

# **Proyecto Modelado SenecaLibre**

## **Grupo 7**

**Andrea Lucia Galindo Cera - 202122477**

**Santiago Navarrete Varela - 202211202**

**Luis Fernando Ruiz - 202211513**

## **Introducción**

En este documento se presenta el modelado matemático desarrollado por el equipo para optimizar la operación logística de Seneca Libre, con un enfoque principal en la minimización de los costos operativos. Seneca Libre, como una plataforma líder de comercio electrónico en Bogotá, enfrenta desafíos importantes debido a su rápido crecimiento en la demanda y la necesidad de mantenerse competitiva frente a grandes actores del sector. Los altos costos operativos actuales, el uso limitado de la infraestructura logística existente, y las crecientes presiones regulatorias hacen necesario un replanteamiento estratégico del modelo de distribución de la empresa.

Tomando en cuenta las diversas propuestas de los stakeholders, se ha diseñado un modelo integral que combina las soluciones más adecuadas para abordar estos desafíos. El equipo ha basado su diseño en propuestas que buscan expandir la infraestructura logística mediante la apertura de un nuevo centro de distribución, así como modernizar la flota de transporte incorporando tecnologías más eficientes, como vehículos eléctricos y drones. Estas decisiones estratégicas permiten maximizar la eficiencia en las rutas de entrega, al mismo tiempo que reducen los costos de operación y mantenimiento.

A lo largo de este documento, se explicarán detalladamente los fundamentos matemáticos que sustentan el modelo, así como las decisiones de diseño adoptadas en función de las propuestas evaluadas. Se presentará la función objetivo, centrada en la minimización de los costos operativos totales, junto con las restricciones que aseguran que las soluciones propuestas no solo sean eficientes, sino que también cumplan con los requisitos operativos y sean viables para la expansión futura de Seneca Libre. Este enfoque permitirá que la empresa afronte los retos logísticos derivados de su crecimiento y mantenga su liderazgo en el competitivo mercado del comercio electrónico.

## Modelo General

### Conjuntos

$C$ : Clientes de la ciudad

$D$ : Depots de Seneca Libre

$V$ : Vehículos de Seneca Libre

$N$ : Todos los Nodos de la ciudad

### Parámetros

$A_{ij}$ : Representa la matriz de distancias entre cada punto de la ciudad

(clientes, depots)

$Dur_{ij}$ : Representa la matriz de tiempos entre los puntos de la ciudad (clientes, depots)

$Adr_{ij}$ : Representa la matriz de distancias aéreas entre cada punto de la ciudad

(clientes, depots)

$D_i^k$ : Representa la demanda del cliente  $i$  del producto  $k$

$T_i$ : Representa el tipo del vehículo  $i$

$CA_i$ : Representa la capacidad del vehículo

$R_i$ : Distancia máxima que puede recorrer el vehículo  $i$

$TF_i$ : Costo por kilómetro del tipo de de vehículo  $i$  (Usado para C total)

$TT_i$ : Costo por minuto de operación del tipo de vehículo  $i$  (Usado para C tiempo)

$CM_i$ : Costo por mantenimiento del tipo de vehículo  $i$

$CRC_i$ : Costo de recarga de combustible del tipo de vehículo  $i$

$TR_i$ : Tiempo para recargar 10% del tipo de vehículo  $i$

$VP_i$ : Velocidad promedio del tipo de vehículo  $i$  (Usado para C tiempo)

$EC_i$ : Eficiencia del consumo de combustible del tipo de vehículo  $i$  (Gasolina y Electricidad)

### Variable de decisión

$x_{ij}^k$ : Si el vehículo  $k$  va del punto  $i$  al punto  $j$  **Binary**

$W_i$ : Cantidad de peso que lleva el vehículo  $i$  **NonNegativeReal**

$u_{ik}$ : Representa posiciones secuenciales de las localidades en la ruta de cada equipo para evitar subtours. **NonNegativeReal**

### Función Objetivo

Nuestra función objetivo es minimizar el costo total de la operación diaria de Seneca Libre:

$$\begin{aligned} C_{total} &= \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} TF_k * \begin{cases} \frac{A_{ij}}{1000}, & \text{si } T_k \neq Drone \\ Adr_{ij}, & \text{si } T_k = Drone \end{cases} * x_{ij}^k \\ C_{tiempo} &= \sum_k \sum_i \sum_j TT_k * \begin{cases} \frac{A_{ij}}{1000} * \frac{60}{VP_k}, & \text{si } T_k = Drone \\ \frac{Dur_{ij}}{60}, & \text{si } T_k \neq Drone \end{cases} * x_{ij}^k \\ C_{carga} &= \sum_{i \in K} W_i * 500 \\ C_{mantenimiento} &= \sum_{k \in K} CM_k * \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} x_{ij}^k \\ CostoOperativoTotal(i) &= C_{total_i} + C_{tiempo_i} + C_{carga_i} + C_{mantenimiento} \\ Min(z) &= CostoOperativoTotal(i) \end{aligned}$$

### Restricciones

#### 1. Salida desde un depósito:

Cada vehículo puede salir de un depósito de la ciudad.

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in N} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall k \in V$$

#### 2. Regreso al depósito de origen

La misma cantidad de vehículos que llegan deben ser la misma cantidad que los que salen.

$$\sum_{i \mid i \in D} \sum_j^N x_{ji}^k = \sum_{i \mid i \in D} \sum_j^N x_{ij}^k \quad \forall k \in V$$

### 3. Regreso al mismo Depósito (Opcional)

Si se desea, se puede restringir que el vehículo tiene que volver al mismo punto de partida

$$\sum_{i \mid i \in D} \sum_j^N x_{ji}^k = \sum_{i \mid i \in D} \sum_j^N x_{ij}^k \quad \forall k \in K$$

### 4. Flujo correcto entre nodos.

Para garantizar el flujo correcto de los vehículos. Es necesario que toda localidad a la que se llegue sea también abandonada, para así seguir con el recorrido.

$$\sum_{j \mid j \neq i}^N X_{ij}^k = \sum_{j=0 \mid j \neq i}^N X_{ji}^k \quad \forall k \in V, \forall i \in N \mid i \notin D$$

### 5. Restricción MTZ para prevenir subtours

Al querer tener rutas óptimas. No queremos desperdiciar recursos en posibles ciclos dentro de los recorridos. Ya que esto aumentaría el costo por distancia.

$$u_{ij} - u_{jk} + (n - 1) * x_{ij}^k \leq n - 2$$

$$\forall k \in V, \forall i \in N \mid i \neq j \wedge i \notin D, \forall j \in N \mid j \notin D$$

### 6. Capacidad Máxima de Carga

La capacidad que lleve cada vehículo no debe superar su capacidad máxima de carga

$$W_i \leq CA_i \quad \forall i \in V$$

### 7. Demanda de los clientes

Se debe cumplir que cada cliente reciba lo que pide.

$$\sum_k^V \sum_j^N x_{ji}^k = 1 \quad \forall i \in C$$

### 8. Capacidad y Demanda

Los vehículos tienen que llevar la cantidad necesaria para cumplir con la demanda de los clientes que visita

$$W_k = \sum_i^C D_i * \sum_j^N X_{ij}^k \quad \forall k \in V$$

## 9. Distancia máxima (Rango) del vehículo

Cada vehículo no puede hacer un recorrido de mayor distancia al rango máximo que tiene.

$$\sum_i^N \sum_j^N \begin{cases} \frac{A_{ij}}{1000}, & \text{si } T_k \neq Drone \\ Adr_{ij}, & \text{si } T_k = Drone \end{cases} * x_{ij}^k \leq R_k, \quad \forall k \in V$$

## Diseño e Implementación de Casos

### Caso 1

En el primer caso se busca tener una solución factible al modelo y datos propuestos. Es importante resaltar que se realizó la prueba con el archivo de Clients.csv que contenía la información de 24 clientes, Depots.csv, que tenía la información de 12 depósitos y Vehicles.csv, que tenía la información de 12 vehículos de tipo mixto.

Los resultados a continuación presentados son después de una hora de ejecución

#### Archivo Rutas

El archivo de rutas se encuentra en /case\_1\_base/results/reporte\_rutas.csv

#### Valor de la Función Objetivo

Para este caso, el valor de la función objetivo obtenido en 1 hora fue de \$760.509,80 COP. Esto es el costo óptimo de funcionamiento diario con los datos usados.

Según los resultados, se puede ver que solo se usan 7 de los 12 vehículos: 3 EV y 4 drones.

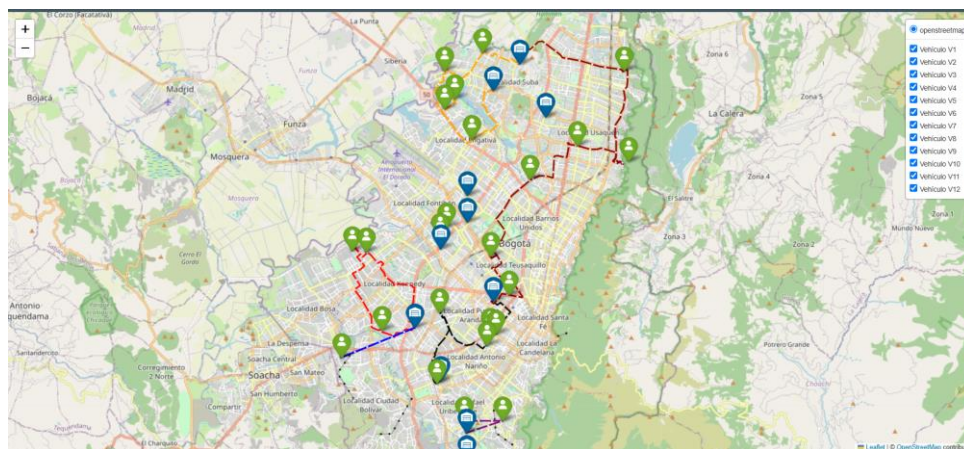
Las distancias y pesos transportados respectivamente son:

Distancias totales recorridas:	Pesos totales transportados:
Vehículo V1: 0.00 km	Vehículo V1: 0.00 kg
Vehículo V2: 0.00 km	Vehículo V2: 0.00 kg
Vehículo V3: 0.00 km	Vehículo V3: 0.00 kg
Vehículo V4: 0.00 km	Vehículo V4: 0.00 kg
Vehículo V5: 19.60 km	Vehículo V5: 69.00 kg
Vehículo V6: 14.92 km	Vehículo V6: 81.00 kg
Vehículo V7: 38.23 km	Vehículo V7: 96.00 kg
Vehículo V8: 0.00 km	Vehículo V8: 0.00 kg
Vehículo V9: 18.59 km	Vehículo V9: 60.00 kg
Vehículo V10: 9.51 km	Vehículo V10: 17.00 kg
Vehículo V11: 2.77 km	Vehículo V11: 29.00 kg
Vehículo V12: 5.37 km	Vehículo V12: 25.00 kg

El archivo de resultados se puede encontrar en  
/case\_1\_base/results/reporte\_resultados.txt

## Visualización de Rutas

Para la visualización se usó la librería de Folium, que nos permite ver tanto las rutas de los vehículos terrestres como de los aéreos. Asimismo, si se abre el archivo HTML. Se puede ver el movimiento de la línea punteada. La cual indica hacia que sentido se debe realizar la ruta.



Además, en la parte superior derecha se disponen filtros para ver la ruta de cada vehículo.

El mapa se puede encontrar en /case\_1\_base/results/mapa\_rutas.html

## Informe pdf

En este informe podrá visualizar el costo total operativo, las distancias recorridas por cada vehículo, los pesos transportados por vehículo y las rutas asignadas con sus correspondientes enlaces a Google Maps. Además, se presentan tanto las rutas punto a punto como la ruta completa con todas las paradas, facilitando así la planificación y orientación para los conductores.



## Informe de Rutas

### Consultores:

- Santiago Navarrete
- Luis Ruiz
- Andrea Lucia Galindo

**Costo total operativo: 760509.80 COP**

### Distancias totales recorridas:

Vehículo	Distancia (km)
V1	0.00 km
V2	0.00 km
V3	0.00 km
V4	0.00 km
V5	19.60 km
V6	14.92 km
V7	38.23 km
V8	0.00 km
V9	18.59 km
V10	9.51 km
V11	2.77 km
V12	5.37 km

El informe completo se puede encontrar en [/case\\_1\\_base /results/informe.pdf](/case_1_base/results/informe.pdf)

## Análisis de Resultados

En relación con las rutas y los tipos de vehículos utilizados, se destaca que los drones son ideales para cubrir distancias cortas entre depósitos y clientes. Su capacidad para moverse de manera eficiente en trayectos cortos los convierte en una opción económica y rápida en este tipo de escenarios. Por otro lado, los vehículos eléctricos (EV) demostraron ser óptimos para rutas más largas, gracias a su mayor rango de operación y menores costos asociados al consumo de energía.

Adicionalmente, se observa que algunos vehículos regresan al depósito de origen, mientras que otros finalizan sus recorridos en diferentes depósitos de la ciudad. Esta flexibilidad en la planificación elimina el gasto innecesario de forzar un retorno al depósito inicial, lo que contribuye significativamente a la optimización de los costos operativos.

Como parte del análisis, se generó un reporte en formato PDF dirigido a los jefes operativos de Seneca-Libre. Este reporte detalla las rutas asignadas a cada vehículo, el peso que debe transportar y un enlace a la ruta optimizada en Google Maps. Esto facilita la coordinación y comunicación con los conductores, permitiendo una implementación práctica y eficiente del modelo en las operaciones diarias.

(ADJUNTAR SS)

## Caso 2

En el segundo caso se busca tener una solución óptima al modelo y datos propuestos. Es importante resaltar que se realizó la prueba con el archivo de Clients.csv, que tenía la información de 30 clientes, Depots.csv, que tenía la información de 12 depósitos y Vehicles.csv, que tenía la información de 6 vehículos de tipos mixto.

Los resultados a continuación presentados son después de una hora de ejecución

### Archivo Rutas

El archivo de rutas se encuentra en /case\_2\_cost/results/reporte\_rutas.csv

### Valor de la Función Objetivo

Para este caso, el valor de la función objetivo obtenido en 1 hora fue de \$691.456,59 COP. Esto es el costo óptimo de funcionamiento diario con los datos usados.

Según los resultados, se puede ver que solo se usan 4 de los 6 vehículos: 2 EV y 2 drones.

Las distancias y pesos transportados respectivamente son:

Distancias totales recorridas:	Pesos totales transportados:
Vehículo V1: 0.00 km	Vehículo V1: -0.00 kg
Vehículo V2: 0.00 km	Vehículo V2: -0.00 kg
Vehículo V3: 41.67 km	Vehículo V3: 88.00 kg
Vehículo V4: 60.16 km	Vehículo V4: 108.00 kg
Vehículo V5: 14.32 km	Vehículo V5: 18.00 kg
Vehículo V6: 10.33 km	Vehículo V6: 18.00 kg

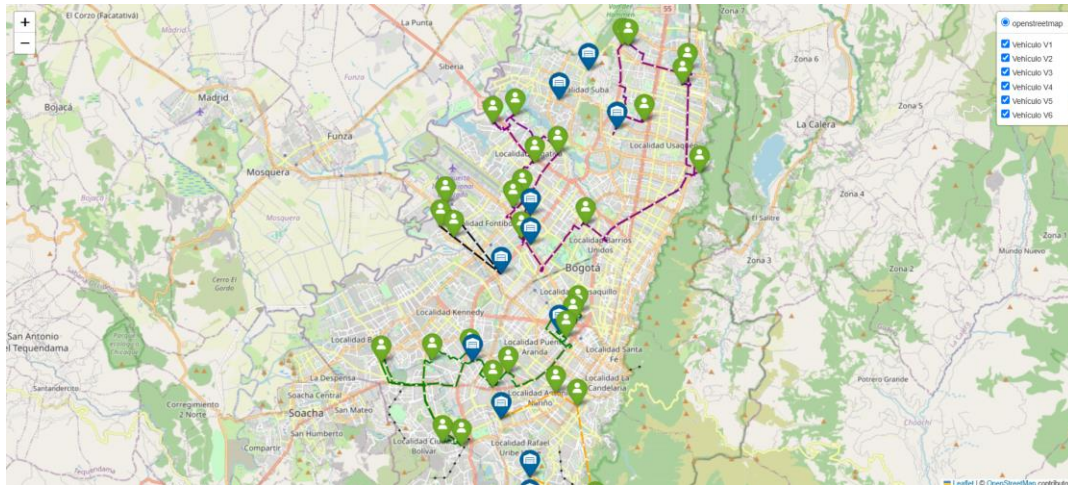
El archivo de resultados se puede encontrar en  
/case\_2\_cost/results/reporte\_resultados.txt

### Visualización de Rutas

Para la visualización se usó la librería de Folium, que nos permite ver tanto las rutas de los vehículos terrestres como de los aéreos. Asimismo, si se abre el archivo HTML.



Se puede ver el movimiento de la línea punteada. La cual indica hacia que sentido se debe realizar la ruta.



Además, en la parte superior derecha se disponen filtros para ver la ruta de cada vehículo.

El mapa se puede encontrar en [/case\\_2\\_cost/results/mapa\\_rutas.html](/case_2_cost/results/mapa_rutas.html)

### Informe pdf

En este informe podrá visualizar el costo total operativo, las distancias recorridas por cada vehículo, los pesos transportados por vehículo y las rutas asignadas con sus correspondientes enlaces a Google Maps. Además, se presentan tanto las rutas punto a punto como la ruta completa con todas las paradas, facilitando así la planificación y orientación para los conductores.



## Informe de Rutas

### Consultores:

- Santiago Navarrete
- Luis Ruiz
- Andrea Lucia Galindo

**Costo total operativo: 691456.59 COP**

### Distancias totales recorridas:

Vehículo	Distancia (km)
V1	0.00 km
V2	0.00 km
V3	41.67 km
V4	60.16 km
V5	14.32 km
V6	10.33 km

### Pesos totales transportados:

Vehículo	Peso (kg)
V1	-0.00 kg
V2	-0.00 kg
V3	88.00 kg
V4	108.00 kg
V5	18.00 kg

El informe completo se puede encontrar en [/case\\_2\\_cost /results/informe.pdf](/case_2_cost/results/informe.pdf)

## Análisis de Resultados

En este escenario, los resultados obtenidos reflejan una optimización aún más eficiente en los costos operativos, alcanzando un total de 691,456.59 COP. Esto se logra mediante una asignación estratégica de rutas que maximiza la capacidad de los vehículos disponibles.

Se observa que algunos vehículos permanecen inactivos, lo que indica que su uso no era necesario para cumplir con las demandas de los clientes, evitando así costos adicionales. Por otro lado, los vehículos asignados cumplen con rutas bien definidas, donde se prioriza la eficiencia tanto en la distancia recorrida como en el peso transportado.

Los vehículos con mayores capacidades, como los eléctricos, fueron seleccionados para cubrir las rutas más largas y con mayores volúmenes de carga, mientras que los drones y otros vehículos más pequeños se utilizaron en trayectos cortos y

específicos. Este enfoque evidencia la efectividad del modelo para equilibrar el uso de recursos y minimizar los costos asociados.

El análisis de las distancias y cargas totales transportadas resalta cómo se optimizó el sistema para adaptarse a las necesidades operativas. Además, el modelo permitió asignar las entregas de manera estratégica, eliminando redundancias y maximizando la utilización de cada vehículo activo en función de su capacidad y alcance. Esto resulta en una operación más sostenible y rentable para Seneca-Libre.

Además, incluimos un reporte en PDF dirigido a los jefes operativos de Seneca-Libre, el cual tiene las rutas que cada vehículo tiene que hacer, cuánto peso debe cargar. Y la ruta en Google maps para que sea compartida con los conductores de cada vehículo.

### Caso 3

En el tercer caso se busca tener una solución factible al modelo y datos propuestos, añadiendo la restricción de que un depósito tiene capacidad de entrega limitada. Es importante resaltar que se realizó la prueba con el archivo de Clients.csv, el cual tiene la información de 9 clientes, Depots.csv, que tiene la información de 12 depósitos y Vehicles.csv, que tiene la información de 5 vehículos de tipos mixtos.

Los resultados a continuación presentados son después de una hora de ejecución

#### Adición Modelo

Para solucionar este caso, fue necesario añadir varias restricciones y variables auxiliares para tener en cuenta la nueva restricción.

#### Variables Auxiliares

$s_{kd}$ : Si el vehículo  $k$  está asignado al depósito  $d$  **Binary**

$WS_{kd}$ : Cantidad de peso que el vehículo  $k$  transporta al depósito  $d$

**NonNegativeReal**

#### Nuevas Restricciones

##### 1. Única Salida de Depósito

Cada vehículo solo puede estar asignado a un depósito a la vez

$$\sum_{d \in D} s_{kd} = 1, \forall k \in K$$

##### 2. Relacionar S y X

Asegura coherencia entre las variables objetivo

$$S_{kd} = \sum_{j \in I} x_{ij}^k, \forall k \in K, \forall d \in D$$

### 3. Linearización

Al no poder multiplicar variables objetivo, ya que el solver lo toma como si no fuera un problema lineal. Se deben linearizar las restricciones

$$\begin{aligned} WS_{kd} &\leq W_k, \forall k \in K, \forall d \in D \\ WS_{kd} &< CA_k * S_{kd}, \forall k \in K, \forall d \in D \\ WS_{kd} &\geq W_k - CA_k * (1 - S_{kd}), \forall k \in K, \forall d \in D \end{aligned}$$

### 4. Capacidad del depósito

Asegura que la carga total transportada desde un depósito no supere su capacidad máxima

$$\sum_{k \in K} WS_{kd} \leq Capacidad_d, \forall d \in D$$

## Archivo Rutas

El archivo de rutas se encuentra en `/case_3_supply_limits/results/reporte_rutas.csv`

## Valor de la Función Objetivo

Para este caso, el valor de la función objetivo obtenido en 1 hora fue de \$323.536,32 COP. Esto es el costo óptimo de funcionamiento diario con los datos usados. Según los resultados, se puede ver que solo se usan 5 de los 6 vehículos: 2 EV y 3 drones.

Las distancias y pesos transportados respectivamente son:

Distancias totales recorridas:	Pesos totales transportados:
Vehículo V1: 0.00 km	Vehículo V1: 0.00 kg
Vehículo V2: 24.56 km	Vehículo V2: 18.00 kg
Vehículo V3: 8.09 km	Vehículo V3: 15.00 kg
Vehículo V4: 12.60 km	Vehículo V4: 26.00 kg
Vehículo V5: 15.85 km	Vehículo V5: 22.00 kg
Vehículo V6: 3.76 km	Vehículo V6: 20.00 kg

El archivo de resultados se puede encontrar en `/case_3_supply_limits/results/reporte_resultados.txt`

## Visualización de Rutas

Para la visualización se usó la librería de Folium, que nos permite ver tanto las rutas de los vehículos terrestres como de los aéreos. Asimismo, si se abre el archivo HTML.

The map displays the urban area of Bogotá, Colombia, with several localities labeled, including El Corral (Pacatativá), Madrid, Funza, Mosquera, La Catedral, and Soacha. The routes of six vehicles are shown: V1 (blue), V2 (green), V3 (orange), V4 (red), V5 (purple), and V6 (brown). The routes are marked with colored lines and icons representing the vehicles. A legend in the top right corner identifies the vehicles by color and icon. The map also shows the Bogotá River and surrounding areas.

**Informe pdf**

En este informe podrá visualizar el costo total operativo, las distancias recorridas por cada vehículo, los pesos transportados por vehículo y las rutas asignadas con sus correspondientes enlaces a Google Maps. Además, se presentan tanto las rutas punto a punto como la ruta completa con todas las paradas, facilitando así la planificación y orientación para los conductores.

En este informe podrá visualizar el costo total operativo, las distancias recorridas por cada vehículo, los pesos transportados por vehículo y las rutas asignadas con sus correspondientes enlaces a Google Maps. Además, se presentan tanto las rutas punto a punto como la ruta completa con todas las paradas, facilitando así la planificación y orientación para los conductores.



## Informe de Rutas

### Consultores:

- Santiago Navarrete
- Luis Ruiz
- Andrea Lucia Galindo

**Costo total operativo: 323536.32 COP**

### Distancias totales recorridas:

Vehículo	Distancia (km)
V1	0.00 km
V2	24.56 km
V3	8.09 km
V4	12.60 km
V5	15.85 km
V6	3.76 km

### Pesos totales transportados:

Vehículo	Peso (kg)
V1	0.00 kg
V2	18.00 kg
V3	15.00 kg
V4	26.00 kg
V5	22.00 kg
V6	20.00 kg

El informe completo se puede encontrar en  
[/case\\_3\\_supply\\_limits/results/informe.pdf](/case_3_supply_limits/results/informe.pdf)

## Análisis de Resultados

En este tercer caso, la inclusión de una restricción que limita la capacidad de entrega de los depósitos permite analizar cómo el modelo responde a condiciones operativas más realistas. Con un costo total operativo de 323,536.32 COP, se observa una asignación efectiva de rutas y vehículos, manteniendo el cumplimiento de las demandas de los clientes dentro de las capacidades de los depósitos.

El modelo distribuye estratégicamente las entregas entre los vehículos disponibles, asegurándose de no exceder la capacidad máxima de cada depósito. Esto resulta en rutas más cortas y especializadas, optimizando el uso de los recursos y evitando

costos innecesarios. Por ejemplo, todos los vehículos cumplen con rutas específicas y bien delimitadas, con distancias que oscilan entre 3.76 km y 24.56 km, maximizando la eficiencia operativa.

Además, la asignación de pesos transportados refleja un equilibrio adecuado entre las capacidades de los vehículos y las restricciones de los depósitos. Los vehículos activos se utilizaron de manera eficiente, mientras que aquellos que no se necesitaban permanecieron inactivos, eliminando gastos innecesarios.

Esta configuración, que considera tanto las capacidades de los depósitos como la demanda de los clientes, demuestra la capacidad del modelo para adaptarse a diferentes restricciones, proporcionando soluciones factibles y rentables para operaciones logísticas complejas.

Además, incluimos un reporte en PDF dirigido a los jefes operativos de Seneca-Libre, el cual tiene las rutas que cada vehículo tiene que hacer, cuánto peso debe cargar. Y la ruta en Google maps para que sea compartida con los conductores de cada vehículo.

## **Caso 4**

En el cuarto caso se busca tener una solución factible al modelo y datos propuestos, añadiendo la restricción de que se tienen 3 tipos diferentes de productos. Es importante resaltar que se realizó la prueba con el archivo de Clients.csv, el cual tiene la información de 9 clientes, Depots.csv, que tiene la información de 12 depósitos y Vehicles.csv, que tiene la información de 5 vehículos de tipos mixtos.

Los resultados a continuación presentados son después de una hora de ejecución

### **Adición Modelo**

Para solucionar este caso, fue necesario cambiar varias restricciones y variables auxiliares para tener en cuenta la nueva restricción.

#### **Adición de Parámetros**

*$CP_{ij}$ : Representa la demanda de del cliente  $i$  del producto  $j$*

#### **Cambio Variables Auxiliares**

Fue necesario añadir una dimensión a la variable objetivo de peso. Pues ahora depende de cada producto.

$W_{ij}$ : Cantidad de peso que lleva el vehículo  $i$  del producto  $j$

$WS_{kdp}$ : Cantidad de peso que el vehículo  $k$  transporta al depósito  $d$  del producto  $p$

### Cambio Restricciones

#### 1. Capacidad Máxima de Carga

La capacidad que lleve cada vehículo no debe superar su capacidad máxima de carga

$$\sum_{j \in P} W_{ij} \leq CA_i \quad \forall i \in V$$

#### 2. Capacidad y Demanda

Los vehículos tienen que llevar la cantidad necesaria para cumplir con la demanda de los clientes que visita

$$W_{kp} = \sum_i^C (CP_{ip} * \sum_j^N X_{ij}^k), \quad \forall k \in V \quad \forall p \in CP$$

#### 3. Linearización

Al no poder multiplicar variables objetivo, ya que el solver lo toma como si no fuera un problema lineal. Se deben linearizar las restricciones

$$WS_{kdp} \leq W_{kp}, \quad \forall k \in K, \forall d \in D, \forall p \in CP$$

$$WS_{kdp} < CA_k * S_{kd}, \quad \forall k \in K, \forall d \in D, \forall p \in CP$$

$$WS_{kdp} \geq W_{kp} - CA_k * (1 - S_{kd}), \quad \forall k \in K, \forall d \in D, \forall p \in CP$$

### Archivo Rutas

El archivo de rutas se encuentra en /case\_4\_multi\_product/results/reporte\_rutas.csv

### Valor de la Función Objetivo

Para este caso, el valor de la función objetivo obtenido en 1 hora fue de \$242.484,77 COP. Esto es el costo óptimo de funcionamiento diario con los datos usados.

Según los resultados, se puede ver que solo se usan 4 de los 6 vehículos: 1 EV y 3 drones.

Las distancias y pesos transportados respectivamente son:



```

Distancias totales recorridas:
Vehículo V1: 0.00 km
Vehículo V2: 0.00 km
Vehículo V3: 17.55 km
Vehículo V4: 14.16 km
Vehículo V5: 15.75 km
Vehículo V6: 9.41 km

```

```

Vehículo V1:
  Producto A: 0.00 kg
  Producto B: 0.00 kg
  Producto C: 0.00 kg
Vehículo V2:
  Producto A: -0.00 kg
  Producto B: -0.00 kg
  Producto C: -0.00 kg

```

```

Vehículo V3:
  Producto A: 29.00 kg
  Producto B: 5.00 kg
  Producto C: 8.00 kg
Vehículo V4:
  Producto A: 21.00 kg
  Producto B: 2.00 kg
  Producto C: 5.00 kg

```

```

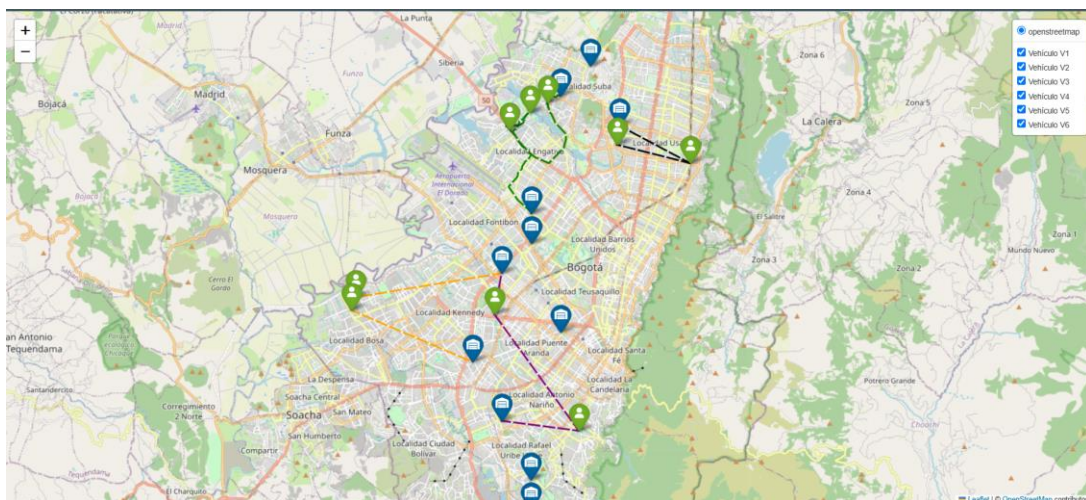
Vehículo V5:
  Producto A: 27.00 kg
  Producto B: 4.00 kg
  Producto C: 5.00 kg
Vehículo V6:
  Producto A: 22.00 kg
  Producto B: 4.00 kg
  Producto C: 5.00 kg

```

El archivo de resultados se puede encontrar en  
/case\_4\_multi\_product/results/reporte\_resultados.txt

## Visualización de Rutas

Para la visualización se usó la librería de Folium, que nos permite ver tanto las rutas de los vehículos terrestres como de los aéreos. Asimismo, si se abre el archivo HTML. Se puede ver el movimiento de la línea punteada. La cual indica hacia que sentido se debe realizar la ruta.



El mapa se puede encontrar en /case\_4\_multi\_product/results/mapa\_rutas.html

## Informe pdf

En este informe podrá visualizar el costo total operativo, las distancias recorridas por cada vehículo, los pesos transportados por vehículo y las rutas asignadas con sus correspondientes enlaces a Google Maps. Además, se presentan tanto las rutas punto a punto como la ruta completa con todas las paradas, facilitando así la planificación y orientación para los conductores.



## Informe de Rutas

### Consultores:

- Santiago Navarrete
- Luis Ruiz
- Andrea Lucia Galindo

**Costo total operativo: 242484.77 COP**

### Distancias totales recorridas:

Vehículo	Distancia (km)
V1	0.00 km
V2	0.00 km
V3	17.55 km
V4	14.16 km
V5	15.75 km
V6	9.41 km

### Pesos totales transportados por vehículo y producto:

Vehículo	Producto A (kg)	Producto B (kg)	Producto C (kg)
V1	0.00	0.00	0.00
V2	-0.00	-0.00	-0.00
V3	29.00	5.00	8.00
V4	21.00	2.00	5.00
V5	27.00	4.00	5.00
V6	22.00	4.00	5.00

El informe completo se puede encontrar en  
[/case\\_4\\_multi\\_product/results/informe.pdf](/case_4_multi_product/results/informe.pdf)

## Análisis de Resultados

En este cuarto caso, se incorporó la restricción de manejar tres tipos diferentes de productos, lo que añade complejidad al modelo al exigir una asignación adecuada de los recursos logísticos a las diferentes categorías. Con un costo operativo total de 242,484.77 COP, los resultados reflejan una optimización efectiva del modelo bajo estas condiciones.

La distribución de rutas muestra que cuatro de los cinco vehículos disponibles se emplearon para realizar entregas específicas, con distancias recorridas que varían entre 9.41 km y 17.55 km. Esto evidencia que el modelo asigna rutas más cortas, maximizando la eficiencia de los recursos mientras cumple con las demandas de los clientes.

La inclusión de la clasificación por tipo de producto resalta la capacidad del modelo para distribuir la carga de manera equilibrada entre los vehículos. Por ejemplo, cada vehículo activo transportó una combinación adecuada de productos A, B y C, asegurando que las capacidades y restricciones específicas de los vehículos se respetaran. Por otro lado, los vehículos no utilizados permanecieron inactivos, evitando costos adicionales innecesarios.

Este enfoque segmentado no solo optimiza el uso de los recursos, sino que también facilita la logística de manejo de productos diferenciados, permitiendo a la operación atender necesidades variadas sin sacrificar la eficiencia. La solución demuestra que el modelo puede adaptarse a escenarios con restricciones específicas, ofreciendo rutas factibles y rentables incluso bajo condiciones más complejas.

Además, incluimos un reporte en PDF dirigido a los jefes operativos de Seneca-Libre, el cual tiene las rutas que cada vehículo tiene que hacer, cuánto peso debe cargar. Y la ruta en Google maps para que sea compartida con los conductores de cada vehículo.

## **BONOS**

### **1. Visualización**

Teniendo en cuenta que el cliente objetivo de este proyecto. Para cada caso realizamos un mapa interactivo que muestra las rutas. Además, realizamos un reporte en PDF el cual se tiene los links de Google Maps de cada ruta (por recorrido y completa). Esto ya que queremos darle de una

manera sencilla al jefe de operaciones de Séneca-Libre las respuestas al proyecto.

## **2. Ganadores MonkeyType**

En la penúltima clase en dónde hicimos la competencia de MonkeyType, fuimos el grupo ganador por nuestra compañera Andrea Galindo.