

Proyecto - Etapa 2

Formulación del modelo matemático - Proyecto A

Formulación matemática

Definición de conjuntos

- $C = \text{conjunto de clientes}$
- $B = \text{conjunto de bodegas}$
- $P = \text{conjunto de puntos o lugares} \rightarrow C \cup B$
- $V = \text{Conjunto de vehículos}$

Definición de parámetros

- $Bc_i = \text{capacidad maxima de la bodega } i$
- $Cd_i = \text{demanda del cliente } i$
- $Q_i = \text{capacidad maxima del vehículo } i$
- $K_i = \text{rango operativo del vehículo } i \text{ (km)}, \text{ indica la distancia máxima que puede recorrer el vehículo } i, \text{ antes de necesitar combustible o mantenimiento.}$
- $lat_i = \text{latitud del lugar } i$
- $lon_i = \text{longitud del lugar } i$
- $d_{ij} = \text{distancia de un punto } i \text{ a un punto } j \text{ (km)}, \text{ esto se calcula por medio del preprocesamiento utilizando } lat_i \text{ y } lon_i$
- $P_f = \text{costo del combustible por litro}$
- $F_f = \text{tarifa de flete por km}$
- $Cm = \text{costo de mantenimiento por km}$
- $g = \text{litros de gasolina para recorrer 1km}$
- $P_g = \text{dinero necesario para recorrer 1km} = P_f \cdot g$

Definición de variables

La variable de decisión es la siguiente:

- $x_{ij}^k = \text{si el vehículo } k \text{ va del punto } i \text{ al punto } j \rightarrow x_{ij}^k \in \{0,1\}$

Las variables auxiliares son:

- $y_i^k = \text{Si el vehículo } k \text{ sale de la bodega } i \rightarrow y_i^k \in \{0,1\}$
- $u_i^k = \text{Carga acumulada al llegar al cliente } i \text{ usando el vehículo } k \rightarrow u_i^k \in \mathbb{Z}^+$

Restricciones

Cobertura de clientes: cada cliente debe ser visitado exactamente una vez por un único un vehículo.

$$\sum_{i \in P} x_{ij}^k = 1, \quad \forall j \in C, \forall k \in V$$

Conservación de flujo: si un vehículo visita un punto, también debe salir de allí. Esto aplica para todos los puntos.

$$\sum_{j \in P} x_{ij}^k - \sum_{j \in P} x_{ji}^k = 0, \quad \forall i \in C, \forall k \in V$$

Asignación de vehículos a bodegas: cada vehículo parte de una única bodega y de una bodega solo puede salir un vehículo

$$\sum_{i \in B} y_i^k = 1, \quad \forall k \in V$$

Punto de salida: si un vehículo parte de una bodega i , solo puede salir de ella una única vez y no puede partir de otras bodegas

$$\sum_{j \in C} x_{ij}^k = y_i^k, \quad \forall i \in B, \forall k \in V$$

Prohibición de viaje entre bodegas: los vehículos no deberían de hacer recorridos entre bodegas

$$x_{ij}^k = 0, \quad \forall i, j \in B, \forall k \in V, i \neq j$$

Capacidad de los vehículos: La suma de las demandas de los clientes asignados a la ruta de un vehículo no debe exceder su capacidad

$$\sum_{i \in C} Cd_i \cdot \sum_{i \in C} \sum_{j \in P} x_{ij}^k \leq Q_k, \quad \forall k \in V$$

Límite de rango operativo de los vehículos: la cantidad total de kilómetros recorridos por un vehículo no puede exceder el rango operativo de este

$$\sum_{i \in P} \sum_{j \in P} x_{ij}^k \cdot d_{ij} \leq K_v, \quad \forall v \in V$$

Capacidad de las bodegas: la demanda total atendida por un vehículo no puede superar la capacidad de la bodega de la que parte. Esto aplica para todos los vehículos

$$\sum_{i \in C} Cd_i \cdot \sum_{i \in C} \sum_{j \in P} x_{ij}^k \leq Bc_b + M(1 - y_b^k), \quad \forall b \in B, \forall k \in V$$

M es una constante lo suficientemente grande

Eliminación de subtours (MTZ): Un vehículo debe seguir una trayectoria en su recorrido, por lo que no puede “teletransportarse” entre puntos en ningún momento

$$u_i^k + Cd_j \leq u_j^k + Q_k \cdot (1 - x_{ij}^k), \quad \forall k \in V, \forall i, j \in C, i \neq j$$

Cotas para la satisfacción de la demanda: cada cliente debe recibir la cantidad demandada de unidades. Por tanto, el vehículo que pasa por este cliente debería contener al menos la cantidad solicitada por este.

$$Cd_i \leq u_i^k \leq Q_k, \quad \forall i \in C, \forall k \in V$$

Carga acumulada al llegar al cliente: La carga acumulada en el vehículo al llegar a un cliente, debe ser un número positivo o cero.

$$u_i^k \geq 0, \forall i \in C, \forall k \in V$$

Función Objetivo

Como el objetivo de la empresa es minimizar los costos operativos, la función objetivo diseñada es la siguiente

$$\min \sum_{i \in P} \sum_{j \in P} \sum_{k \in V} x_{ij}^k \cdot d_{ij} \cdot (P_g + F_t + Cm)$$

Con la función se busca minimizar el costo total de la operación; es decir, se busca minimizar la suma de los costos de mantenimiento por kilómetro recorrido, la tarifa de flete por kilómetro y la eficiencia de gasolina por kilómetro, multiplicado por los kilómetros recorridos por todos los vehículos de la compañía.

Preprocesamiento de Datos

Preprocesamiento de clientes, centros de distribución y vehículos

El proceso comienza cargando los tres archivos CSV (clients.csv, depots.csv y vehicles.csv) en objetos DataFrame de pandas. A continuación, los identificadores se transforman en cadenas de texto: en *df_depots* y *df_clients* se convierten las columnas DepotID y ClientID a tipo str, y en *df_vehicles* se genera una nueva lista con los identificadores de cada vehículo. Con estos DataFrame limpios, se extraen las coordenadas de cada depósito y de cada cliente como tuplas (longitud, latitud), almacenándolas en las variables *coord_depots* y

coord_clients, y luego se concatenan en la lista lugares, que agrupa todas las ubicaciones a modelar.

Por otro lado, para obtener la información de las características de cada elemento, se extrae de los DataFrame las capacidades y demandas asociadas a cada entidad —depósitos, clientes y vehículos— y se organizan diccionarios. En primer lugar, itera sobre los identificadores de depósitos y sus capacidades, construyendo el diccionario *depot_capacity* cuya clave es el código “CD” más el identificador original y cuyo valor es la capacidad correspondiente. A continuación, realiza un proceso análogo para los clientes, generando el diccionario *demand* con claves de la forma “C” más el identificador del cliente y valores equivalentes a la demanda. Finalmente, crea dos diccionarios para los vehículos: *vehicle_capacity*, que asocia cada nombre de vehículo (por ejemplo, V1, V2, ...) con su capacidad de carga máxima, y *vehicle_range*, que vincula ese mismo nombre de vehículo con su rango operativo en kilómetros. Estas cuatro estructuras de datos (*depot_capacity*, *demand*, *vehicle_capacity* y *vehicle_range*) luego son usados para construir los parámetros y las restricciones del modelo en Pyomo.

Cálculo de la matriz de distancia y costo

“Un camión pequeño con una carga útil de 16 toneladas consume aproximadamente 25 litros de gasóleo cada 100 km” (Romero, 2024), lo que equivale a 0.25 litros por kilómetro.

Se asume que todos los camiones de la empresa presentan esta misma tasa de consumo. Al 23 de marzo de 2025, el precio del galón de diésel en Bogotá es de \$10,842 y, dado que un galón equivale a 3.785 litros, el costo por litro es de 2,864 pesos.

Por lo tanto, el costo de combustible por kilómetro recorrido se calcula multiplicando 2,864 pesos por litro por 0.25 litros por kilómetro.

Además de lo mencionado, se considera que los datos proporcionados abarcan una parte de la ciudad, desde Usaquén en el norte hasta Los Mártires en el sur. En este tramo, la distancia promedio de un viaje se estima en 12,23 km.

Asimismo, el flete mínimo urbano por unidad es de \$22.500 por viaje (Red Nacional de Transportes, s.f.). Aunque existen factores adicionales, como el costo variable según el valor declarado de la mercancía, para simplificar el cálculo se asumirá una tarifa fija de \$22.500 / 12,23 km. \$1.839,74 por km.

Por último, según el ministerio de transporte (2020) el costo por km de Mantenimiento y reparaciones es de \$476,36.

$$\left(2864 \frac{\text{pesos}}{\text{litro}} \times 0.25 \frac{\text{litro}}{\text{km}}\right) + 1839.74 \frac{\text{pesos}}{\text{km}} + 476.36 \frac{\text{pesos}}{\text{km}} = 3031,36 \frac{\text{pesos}}{\text{km}}$$

Para el cálculo de las distancias y los costos de cada viaje se utilizó el dato de pesos por kilómetro recién mencionado y se construyeron dos diccionarios: *cost* y *distance*, que almacenarán los costos y distancias entre cada par de nodos. Para obtener estos valores, se realiza una iteración sobre todos los pares de nodos (origen, destino). Si los nodos son distintos, se hace una solicitud a la API de openrouteservice, la cual devuelve una matriz de distancias entre todos los puntos especificados.

Cabe aclarar que esta API soporta por consulta el procesamiento de 50 lugares a la vez, por lo que para el caso en el que se tenían más lugares, la obtención de distancias se hizo por lotes. Estas distancias fueron guardadas en el archivo *distances_all.csv* con el fin de que este procedimiento no tuviese que hacerse otra vez, lo que permitió ahorrar tiempo en los futuros preprocesamientos de datos.

Descripción de la implementación

En primer lugar, se definen los conjuntos de depósitos (*D*), clientes (*C*), vehículos (*V*) y nodos totales ($N = D \cup C$) en Pyomo, junto con los parámetros $cost[i,j]$ y $distance[i,j]$ obtenidos de las estructuras de datos creadas en el preprocesamiento de datos.

A continuación, se plantean las variables binarias $x[\nu, i, j]$ para el recorrido del vehículo ν entre nodos i y j , $y[\nu, d]$ para la asignación de cada vehículo a un único depósito, y una variable continua $u[\nu, i]$ para el esquema MTZ de eliminación de subtours. Por su parte, la función objetivo se basa en minimizar la suma de los costos de viaje, que realmente se traduce a minimizar la distancia total recorrida (pues tal y como fue modelado, el costo depende únicamente de los kilómetros recorridos).

Las restricciones aseguran la asignación exclusiva de un depósito por vehículo, inicio de ruta condicionado a dicha asignación, conservación de flujo en clientes, prohibición de viajes entre depósitos, visita única a cada cliente, límites de carga por vehículo, depósito y rango operativo de los camiones; satisfacción de la demanda de los clientes y rutas sin subtours.

El modelo elaborado en Pyomo se resuelve con el solver Gurobi y posteriormente se imprimen los resultados de cada caso, los cuales ilustran el costo total de la solución. Además, por cada vehículo, se imprime la ruta que siguió, los clientes a los que atendió, su uso del rango operativo, la distancia total que recorrió, la carga total que llevaba y cuánto de esta repartió a cada uno de los respectivos clientes.

Resultados

Caso 1

Resultados:

==== Costo óptimo total del plan de rutas: \$ 1074758.166

>>> Ruta del vehículo V1:

- Depósito de salida: CD1 (Capacidad depósito: 9999999)
- Capacidad del vehículo: 130 unidades
- Rango operativo del vehículo: 170 km
- Ruta: CD1 → C12 → CD1
- Carga total transportada: 12/130 unidades
- Distancia total recorrida: 31.890 km
- Uso del rango operativo: 18.8%
- Costo del transporte: \$ 96693.67
- Entregas entre nodos:
 - De CD1 → C12: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V2:

- Depósito de salida: CD1 (Capacidad depósito: 9999999)
- Capacidad del vehículo: 140 unidades
- Rango operativo del vehículo: 200 km
- Ruta: CD1 → C6 → C17 → C24 → C16 → C10 → C1 → C15 → C4 → C18 → CD1
- Carga total transportada: 135/140 unidades
- Distancia total recorrida: 77.140 km
- Uso del rango operativo: 38.6%
- Costo del transporte: \$ 233896.19
- Entregas entre nodos:
 - De CD1 → C6: 17 unidades
 - De C6 → C17: 25 unidades
 - De C17 → C24: 11 unidades
 - De C24 → C16: 10 unidades
 - De C16 → C10: 15 unidades
 - De C10 → C1: 13 unidades
 - De C1 → C15: 17 unidades
 - De C15 → C4: 15 unidades
 - De C4 → C18: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V3:

- Depósito de salida: CD1 (Capacidad depósito: 9999999)
- Capacidad del vehículo: 120 unidades
- Rango operativo del vehículo: 180 km
- Ruta: CD1 → C23 → CD1
- Carga total transportada: 15/120 unidades
- Distancia total recorrida: 23.580 km
- Uso del rango operativo: 13.1%
- Costo del transporte: \$ 71496.92
- Entregas entre nodos:
 - De CD1 → C23: 15 unidades

>>> Ruta del vehículo V4:

- Depósito de salida: CD1 (Capacidad depósito: 9999999)
- Capacidad del vehículo: 100 unidades
- Rango operativo del vehículo: 90 km
- Ruta: CD1 → C22 → C11 → C9 → C8 → C5 → CD1
- Carga total transportada: 95/100 unidades
- Distancia total recorrida: 73.130 km
- Uso del rango operativo: 81.3%
- Costo del transporte: \$ 221737.47
- Entregas entre nodos:
 - De CD1 → C22: 18 unidades
 - De C22 → C11: 17 unidades
 - De C11 → C9: 20 unidades
 - De C9 → C8: 20 unidades
 - De C8 → C5: 20 unidades

>>> Ruta del vehículo V5:

- Depósito de salida: CD1 (Capacidad depósito: 9999999)
- Capacidad del vehículo: 70 unidades
- Rango operativo del vehículo: 100 km
- Ruta: CD1 → C3 → CD1
- Carga total transportada: 12/70 unidades
- Distancia total recorrida: 26.130 km
- Uso del rango operativo: 26.1%
- Costo del transporte: \$ 79228.77
- Entregas entre nodos:
 - De CD1 → C3: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V6:

- Depósito de salida: CD1 (Capacidad depósito: 9999999)
- Capacidad del vehículo: 55 unidades
- Rango operativo del vehículo: 170 km
- Ruta: CD1 → C14 → CD1
- Carga total transportada: 15/55 unidades
- Distancia total recorrida: 21.570 km
- Uso del rango operativo: 12.7%
- Costo del transporte: \$ 65402.40
- Entregas entre nodos:
 - De CD1 → C14: 15 unidades

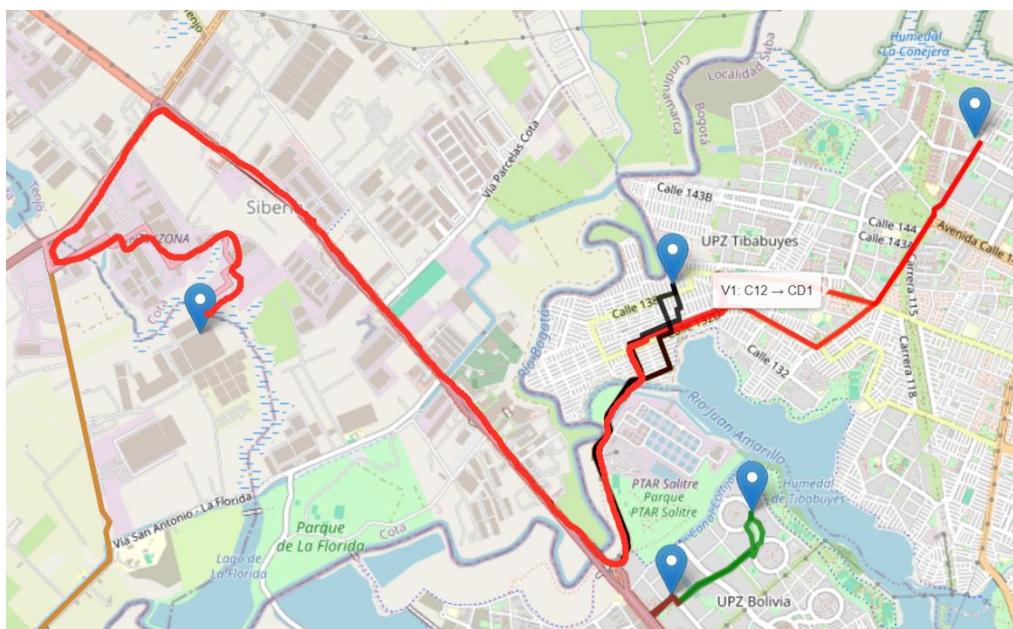
>>> Ruta del vehículo V7:

- Depósito de salida: CD1 (Capacidad depósito: 9999999)
- Capacidad del vehículo: 110 unidades
- Rango operativo del vehículo: 150 km
- Ruta: CD1 → C20 → CD1
- Carga total transportada: 15/110 unidades
- Distancia total recorrida: 26.220 km
- Uso del rango operativo: 17.5%
- Costo del transporte: \$ 79501.66
- Entregas entre nodos:
 - De CD1 → C20: 15 unidades

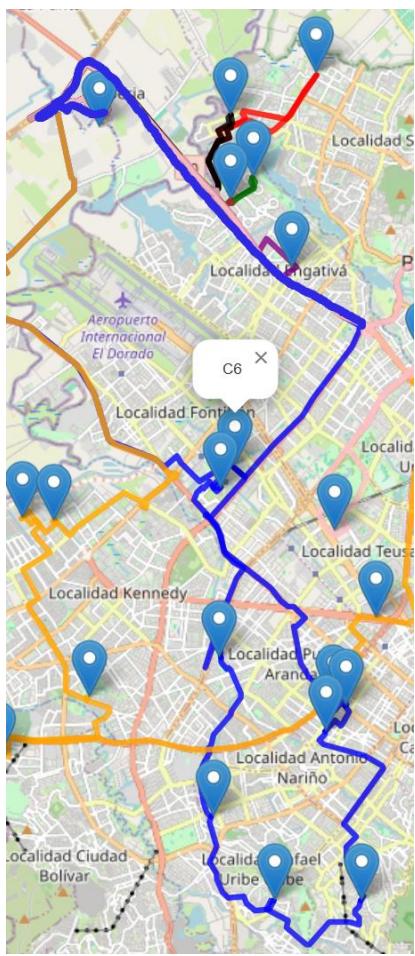
>>> Ruta del vehículo V8:

- Depósito de salida: CD1 (Capacidad depósito: 9999999)
- Capacidad del vehículo: 114 unidades
- Rango operativo del vehículo: 140 km
- Ruta: CD1 → C7 → C21 → C19 → C2 → C13 → CD1
- Carga total transportada: 78/114 unidades
- Distancia total recorrida: 74.800 km
- Uso del rango operativo: 53.4%
- Costo del transporte: \$ 226801.08
- Entregas entre nodos:
 - De CD1 → C7: 17 unidades
 - De C7 → C21: 14 unidades
 - De C21 → C19: 11 unidades
 - De C19 → C2: 15 unidades
 - De C2 → C13: 21 unidades

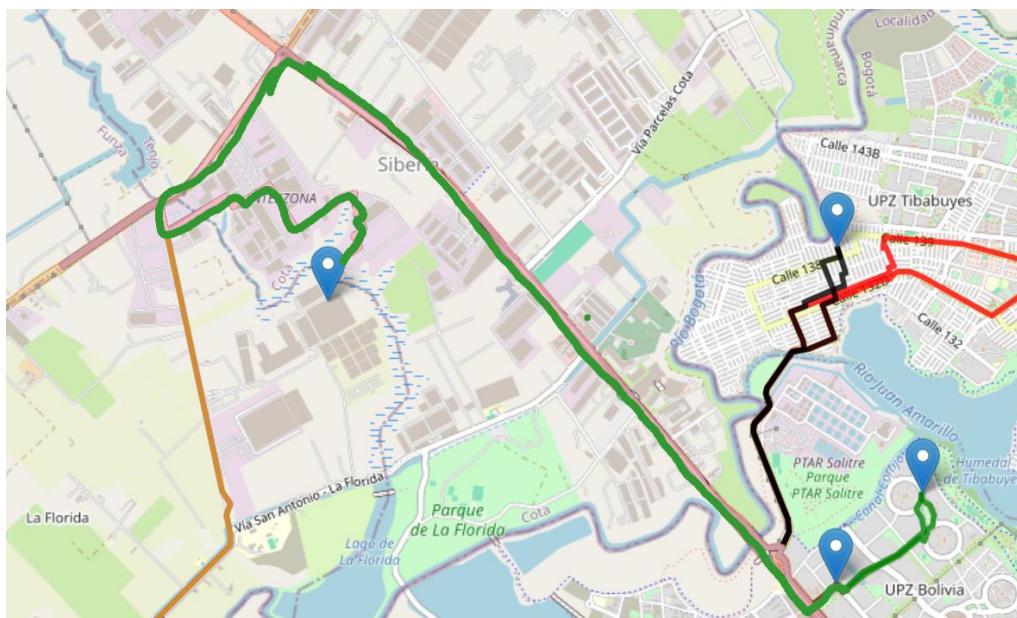
Vehículo 1:



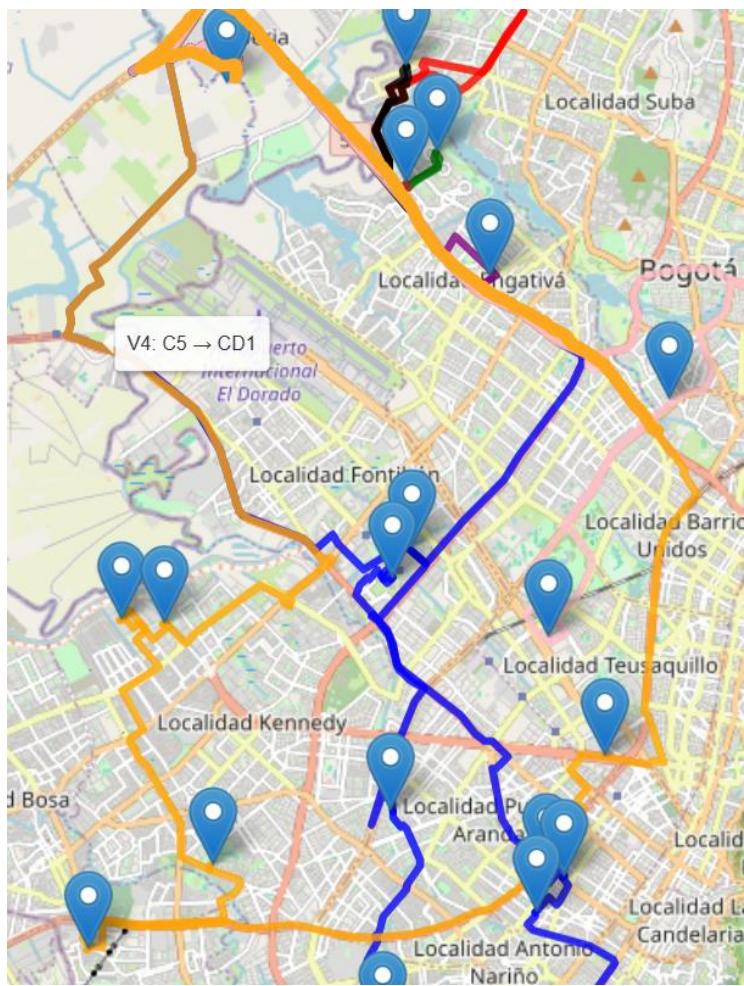
Vehículo 2:



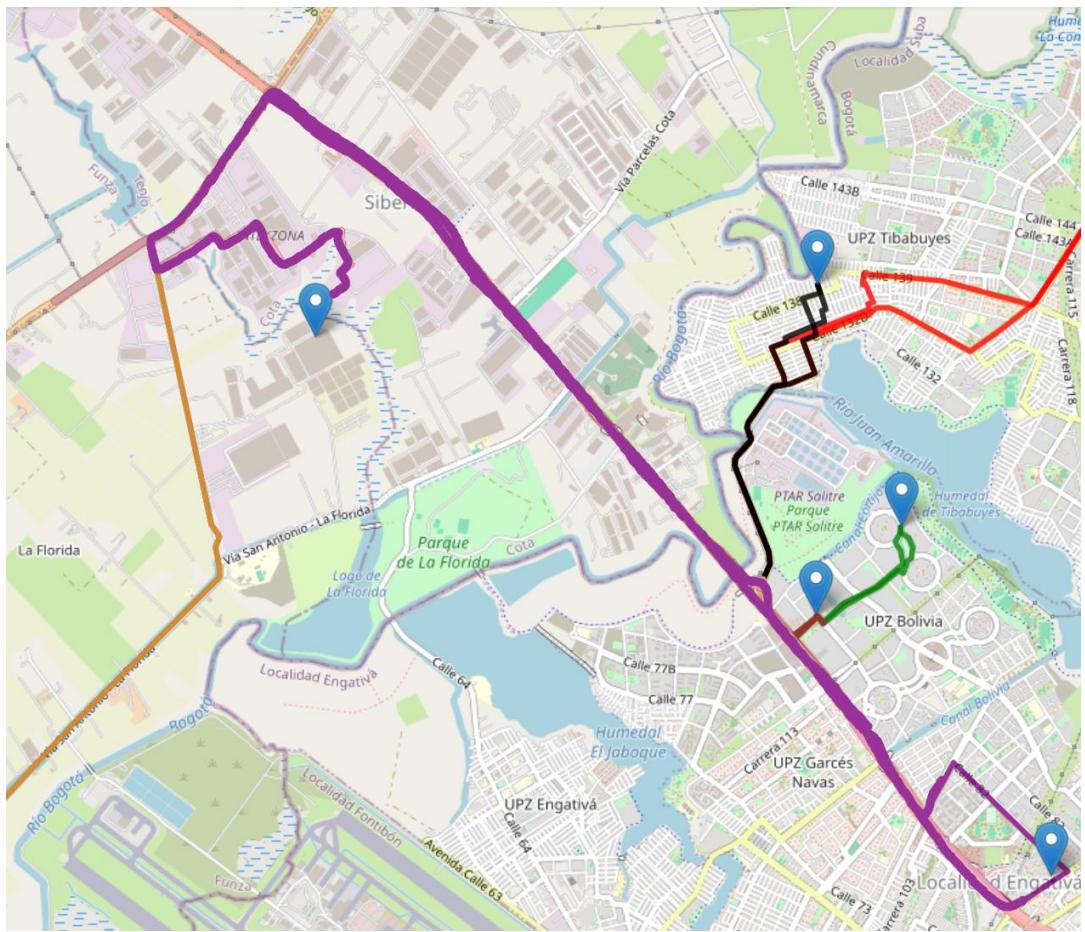
Vehículo 3:



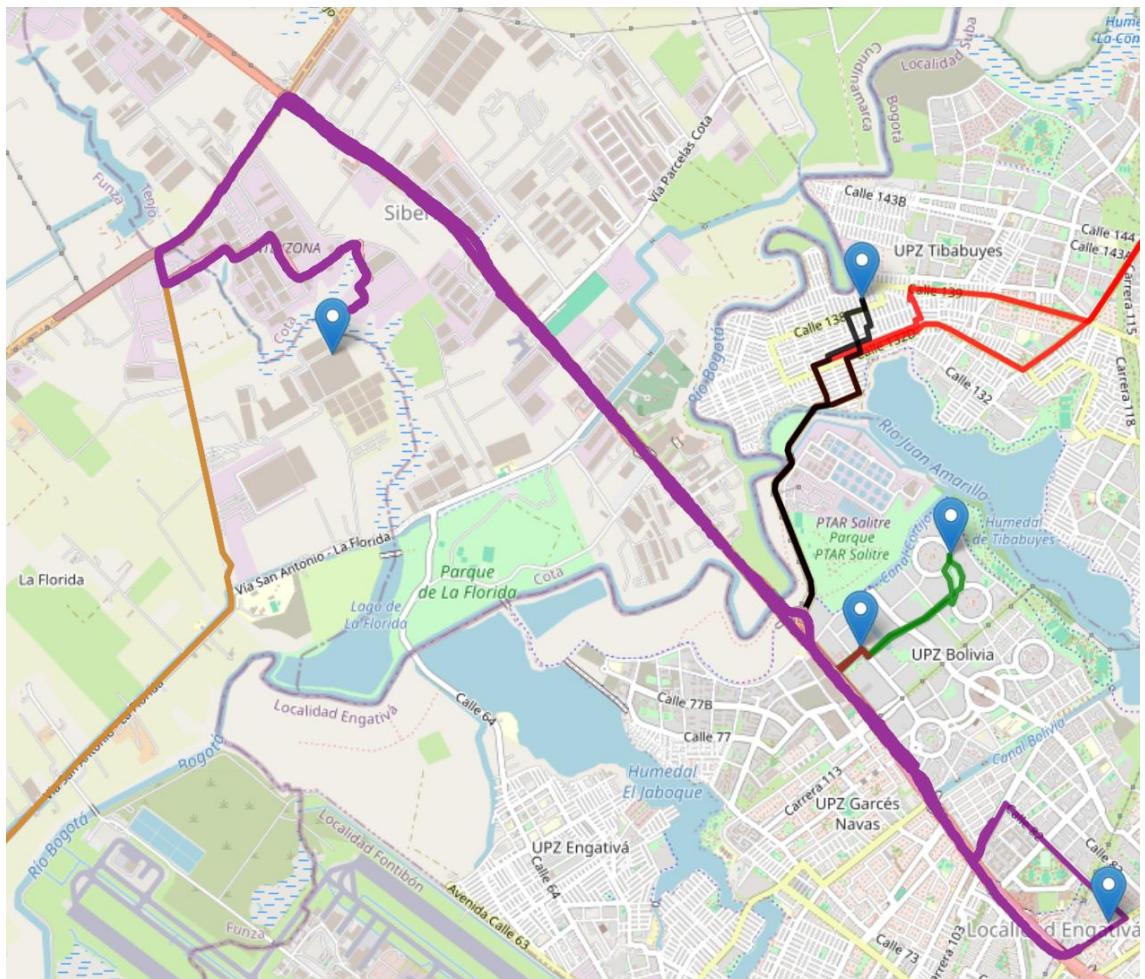
Vehículo 4:



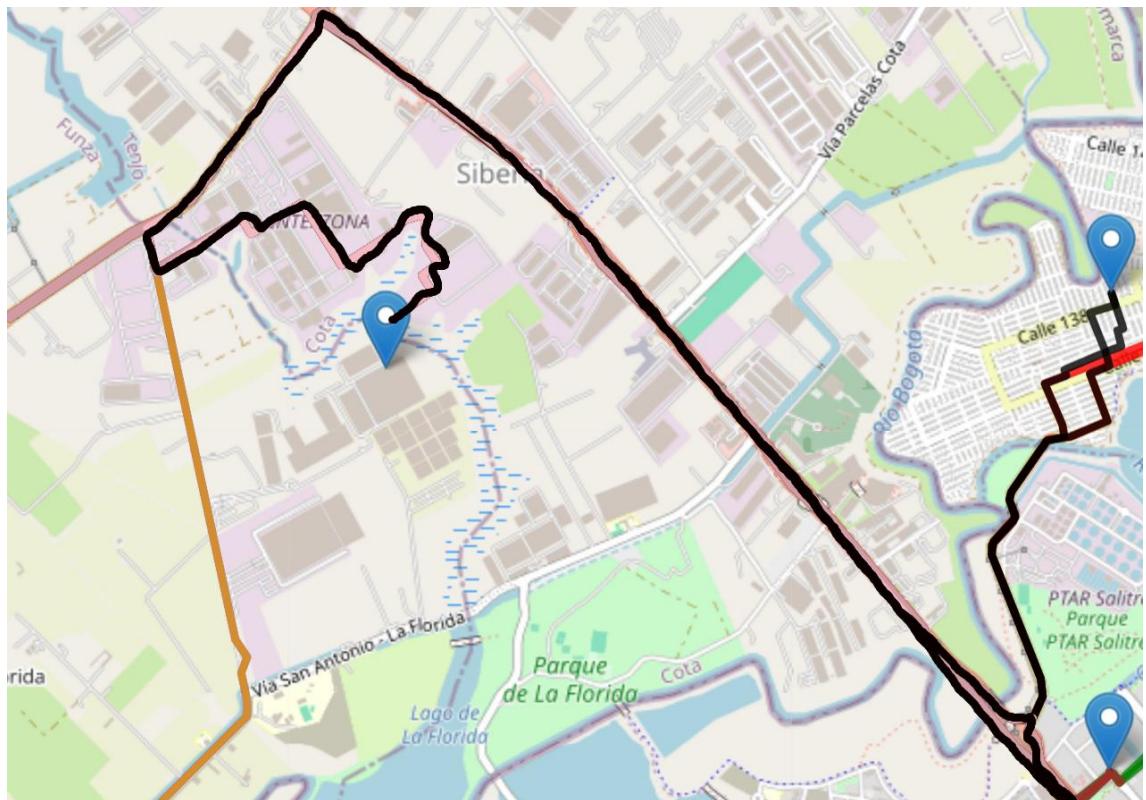
Vehículo 5:



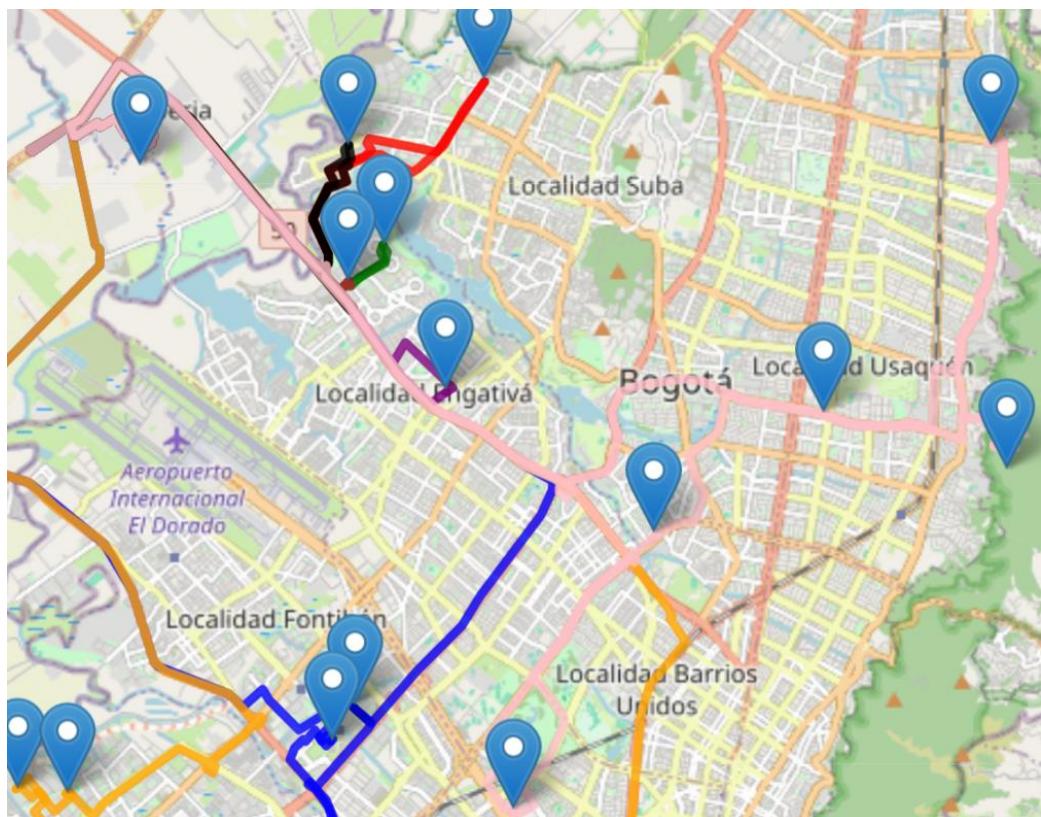
Vehículo 6:



Vehículo 7:



Vehículo 8:



Caso 2

===== Costo óptimo total del plan de rutas: \$ 284744.511

>>> Ruta del vehículo V1:

- Depósito de salida: CD9 (Capacidad depósito: 43)
- Capacidad del vehículo: 131.9211396722696 unidades
- Rango operativo del vehículo: 145.85207096486445 km
- Ruta: CD9 → C5 → CD9
- Carga total transportada: 5/131.9211396722696 unidades
- Distancia total recorrida: 17.540 km
- Uso del rango operativo: 12.0%
- Costo del transporte: \$ 53183.03
- Entregas entre nodos:
 - De CD9 → C5: 5 unidades

>>> Ruta del vehículo V2:

- Depósito de salida: CD9 (Capacidad depósito: 43)
- Capacidad del vehículo: 108.4356199315333 unidades
- Rango operativo del vehículo: 1304.605971281605 km
- Ruta: CD9 → C8 → C7 → C9 → CD7
- Carga total transportada: 37/108.4356199315333 unidades
- Distancia total recorrida: 30.460 km
- Uso del rango operativo: 2.3%
- Costo del transporte: \$ 92357.77
- Entregas entre nodos:
 - De CD9 → C8: 10 unidades
 - De C8 → C7: 12 unidades
 - De C7 → C9: 15 unidades

>>> Ruta del vehículo V3:

- Depósito de salida: CD5 (Capacidad depósito: 28)
- Capacidad del vehículo: 91.50425520531196 unidades
- Rango operativo del vehículo: 953.172608610164 km
- Ruta: CD5 → C4 → C1 → CD5
- Carga total transportada: 18/91.50425520531196 unidades
- Distancia total recorrida: 22.730 km
- Uso del rango operativo: 2.4%
- Costo del transporte: \$ 68919.63
- Entregas entre nodos:
 - De CD5 → C4: 6 unidades
 - De C4 → C1: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V4:

- Depósito de salida: CD9 (Capacidad depósito: 43)
- Capacidad del vehículo: 32.896064077536955 unidades
- Rango operativo del vehículo: 17.302304187458727 km
- Ruta: CD9 → C3 → CD9
- Carga total transportada: 15/32.896064077536955 unidades
- Distancia total recorrida: 2.560 km
- Uso del rango operativo: 14.8%
- Costo del transporte: \$ 7762.18

- Entregas entre nodos:
De CD9 → C3: 15 unidades

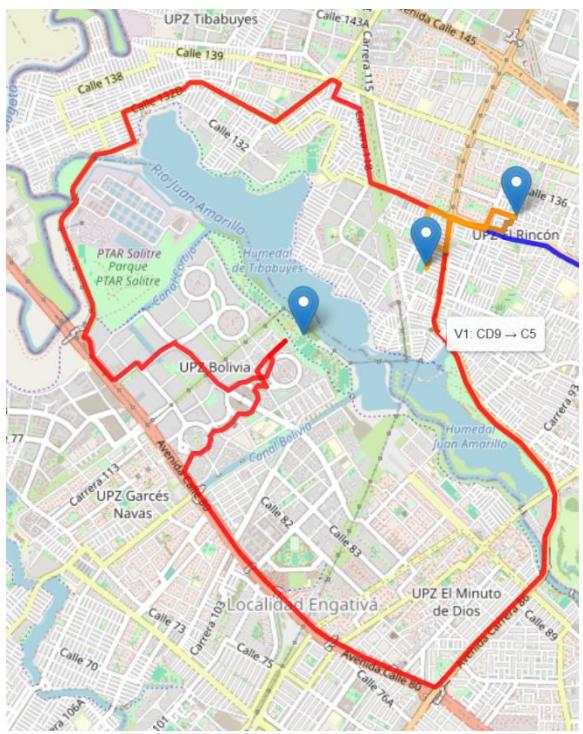
>>> Ruta del vehículo V5:

- Depósito de salida: CD11 (Capacidad depósito: 16)
- Capacidad del vehículo: 22.65262807032524 unidades
- Rango operativo del vehículo: 16.627680130757895 km
- Ruta: CD11 → C6 → CD6
- Carga total transportada: 11/22.65262807032524 unidades
- Distancia total recorrida: 15.070 km
- Uso del rango operativo: 90.6%
- Costo del transporte: \$ 45693.75
- Entregas entre nodos:
De CD11 → C6: 11 unidades

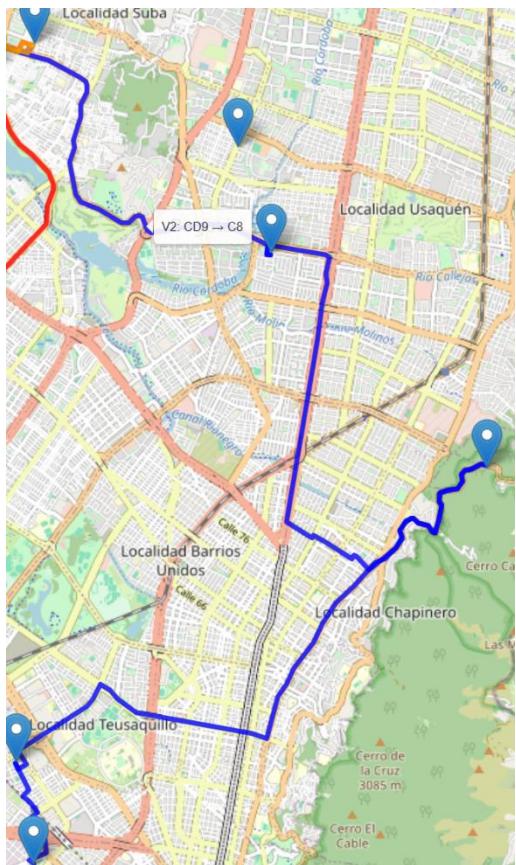
>>> Ruta del vehículo V6:

- Depósito de salida: CD5 (Capacidad depósito: 28)
- Capacidad del vehículo: 22.682911535937688 unidades
- Rango operativo del vehículo: 13.602810739289229 km
- Ruta: CD5 → C2 → CD5
- Carga total transportada: 15/22.682911535937688 unidades
- Distancia total recorrida: 5.550 km
- Uso del rango operativo: 40.8%
- Costo del transporte: \$ 16828.16
- Entregas entre nodos:
De CD5 → C2: 15 unidades

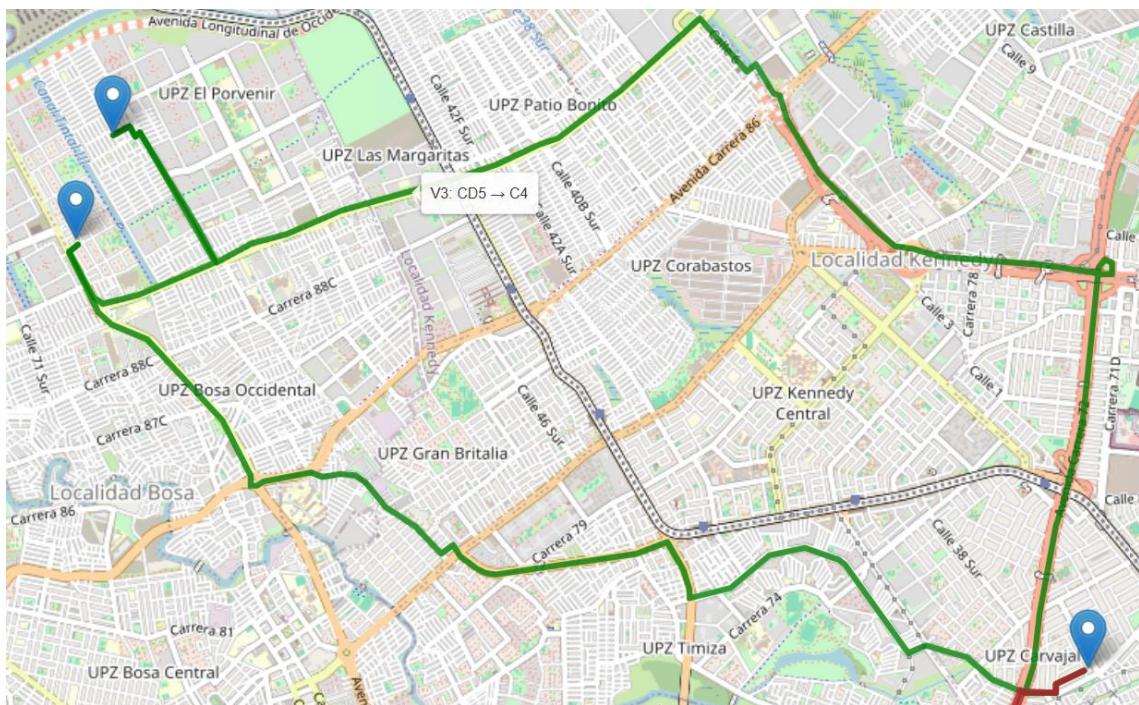
Vehículo 1:



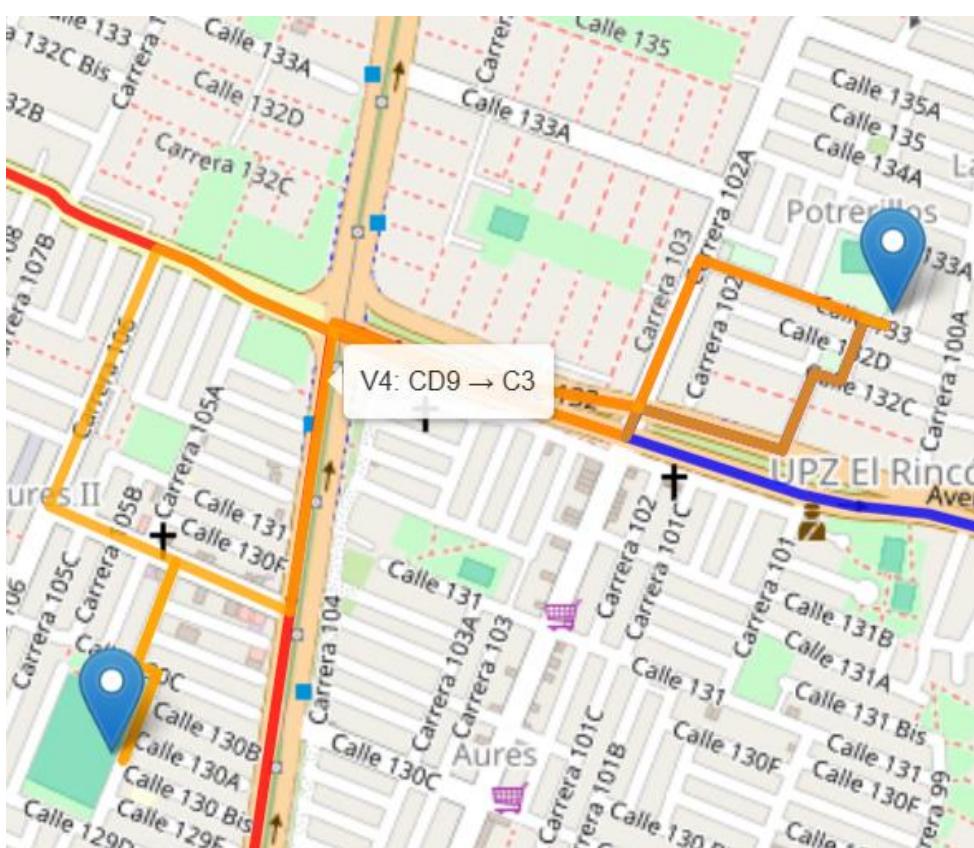
Vehículo 2:



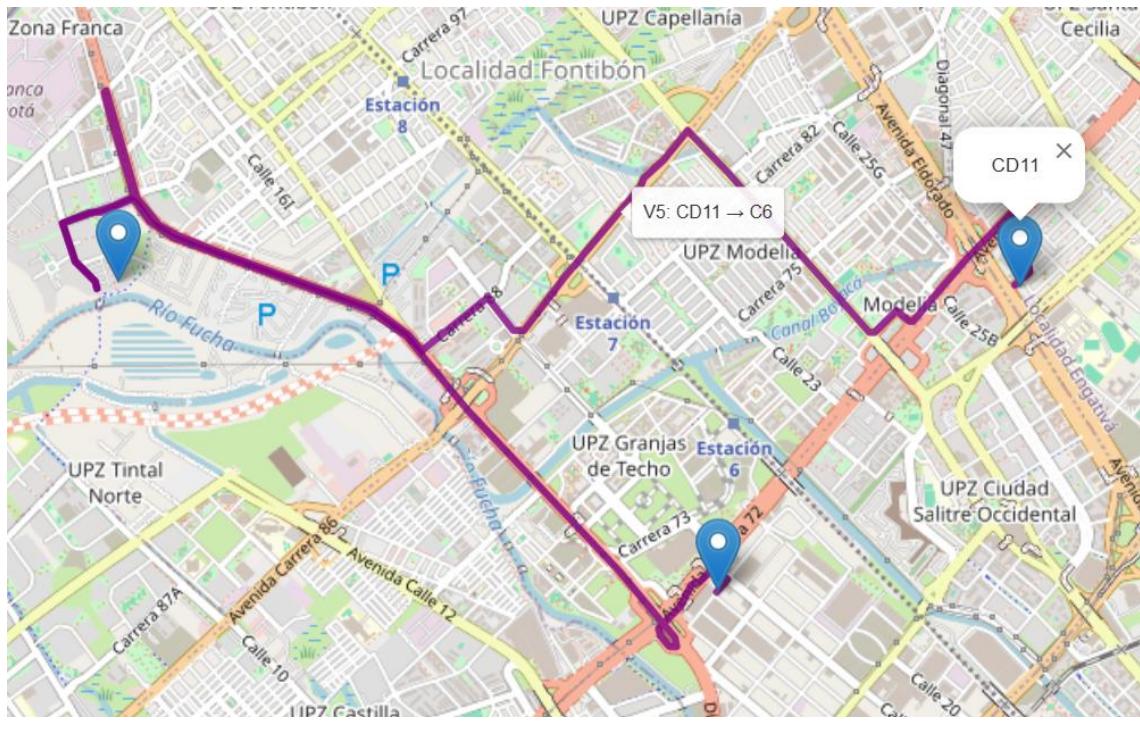
Vehículo 3:



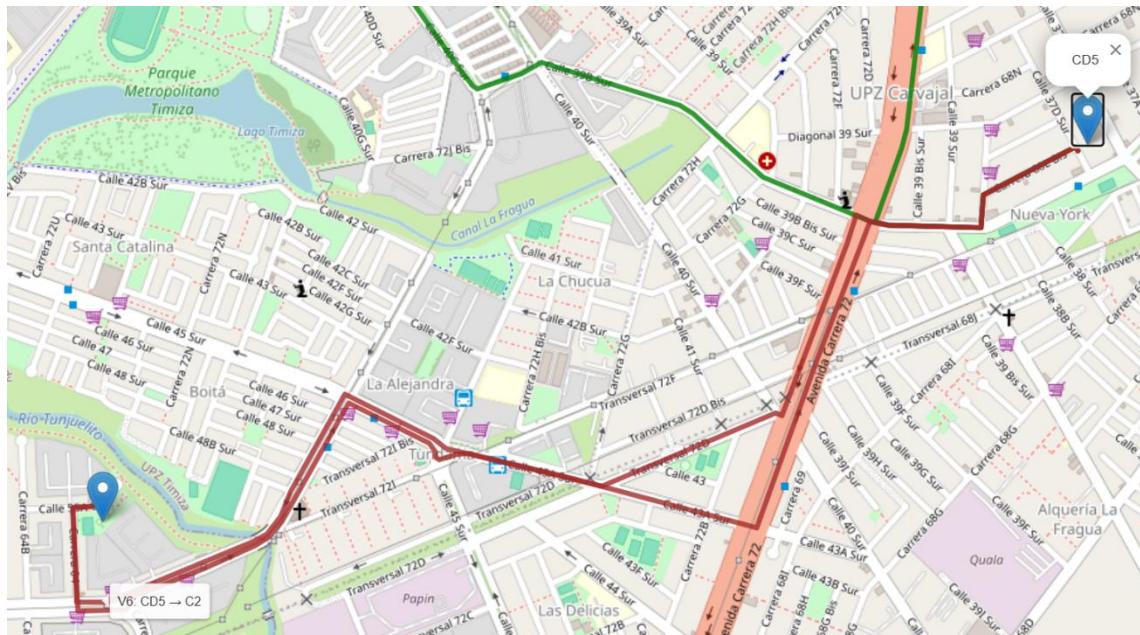
Vehículo 4:



Vehículo 5:



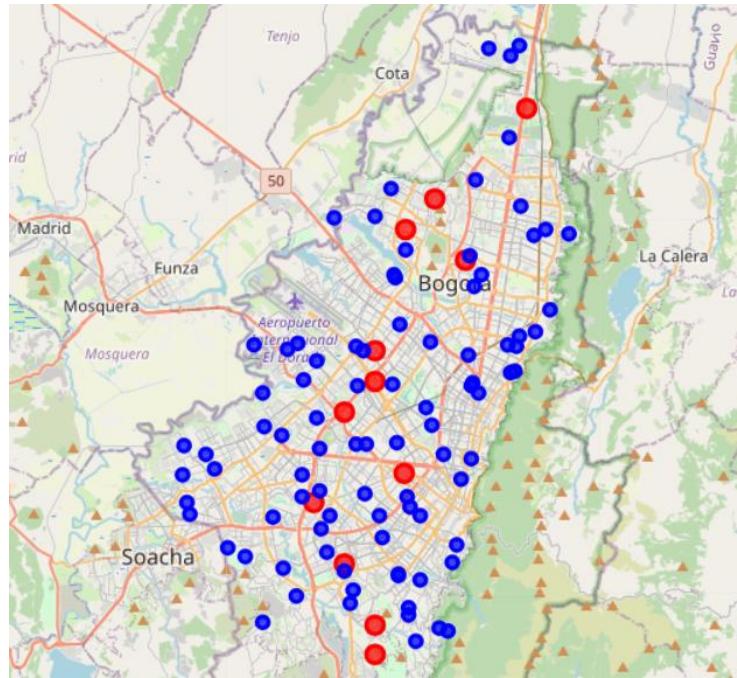
Vehículo 6:



Caso 3

Cambios en la formulación matemática – Majo

En un inicio, se intentó resolver el problema con el mismo modelo con el que se resolvieron los anteriores casos. A continuación, se muestra una imagen indicando los centros de distribución en rojo y los clientes en azul.



Como se puede apreciar, para este caso se contaba con un gran número de clientes considerablemente dispersos a lo largo de la ciudad. Dadas estas características, el problema no pudo ser resuelto con el modelo original, pues este nunca dio respuesta en un rango de tiempo considerable.

De esta forma, decidió asignar un centro de distribución para que atendiese a cada cliente. De igual forma, se asignaron a los depósitos ciertos vehículos para que pudieran satisfacer la demanda solicitada.

Así pues, los cambios que surgieron en el modelo fueron relacionados a las restricciones de este. Como a cada centro de distribución se le asignó por defecto un grupo de clientes que debía atender y un conjunto de vehículos para operar, las limitaciones trabajadas fueron las siguientes:

- Cada vehículo puede partir como máximo de un único centro de distribución.
- Si un vehículo está asignado a un centro, debe iniciar su ruta exactamente una vez en ese centro.
- En cada ubicación de un cliente, el número de llegadas de vehículos debe coincidir con el número de salidas, garantizando continuidad en el flujo de rutas.
- Un vehículo solo puede atender a un cliente si está asignado al centro responsable de ese cliente, y no puede iniciar ni concluir desplazamientos en puntos no propios de su asignación.
- Cada cliente debe ser atendido exactamente una vez por un vehículo, asegurando cobertura única sin solapamientos.

- La carga total transportada por un vehículo no puede superar su capacidad máxima de carga.
- La suma de las demandas de los clientes servidos desde un mismo centro de distribución no puede exceder la capacidad de suministro de ese centro.
- La distancia total recorrida por cada vehículo, sumando todos sus tramos, no puede exceder el rango operativo de dicho vehículo.
- Se evita la formación de subrutas independientes mediante la imposición de un orden en la secuencia de visitas, asegurando que todas las rutas permanezcan conectadas al centro de distribución.
- Se establecen límites mínimos y máximos para el nivel de carga transportada en cada etapa de la ruta, de modo que nunca sea inferior a la demanda atendida ni superior a la capacidad del vehículo.
- Cada vez que un vehículo atiende a un cliente, la carga que transporta debe ser al menos igual a la demanda de ese cliente.
- Solo se permite que un vehículo opere desde un centro de distribución si ha sido explícitamente asignado a ese centro.

Cabe decir que los demás elementos del modelo permanecieron igual con respecto al modelo usado para los casos 1 y 2.

Impacto de Variaciones en Combustible, Capacidad y Demanda

De la manera en que fue plantado el problema, las variaciones en cuanto al combustible afectarían el precio calculado por kilómetro. Así pues, para un aumento del 20% en este valor repercutiría de la siguiente manera:

$$\left(3436.8 \frac{\text{pesos}}{\text{litro}} \times 0.25 \frac{\text{litro}}{\text{km}}\right) + 1839.74 \frac{\text{pesos}}{\text{km}} + 476.36 \frac{\text{pesos}}{\text{km}} = 3175,3 \frac{\text{pesos}}{\text{km}}$$

Si no se presentase un incremento si no un decremento, entonces:

$$\left(2291.2 \frac{\text{pesos}}{\text{litro}} \times 0.25 \frac{\text{litro}}{\text{km}}\right) + 1839.74 \frac{\text{pesos}}{\text{km}} + 476.36 \frac{\text{pesos}}{\text{km}} = 2888,9 \frac{\text{pesos}}{\text{km}}$$

Estos cambios tendrían un peso relativo en las soluciones, pues entre mayor sea el precio del combustible, mayor será el costo de la solución. No obstante, este es un parámetro que no afecta la solución óptima en sí, ya que como es establecido como un valor constante, realmente depende de la distancia total que se recorra. De esta forma, en general, entre menos distancia logre recorrerse, menor será el costo de la solución.

Sin embargo, la capacidad de los centros de distribución y la demanda de los clientes son variables que impactan profundamente en la solución. Por una parte, si la capacidad de los centros de distribución se reduce, es altamente probable que no alcancen a satisfacer la demanda de los clientes que tienen asignados, por lo que sería necesarios reasignarlos para que sean atendidos por otro depósito.

Dependiendo de qué tan lejos estén de este último, el vehículo que abastece al cliente podría recorrer un mayor número de kilómetros, lo que afectaría la solución del modelo. En este sentido, no solo debería hacerse una modificación en la asignación de los clientes, sino también de los vehículos, pues hay que asegurarse de que el rango operativo de estos sea suficiente para llegar a todos los clientes.

Por otro lado, incrementar las demandas de los clientes implicaría evaluar si pueden ser o no abastecidos por el centro de distribución previamente asignado, así como corroborar que el o los vehículos que parten del centro de distribución correspondiente tienen la capacidad necesaria de satisfacer absolutamente toda su demanda (pues, de la manera en que esta planteado el problema, no pueden hacerse entregas parciales).

Dados los casos anteriores, se determina que ambos impactarían en las rutas seleccionadas por el modelo y, por ende, tendría impacto en los kilómetros recorridos, lo que podría aumentar el costo total de la solución.

Reportes detallados por centro de distribución y por vehículo

- Costo total de operación (combustible, mantenimiento): El costo total se calcula por medio del resultado de la función objetivo que dio \$1089676.098
- Distancia total recorrida: La distancia total es la suma de las distancias recorridas de cada uno de los vehículos para distribuir a los clientes y es la siguiente suma:

$$\begin{aligned} 2.370 + 35.290 + 42.870 + 36.750 + 13.510 + 27.990 + 7.790 + 24.290 \\ + 16.060 + 25.850 + 34.360 + 12.480 + 20.340 + 12.250 \\ + 47.180 = 359.38km \end{aligned}$$

- Tiempo total estimado de operación:

Frente al tiempo total estimado no su calculó por simplificación del modelo, pero también teniendo en consideración que este es un factor de alta variabilidad teniendo en cuenta la ciudad en la que opera la empresa. En Bogotá, el tiempo de embotellamiento estimado depende del estado de las vías, las obras en ellas, la cantidad de vehículos en la ciudad, la hora del día y demás factores (Castillo, 2022). Es por esto que, aunque se pudo haber tomado en cuenta las ventanas de tiempo, si esto se hace usando una herramienta en tiempo real, las estimaciones hechas variarían con frecuencia, por lo que sería complicado estimar el costo total de las operaciones en un periodo de tiempo medianamente prolongado.

Así mismo, en uno de los artículos revisados, no se encontró explícitamente el uso del factor del tiempo en la función objetivo, si no que “el modelo es ajustado para que cumpla con el tiempo máximo de operación disponible en la empresa” (Zapata et al., 2020) y para su cálculo se utiliza la velocidad promedio de los vehículos en la ciudad. Esto puede dar indicios de que el tiempo es un elemento complicado de tratar, de manera que es preferible omitirlo por motivos de

simplificación. Otras fuentes contempladas no mencionan la consideración del tiempo en las funciones objetivo planteadas.

Carga total entregada:

La carga total fue suplir las demandas de cada uno de los clientes por medio de los vehículos lo cual dio está suma, que es lo que entrego cada vehículo elegido:

$$12 + 132 + 114 + 59 + 33 + 108 + 48 + 60 + 60 + 96 + 120 + 36 + 65 + 60 + 60 = 1063$$

Carga total entregada entre todos los vehículos de 1063

Estadísticas Globales:

- Distancia, tiempo y carga promedio por vehículo:

La distancia promedio se calcula a través del promedio de la distancia total dividido en la cantidad de vehículos utilizados como se ve en la siguiente ecuación:

$$\frac{359.38km}{15} = 23.959km$$

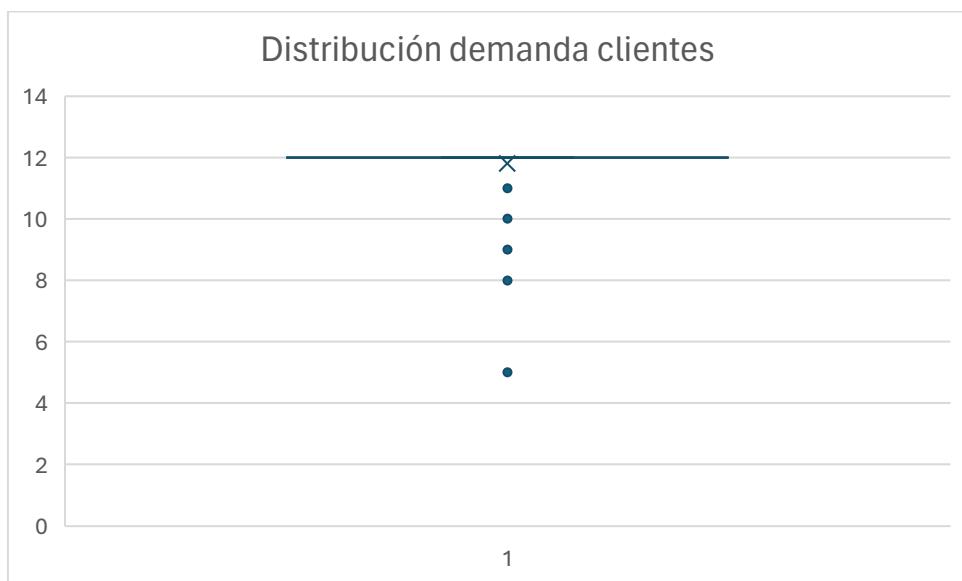
Se utilizaron 15 vehículos y la distancia promedio recorrido entre todos fue de 23.972km.

La carga promedio se calcula del mismo modo:

$$\frac{1063}{15} = 70.86$$

La carga promedio entre los 15 vehículos fue de 70.86

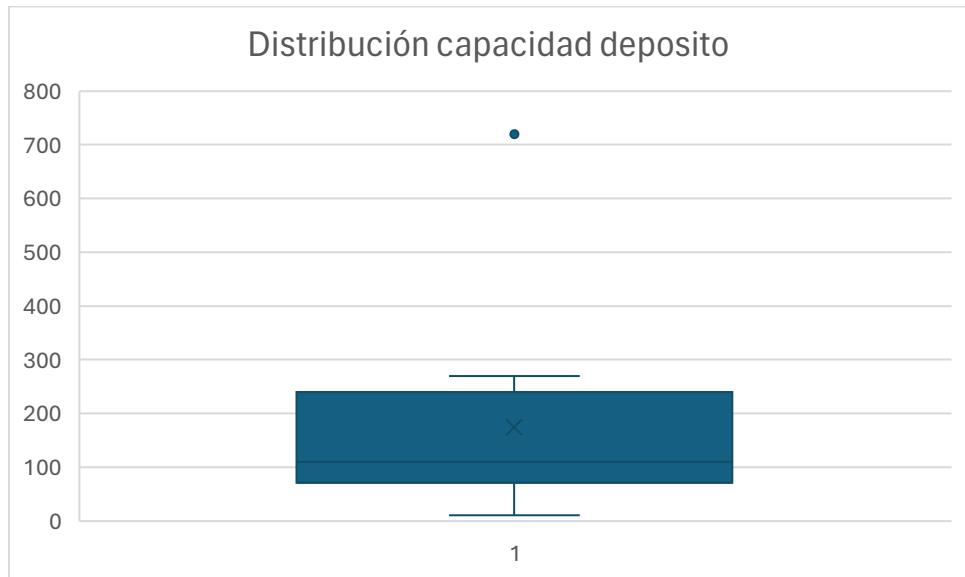
- Desviaciones estándares y distribuciones de los datos
- Frente a las demandas de los clientes:



Se creo un gráfico de caja de bigotes donde su puede evidenciar que la mayoría de demandas de los clientes son de 12.

La desviación estándar de estos datos fue de 0.92

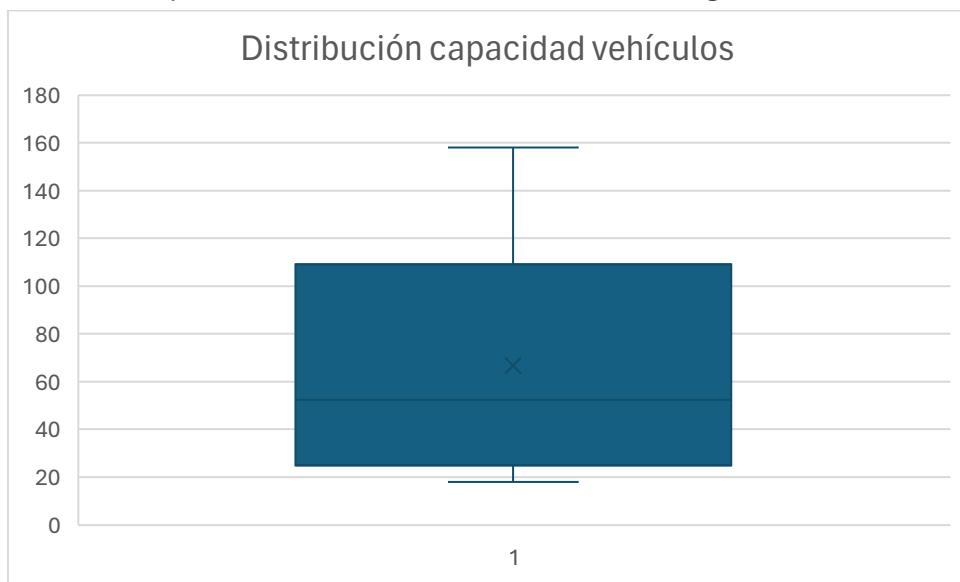
Frente a las capacidades de los depósitos se vio lo siguiente:



Se creo un gráfico de caja de bigotes donde se evidencio que la mayor parte de los datos están entre 70 y 230. Además hay un dato atípico en 720 como se evidencia en el gráfico.

La desviación estándar de los datos fue de 180.97

Frente a las capacidades de los vehículos se vio los siguiente:



Se puede ver que se distribuyen principalmente alrededor de 22 a 110, asimismo no se presentan datos atípicos.

La desviación estándar de los datos fue de 44.90

- Estadísticas de desempeño del algoritmo
 - Tiempo de ejecución: 21.09s
 - El número de iteraciones no se pudo obtener.

Conclusiones que respondan preguntas estratégicas:

- "¿Cuáles son los parámetros iniciales que más afectan la logística urbana?"
Los parámetros que más afectan son las ubicaciones de los clientes puesto a que dependiendo de la dispersión de estos y su densidad es que se puede llegar a realizar la logística urbana.
- "¿Dónde se presentan los mayores cuellos de botella?"
Se presentan más cuellos de botella cuando los vehículos no tienen la capacidad de realizar todo el trayecto hasta los clientes, dificultando de este modo la logística. Asimismo, cuando se presentan clientes muy lejanos de los centros de distribución.
- "¿Qué mejoras recomendaría a LogistiCo?"
Le recomendaríamos segmentar la demanda frente a los diferentes puntos de distribución, asimismo aumentar capacidad de algunos depósitos puesto que algunos no podían ser utilizados por su baja capacidad.

Identificar los parámetros que generan mayor impacto en el costo total y estructura de rutas.

Los parámetros que más influyen son las distancias de los puntos de distribución hacia los clientes y entre ellos frente a una ruta que están haciendo, debido a que los costos se calculan por medio de las distancias.

Resultados:

==== Costo óptimo total del plan de rutas: \$ 1089676.098

>>> Ruta del vehículo V1:

- Depósito de salida: CD4 (Capacidad depósito: 145)
- Capacidad del vehículo: 132 unidades
- Rango operativo del vehículo: 146 km
- Ruta: CD4 → C7 → CD4
- Carga total transportada: 12/132 unidades
- Distancia total recorrida: 2.370 km
- Uso del rango operativo: 1.6%
- Costo del transporte: \$ 7186.08
- Entregas entre nodos:

De CD4 → C7: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V2:

- Depósito de salida: CD4 (Capacidad depósito: 145)
- Capacidad del vehículo: 136 unidades
- Rango operativo del vehículo: 196 km
- Ruta: CD4 → C67 → C74 → C69 → C20 → C41 → C82 → C63 → C4 → C47 → C66 → C58
→ CD4
- Carga total transportada: 132/136 unidades
- Distancia total recorrida: 35.290 km
- Uso del rango operativo: 18.0%
- Costo del transporte: \$ 107002.81

- Entregas entre nodos:

De CD4 → C67: 12 unidades

De C67 → C74: 12 unidades

De C74 → C69: 12 unidades

De C69 → C20: 12 unidades

De C20 → C41: 12 unidades

De C41 → C82: 12 unidades

De C82 → C63: 12 unidades

De C63 → C4: 12 unidades

De C4 → C47: 12 unidades

De C47 → C66: 12 unidades

De C66 → C58: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V3:

- Depósito de salida: CD6 (Capacidad depósito: 180)
- Capacidad del vehículo: 115 unidades
- Rango operativo del vehículo: 143 km

- Ruta: CD6 → C32 → C11 → C75 → C1 → C26 → C87 → C33 → C64 → C13 → C55 → CD6
- Carga total transportada: 114/115 unidades
- Distancia total recorrida: 42.870 km
- Uso del rango operativo: 30.0%
- Costo del transporte: \$ 129986.13
- Entregas entre nodos:
 - De CD6 → C32: 12 unidades
 - De C32 → C11: 12 unidades
 - De C11 → C75: 12 unidades
 - De C75 → C1: 12 unidades
 - De C1 → C26: 12 unidades
 - De C26 → C87: 10 unidades
 - De C87 → C33: 12 unidades
 - De C33 → C64: 12 unidades
 - De C64 → C13: 8 unidades
 - De C13 → C55: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V4:

- Depósito de salida: CD3 (Capacidad depósito: 130)
- Capacidad del vehículo: 158 unidades
- Rango operativo del vehículo: 174 km
- Ruta: CD3 → C31 → C5 → C77 → C6 → C2 → CD3
- Carga total transportada: 59/158 unidades
- Distancia total recorrida: 36.750 km
- Uso del rango operativo: 21.1%
- Costo del transporte: \$ 111429.68
- Entregas entre nodos:
 - De CD3 → C31: 11 unidades

De C31 → C5: 12 unidades

De C5 → C77: 12 unidades

De C77 → C6: 12 unidades

De C6 → C2: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V5:

- Depósito de salida: CD6 (Capacidad depósito: 180)

- Capacidad del vehículo: 109 unidades

- Rango operativo del vehículo: 167 km

- Ruta: CD6 → C85 → C30 → C57 → CD6

- Carga total transportada: 33/109 unidades

- Distancia total recorrida: 13.510 km

- Uso del rango operativo: 8.1%

- Costo del transporte: \$ 40963.67

- Entregas entre nodos:

De CD6 → C85: 12 unidades

De C85 → C30: 12 unidades

De C30 → C57: 9 unidades

>>> Ruta del vehículo V6:

- Depósito de salida: CD7 (Capacidad depósito: 720)

- Capacidad del vehículo: 109 unidades

- Rango operativo del vehículo: 137 km

- Ruta: CD7 → C24 → C35 → C12 → C72 → C14 → C90 → C10 → C43 → C39 → CD7

- Carga total transportada: 108/109 unidades

- Distancia total recorrida: 27.990 km

- Uso del rango operativo: 20.4%

- Costo del transporte: \$ 84868.48

- Entregas entre nodos:

De CD7 → C24: 12 unidades

De C24 → C35: 12 unidades

De C35 → C12: 12 unidades

De C12 → C72: 12 unidades

De C72 → C14: 12 unidades

De C14 → C90: 12 unidades

De C90 → C10: 12 unidades

De C10 → C43: 12 unidades

De C43 → C39: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V7:

- Depósito de salida: CD5 (Capacidad depósito: 260)

- Capacidad del vehículo: 126 unidades

- Rango operativo del vehículo: 93 km

- Ruta: CD5 → C45 → C18 → C16 → C48 → CD5

- Carga total transportada: 48/126 unidades

- Distancia total recorrida: 7.790 km

- Uso del rango operativo: 8.4%

- Costo del transporte: \$ 23620.06

- Entregas entre nodos:

De CD5 → C45: 12 unidades

De C45 → C18: 12 unidades

De C18 → C16: 12 unidades

De C16 → C48: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V8:

- Depósito de salida: CD12 (Capacidad depósito: 270)

- Capacidad del vehículo: 79 unidades
- Rango operativo del vehículo: 134 km
- Ruta: CD12 → C22 → C36 → C88 → C8 → C70 → CD12
- Carga total transportada: 60/79 unidades
- Distancia total recorrida: 24.290 km
- Uso del rango operativo: 18.1%
- Costo del transporte: \$ 73649.71
- Entregas entre nodos:
 - De CD12 → C22: 12 unidades
 - De C22 → C36: 12 unidades
 - De C36 → C88: 12 unidades
 - De C88 → C8: 12 unidades
 - De C8 → C70: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V9:

- Depósito de salida: CD9 (Capacidad depósito: 70)
- Capacidad del vehículo: 96 unidades
- Rango operativo del vehículo: 160 km
- Ruta: CD9 → C61 → C49 → C29 → C21 → C9 → CD9
- Carga total transportada: 60/96 unidades
- Distancia total recorrida: 16.060 km
- Uso del rango operativo: 10.0%
- Costo del transporte: \$ 48695.53
- Entregas entre nodos:
 - De CD9 → C61: 12 unidades
 - De C61 → C49: 12 unidades
 - De C49 → C29: 12 unidades
 - De C29 → C21: 12 unidades

De C21 → C9: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V10:

- Depósito de salida: CD7 (Capacidad depósito: 720)
- Capacidad del vehículo: 99 unidades
- Rango operativo del vehículo: 108 km
- Ruta: CD7 → C34 → C15 → C84 → C73 → C89 → C23 → C59 → C56 → CD7
- Carga total transportada: 96/99 unidades
- Distancia total recorrida: 25.850 km
- Uso del rango operativo: 23.9%
- Costo del transporte: \$ 78379.78
- Entregas entre nodos:

De CD7 → C34: 12 unidades

De C34 → C15: 12 unidades

De C15 → C84: 12 unidades

De C84 → C73: 12 unidades

De C73 → C89: 12 unidades

De C89 → C23: 12 unidades

De C23 → C59: 12 unidades

De C59 → C56: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V11:

- Depósito de salida: CD5 (Capacidad depósito: 260)
- Capacidad del vehículo: 125 unidades
- Rango operativo del vehículo: 955 km
- Ruta: CD5 → C51 → C60 → C46 → C76 → C65 → C42 → C19 → C17 → C28 → C3 → CD5
- Carga total transportada: 120/125 unidades
- Distancia total recorrida: 34.360 km

- Uso del rango operativo: 3.6%
- Costo del transporte: \$ 104182.96

- Entregas entre nodos:

 - De CD5 → C51: 12 unidades

 - De C51 → C60: 12 unidades

 - De C60 → C46: 12 unidades

 - De C46 → C76: 12 unidades

 - De C76 → C65: 12 unidades

 - De C65 → C42: 12 unidades

 - De C42 → C19: 12 unidades

 - De C19 → C17: 12 unidades

 - De C17 → C28: 12 unidades

 - De C28 → C3: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V12:

- Depósito de salida: CD8 (Capacidad depósito: 55)
- Capacidad del vehículo: 98 unidades
- Rango operativo del vehículo: 716 km
- Ruta: CD8 → C44 → C62 → C78 → CD8
- Carga total transportada: 36/98 unidades
- Distancia total recorrida: 12.480 km
- Uso del rango operativo: 1.7%
- Costo del transporte: \$ 37840.61

- Entregas entre nodos:

 - De CD8 → C44: 12 unidades

 - De C44 → C62: 12 unidades

 - De C62 → C78: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V13:

- Depósito de salida: CD10 (Capacidad depósito: 75)
- Capacidad del vehículo: 86 unidades
- Rango operativo del vehículo: 1023 km
- Ruta: CD10 → C53 → C83 → C80 → C52 → C86 → C25 → CD10
- Carga total transportada: 65/86 unidades
- Distancia total recorrida: 20.340 km
- Uso del rango operativo: 2.0%
- Costo del transporte: \$ 61672.91

- Entregas entre nodos:

De CD10 → C53: 12 unidades

De C53 → C83: 12 unidades

De C83 → C80: 5 unidades

De C80 → C52: 12 unidades

De C52 → C86: 12 unidades

De C86 → C25: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V14:

- Depósito de salida: CD12 (Capacidad depósito: 270)
- Capacidad del vehículo: 74 unidades
- Rango operativo del vehículo: 1076 km
- Ruta: CD12 → C79 → C68 → C27 → C54 → C37 → CD12
- Carga total transportada: 60/74 unidades
- Distancia total recorrida: 12.250 km
- Uso del rango operativo: 1.1%
- Costo del transporte: \$ 37143.22

- Entregas entre nodos:

De CD12 → C79: 12 unidades

De C79 → C68: 12 unidades

De C68 → C27: 12 unidades

De C27 → C54: 12 unidades

De C54 → C37: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V15:

- Depósito de salida: CD11 (Capacidad depósito: 90)

- Capacidad del vehículo: 85 unidades

- Rango operativo del vehículo: 942 km

- Ruta: CD11 → C50 → C81 → C40 → C71 → C38 → CD11

- Carga total transportada: 60/85 unidades

- Distancia total recorrida: 47.180 km

- Uso del rango operativo: 5.0%

- Costo del transporte: \$ 143054.48

- Entregas entre nodos:

De CD11 → C50: 12 unidades

De C50 → C81: 12 unidades

De C81 → C40: 12 unidades

De C40 → C71: 12 unidades

De C71 → C38: 12 unidades

>>> Ruta del vehículo V16:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V17:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V18:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V19:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V20:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V21:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V22:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V23:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V24:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V25:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V26:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V27:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V28:

Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V29:

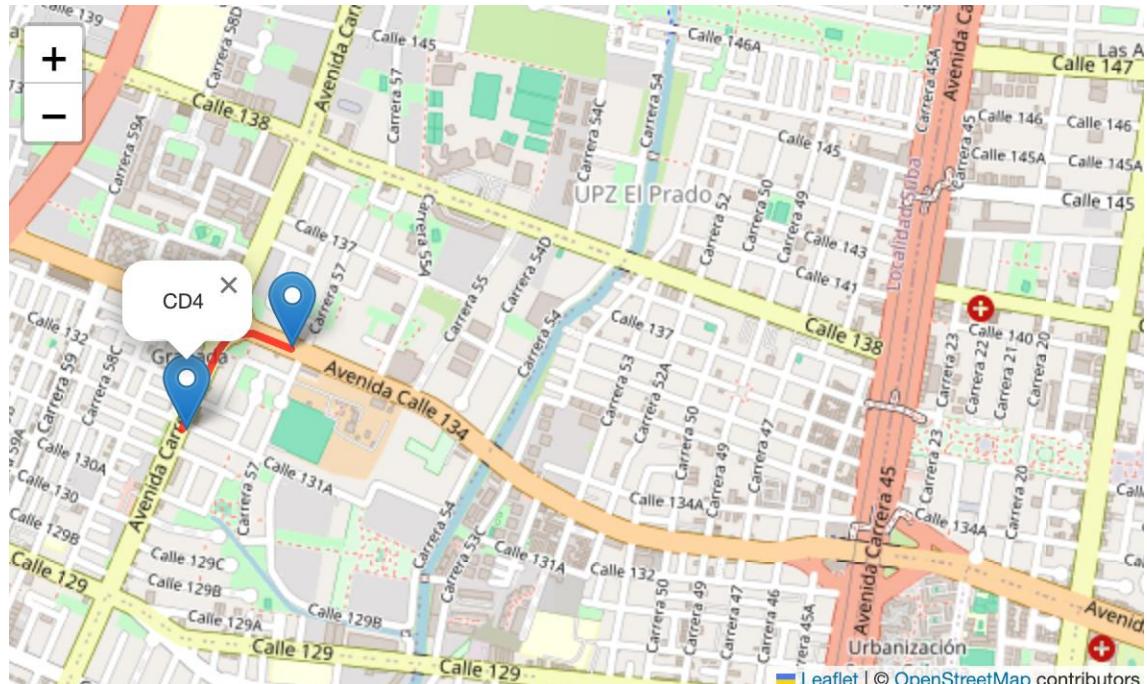
Vehículo no asignado a ningún depósito.

>>> Ruta del vehículo V30:

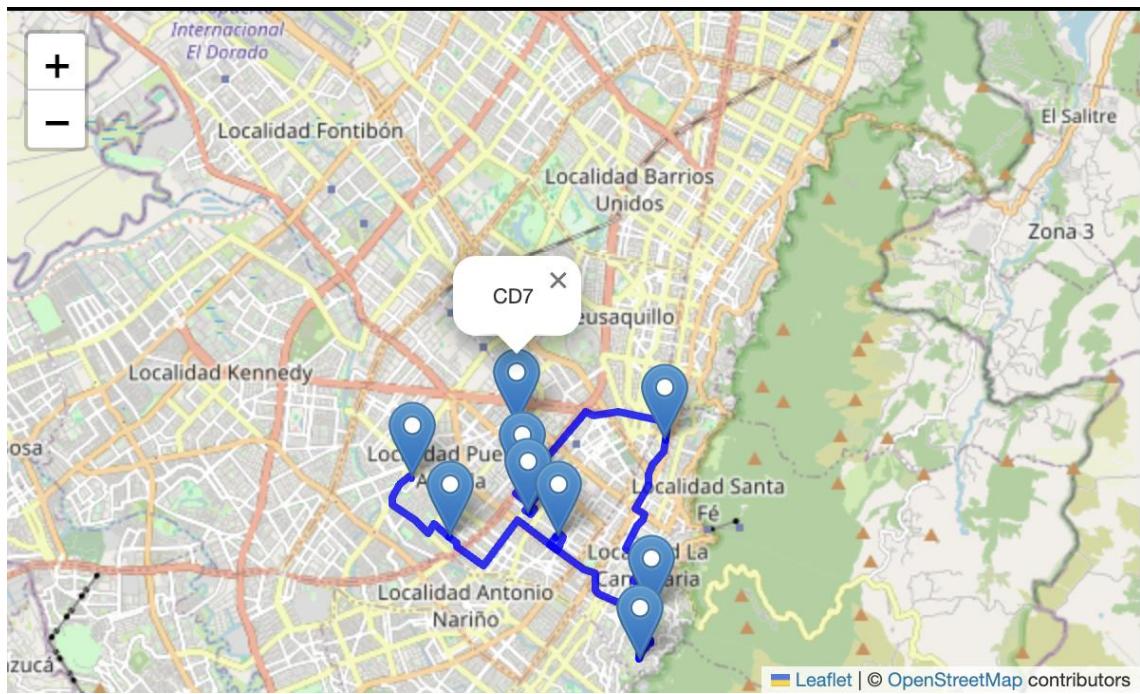
Vehículo no asignado a ningún depósito.

Visualización:

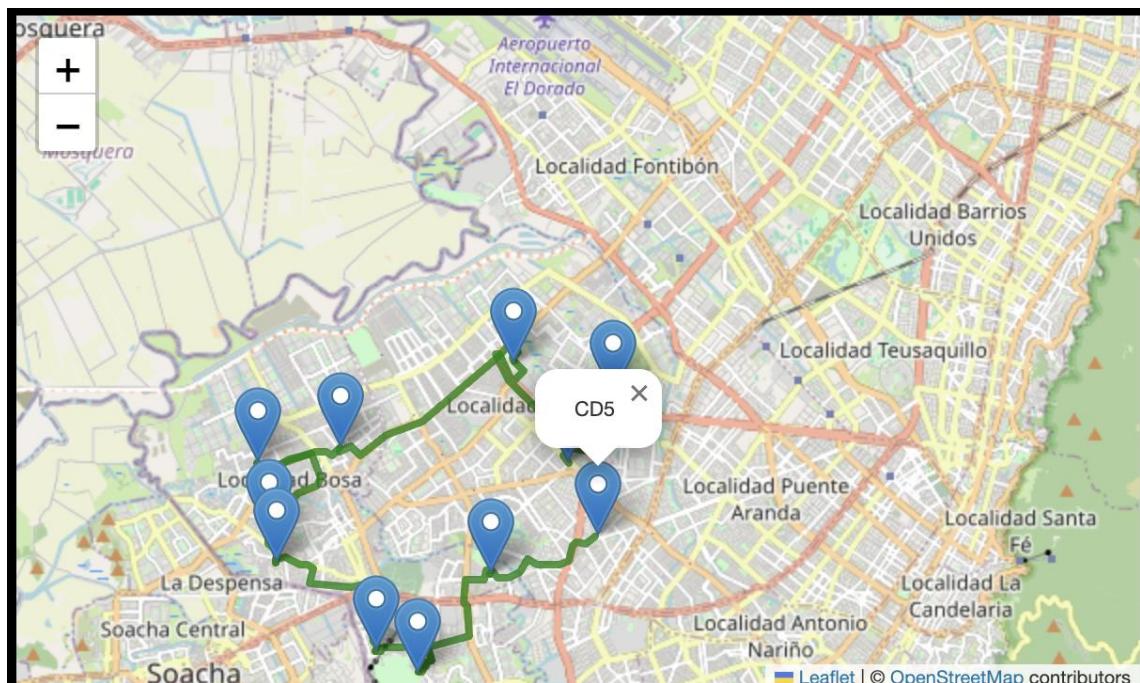
Ruta de V1: ['CD4', 'C7']



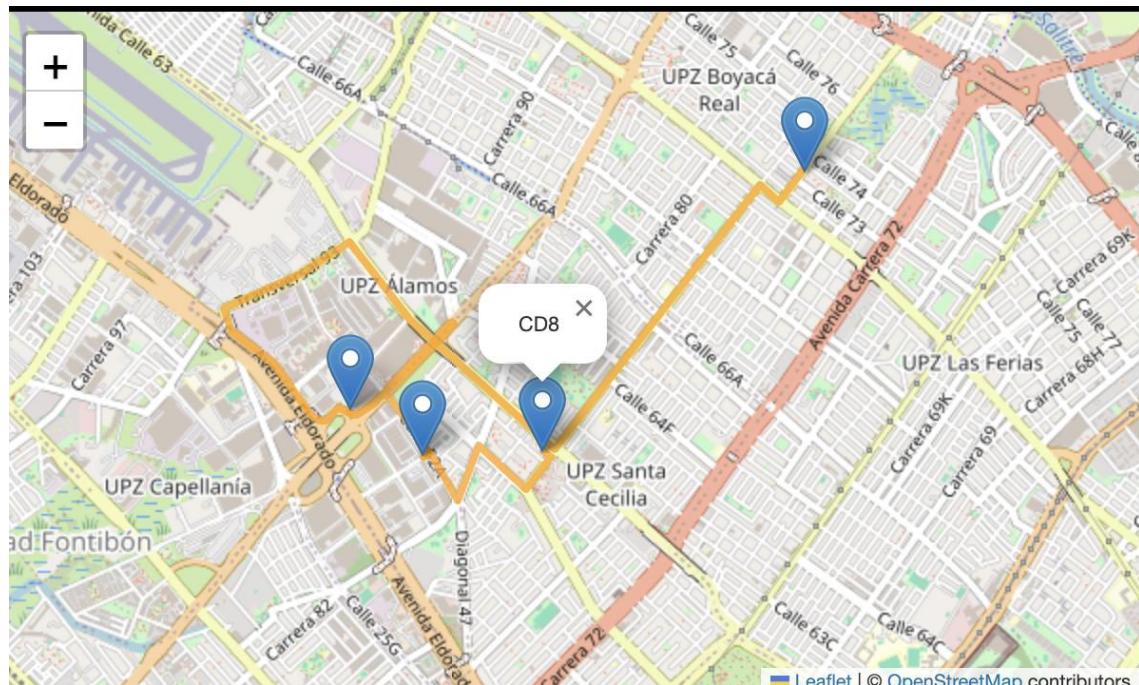
Ruta de V10: ['CD7', 'C34', 'C15', 'C84', 'C73', 'C89', 'C23', 'C59', 'C56']



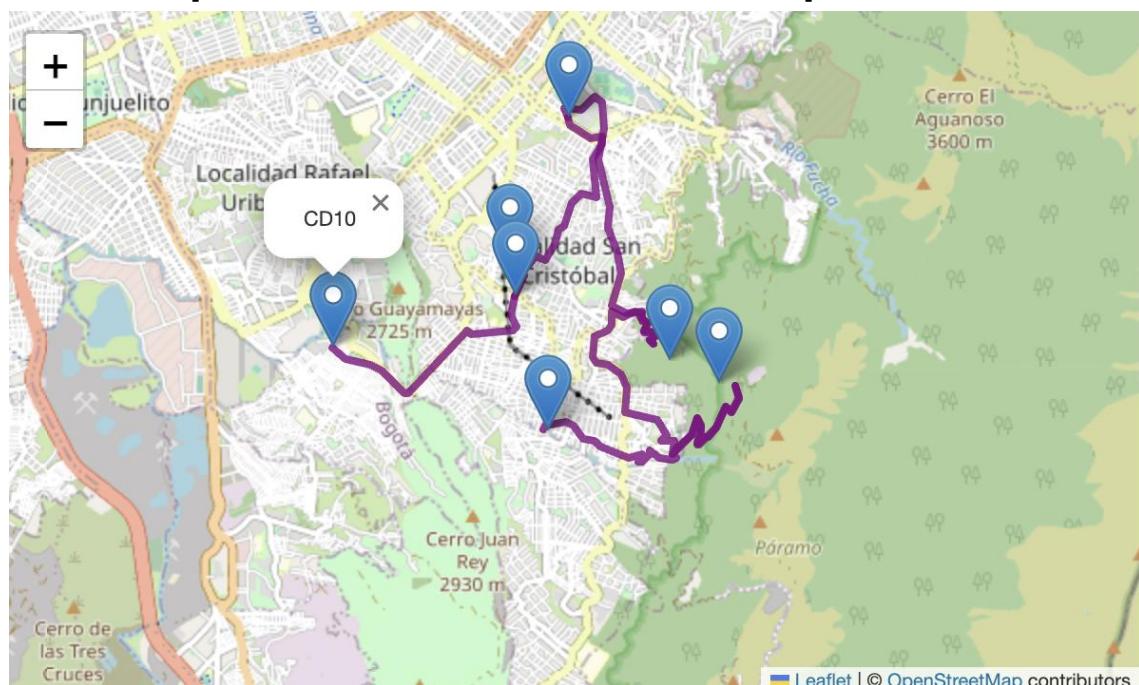
Ruta de V11: ['CD5', 'C51', 'C60', 'C46', 'C76', 'C65', 'C42', 'C19', 'C17', 'C28', 'C3']



Ruta de V12: ['CD8', 'C44', 'C62', 'C78']



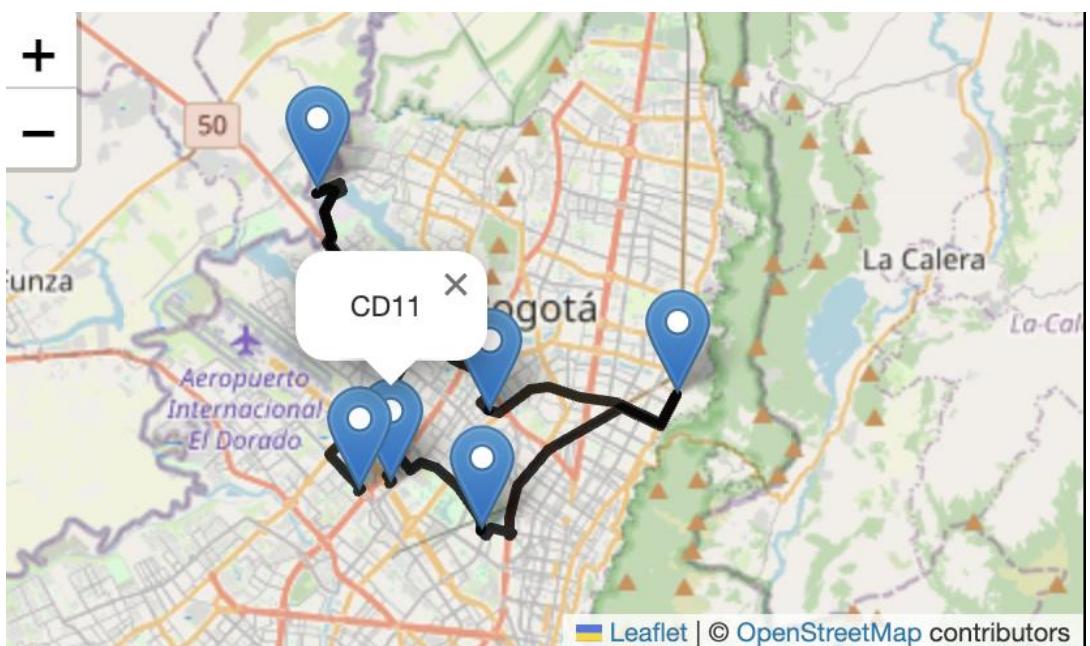
Ruta de V13: ['CD10', 'C53', 'C83', 'C80', 'C52', 'C86', 'C25']



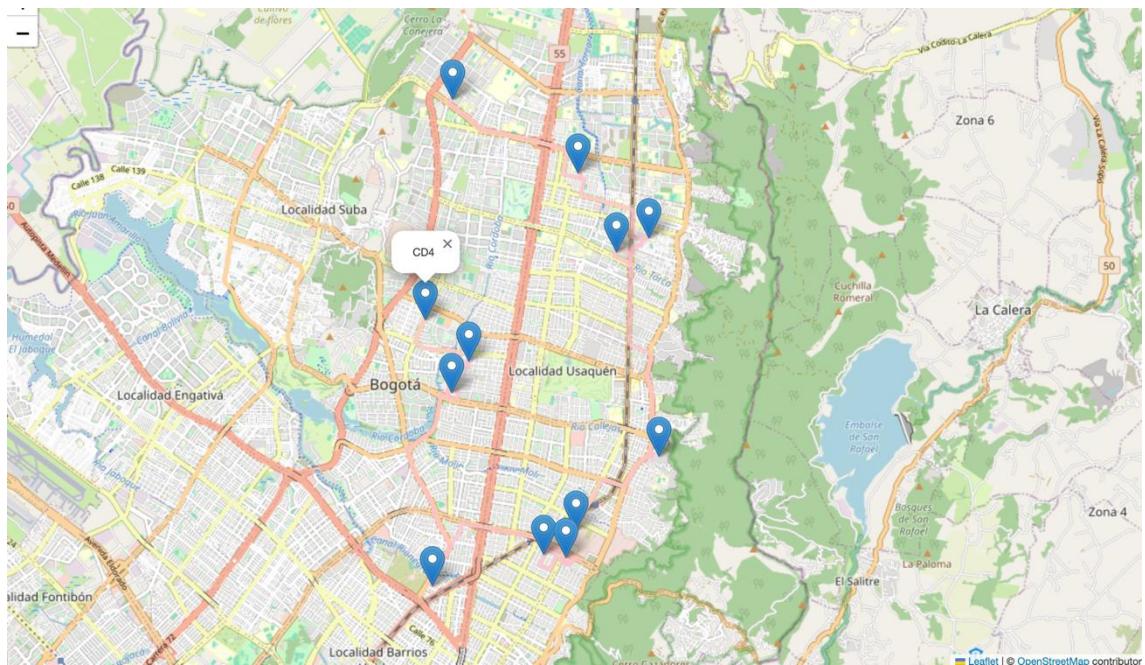
Ruta de V14: ['CD12', 'C79', 'C68', 'C27', 'C54', 'C37']



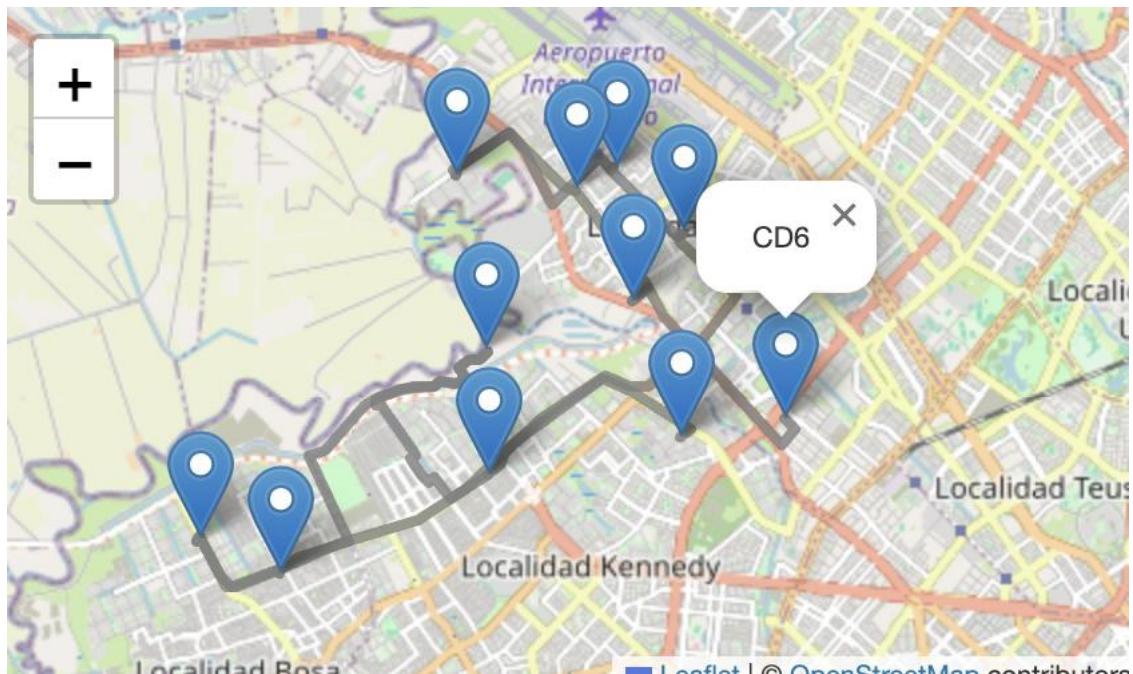
Ruta de V15: ['CD11', 'C50', 'C81', 'C40', 'C71', 'C38']



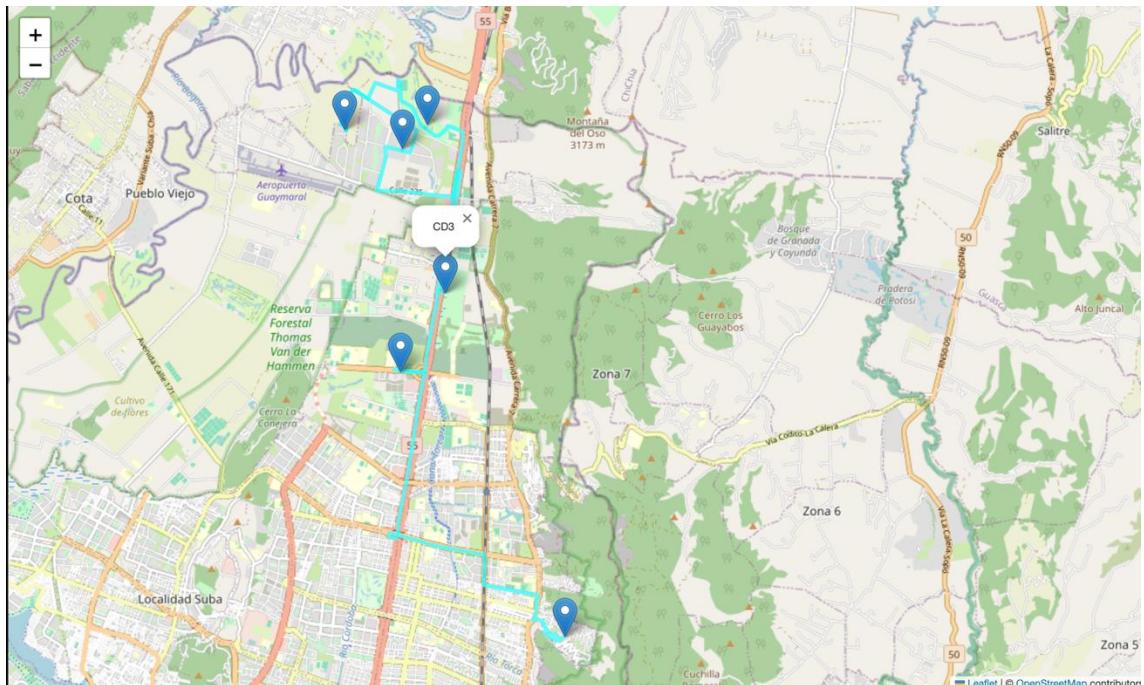
Ruta de V2: ['CD4', 'C67', 'C74', 'C69', 'C20', 'C41', 'C82', 'C63', 'C4', 'C47', 'C66', 'C58']



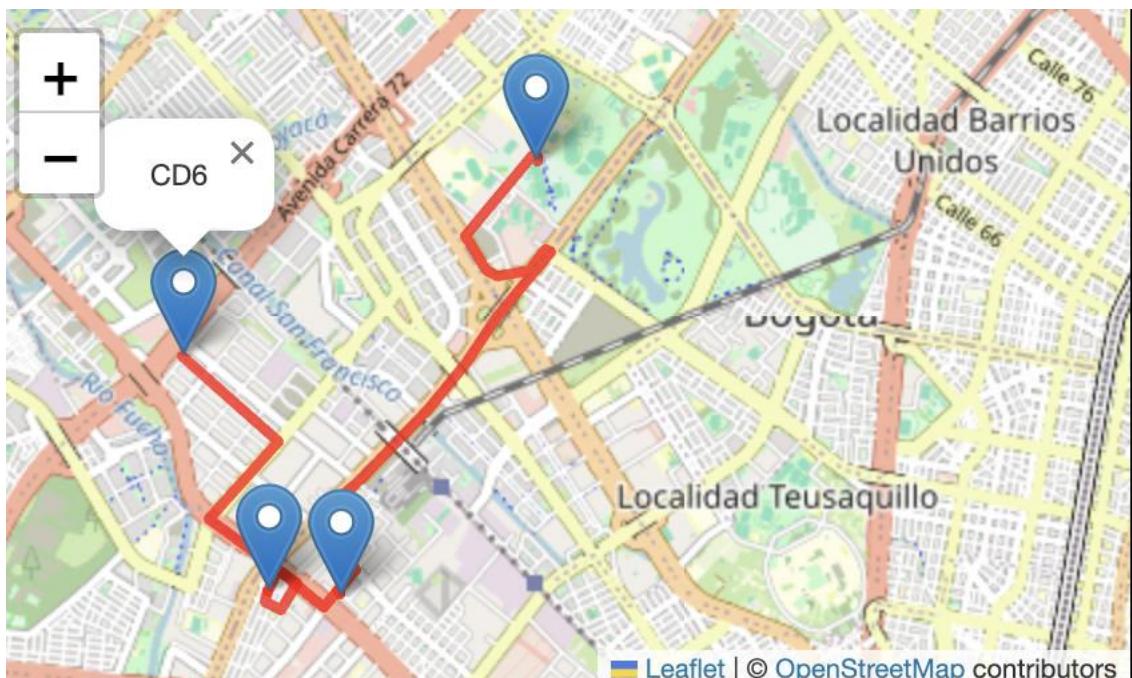
Ruta de V3: ['CD6', 'C32', 'C11', 'C75', 'C1', 'C26', 'C87', 'C33', 'C64', 'C13', 'C55']



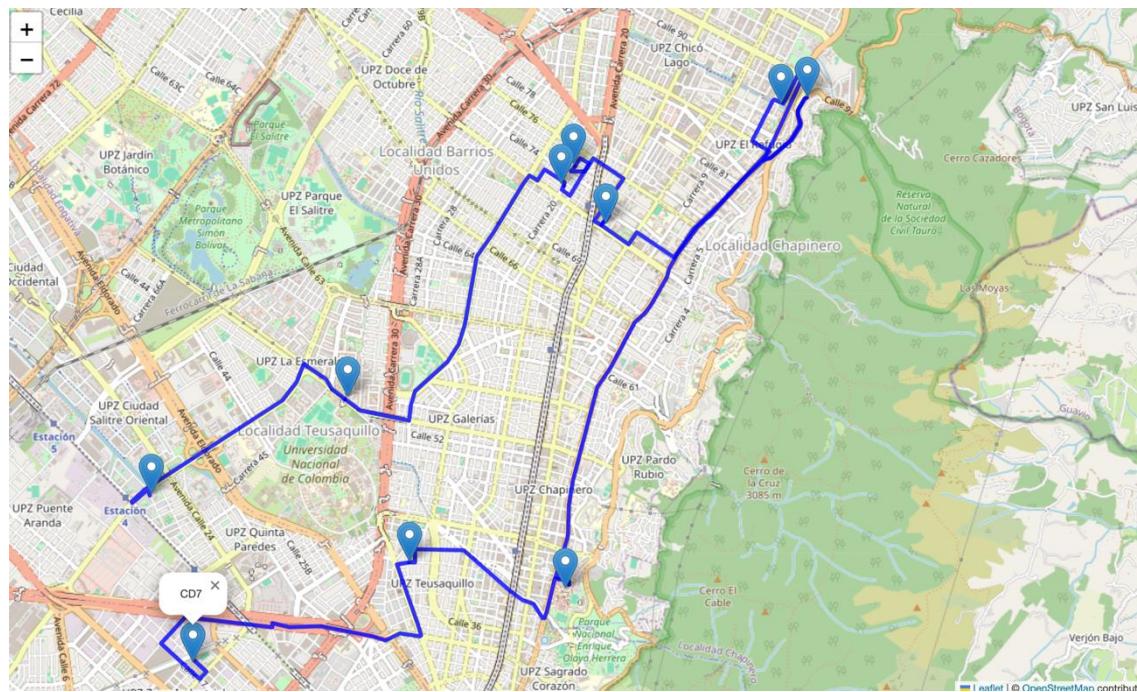
Ruta de V4: ['CD3', 'C31', 'C5', 'C77', 'C6', 'C2']



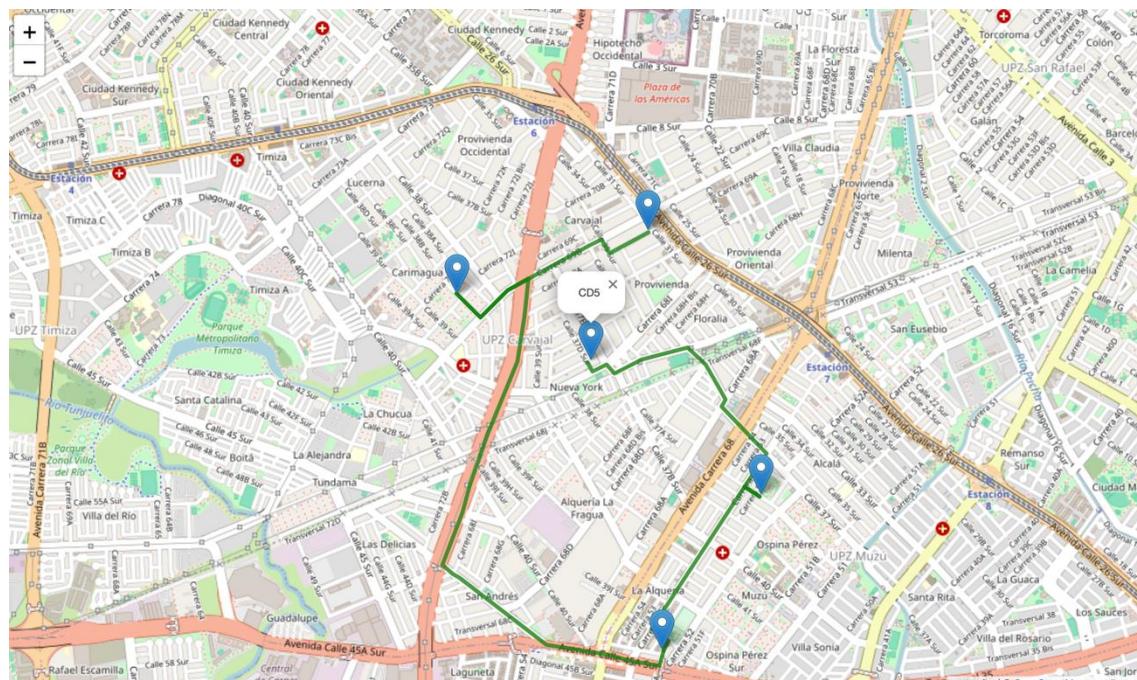
Ruta de V5: ['CD6', 'C85', 'C30', 'C57']



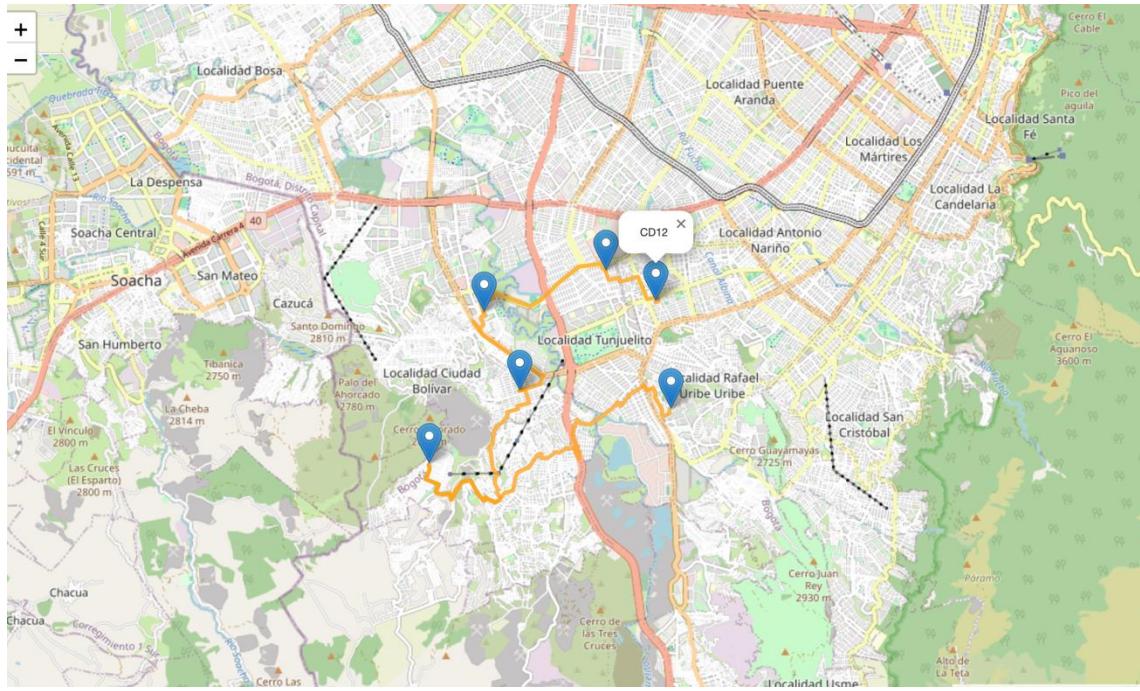
Ruta de V6: ['CD7', 'C24', 'C35', 'C12', 'C72', 'C14', 'C90', 'C10', 'C43', 'C39']



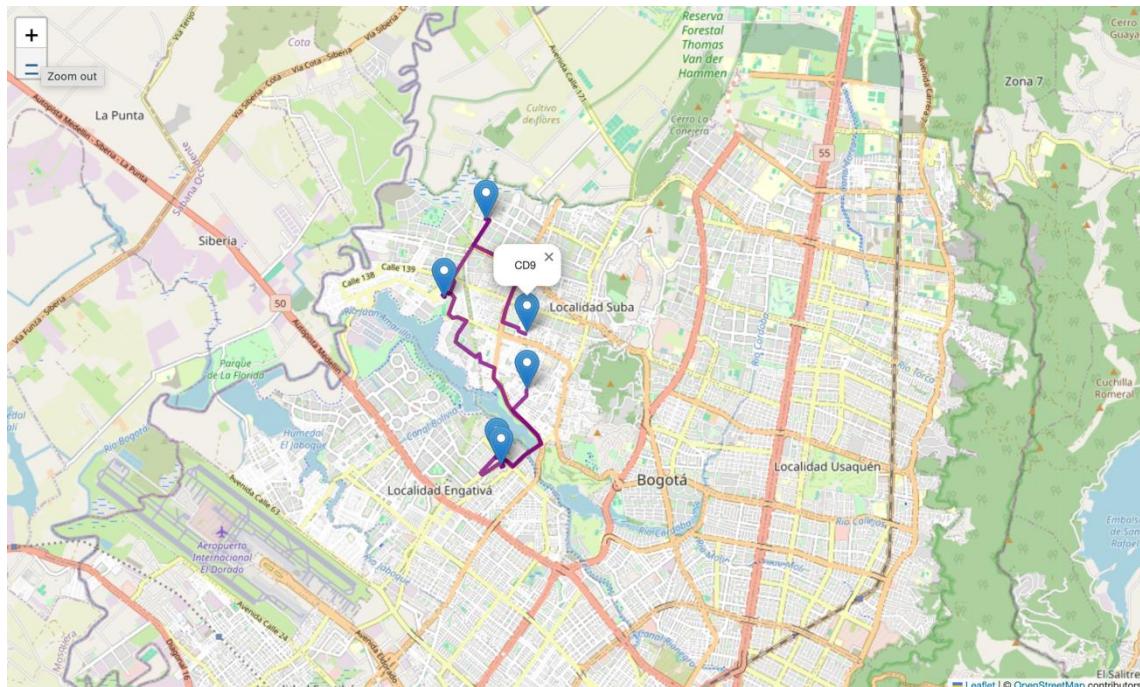
Ruta de V7: ['CD5', 'C45', 'C18', 'C16', 'C48']



Ruta de V8: ['CD12', 'C22', 'C36', 'C88', 'C8', 'C70']



Ruta de V9: ['CD9', 'C61', 'C49', 'C29', 'C21', 'C9']



Referencias

Abdallah, H. (2004). Guidelines for Assessing Costs in a Logistics System: An Example of Transport Cost Analysis. Arlington, Va.: John Snow, Inc./DELIVER, for the US Agency for International Development, 37.

Castillo, C. A. (2022, 16 de agosto). Trancones en Bogotá: ¿qué explica tantos trancones en la ciudad? El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/bogota/trancones-en-bogota-que-explica-tantos-trancones-en-la-ciudad-695205>

McGINNIS, M. A. (1990). The Relative Importance of Cost and Service in Freight Transportation Choice: Before and After Deregulation. *Transportation Journal*, 30(1), 12–19. <http://www.jstor.org/stable/20713064>

Ministerio de Transporte. (2020). SICETAC - Ministerio de Transporte. Recuperado el 27 de marzo de 2025, de <https://familiacamionera.com/wp-content/uploads/2020/08/SICETAC-MINISTERIO-DE-TRANSPORTE.pdf>

Muñoz Villamizar, A. F. Solución de los problemas de localización y dimensionamiento de centros urbanos de distribución y enrutamiento de sus vehículos (Master's thesis, Universidad de La Sabana).

Pečený, L., Meško, P., Kampf, R., & Gašparík, J. (2020). Optimisation in transport and logistic processes. *Transportation Research Procedia*, 44, 15-22.

Red Nacional de Transportes. (s.f.). Tarifas de transporte. Recuperado el 27 de marzo de 2025, de <https://rednacionaldetransportes.com/portal/index.php/tarifas.html>

Romero, J. (2024, November 21). ¿Cuánto consume un camión? Gestiona el gasto de combustible. El Blog De Webfleet. https://www.webfleet.com/es_es/webfleet/blog/conoces-el-consumo-de-diesel-de-un-camion-por-km/#:~:text=Un%20cami%C3%B3n%20peque%C3%A9llo%20con%20una,transporte%C20m%C3%A1s%20grandes%20y%20pesados.

Zapata-Cortes, J. A., Vélez-Bedoya, Á. R., & Arango-Serna, M. D. (2020). Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte. *Investigación administrativa*, 49(126).