

Proyecto - Etapa 2

Proyecto A

María Alejandra Londoño - 202220983

Angélica Ortiz - 202222480

María José Amoroch - 202220179

La implementación del problema se encuentra en el siguiente repositorio:

<https://github.com/SuperEquipoEstrella/MOS-Proy1-E1.git>

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

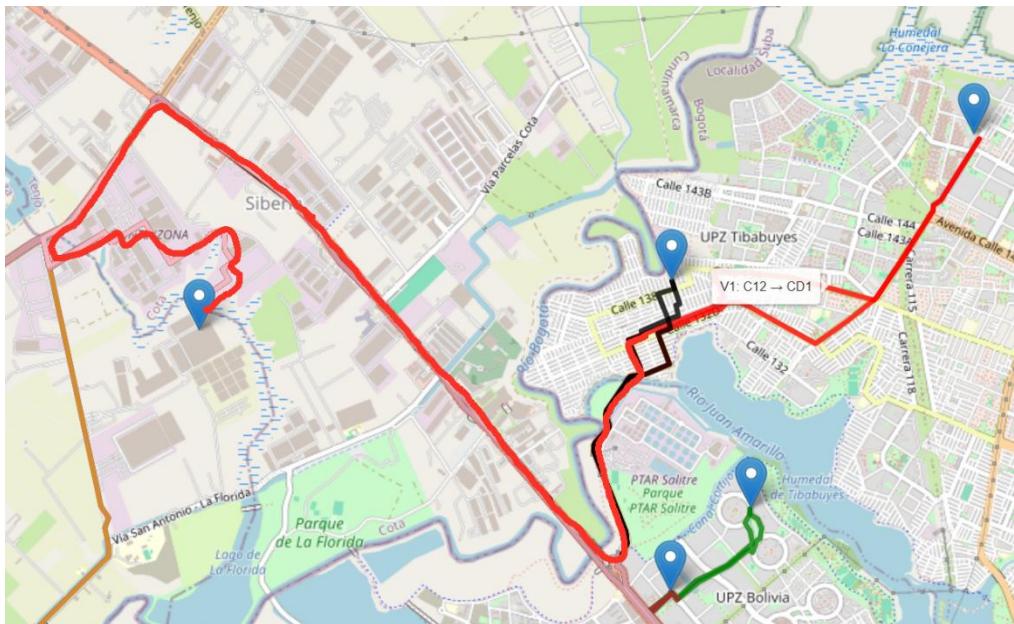
Resultados:

===== Costo óptimo total del plan de rutas: \$ \$ 1,074,758.166

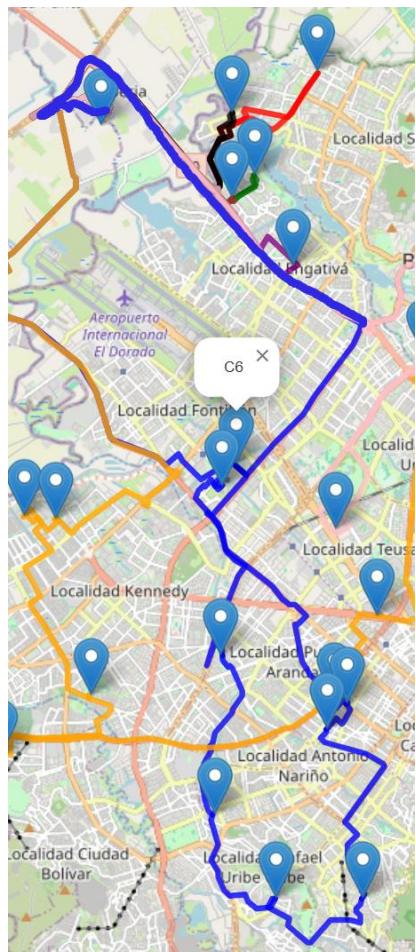
Vehículo	Depósito Salida*	Capacidad Vehículo	Rango Operativo (km)	Ruta	Carga Inicial	Distancia Recorrida (km)	Costo Transporte	Entregas (unidades)
V1	CD1	130 unidades	170	CD1 → C12 → CD1	12	31.89	\$ 96,693.67	CD1 → C12: 12
V2	CD1	140 unidades	200	CD1 → C6 → C17 → C24 → C16 → C10 → C1 → C15 → C4 → C18 → CD1	135	77.14	\$ 233,896.19	CD1 → C6: 17 C6 → C17: 25 C17 → C24: 11 C24 → C16: 10 C16 → C10: 15 C10 → C1: 13 C1 → C15: 17 C15 → C4: 15 C4 → C18: 12
V3	CD1	120 unidades	180	CD1 → C23 → CD1	15	23.58	\$ 71,496.92	CD1 → C23: 15
V4	CD1	100 unidades	90	CD1 → C22 → C11 → C9 → C8 → C5 → CD1	95	73.13	\$ 221,737.47	CD1 → C22: 18 C22 → C11: 17 C11 → C9: 20 C9 → C8: 20 C8 → C5: 20
V5	CD1	70 unidades	100	CD1 → C3 → CD1	12	26.13	\$ 79,228.77	CD1 → C3: 12
V6	CD1	55 unidades	170	CD1 → C14 → CD1	15	21.57	\$ 65,402.40	CD1 → C14: 15
V7	CD1	110 unidades	150	CD1 → C20 → CD1	15	26.22	\$ 79,501.66	CD1 → C20: 15
V8	CD1	114 unidades	140	CD1 → C7 → C21 → C19 → C2 → C13 → CD1	78	74.8	\$ 226,801.08	CD1 → C7: 17 C7 → C21: 14 C21 → C19: 11 C19 → C2: 15 C2 → C13: 21

* Para este caso, la capacidad de todos los depósitos era de 9'999'999

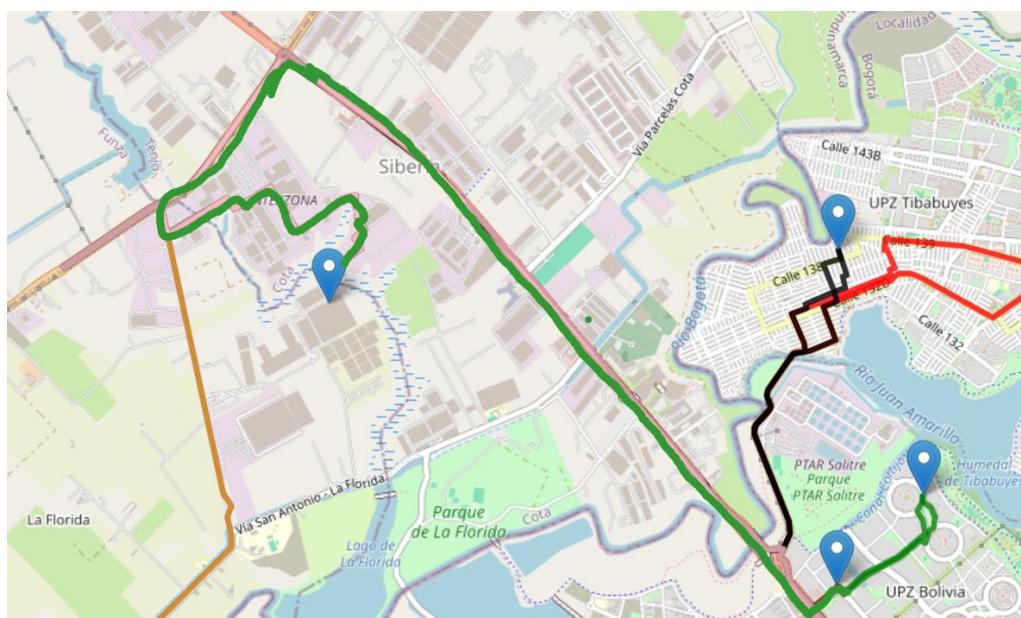
Vehículo 1:



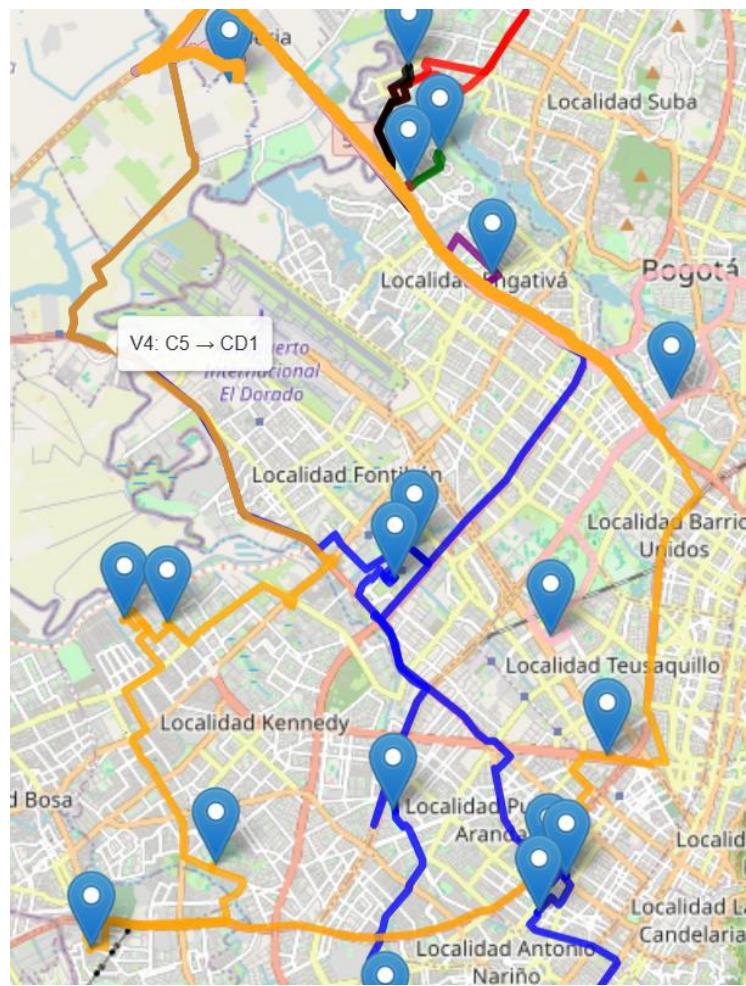
Vehículo 2:



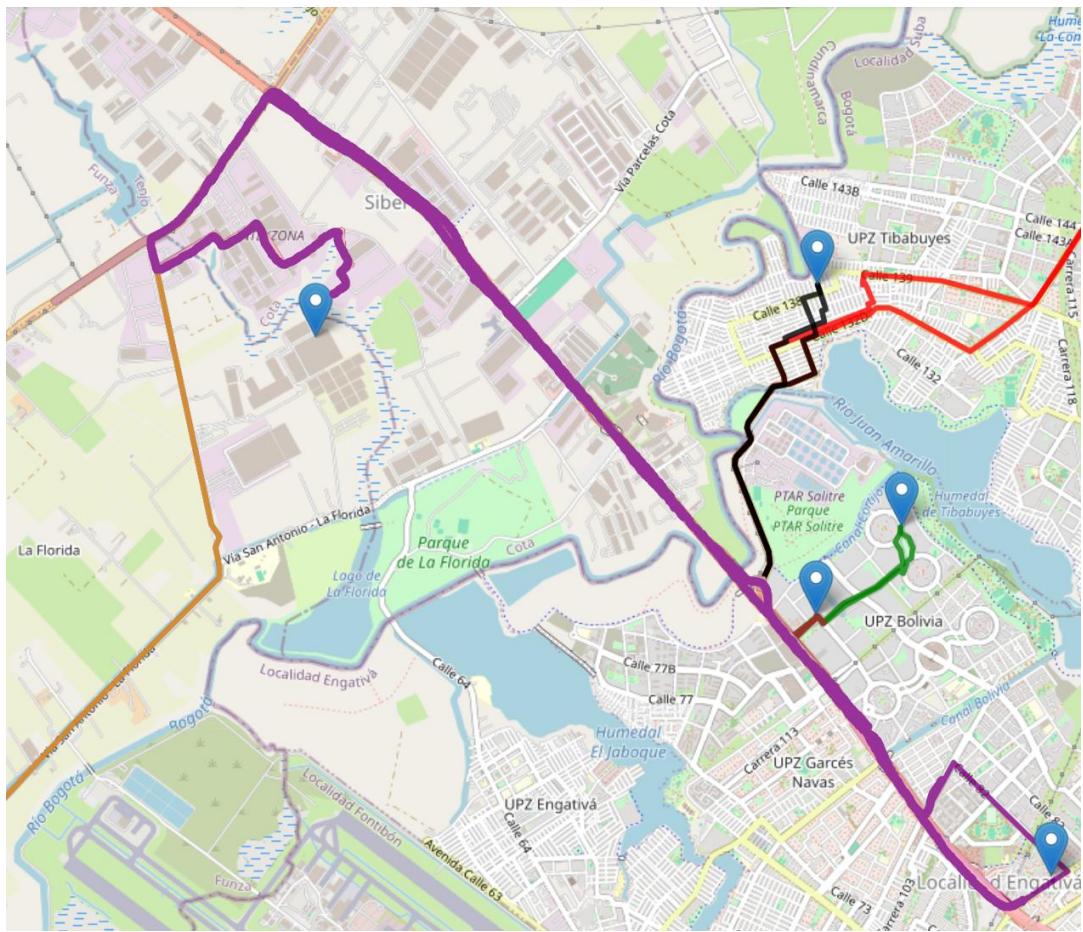
Vehículo 3:



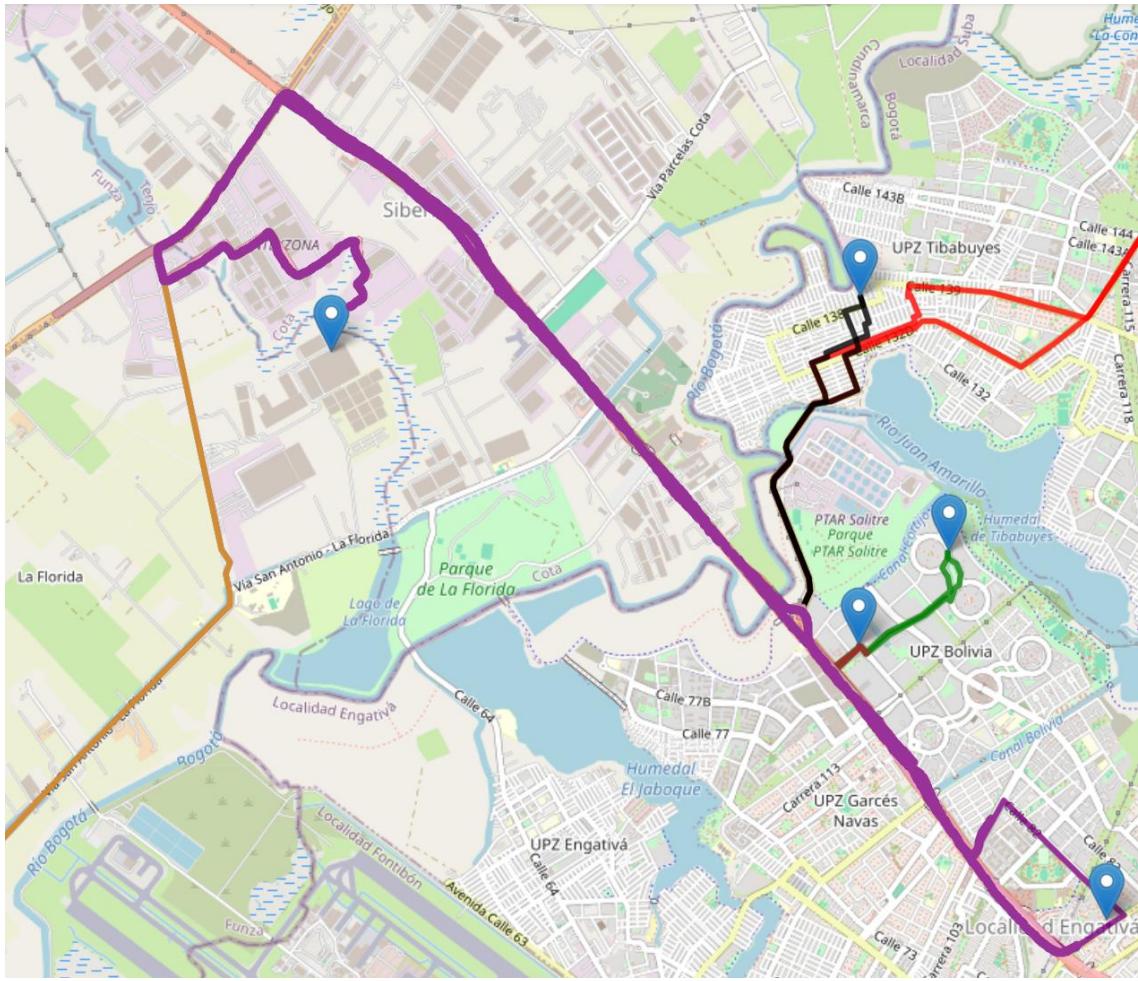
Vehículo 4:



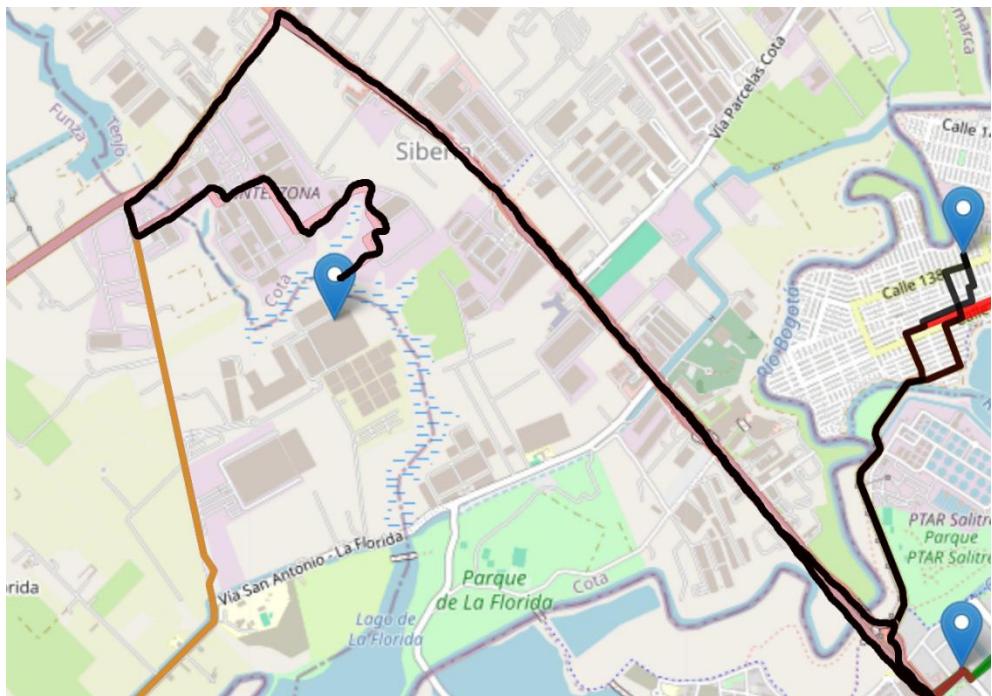
Vehículo 5:



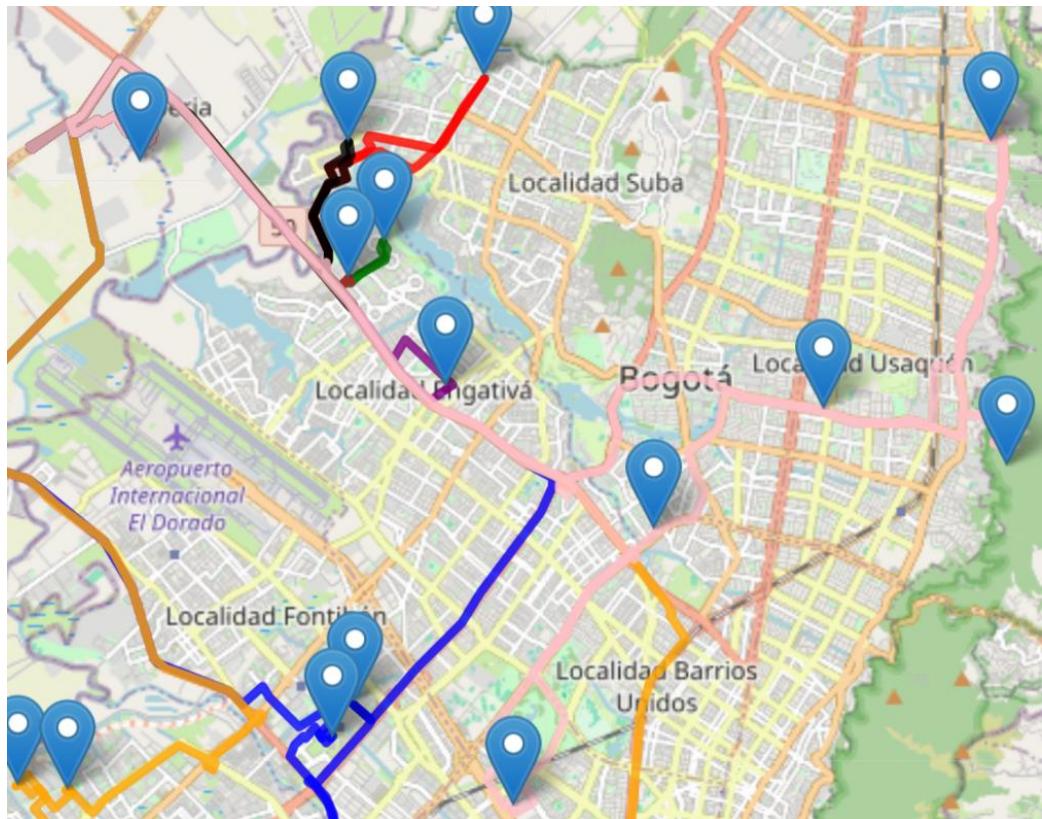
Vehículo 6:



Vehículo 7:



Vehículo 8:

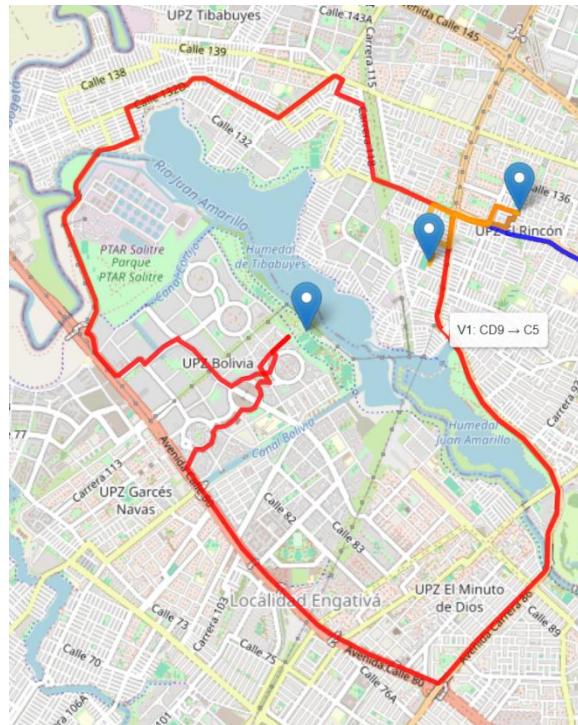


Caso 2

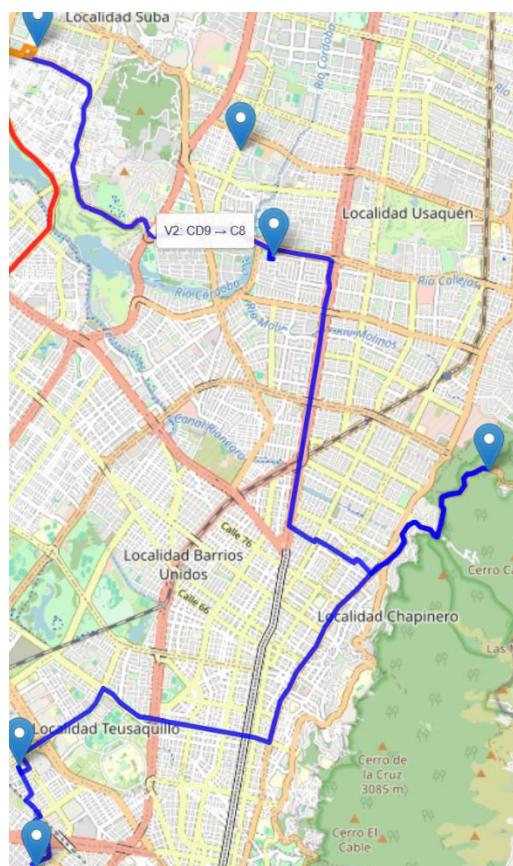
===== Costo óptimo total del plan de rutas: \$ 284744.511

Vehículo	Depósito Salida	Capacidad Depósito	Capacidad Vehículo	Rango Operativo (km)	Ruta	Carga Inicial	Distancia Recorrida (km)	Costo Transporte	Entregas
V1	CD9	43	131.92	145.85	CD9 → C5 → CD9	5	17.54	\$ 53,183.03	CD9 → C5: 5
V2	CD9	43	108.44	1304.61	CD9 → C8 → C7 → C9 → CD7	37	30.46	\$ 92,357.77	CD9 → C8: 10 C8 → C7: 12 C7 → C9: 15
V3	CD5	28	91.5	953.17	CD5 → C4 → C1 → CD5	18	22.73	\$ 68,919.63	CD5 → C4: 6 C4 → C1: 12
V4	CD9	43	32.9	17.3	CD9 → C3 → CD9	15	2.56	\$ 7,762.18	CD9 → C3: 15
V5	CD11	16	22.65	16.63	CD11 → C6 → CD6	11	15.07	\$ 45,693.75	CD11 → C6: 11
V6	CD5	28	22.68	13.6	CD5 → C2 → CD5	15	5.55	\$ 16,828.16	CD5 → C2: 15

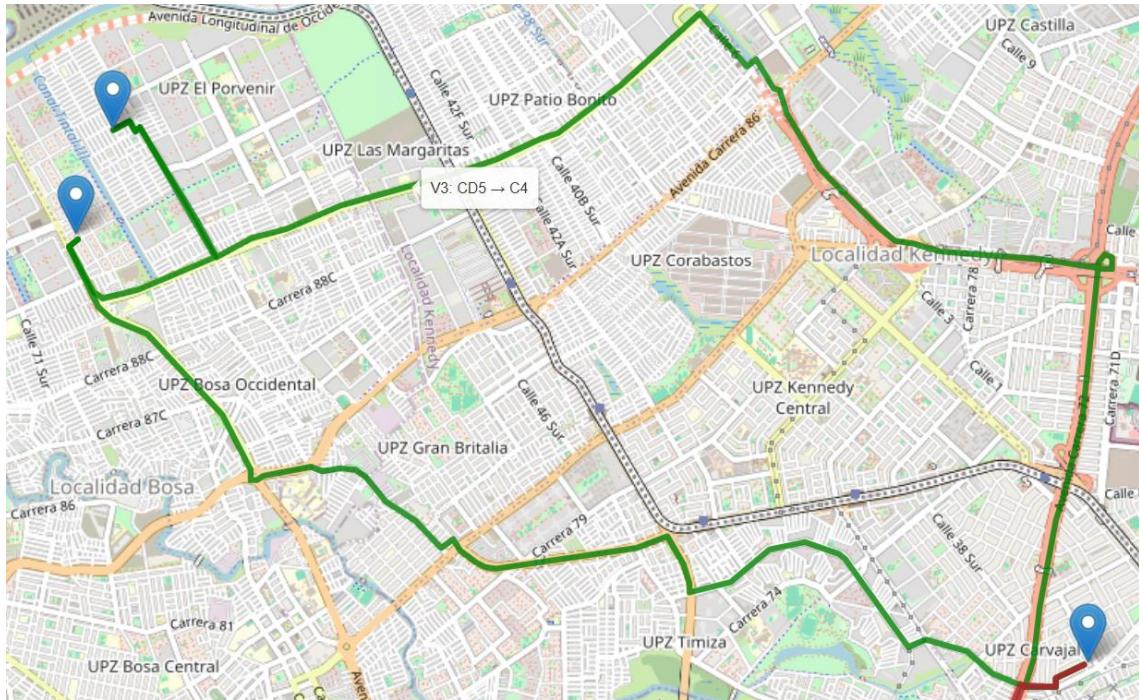
Vehículo 1:



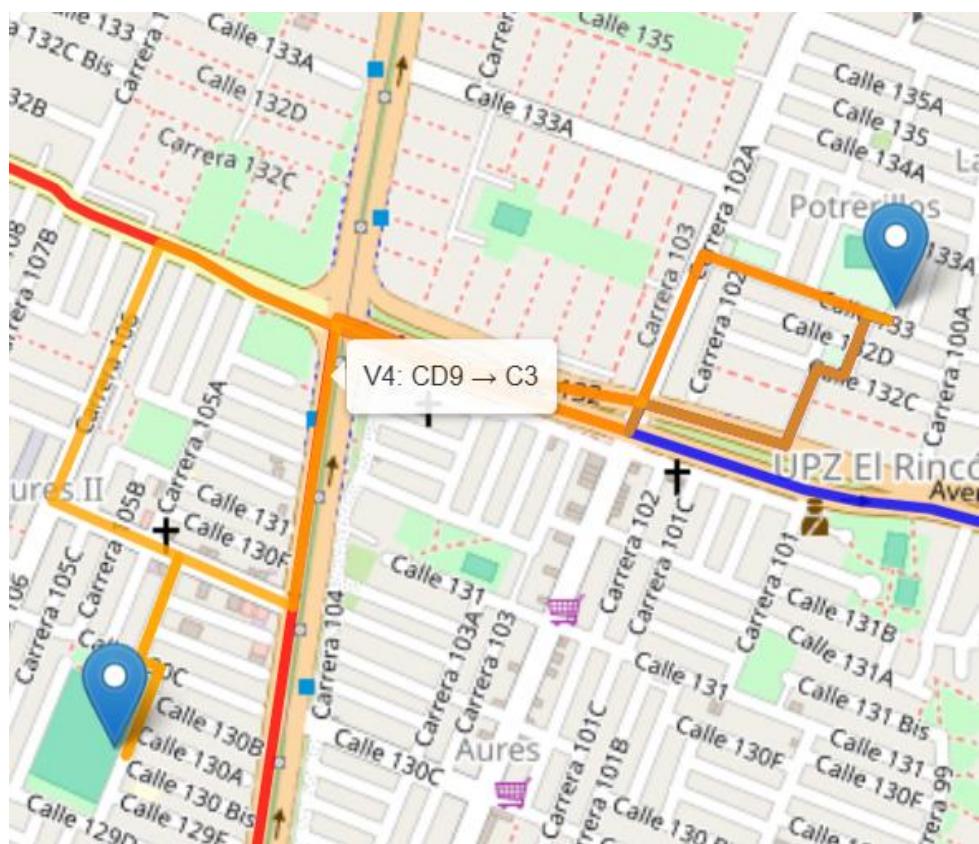
Vehículo 2:



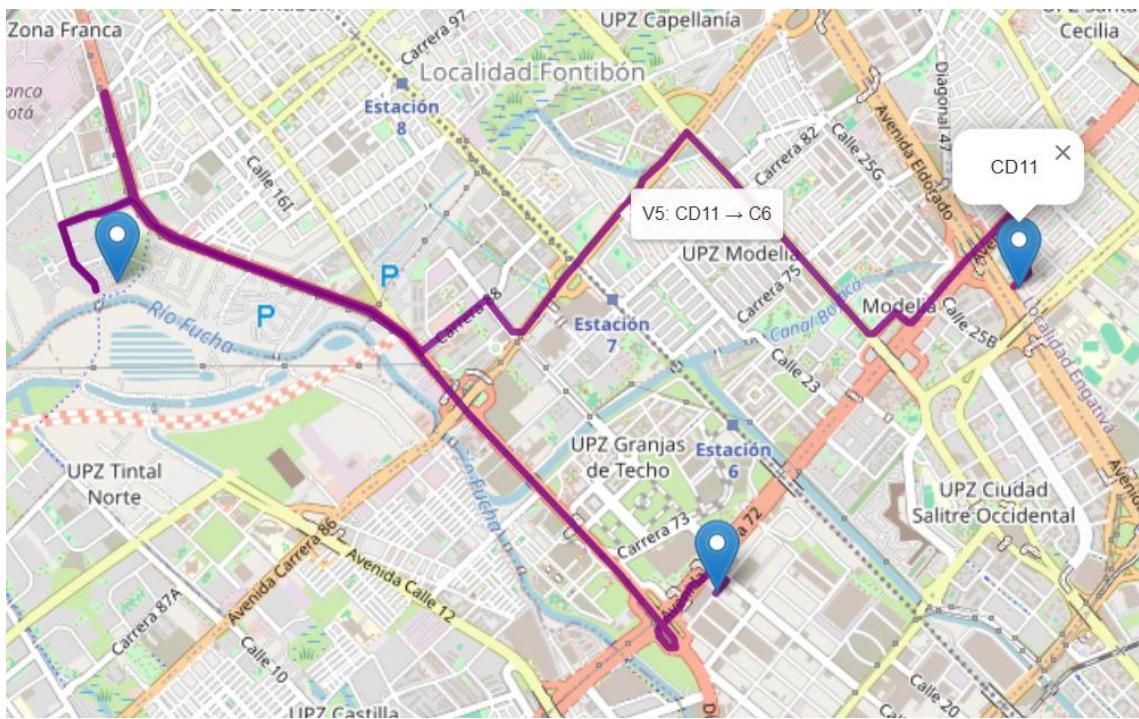
Vehículo 3:



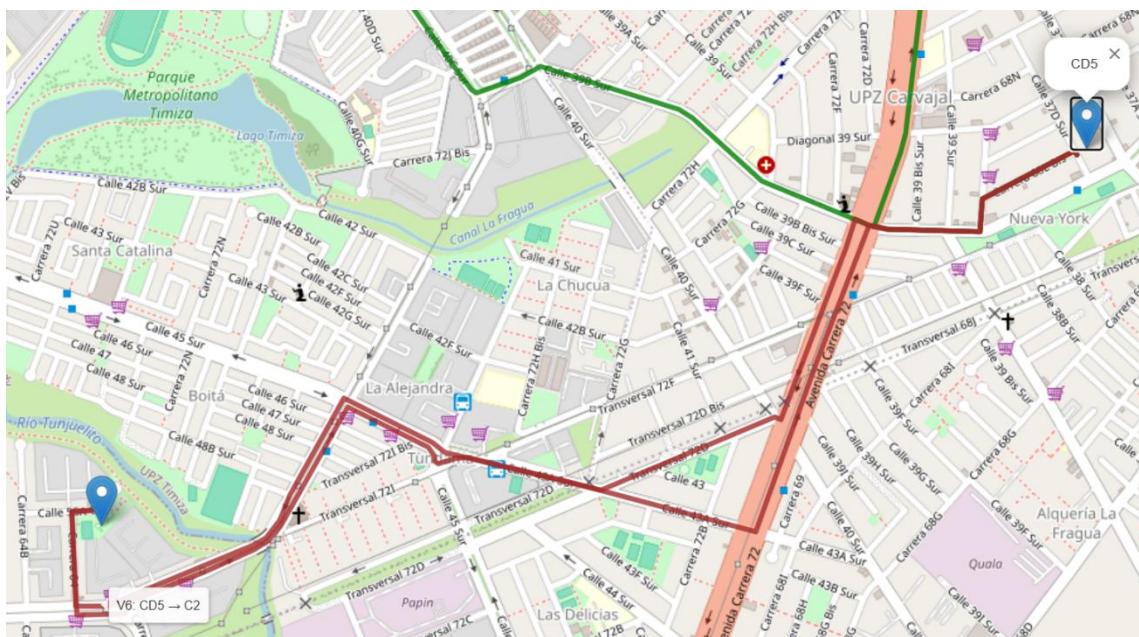
Vehículo 4:



Vehículo 5:



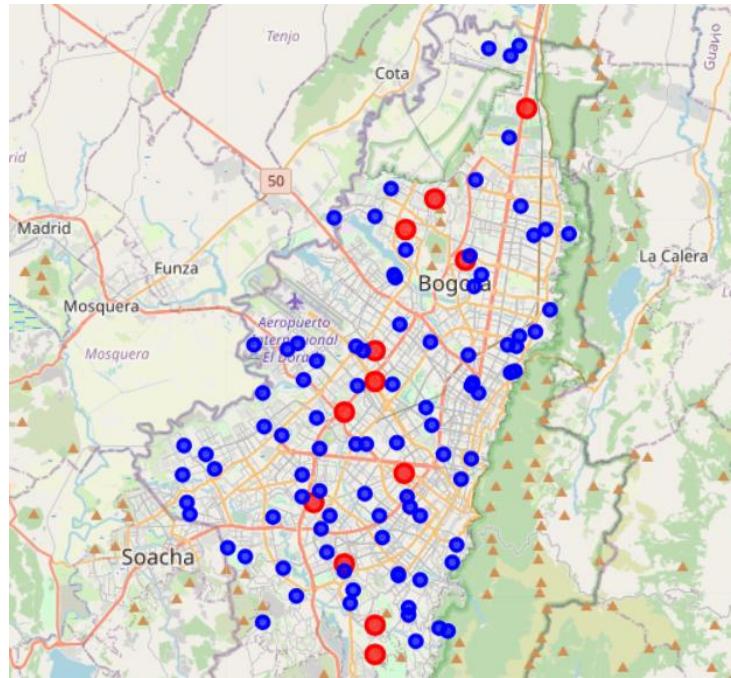
Vehículo 6:



Caso 3

Cambios en la formulación matemática

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 un conjunto de clientes. De igual forma, se asignaron a los depósitos ciertos vehículos para que pudieran satisfacer la demanda solicitada.

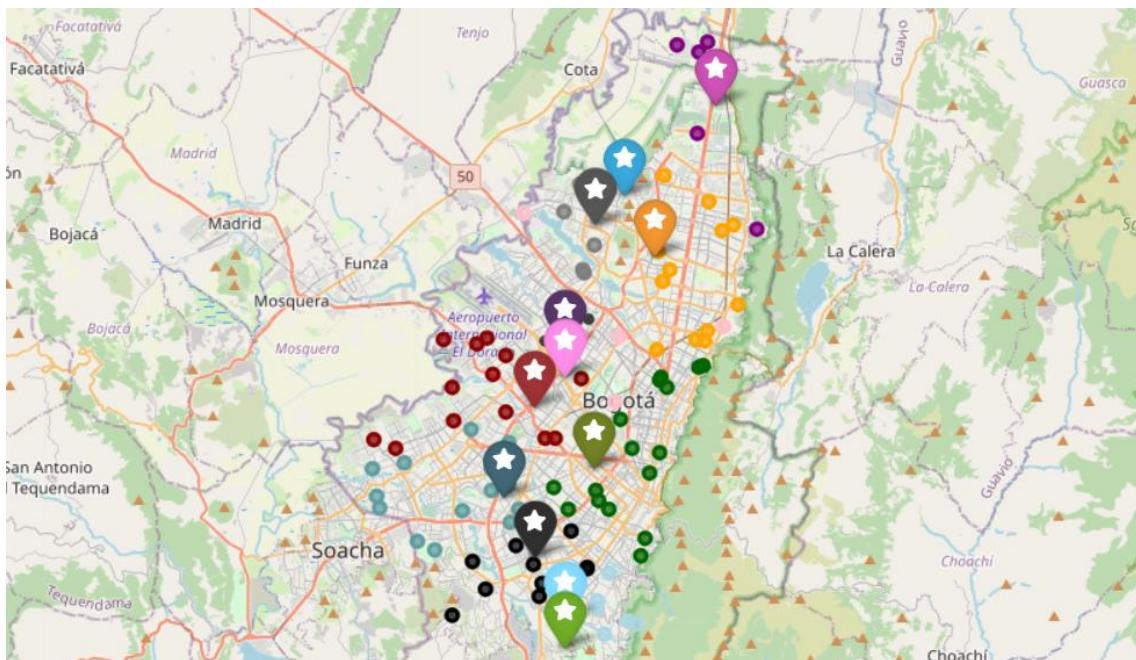
Así pues, los cambios que surgieron en el modelo fueron relacionados a las restricciones de este. Como a cada centro de distribución se le asignó por defecto un grupo de clientes que debía atender y un conjunto de vehículos para operar, las limitaciones trabajadas fueron las siguientes:

- 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.

Así pues, se puede decir que el problema general se subdividió en subproblemas, donde para cada depósito, su conjunto de clientes asignado y los vehículos dados, se encontraba la ruta de menor costo para satisfacer la demanda. A continuación, se muestran con colores cada grupo de clientes y los depósitos que los atienden (marcados con una estrella).



Resultados:

===== Costo óptimo total del plan de rutas: \$ 1051805.169

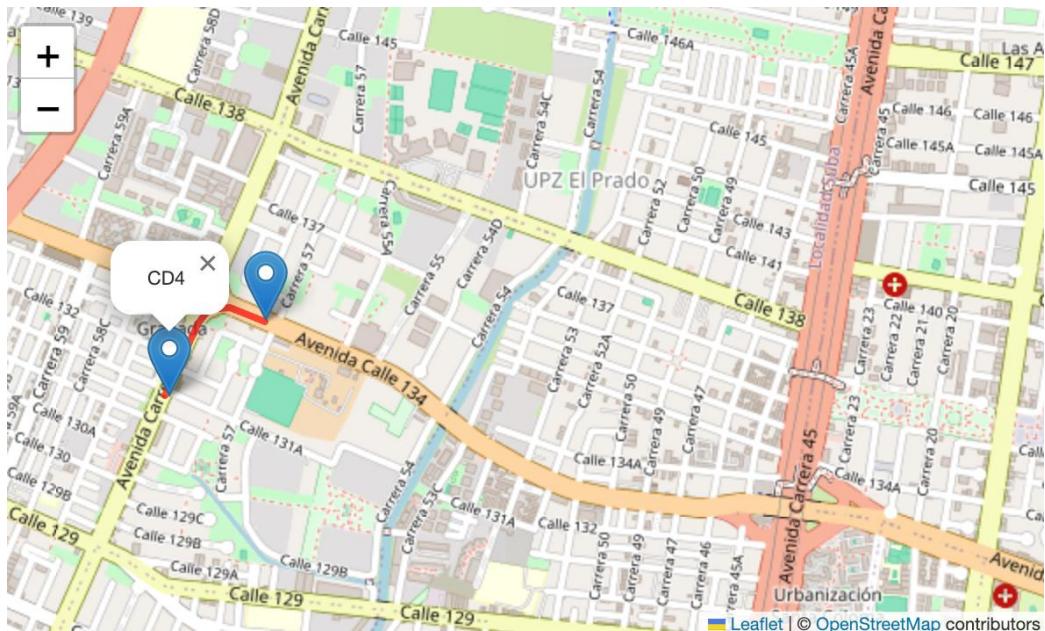
A continuación, se muestra la ruta simplificada para cada vehículo. Los resultados completos están en el repositorio.

Vehículo	Depósito Salida	Capacidad Depósito	Capacidad Vehículo	Rango Operativo (km)	Ruta	Carga Inicial	Distancia Recorrida (km)	Costo Transporte	Entregas
V1	CD4	145	132	146	CD4 → C7 → CD4	12	2.37	\$ 7,186.08	CD4 → C7: 12
V2	CD4	145	136	196	CD4 → C67 → ... → C58 → CD1	132	32.280	\$ 97,876.19	CD4 → C67: 12
				
					C66 → C58: 12				
V3	CD6	180	115	143	CD6 → C32 → ... → C55 → CD6	114	42.87	\$ 129,986.13	CD6 → C32: 12
				
					C13 → C55: 12				
V4	CD3	130	158	174	CD3 → C31 → ... → C2 → CD3	59	36.75	\$ 111,429.68	CD3 → C31: 11
				
					C6 → C2: 12				
V6	CD6	180	109	167	CD6 → C85 → C30 → C57 → CD6	33	13.51	\$ 40,963.67	CD6 → C85: 12
				
					C30 → C57: 9				
V5	CD7	720	109	137	CD7 → C24 → ... → C39 → CD7	108	27.99	\$ 84,868.48	CD7 → C24: 12
				
					C43 → C39: 12				
V7	CD5	260	126	93	CD5 → C45 → ... → C48 → CD5	48	7.79	\$ 23,620.06	CD5 → C45: 12
				
					C16 → C48: 12				
V8	CD12	270	79	134	CD12 → C22 → ... → C70 → CD12	60	24.29	\$ 73,649.71	CD12 → C22: 12
				
					C8 → C70: 12				
V9	CD9	70	96	160	CD9 → C61 → ... → C9 → CD9	60	16.06	\$ 48,695.53	CD9 → C61: 12
				
					C21 → C9: 12				

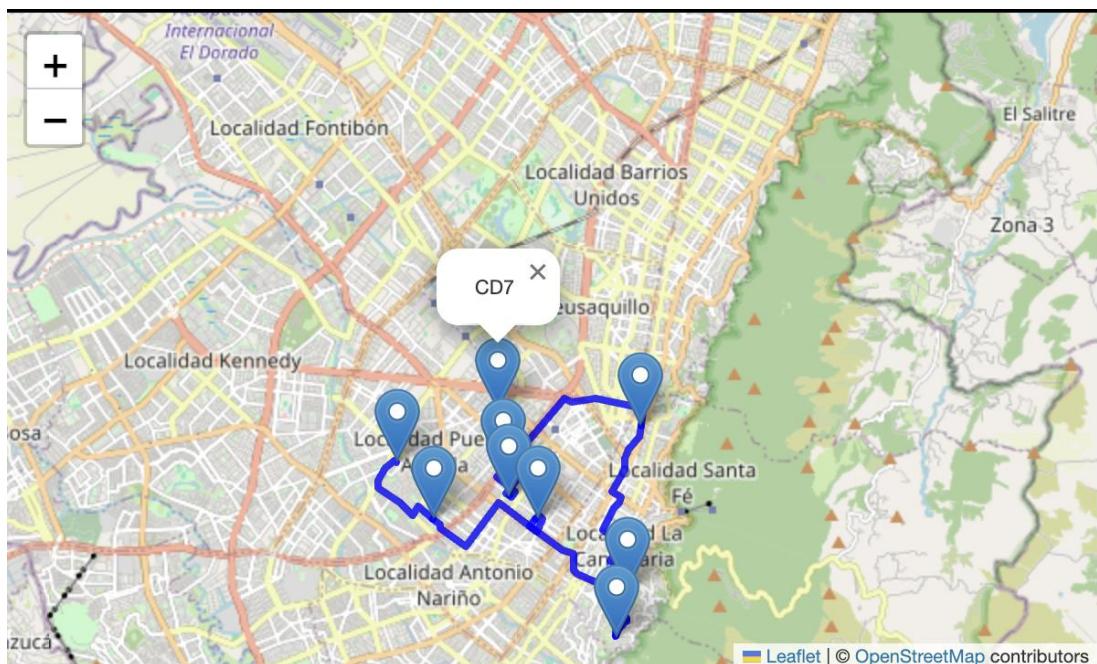
V10	CD7	720	99	108	CD7 → C34 → ... → C56 → CD7	96	25.85	\$ 78,379.78	CD7 → C34: 12 ... C59 → C56: 12
V11	CD5	260	125	955	CD5 → C51 → ... → C3 → CD5	120	34.36	\$ 104,182.9	CD5 → C51: 12 ... C28 → C3: 12
V12	CD8	55	98	716	CD8 → C44 → C62 → C78 → CD8	36	12.48	\$ 37,840.61	CD8 → C44: 12 ... C62 → C78: 12
V13	CD10	75	86	1023	CD10 → C53 → ... → C25 → CD10	65	20.34	\$ 61,672.91	CD10 → C53: 12 ... C86 → C25: 12
V14	CD12	270	74	1076	CD12 → C79 → ... → C37 → CD12	60	12.25	\$ 37,143.22	CD12 → C79: 12 ... C54 → C37: 12
V15	CD11	90	85	942	CD11 → C50 → ... → C38 → CD11	60	47.18	\$ 143,054.4	CD11 → C50: 12 ... C71 → C38: 12

Visualización:

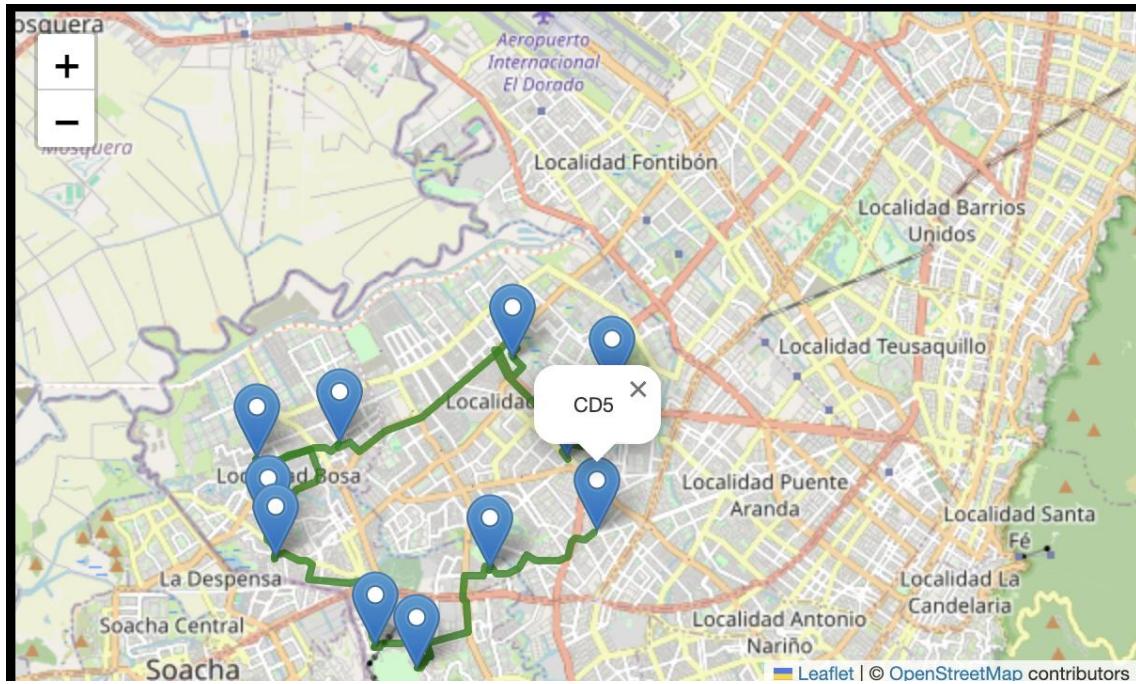
Ruta de V1: ['CD4', 'C7']



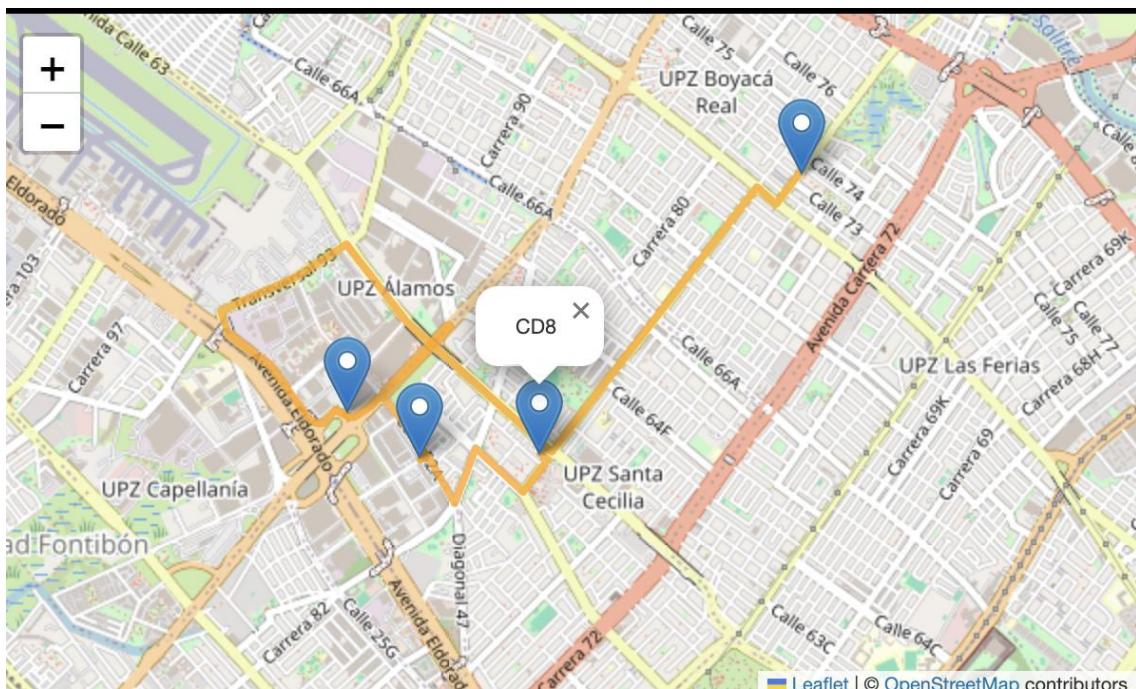
Ruta de V10: ['CD7', 'C34', 'C15', 'C84', 'C73', 'C89', 'C23', 'C59', 'C56']



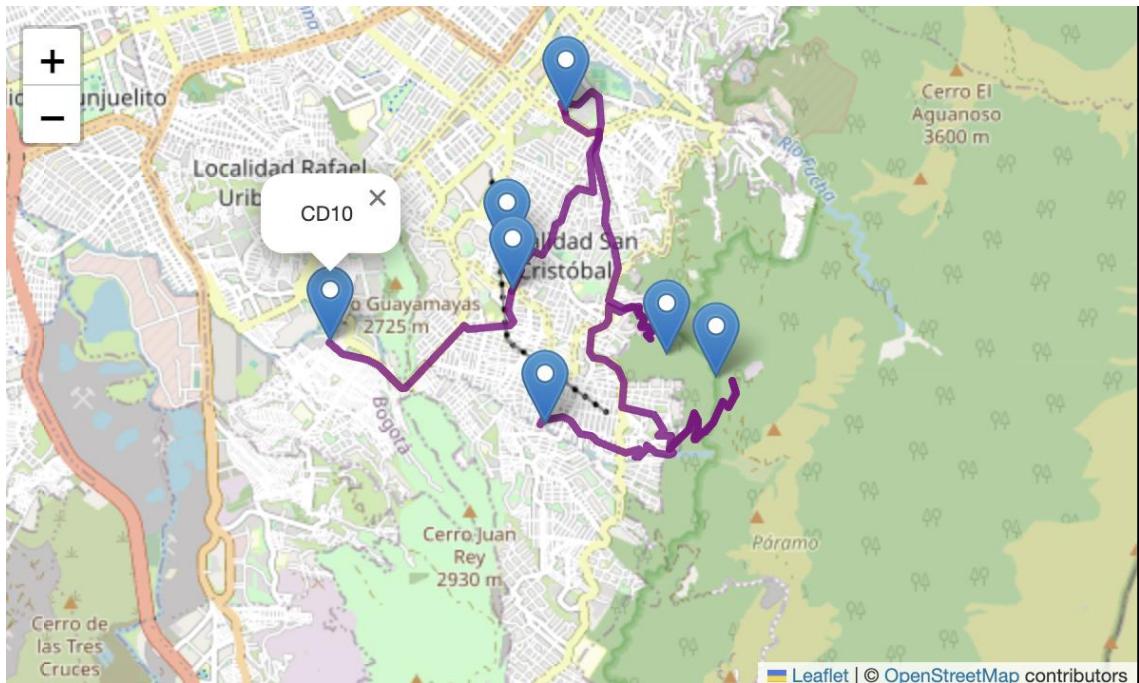
Ruta de V11: ['CD5', 'C51', 'C60', 'C46', 'C76', 'C65', 'C42', 'C19', 'C17', 'C28', 'C3']



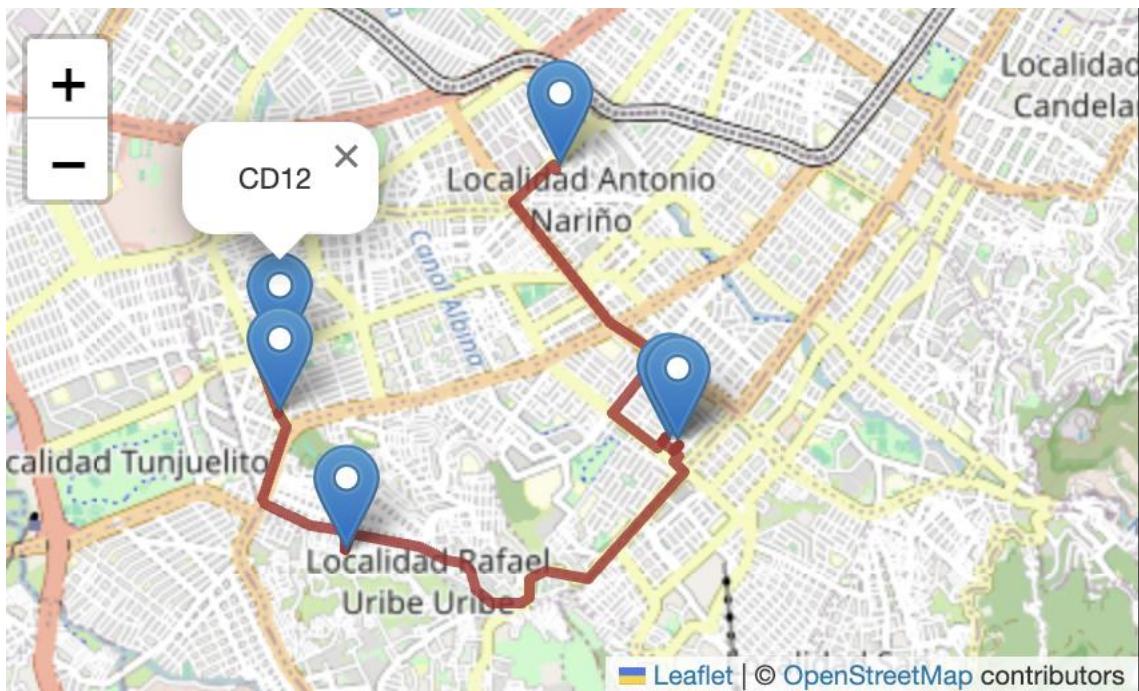
Ruta de V12: ['CD8', 'C44', 'C62', 'C78']



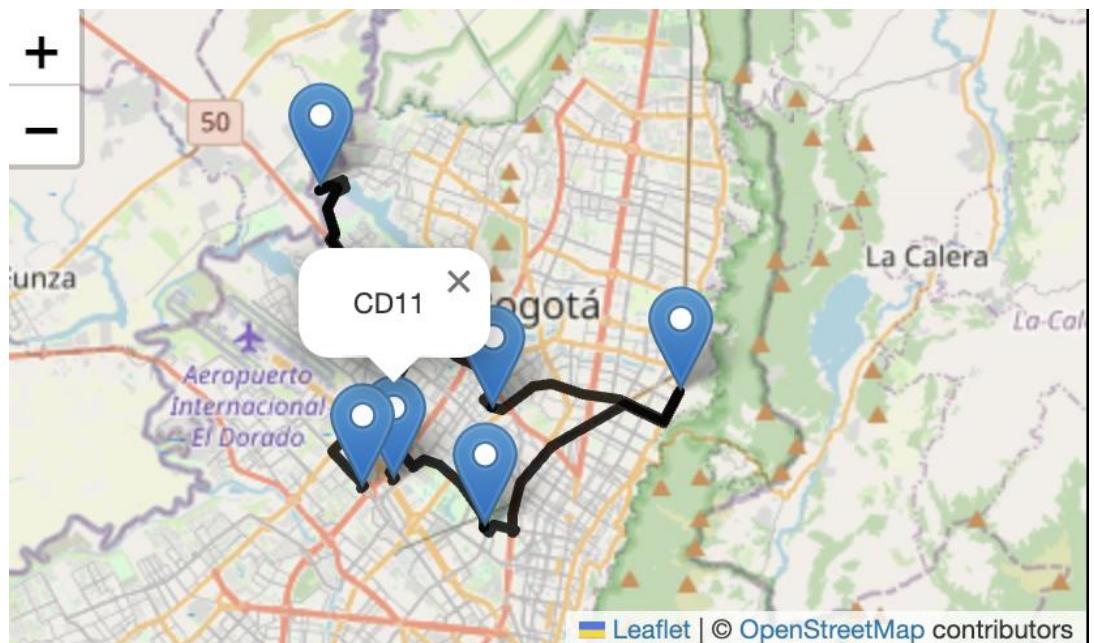
Ruta de V13: ['CD10', 'C53', 'C83', 'C80', 'C52', 'C86', 'C25']



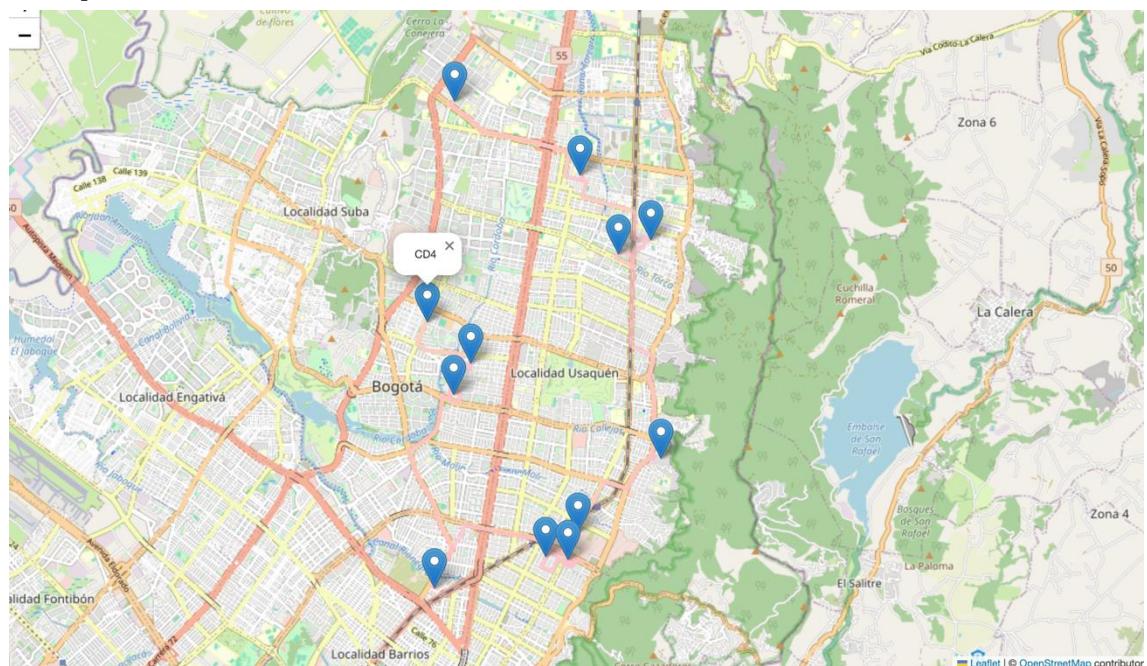
Ruta de V14: ['CD12', 'C79', 'C68', 'C27', 'C54', 'C37']



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



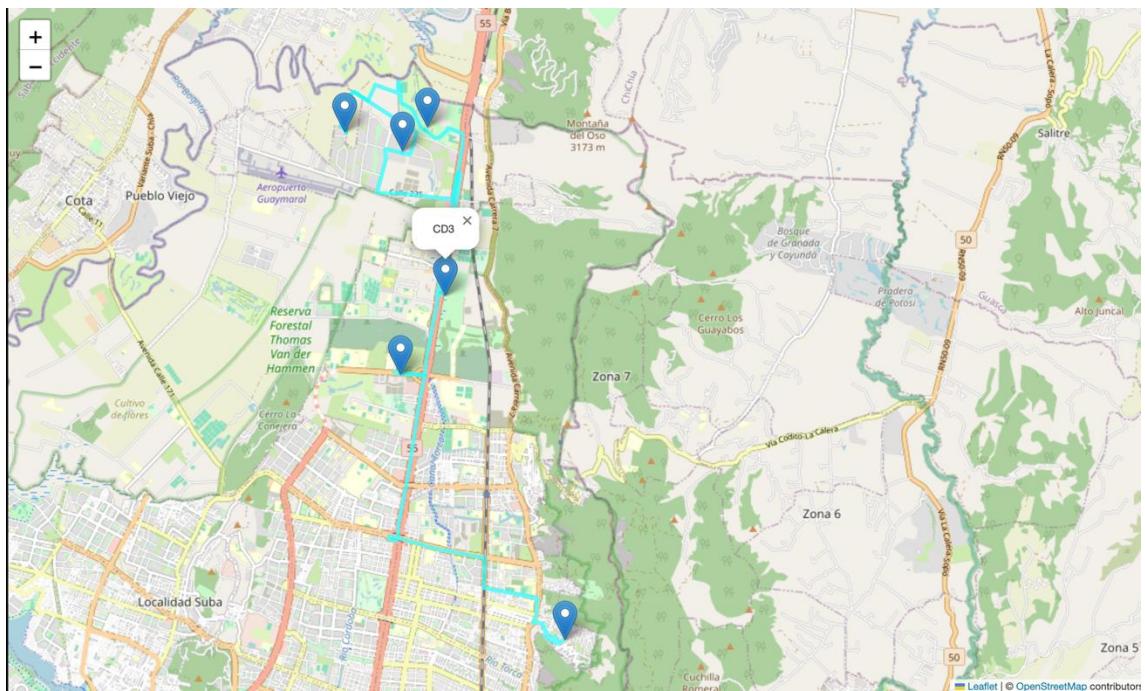
Ruta de V2: ['CD4', 'C67', 'C74', 'C69', 'C20', 'C41', 'C82', 'C63', 'C4', 'C47', 'C66', 'C58']



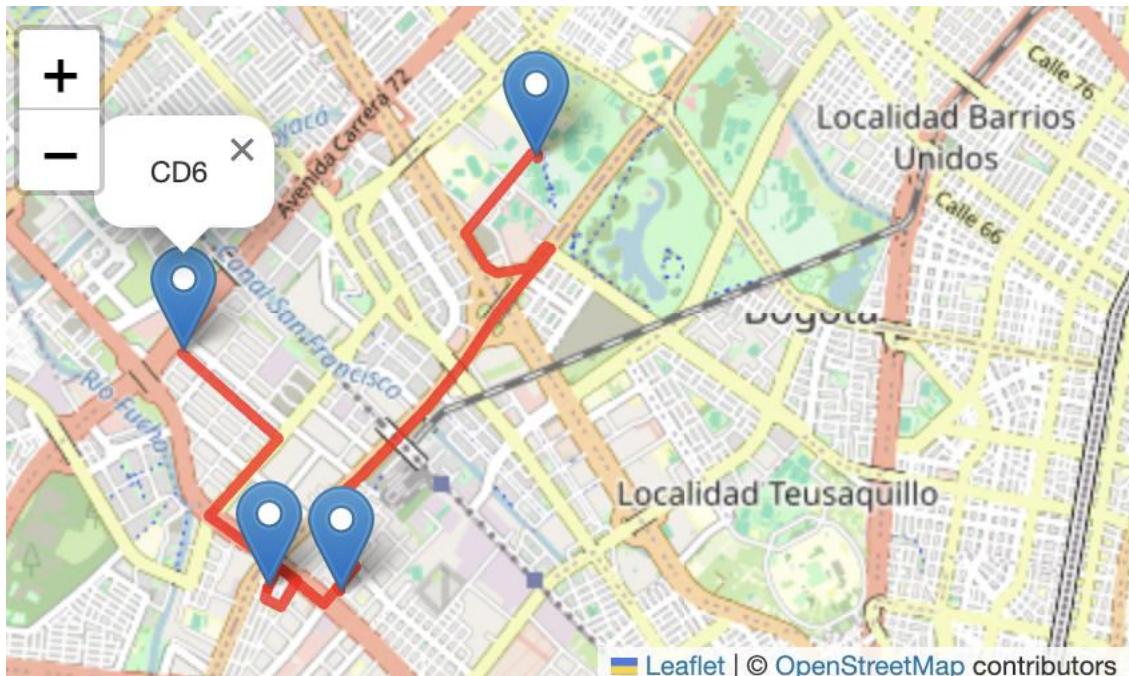
Ruta de V3: ['CD6', 'C32', 'C11', 'C75', 'C1', 'C26', 'C87', 'C33', 'C64', 'C13', 'C55']



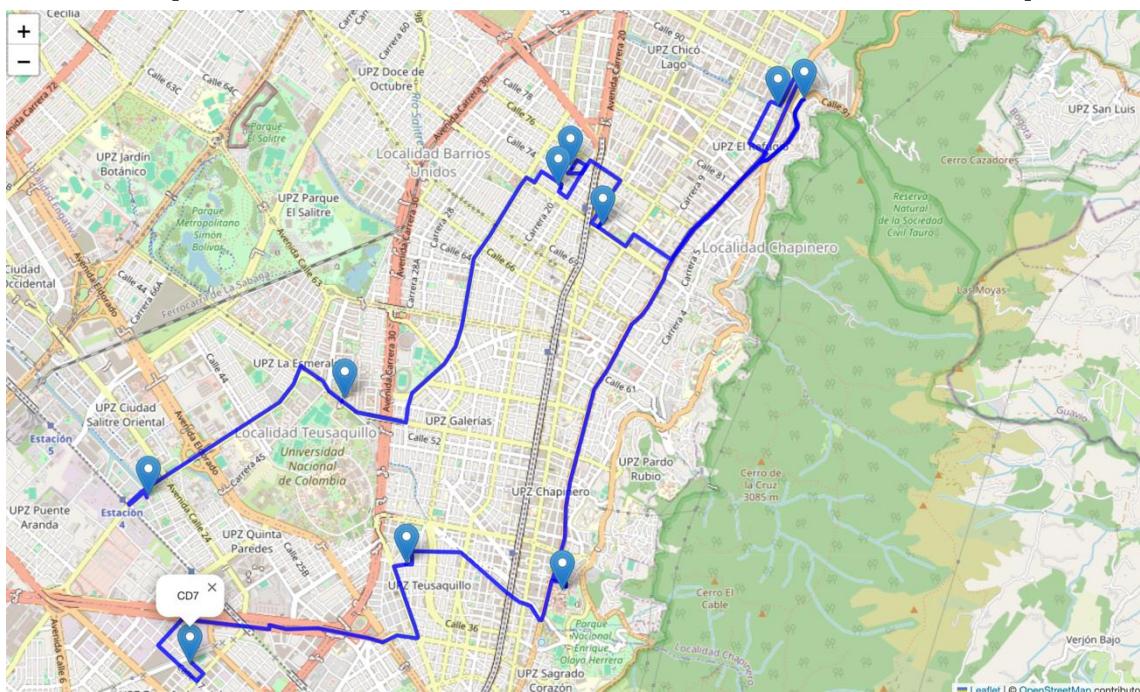
Ruta de V4: ['CD3', 'C31', 'C5', 'C77', 'C6', 'C2']



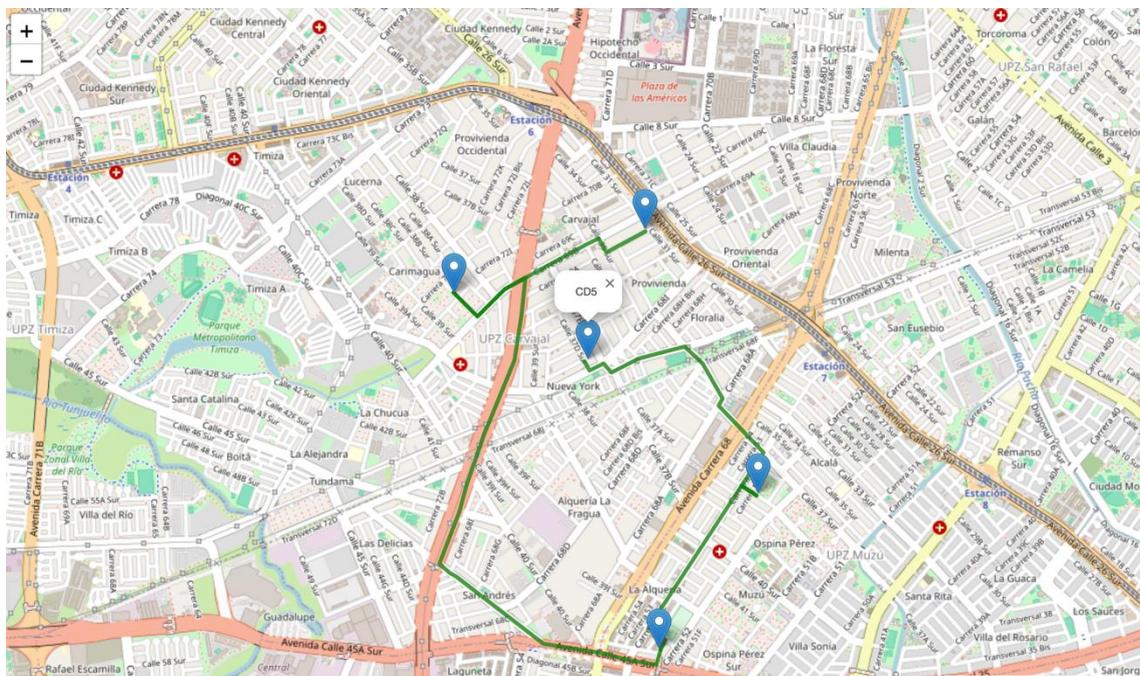
Ruta de V6: ['CD6', 'C85', 'C30', 'C57']



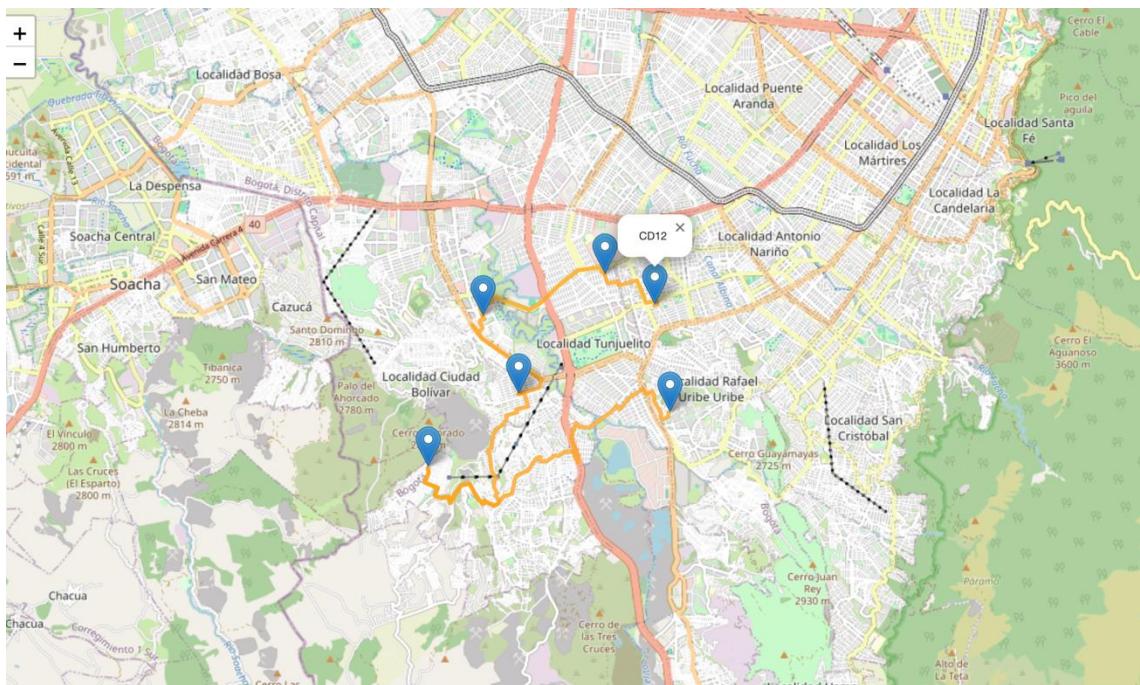
Ruta de V5: ['CD7', 'C24', 'C35', 'C12', 'C72', 'C14', 'C90', 'C10', 'C43', 'C39']



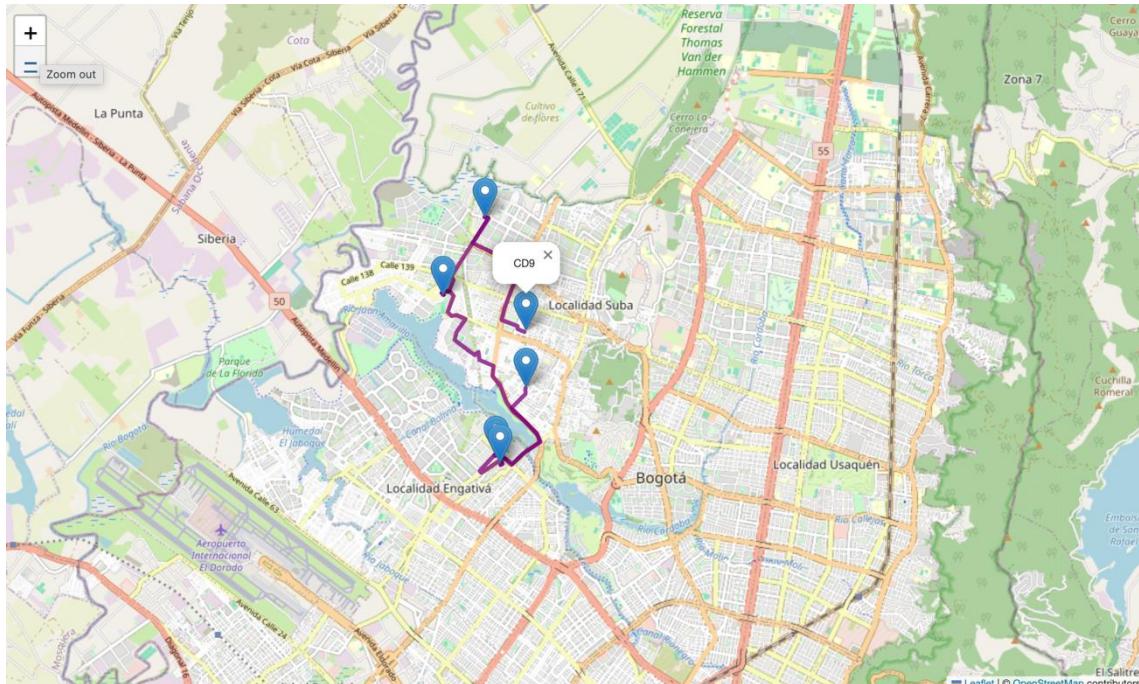
Ruta de V7: ['CD5', 'C45', 'C18', 'C16', 'C48']



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



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



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:

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

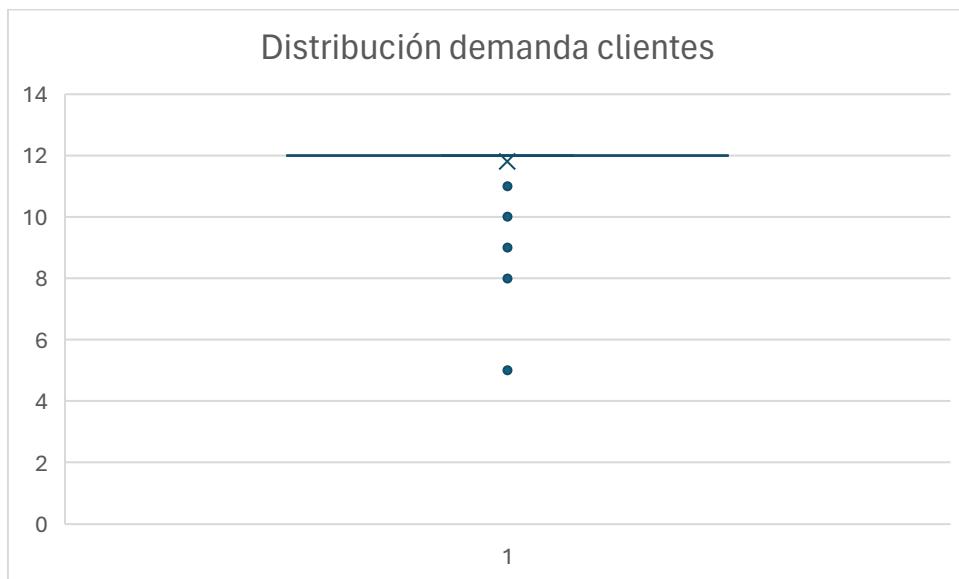
Se utilizaron 15 vehículos y la distancia promedio recorrido entre todos fue de 23.972 km.

La carga promedio se calcula del mismo modo:

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

La carga promedio entre los 15 vehículos fue de 70.86

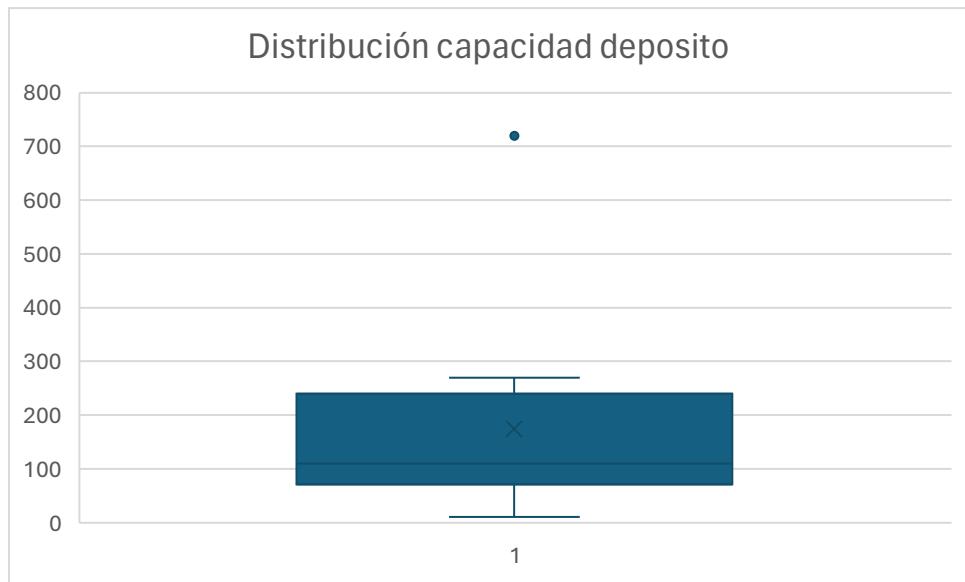
- Desviaciones estándares y distribuciones de los datos Frente a las demandas de los clientes:



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

La desviación estándar de estos datos fue de 0.92

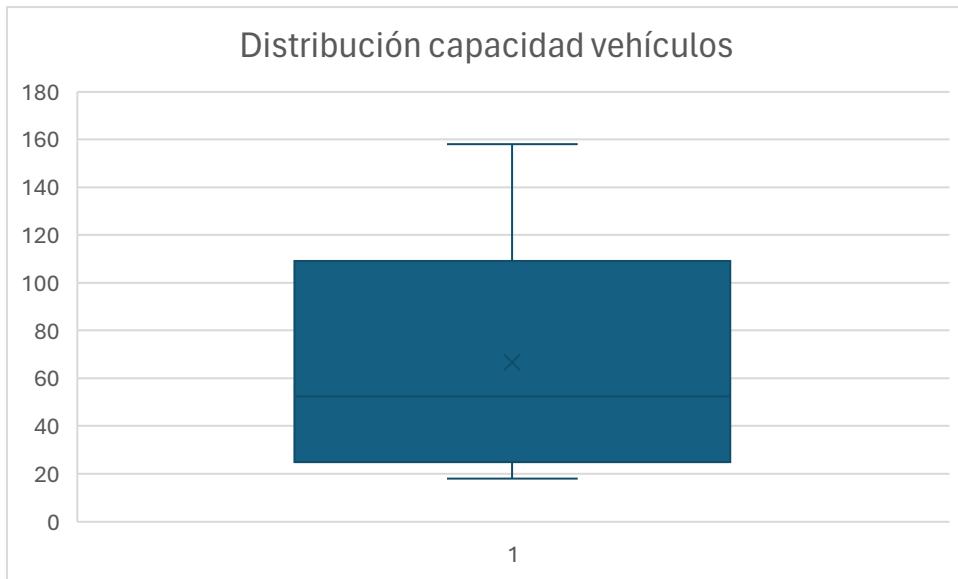
Frente a las capacidades de los depósitos se vio lo siguiente:



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 recomendamos 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.

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%B1o%20con%20una,transporte%20m%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).