{en} el archivo de verificación).

Listing 3: Ejemplo de archivo verificacion_caso3.csv (con reabastecimientos)

```

1 VehicleId,VehicleType,InitLoad,RouteSequence,Clients,DemandSatisfied,
   ↪ ArrivalTimes,Resup,ResupAmounts,Distance,Time,Cost
2 V001,Drone,35,CD01-C004-C011-CD01-C008-C012-CD01
   ↪ ,4,15-20-25-25,10:35-11:15-12:30-13:20,1,50,62.5,185.0,350000
3 V002,Truck,150,CD01-C002-C007-C009-CD01-C015-C021-CD01
   ↪ ,5,45-60-45-75-70,09:45-10:30-11:15-13:00-14:15,1,145,78.3,250.0,425000
4 V003,Drone,40,CD01-C001-C005-CD01-C006-CD01
   ↪ ,3,25-15-40,09:15-10:05-11:30,1,40,48.7,135.0,280000

```

6. Explicación del Formato:

- **VehicleId:** Identificador único del vehículo, debe coincidir con el ID en el archivo de entrada.
- **VehicleType:** Tipo de vehículo ("Drone."° "Truck").
- **InitLoad/InitialLoad:** Carga inicial del vehículo al salir del centro de distribución (en unidades).
- **RouteSequence:** Secuencia completa de la ruta incluyendo el CD inicial, las comunidades y los retornos al CD.

-
- **Clients/ClientsServed:** Número total de clientes atendidos en la ruta.
 - **DemandSatisfied:** Lista de demandas satisfechas por cada cliente en el orden visitado, separadas por guiones.
 - **ArrivalTimes:** Hora de llegada a cada cliente en formato HH:MM, separadas por guiones.
 - **Resup/Resupplies:** Número de veces que el vehículo retornó al CD para reabastecerse (Caso 3).
 - **ResupAmounts:** Cantidad total reabastecida en cada retorno al CD, separadas por guiones (Caso 3).
 - **Distance/TotalDistance:** Distancia total recorrida (en km).
 - **Time/TotalTime:** Tiempo total de la ruta (en minutos).
 - **Cost/OperationCost:** Costo total de operación para la ruta (en pesos colombianos).

7. Consideraciones Adicionales:

- Para el Caso 1, se pueden omitir las columnas de tiempos de llegada y reabastecimientos.
- Para el Caso 2, se deben omitir las columnas de reabastecimientos pero incluir la de tiempos de llegada.
- Para el Caso 3, todas las columnas son obligatorias.
- Los valores numéricos deben utilizar punto como separador decimal.
- Las secuencias de valores deben separarse con guiones (-) sin espacios.
- El centro de distribución debe identificarse como CD01.^{en} la secuencia de ruta.
- Los clientes deben identificarse con el formato estándar C001", C002", etc.
- El formato de hora debe ser HH:MM (24 horas).
- Se verificará que todos los clientes sean atendidos dentro de sus ventanas de tiempo especificadas.
- Se validará que las cargas iniciales y reabastecimientos no excedan la capacidad de los vehículos.

8. Visualización y Reportes:

-
- Para todos los casos:
 - Mapas de rutas diferenciadas por tipo de vehículo (dron o terrestre)
 - Diagramas de Gantt con cumplimiento de ventanas de tiempo por cliente (excepto Caso 1)
 - Exclusivo para Caso 3:
 - Gráficos y tablas por vehículo:
 - Tiempo de llegada a cada cliente
 - Cantidad de entregas realizadas
 - Número de reabastecimientos
 - Costo total, distancia y tiempo de operación
 - Análisis de sensibilidad para:
 - Variaciones en tiempos de recarga o vuelo
 - Cambios en demanda
 - Fallo temporal de un tipo de vehículo
 - Conclusiones que respondan a:
 - "*¿Se cumplieron las ventanas de tiempo en promedio?*"
 - "*¿Cuál fue el número promedio de reabastecimientos por tipo de vehículo?*"
 - "*¿Qué configuración es más robusta para zonas remotas?*"

9. Entregables:

- Código modular Pyomo y scripts de ejecución.
- Archivos de verificación para cada caso (verificacion_caso1.csv, verificacion_caso2.csv, verificacion_caso3.csv).
- Visualizaciones: mapas, Gantt, gráficos comparativos.
- Documento de análisis en PDF con interpretaciones clave.
- Carpeta de datos con archivo README explicativo.

8 Proyecto C: Optimización en la Planificación de Rutas Nacionales y Estrategia de Recarga para LogistiCo

8.1 Resumen Ejecutivo

Este proyecto optimiza el transporte de carga a nivel nacional, conectando puertos con centros de consumo en todo Colombia. El desafío principal es minimizar costos totales mediante decisiones estratégicas de ruteo, recarga de combustible y cumplimiento de restricciones municipales de peso, considerando además el impacto de peajes variables.

Características clave: Red nacional extensa, estaciones de recarga estratégicas con precios variables, restricciones de peso por municipio, sistema de peajes complejo, rutas de largo recorrido.

8.2 Objetivo

El objetivo de esta fase es implementar en Pyomo el modelo previamente formulado para la planificación de rutas nacionales de transporte de carga con estrategias **óptimas de recarga de combustible**. La implementación debe minimizar los costos totales considerando distancias, peajes, recargas estratégicas y restricciones de peso por municipio.

8.3 Contexto

La implementación debe traducir a código ejecutable todas las complejidades del transporte nacional en Colombia, incluyendo la variación de precios de combustible entre estaciones, el impacto de los peajes en los costos operativos, y las restricciones de peso impuestas por diferentes municipios. El sistema debe optimizar no solo las rutas sino también las decisiones estratégicas sobre dónde y cuánto recargar combustible para cumplir con las restricciones de autonomía y carga.

8.4 Datos del Problema

Los datos para los tres casos de estudio se encuentran disponibles en Bloque Neón bajo las etiquetas `Proyecto_Caso_Base`, `Proyecto_C_Caso2` y `Proyecto_C_Caso3`. Cada conjunto incluye:

-
- Punto de acceso (Puerto de Barranquilla) con sus coordenadas
 - Centros de consumo (municipios) con demandas y restricciones de peso máximo
 - Estaciones de servicio con ubicaciones y precios de combustible
 - Peajes con sus tarifas base y variables según el peso
 - Características de la flota de camiones (capacidad, autonomía, consumo)

8.5 Instrucciones

1. Caso Base (Caso 1: CVRP Estándar):

- Implementar un modelo básico tipo CVRP con un **origen nacional (puerto)** y destinos (**municipios**).
- Incluir restricciones de capacidad y autonomía de los vehículos.
- Validar factibilidad de la solución considerando solamente distancia y demanda.

2. Caso Intermedio: Incorporación de Recarga (Caso 2):

- Extender el modelo anterior para incluir decisiones de recarga.
- Tomar en cuenta los diferentes precios de combustible en estaciones a lo largo del recorrido.
- Asegurar que ningún vehículo se quede sin combustible en ninguna parte de la ruta.
- Este caso permite probar estrategias como recarga completa vs. recarga mínima necesaria.

3. Escenario Complejo con Peajes y Restricciones de Peso (Caso 3):

- Incorporar restricciones de peso por municipio, asociadas a normativas locales.
- Incluir peajes con tarifas variables según el peso y tramo recorrido.
- Determinar estrategias **conjuntas de ruteo y recarga**, optimizando el costo total nacional.

4. Formato del Archivo de Verificación:

Listing 4: Ejemplo de archivo verificacion_caso1.csv (básico)

```

1 VehicleId,LoadCap,FuelCap,RouteSequence,Municipalities,DemandSatisfied,
    ↪ InitialLoad,InitialFuel,Distance,Time,TotalCost
2 V001,20000,200,CD01-C003-C007-C012-CD01
    ↪ ,3,5200-7800-6500,19500,200,310.5,270.2,580000
3 V002,15000,150,CD01-C002-C005-C009-CD01
    ↪ ,3,4500-5200-4800,14500,150,285.7,250.5,530000
4 V003,25000,250,CD01-C001-C006-C011-C015-CD01
    ↪ ,4,6000-5500-6800-6200,24500,250,420.3,380.7,750000

```

Nota sobre identificadores: Use CD01 para el puerto de origen, C001, C002, etc. para los municipios/clientes, E001, E002, etc. para estaciones de servicio, y P001, P002, etc. para peajes.

Listing 5: Ejemplo de archivo verificacion_caso2.csv (con recarga)

```

1 VehicleId,LoadCap,FuelCap,RouteSequence,Municipalities,DemandSatisfied,
    ↪ InitLoad,InitFuel,RefuelStops,RefuelAmounts,Distance,Time,FuelCost,
    ↪ TotalCost
2 V001,20000,200,CD01-C003-E002-C007-C012-CD01
    ↪ ,3,5200-0-7800-6500,19500,180,1,150,380.5,320.2,175000,680000
3 V002,15000,150,CD01-C002-E001-C005-C009-CD01
    ↪ ,3,4500-0-5200-4800,14500,120,1,100,325.7,290.5,142000,590000
4 V003,25000,250,CD01-C001-E003-C006-C011-E004-C015-CD01
    ↪ ,4,6000-0-5500-6800-0-6200,24500,200,2,170-120,530.3,460.7,230000,890000
    ↪

```

Listing 6: Ejemplo de archivo verificacion_caso3.csv (completo)

```

1 VehicleId,LoadCap,FuelCap,RouteSeq,Municipalities,Demand,InitLoad,InitFuel,
    ↪ RefuelStops,RefuelAmounts,TollsVisited,TollCosts,VehicleWeights,
    ↪ Distance,Time,FuelCost,TollCost,TotalCost
2 V001,20000,200,CD01-C003-E002-P001-C007-P003-C012-CD01
    ↪ ,3,5200-0-0-7800-0-6500,19500,180,1,150,2,85000-92000,19500-14300-6500,420.5,360.2,175000,
    ↪
3 V002,15000,150,CD01-C002-E001-P002-C005-P004-C009-CD01
    ↪ ,3,4500-0-0-5200-0-4800,14500,120,1,100,2,70000-65000,14500-10000-4800,350.7,325.5,142000,
    ↪
4 V003,25000,250,CD01-C001-E003-P001-C006-P003-C011-E004-P005-C015-CD01
    ↪ ,4,6000-0-0-5500-0-6800-0-0-6200,24500,200,2,170-120,3,95000-92000-105000,24500-18500-13000
    ↪

```

5. Explicación del Formato:

- **VehicleId:** Identificador único del vehículo.
- **LoadCap:** Capacidad de carga del vehículo (en kg).
- **FuelCap:** Capacidad de combustible del vehículo (en galones).
- **RouteSeq/RouteSequence:** Secuencia completa de la ruta incluyendo puerto (PTO), municipios (MUN), estaciones de servicio (EST) y peajes (PEA).

-
- **Municipalities**: Número de municipios (clientes) atendidos en la ruta.
 - **Demand/DemandSatisfied**: Lista de demandas satisfechas en cada punto de la ruta (0 para estaciones y peajes).
 - **InitLoad/InitialLoad**: Carga inicial del vehículo al salir del puerto (en kg).
 - **InitFuel/InitialFuel**: Combustible inicial del vehículo al salir del puerto (en galones).
 - **RefuelStops**: Número de paradas para recargar combustible (Casos 2 y 3).
 - **RefuelAmounts**: Cantidades de combustible recargadas en cada parada (en galones).
 - **TollsVisited**: Número de peajes por los que pasa el vehículo (solo Caso 3).
 - **TollCosts**: Costo en cada peaje visitado (en pesos colombianos).
 - **VehicleWeights**: Peso del vehículo al entrar a cada municipio (en kg) (solo Caso 3).
 - **Distance**: Distancia total recorrida (en km).
 - **Time**: Tiempo total de la ruta (en minutos).
 - **FuelCost**: Costo total de combustible (en pesos colombianos).
 - **TollCost**: Costo total de peajes (solo Caso 3).
 - **TotalCost**: Costo total de la operación (en pesos colombianos).

6. Consideraciones Adicionales:

- Para el Caso 1, se pueden omitir las columnas relacionadas con recargas y peajes.
- Para el Caso 2, se deben incluir las columnas de recargas pero se pueden omitir las de peajes.
- Para el Caso 3, todas las columnas son obligatorias.
- Los valores numéricos deben utilizar punto como separador decimal.
- Las secuencias de valores deben separarse con guiones (-) sin espacios.
- **Formato estándar de identificadores:**
 - Puerto de origen: CD01"

-
- Municipios/clientes: C001", C002", C003", etc.
 - Estaciones de servicio: .E001", .E002", .E003", etc.
 - Peajes: "P001", "P002", "P003", etc.
 - Se verificará que las cargas no excedan la capacidad de los vehículos.
 - Se validará que los vehículos no se queden sin combustible en ningún tramo.
 - Se comprobará que los vehículos respeten las restricciones de peso por municipio especificadas en los datos de entrada (Caso 3).

7. Visualización y Reportes:

- Para todos los casos:
 - Mapas que muestren las rutas nacionales planificadas
 - Visualización básica de los puntos de recarga (cuando aplique)
- Exclusivo para Caso 3:
 - Mapas detallados que muestren:
 - Rutas nacionales con paradas de recarga específicas
 - Municipios con restricciones y su cumplimiento
 - Tablas por vehículo que reporten:
 - Cantidad total recargada y puntos de recarga
 - Costo por componente: combustible, peajes, mantenimiento
 - Tiempo y distancia totales por ruta
 - Peso transportado vs permitido por municipio
 - Análisis de sensibilidad ante:
 - Aumento de precios en estaciones clave (+20 %)
 - Reducción de autonomía por deterioro de camiones
 - Inclusión o exclusión de estaciones estratégicas
 - Conclusiones que respondan a:
 - "*¿Dónde debería LogistiCo establecer acuerdos con estaciones para minimizar costos?*"
 - "*¿Qué tipo de camiones son más eficientes según el patrón de demanda?*"
 - "*¿Cómo afectan los peajes variables la asignación óptima de rutas?*"

8. Entregables:

- Código Pyomo con estructura modular.
- Scripts de ejecución para cada caso.
- Archivos de verificación para cada caso (verificacion_caso1.csv, verificacion_caso2.csv, verificacion_caso3.csv).
- Visualizaciones interactivas (folium) y estáticas (matplotlib).
- Documento PDF con análisis completo, recomendaciones y tablas resumen.
- Carpeta de datos con README detallado.

Consideraciones finales para todos los proyectos:

- Todos los modelos deben estar implementados utilizando Pyomo para permitir su solución con solvers comerciales o de código abierto.
- El código debe estar modularizado para facilitar su mantenimiento y extensión.
- Se debe incluir manejo adecuado de errores y validación de datos de entrada.
- Las visualizaciones deben ser informativas y orientadas a facilitar la toma de decisiones operativas.
- La documentación debe ser suficientemente clara para permitir que otros desarrolladores puedan entender y modificar el código.

Tener en cuenta:

- No se reciben entregas por fuera del plazo máximo y tampoco por correo. Las entregas solo se reciben por **Bloque Neón**.
- Esta actividad se puede entregar en grupos de hasta 4 integrantes.
- **IMPORTANTE!!!** Junto a los archivos de la entrega adjuntar los nombres de los integrantes del equipo.

9 Referencias

Los parámetros de costo utilizados en la función objetivo unificada se basan en las siguientes fuentes:

9.1 Fuentes Primarias - Colombia

1. DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). (2025). *Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC)*. Incremento anual del 9,1 % registrado en 2025. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/>
2. TuSalario.org Colombia. (2025). *Salarios de Conductores de Vehículos en Colombia*. Salario promedio: \$7,600 COP/hora para conductores urbanos, \$8,000-9,000 COP/hora para conductores especializados. Disponible en: <https://tusalario.org/colombia/>

-
3. **Ministerio de Transporte de Colombia.** (2025). *Regulaciones de Transporte de Carga y Tarifas de Peajes*. Incremento del 2,63 % en costos de transporte en enero 2025.

9.2 Fuentes Internacionales y Estudios de Referencia

4. **American Transportation Research Institute (ATRI).** (2025). *An Analysis of the Operational Costs of Trucking: 2025 Update*. Costos de mantenimiento: \$0.123/km (aprox. \$615 COP/km ajustado a Colombia).
5. **Drone Delivery Research Consortium.** (2024-2025). *Cost-Effectiveness of Drone Delivery vs. Ground Vehicles*. Costos operacionales de drones 70 % menores que vehículos terrestres para entregas de última milla. Costo estimado por entrega: bajo \$1 USD.
6. **Supply Chain Dive.** (2024). *Research on Drone Delivery Costs and Efficiency*. Análisis de costos operativos y energéticos de drones en operaciones logísticas.
7. **Market Research Reports.** (2024). *Latin America Last-Mile Delivery Market Analysis*. Costos y desafíos de logística urbana en América Latina.

9.3 Notas Metodológicas

Los valores de costos presentados en la Sección 3 fueron derivados mediante:

- **Ajuste por contexto:** Datos internacionales ajustados a las condiciones colombianas considerando diferencias en costos laborales, combustible y condiciones operativas.
- **Promediación:** Cuando múltiples fuentes proporcionaban valores diferentes, se utilizó un promedio ponderado.
- **Escalamiento:** Valores base escalados según el tipo de operación (urbana, rural, nacional) y tipo de vehículo.
- **Validación:** Parámetros validados con el ICTC de DANE y reportes del sector logístico colombiano.

Los estudiantes pueden consultar estas fuentes para una comprensión más profunda de los componentes de costo en operaciones logísticas.