

Análisis del problema de ruteo de vehículos con consideraciones ambientales

Kirpach, Juan Pablo

jpkirpach@hotmail.com

Orlandi, Federico

fedeorlandi@hotmail.com

Mascarino, Esteban Ezequiel.

estmasca@mit.edu

Gómez, Daniela Nora

danielag@fceia.unr.edu.ar

Cerrano, Marta Liliana

mcerrano@fceia.unr.edu.ar

Universidad Nacional de Rosario (Argentina).

Fecha de recepción: 16/07/2020

Fecha de aprobación COINI: 08/09/2020

Fecha de aprobación RIII: 24/06/2021

RESUMEN

La logística verde persigue la minimización del impacto ambiental generado por las diversas actividades logísticas. En línea con este objetivo, este trabajo se basa en un modelo denominado PRP (Pollution Routing Problem, por sus siglas en inglés), en el cual se determinan las rutas a realizar por una flota de vehículos para servir a un conjunto de clientes. Al contemplar el consumo de combustible, este modelo permite reducir las emisiones de la flota.

Luego, se introduce y desarrolla una variante del PRP que permite determinar el tamaño de flota óptimo al incluir en el análisis el costo fijo de la misma – incluyendo costo de mantenimiento, leasing, entre otros.

Las rutas generadas con ambos modelos son comparadas con aquellas generadas por un modelo VRP (Vehicle Routing Problem, por sus siglas en inglés) para un caso de estudio de características reales. Como resultado, se perciben reducciones significativas del consumo de combustible – hasta un 17 % – y de los costos totales – hasta un 4 % – en las rutas generadas por los modelos PRP. En contrapartida, estos últimos aumentan levemente el tiempo total demandado para completar la totalidad de las rutas – 0,3 % en promedio.

Palabras Claves: Modelos de ruteo, Logística verde, Contaminación, Consumo de combustible, Dimensionamiento de flota

Vehicle routing problem analysis with environmental considerations

ABSTRACT

Green logistics seeks to minimize the environmental impact generated by multiple logistics activities. To achieve this goal, this paper is based on a Pollution Routing Problem (PRP) model, which determines the best routes for a set of vehicles to serve a group of clients. By including fuel consumption in the analysis, this model can reduce fleet emissions.

Then, a PRP variant is introduced and developed. This new model helps determining the optimal fleet size by including the fixed cost of the fleet under analysis – including maintenance cost, leasing, among others.

The routes generated with both models are compared with those generated by a traditional Vehicle Routing Problem (VRP) through a case study of real characteristics. As a result, significant reductions in fuel consumption – reaching 17 % – as well as slight decreases in total routes costs – close to 4% – are generated by both PRP models. However, PRP models slightly increase the total time required by the routes – 0,3 % on average.

Keywords: Routing models, Green logistics, Pollution, Fuel consumption, Fleet sizing

Análise de problemas de roteamento de veículos com considerações ambientais

RESUMO

A logística verde busca minimizar o impacto ambiental gerado pelas diversas atividades logísticas. Em linha com este objetivo, o trabalho é baseado em um modelo de Problema de Roteamento de Poluição (PRP), que determina as rotas a serem realizadas por uma frota de veículos para atender um grupo de clientes. Ao incluir o consumo de combustível na análise, o modelo pode reduzir as emissões da frota.

Em seguida, uma variante do PRP é introduzida e desenvolvida. Este novo modelo ajuda a determinar o tamanho ótimo da frota ao incluir na análise o custo fixo da frota - incluindo custo de manutenção, arrendamento, entre outros.

As rotas geradas com ambos modelos são comparadas com aquelas geradas por um problema de roteamento de veículos (VRP) tradicional por meio de um estudo de caso de características reais. Como resultado, reduções significativas no consumo de combustível - até 17% - e nos custos totais - perto do 4% - são obtidas pelos modelos de PRP. Por outro lado, os modelos PRP aumentam ligeiramente o tempo total necessário para completar todas as rotas - 0,3% em média.

Palavras chave: Modelos de Roteamento, Logística Verde, Poluição, Consumo de Combustível, Dimensionamento de Frota

1. INTRODUCCIÓN

La logística se define como la gestión del flujo de materiales e información desde los puntos de origen hasta los puntos de consumo, con el objetivo de satisfacer las necesidades de los clientes al menor costo total. Para poder alcanzar este objetivo, se deben desarrollar de manera eficaz una serie de actividades entre las que se encuentran el transporte de cargas, el almacenamiento, la gestión de inventarios, el manejo de materiales y la administración de la información relacionada [1]. Estas actividades son comprendidas dentro del proceso logístico, siendo este una parte fundamental de los procesos de negocio de una organización.

El transporte de productos – ya sea un bien o un servicio – a clientes constituye uno de los últimos eslabones dentro de dicho proceso logístico. Todo esfuerzo realizado en las operaciones vinculadas al transporte afecta la percepción generada en el cliente con relación al producto ofrecido. Por tal motivo, deficiencias en esta etapa del proceso logístico van en desmedro del trabajo realizado en procesos anteriores, entre los que se encuentran la investigación de mercado, el diseño de productos y procesos, la producción, entre otros.

La definición de las rutas que deben realizar los vehículos para atender a la totalidad de los clientes es considerada una actividad crítica dentro del transporte de cargas. Desde 1956 se estudia como optimizar estas rutas buscando disminuir costos y mejorar el nivel de servicio al cliente. La mayoría de dichos estudios tienen como objetivo la minimización de los costos tradicionales de transporte incluyendo costo del combustible – estableciendo una relación directa con el tiempo y la distancia requerida para completar las rutas –, salarios de los conductores, costo de insumos para vehículos, peajes, entre otros. Este enfoque, sin embargo, omite la consideración explícita del impacto ambiental que genera el transporte de cargas.

La omisión de dicha externalidad desconoce la existencia de una gran problemática. Los vehículos utilizados para el transporte emiten una serie de agentes contaminantes, entre los que se encuentran gases de efecto invernadero (GEI) y material particulado. Si bien el material particulado puede afectar seriamente a la salud de las personas que se encuentran expuestas, el principal interés radica en los GEI. Estos gases contribuyen al incremento paulatino de la temperatura en la superficie terrestre, fenómeno conocido como calentamiento global. Se estima que, si las emisiones de dichos gases continúan al ritmo actual, los niveles de temperatura que podrían alcanzarse para mediados de siglo harían peligrar la subsistencia de las personas en el planeta [2].

Resulta aún más alarmante dicha omisión si se considera que el 56,6% de las emisiones antropogénicas, es decir, aquellas originadas por las actividades humanas, corresponden a dióxido de carbono (CO₂) liberado por el uso de combustibles fósiles [3]. En particular, en Latinoamérica, si se consideran las emisiones de CO₂ provenientes del uso de dichos combustibles, el transporte vial participa en el 32% del total [4].

El impacto ambiental ocasionado por las actividades logísticas, en particular el transporte, ha motivado el surgimiento de una rama de estudio dentro de la logística conocida como logística verde. Esta última deja de lado el enfoque miope de la logística tradicional que analiza una estructura de costos más limitada. Por el contrario, la logística verde considera el costo de las externalidades ocasionadas por el desarrollo de las actividades logísticas [5].

En este contexto, la Ingeniería Industrial dispone de herramientas apropiadas que permiten gestionar las actividades logísticas bajo este nuevo paradigma verde procurando garantizar el desarrollo de las mismas de manera sustentable en el tiempo. A partir de ello, este trabajo presenta un modelo de ruteo

que incluye las externalidades ambientales dentro del análisis. Asimismo, se exhiben los ahorros posibles en consumo de combustible y costos a partir del desarrollo de un caso de estudio.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

La importancia de las actividades logísticas ha motivado numerosos estudios en pos de mejorar indicadores como el nivel de servicio al cliente, el costo total, etc. En el caso particular del transporte, gran parte de estos estudios han fomentado el desarrollo de modelos matemáticos para analizar el problema del ruteo de los vehículos, con el objetivo de diagramar rutas más eficientes.

El Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), planteado como un Programa Entero Mixto (PEM), fue introducido por Dantzig y Ramser en 1959 [6]. El VRP es un problema de decisión que consiste en determinar un conjunto de rutas – dado un depósito, un conjunto de clientes dispersos geográficamente y una flota de vehículos definida – de modo que la totalidad de los clientes sean atendidos. Además, en sus diversas variantes, se deben satisfacer una serie de restricciones que dependen del modelo en análisis, entre las que se encuentran capacidad limitada de los vehículos, demanda de los clientes, horarios de atención, entre otras. Las rutas generadas son posteriormente evaluadas en función de una serie de criterios, generalmente de carácter económico, que varían según los objetivos del estudio.

Los modelos asociados a problemas de ruteo han sido ampliamente estudiados ya que brindan información útil para la toma de decisiones, principalmente a nivel operativo. Además, los cambios tecnológicos que se produjeron han fomentado el desarrollo de complejos modelos que se ajustan mejor a los sistemas logísticos reales.

Asimismo, cabe destacar que los esfuerzos de investigación realizados hasta el año 2007 se centraron en el estudio del problema de ruteo con un enfoque tradicional, focalizándose en los costos operativos. Sin embargo, la estimación de estos costos recurría a simplificaciones que consideraban que el consumo de combustible, uno de los principales costos de operación, era proporcional a la distancia recorrida o al tiempo requerido, ignorando la verdadera relación entre estas variables. Esto se traducía en la minimización de las distancias recorridas, el número de vehículos utilizados, entre otros objetivos. No obstante, en 2007 comienzan a desarrollarse modelos que trabajan sobre dichas simplificaciones e incluyen el impacto ambiental de las decisiones de distribución dentro del análisis, dando origen a la logística verde.

En particular, resulta de interés el Pollution Routing Problem (PRP), introducido por Bektaş y Laporte en 2011 [7]. En este modelo, además de las consideraciones económicas y operacionales tradicionales, se toman en cuenta las emisiones de GEI que producen los vehículos de la flota. En este sentido, el PRP minimiza el combustible consumido por la flota para conseguir una reducción en dichas emisiones mediante el análisis de una serie de variables que no eran estudiadas en los diversos modelos que lo precedieron – la carga del vehículo, la velocidad media en cada trayecto, la inclinación media de la ruta, entre otras –.

Al igual que el VRP, el PRP se puede modelizar a través de un PEM que permite determinar las rutas que debe realizar un conjunto definido de vehículos para atender a un grupo de clientes. En particular, el PRP utiliza una función objetivo compleja para determinar el costo de operación de la flota. En ella incluye una serie de términos que permiten determinar el costo del combustible consumido y el costo variable asociado al conductor – expresado como un incentivo percibido por el tiempo total de conducción –.

Buscando minimizar el combustible consumido, el PRP posiciona a los clientes de manera estratégica dentro de la ruta, atendiendo, por lo general, a aquellos clientes con mayor demanda – en términos de carga – en primer lugar y permitiendo que el camión viaje con menos carga en el resto de la ruta.

Asimismo, este modelo determina la velocidad óptima para cada vehículo en cada etapa de la ruta, cumpliendo con las restricciones de tiempo impuestas por los clientes y, en simultáneo, minimizando el combustible consumido.

3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Con el objetivo de presentar la efectividad de los modelos de ruteo de vehículos, en particular del PRP, la presente sección desarrolla un caso de estudio. En el mismo se analiza una ferretería industrial del Gran Rosario que es proveedora de un conjunto de clientes industriales.

En la actualidad, la compañía en análisis subcontrata la distribución de sus productos. Sin embargo, buscando optimizar su operación y reducir el impacto ambiental que ocasiona su flota, la empresa se dispone a internalizar dicha distribución.

Para la nueva estrategia de integración, la empresa define la utilización de camiones ligeros Mercedes Benz Accelo 1016/37 para su potencial flota.

Luego, el tamaño de la flota será definido en función de la cantidad de clientes a abastecer y su respectiva demanda. En particular, se proponen cinco instancias del problema que difieren en la cantidad de clientes a atender (10, 20, 50, 100 y 200 clientes). A cada una de las instancias se le asociará un tamaño de flota particular que garantice la correcta atención de la totalidad de los clientes. La Figura 1 presenta la distribución geográfica de los 200 clientes (nodos rojos) y el depósito (nodo azul).

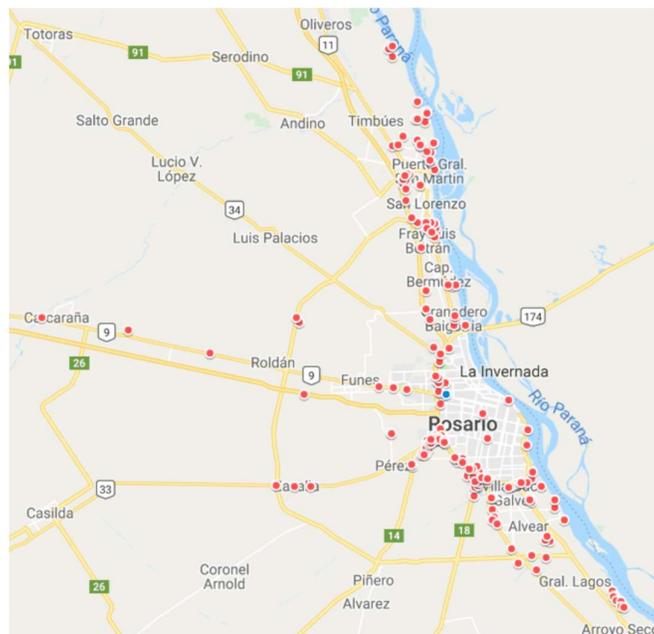


Figura 1 Ubicación geográfica de los clientes y el depósito

4. MODELO

Para desarrollar el modelo matemático que permite analizar el caso de estudio fue necesario el planteo de una serie de hipótesis. En primer lugar, se define que la demanda semanal por cliente es conocida y constante, siendo atendida en una o dos entregas semanales. En segundo lugar, la cantidad de mercadería entregada por visita – llamada dropsize – es igual a la demanda semanal para aquellos clientes con una entrega por semana, mientras que será igual a la mitad de la demanda semanal para aquellos clientes con dos entregas por semana. Luego, se define que el dropsize es, a lo sumo, equivalente a la capacidad máxima de cada vehículo. Además, se define la existencia de un único depósito que dispone de inventario suficiente para abastecer la totalidad de la demanda semanal, sin que se produzcan faltantes. También, se define una flota de vehículos homogénea constituida únicamente por camiones Mercedes Benz Accelo 1016/37.

Adicionalmente cada vehículo puede realizar un único recorrido en el día, comenzando y terminando dicho recorrido en el depósito y circulando a la velocidad media definida para cada tramo – siendo un tramo el trayecto que conecta dos nodos –. Para simplificar el problema, se considera que los tramos no tienen pendiente. Por último, cada cliente posee un tiempo de servicio conocido y constante y, además, debe ser atendido en el rango horario definido por una jornada laboral de nueve horas.

La demanda semanal de cada cliente se exhibe en la Figura 2.



Figura 2 Demanda semanal por cliente

4.1. Velocidad media, distancia y tiempo entre establecimientos

A partir de las coordenadas de los clientes y del depósito, utilizando la API Distance Matrix® de Google, se definieron las siguientes matrices.

Por un lado, la matriz de distancias contiene la totalidad de las distancias entre dos nodos (cliente o depósito), definiendo al elemento d_{ij} como la longitud en metros de la ruta que une al nodo i con el nodo j . Por otro lado, la matriz de tiempos contiene la totalidad de los tiempos estimados para realizar los recorridos que vinculan dos nodos cualesquiera basados en los trayectos de la matriz de distancias, definiendo al elemento t_{ij} como el tiempo en segundos demandado para realizar la ruta entre i y j .

A partir de dichas matrices, se determinó la matriz de velocidades medias, definiendo al elemento v_{ij} a partir de la relación entre d_{ij} y t_{ij} . La Figura 4 Figura 3 Distribución de velocidades presenta un histograma de velocidades medias para la totalidad de los trayectos posibles.

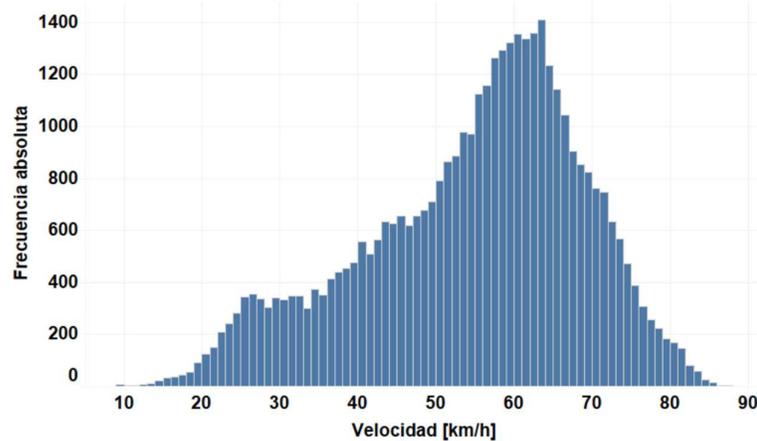


Figura 3 Distribución de velocidades

4.2. PRP táctico

El caso de estudio propuesto requiere de un modelo matemático que permita la determinación del conjunto óptimo de rutas y, en simultáneo, el tamaño óptimo de flota. Este último objetivo no puede ser abordado por los modelos de ruteo convencionales, incluido el modelo PRP propuesto por Bektaş y Laporte [7], que toman al tamaño de la flota como información de entrada y se enfocan únicamente en decisiones operativas, inherentes a la determinación de las rutas que deben realizar los vehículos. En este sentido, el modelo a desarrollar dispondrá además de un enfoque táctico relacionado a la determinación del tamaño de flota.

El planteo anterior expone la necesidad de modificar el PRP básico, propuesto por Bektaş y Laporte [7], en virtud de captar el nuevo enfoque. De esta manera, la función objetivo debe adaptarse para considerar las variaciones de costo originadas por los diferentes tamaños de flota. En consecuencia, tanto las restricciones como la función objetivo deben ser reformuladas de modo que las decisiones de nivel operativo coexistan con aquellas decisiones de nivel táctico. A fin de reducir la complejidad del modelo, tanto la función objetivo como las restricciones deben modificarse de manera tal que las velocidades dentro de los tramos no sean una variable de decisión.

4.2.1. Formulación matemática

Tomando como base la formulación matemática del PRP que realizan Kramer et al. [8], el PRP táctico está definido por un grafo completo dirigido $G = (N; A)$, de modo tal que $N = \{0, \dots, n\}$ es un conjunto de nodos donde el nodo 0 es un depósito y el resto de los nodos se asocian a clientes y $A = \{(i, j): i, j \in N; i \neq j\}$ es un conjunto de arcos. La distancia desde el nodo i al nodo j se denota d_{ij} .

Una flota de vehículos, cada uno con capacidad Q , se dispone a abastecer al conjunto de clientes. El conjunto $N_0 = N \setminus \{0\}$ representa a la totalidad de clientes, donde cada cliente $i \in N_0$ tiene una demanda no negativa igual a q_i – equivalente al dropsize en este trabajo – y debe ser atendido en el intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$. Se permite que un vehículo llegue a atender a un cliente antes del comienzo de la ventana

de tiempo, debiendo esperar hasta el instante a_i para comenzar el servicio. Luego, el tiempo de servicio del cliente i es definido por t_i .

Por otro lado, se define la variable binaria x_{ij} que será igual a 1 si alguno de los vehículos de la flota realiza el tramo (i, j) . Las variables f_{ij} representan la carga total transportada en el arco $(i, j) \in A$. Las variables y_j representan el instante de tiempo en el que comienza el servicio del nodo $j \in N_0$. Luego, v_{ij} representa la velocidad media de circulación del vehículo en el tramo (i, j) . Además, s_j representa el tiempo total dedicado en una ruta que tiene al nodo $j \in N_0$ como el ultimo nodo visitado antes de volver al depósito.

Asimismo, en la función objetivo se encuentran involucrados una serie de parámetros. En primer lugar, los parámetros w_1 , w_2 , w_3 y w_4 se asocian a características técnicas del vehículo. Mientras que f_c representa el costo del combustible por litro, f_d es el costo variable asociado al salario del conductor – incentivo que percibe el chófer por el tiempo que se encuentra conduciendo – y f_f representa el costo diario de mantenimiento y leasing de cada vehículo de la flota, sumadas a la componente fija del costo laboral – salario básico percibido por el chófer.

La formulación del PEM se presenta a continuación:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} f_c w_1 \frac{d_{ij}}{v_{ij}} x_{ij} \quad (1)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} f_c w_2 d_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} f_c w_3 d_{ij} f_{ij} \quad (3)$$

$$+ \sum_{(i,j) \in A} f_c w_4 d_{ij} v_{ij}^2 x_{ij} \quad (4)$$

$$+ \sum_{j \in N_0} f_d s_j \quad (5)$$

$$+ \sum_{j \in N_0} f_f x_{0j} \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1; \quad i \in N_0; \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1; \quad j \in N_0; \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N} f_{ji} - \sum_{j \in N} f_{ij} = q_i; \quad i \in N_0; \quad (9)$$

$$q_j x_{ij} \leq f_{ij} \leq (Q - q_i) x_{ij}; \quad (i, j) \in A; \quad (10)$$

$$y_i - y_j + t_i + \frac{d_{ij}}{v_{ij}} x_{ij} \leq K_{ij} (1 - x_{ij}); \quad i \in N; j \in N_0; i \neq j; \quad (11)$$

$$a_i \leq y_i \leq b_i; \quad i \in N_0; \quad (12)$$

$$y_j + t_j - s_j + \frac{d_{j0}}{v_{j0}} x_{j0} \leq L (1 - x_{j0}); \quad j \in N_0; \quad (13)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}; \quad (i, j) \in A; i \neq j; \quad (14)$$

$$f_{ij} \geq 0; \quad (i, j) \in A; i \neq j; \quad (15)$$

$$y_i \geq 0; \quad i \in N_0; \quad (16)$$

$$s_j \geq 0; \quad j \in N_0; \quad (17)$$

Los Términos (1) – (5) representan el costo de operación de la flota de vehículos para realizar la totalidad de las rutas dentro de un día de trabajo. Cabe destacar que los Términos (1) – (4) permiten determinar el costo del combustible consumido a partir de las relaciones entre dicha variable y la velocidad, la carga transportada y la distancia. Mientras que el Término (5) se asocia al costo variable vinculado al conductor. Por otra parte, se adiciona a la función objetivo del PRP básico el Término (6) que representa el costo fijo asociado a la flota de vehículos – donde x_{0j} representa la cantidad de vehículos que componen la flota-. Este último término es fundamental en la reducción del tamaño de la flota.

Por otra parte, las Restricciones (7) – (8) garantizan que cada cliente sea visitado una única vez. Las Restricciones (9) – (10) garantizan que no se supere la capacidad máxima de ningún vehículo y se satisfaga la demanda de los clientes. Asimismo, dichas restricciones determinan las cargas a transportar en cada uno de los tramos. Las Restricciones (11) – (13) establecen las relaciones existentes entre el tiempo de servicio, el tiempo de inicio de atención de cada uno de los servicios y el tiempo de arribo de los vehículos al depósito. Estos conjuntos de restricciones incluyen a la constante L que es valor lo suficientemente grande y a la constante K_{ij} que representa el tiempo de espera del vehículo en el nodo j y se define como:

$$K_{ij} = \max \left\{ 0, b_i + t_i + \frac{d_{ij}}{v_{ij}} - a_j \right\} \quad (18)$$

Por último, las Restricciones (14) – (17) definen el tipo de variables incluidas en el modelo.

Es importante destacar que el modelo descrito admite ventanas de tiempo de corta duración para los clientes. Sin embargo, en el caso de estudio definido, las ventanas de tiempo cubren la totalidad de la jornada diaria y permiten garantizar que cada vehículo atienda a sus clientes asignados dentro de dicha jornada. Cabe destacar que la utilización de ventanas de tiempo estrictas podría ocasionar un aumento del tamaño de la flota o, en un caso extremo, que el problema resulte incompatible.

4.2.2. Definición de parámetros

En la Tabla 1 se presentan los valores de cada uno de los parámetros intervinientes en el modelo. Los parámetros w_1, w_2, w_3 y w_4 fueron tomados de Kramer et al. [8]. Mientras que Q se obtuvo a partir de la ficha técnica del vehículo. Asimismo, se define la tasa de servicio $\frac{q_i}{t_i}$ que permite definir los respectivos tiempos de servicio. Por último, f_c, f_d y f_f fueron determinados a partir de la información recabada de diversas fuentes – convenios colectivos de trabajo, periódicos, entre otros- de información económica:

Tabla 1 Definición de parámetros

Parámetro	Valor
w_1	$1,018 \times 10^{-3} \frac{\text{litro}}{\text{segundo}}$
w_2	$2,866 \times 10^{-5} \frac{\text{litro}}{\text{metro}}$
w_3	$8,403 \times 10^{-9} \frac{\text{litro}}{\text{metro} \times \text{kilo}}$
w_4	$1,412 \times 10^{-7} \text{ litro} \times \frac{\text{segundo}^2}{\text{metro}^3}$

Q	2780 $\frac{kg}{}$
$\frac{q_i}{t_i}$	20 $\frac{kg}{minuto}$
f_c	1,1 $\frac{USD}{litro}$
f_d	0,00021 $\frac{USD}{segundo}$
f_f	98,839 $\frac{USD}{vehículo}$

5. RESULTADOS COMPUTACIONALES

En la presente sección se detallan los resultados obtenidos aplicando los siguientes modelos al caso de estudio:

- El PRP táctico planteado en la sección anterior.
- Una variación táctica del VRP, que incluye en el análisis los costos fijos de mantenimiento de la flota y persigue la minimización del tiempo que demandan las rutas.
- El PRP definido por Bektaş y Laporte [7], utilizando velocidades medias definidas anteriormente, es decir, la velocidad no se considera como variable de decisión.

Cabe destacar que el PRP sugerido por Bektaş y Laporte [7], a diferencia del modelo táctico planteado en el presente trabajo, no tiene en consideración el costo de mantenimiento de la flota de vehículos ($f_f = 0$). Por otro lado, el VRP táctico mencionado persigue como objetivo la minimización de la suma de los costos de mantenimiento de la flota y del costo variable asociado a los conductores ($f_c = 0$). Por tal motivo, los costos faltantes fueron calculados en una etapa de post-procesamiento con la solución óptima obtenida. Adicionalmente, se corren todos los modelos para cada día de la semana en cada instancia del problema.

La resolución de los problemas se llevó a cabo mediante el uso de un método exacto de ramificación y acotación implementado en Python 3.6.8 y resuelto con Gurobi 8.1.1 utilizando un procesador Intel Core i7, 2.80 GHz, con 12.0 GB de RAM.

5.1. PRP táctico versus VRP táctico

A continuación, la Tabla 2 presenta una comparación entre los resultados de ambos modelos. En ella, se detallan tanto la variación relativa promedio como la variación relativa máxima para una serie de indicadores claves tomando como referencia los valores obtenidos en el VRP táctico. Es decir, la variación se define como $\left(\frac{\text{Valor PRP táctico} - \text{Valor VRP táctico}}{\text{Valor VRP táctico}}\right) \times 100\%$.

Tabla 2 Comparativa entre el VRP táctico y el PRP táctico

Instancia	Variación relativa porcentual	Función objetivo [USD]	Cantidad de vehículos utilizados	Consumo de combustible [litros]	Distancia recorrida [km]	Tiempo demandado para realizar las rutas [hs]
10 clientes	Promedio	-0.20%	0.00%	-2.02%	-1.60%	0.11%
	Máxima	-0.66%	0.00%	-6.55%	-5.27%	0.22%
20 clientes	Promedio	-0.08%	0.00%	-0.77%	-0.54%	0.05%
	Máxima	-0.32%	0.00%	-3.26%	-2.71%	0.12%

50 clientes	Promedio	-0.06%	0.00%	-0.73%	-0.28%	0.19%
	Máxima	-0.11%	0.00%	-1.22%	-0.96%	0.40%
100 clientes	Promedio	-0.12%	0.00%	-1.35%	-0.61%	0.29%
	Máxima	-0.26%	0.00%	-2.89%	-2.06%	0.43%
200 clientes	Promedio	-0.26%	0.00%	-3.02%	-2.66%	0.59%
	Máxima	-0.49%	0.00%	-5.26%	-5.14%	1.07%
General	Promedio	-0.14%	0.00%	-1.58%	-1.14%	0.25%
	Máxima	-0.66%	0.00%	-6.55%	-5.27%	1.07%

Se observa que el PRP táctico demanda en promedio 0,25 % más tiempo para atender a la totalidad de los clientes que el VRP táctico. En contrapartida, obtiene ahorros del 1,58 % en consumo de combustible y de 1,14 % en distancia recorrida.

Dado que ambos modelos arrojan el mismo tamaño de flota, no se presentan grandes variaciones en el costo total. Esto se debe al peso significativo de los costos fijos, iguales para ambos modelos en todas las instancias analizadas.

Adicionalmente, se observan instancias con reducciones superiores al 6,5 % en consumo de combustible y en la distancia recorrida en favor del PRP táctico, con un detrimento del tiempo total de atención de clientes menor al 1,1 %.

En este sentido, el PRP táctico minimiza el peso por kilómetro recorrido para lograr ahorros de combustible al soler posicionar en primer lugar a aquellos clientes con mayor dropsize, permitiendo que el vehículo viaje con menor carga durante el resto de la ruta y reduciendo el combustible consumido.

5.2. PRP táctico versus PRP

La Tabla 3 compara los resultados obtenidos por ambas versiones del PRP. En ella se detallan tanto la variación relativa promedio como la variación relativa máxima para los mismos indicadores de la Tabla 2 tomando como referencia los valores obtenidos en el PRP. Es decir, la variación se define como $\left(\frac{\text{Valor PRP táctico} - \text{Valor PRP}}{\text{Valor PRP}}\right) \times 100\%$.

Tabla 3 Comparativa entre el PRP y el PRP táctico

Instancia	Variación relativa porcentual	Función objetivo [USD]	Cantidad de vehículos utilizados	Consumo de combustible [litros]	Distancia recorrida [km]	Tiempo demandado para realizar las rutas [hs]
10 clientes	Promedio	-3.58%	-4.00%	0.08%	-0.15%	-0.20%
	Máxima	-17.91%	-20.00%	0.42%	-0.76%	-1.00%
20 clientes	Promedio	-10.08%	-11.67%	4.84%	3.90%	0.83%
	Máxima	-30.22%	-33.33%	23.43%	20.93%	6.31%
50 clientes	Promedio	-2.55%	-3.33%	4.42%	4.33%	1.32%
	Máxima	-12.76%	-16.67%	22.11%	21.63%	6.62%
100 clientes	Promedio	-0.01%	0.00%	-0.11%	-0.17%	-0.02%
	Máxima	-0.18%	0.00%	1.56%	1.35%	-0.15%

200 clientes	Promedio	-6.00%	-6.85%	2.26%	2.09%	0.50%
	Máxima	-9.90%	-11.76%	9.82%	9.53%	3.37%
General	Promedio	-4.44%	-5.17%	2.30%	2.00%	0.49%
	Máxima	-30.22%	-33.33%	23.43%	21.63%	6.62%

Dado que el PRP no incorpora en la función objetivo el costo fijo de mantenimiento de cada vehículo, la flota definida por dicho modelo es mayor a aquella definida por el PRP táctico en varias instancias del problema. Este sobredimensionamiento de la flota tiene como consecuencia que el modelo táctico disponga de costos totales menores, 4,44 % en promedio.

En contrapartida, el modelo táctico presenta un consumo de combustible 2,30 % mayor en promedio, asociados a un incremento promedio del 2 % en la distancia total recorrida.

Asimismo, la reducción del tamaño de flota permite aumentar la tasa de utilización de los vehículos que la componen.

5.3. Ruta de muestra

A continuación, se presentan los resultados de una instancia de muestra compuesta por 8 clientes. Los clientes seleccionados corresponden a los nodos 42, 59, 88, 91, 108, 152, 188 y 195, con dropsizes de 383, 321, 374, 310, 336, 270, 277 y 402 kilogramos respectivamente, totalizando 2673 kilogramos. Cabe destacar que dichos clientes fueron atendidos por un único vehículo.

Tabla 4 Resultados computacionales del modelo PRP táctico

PRP Táctico				
Costo de la ruta [USD]	Orden de Visita a los Clientes	Consumo de Combustible [litros]	Distancia Recorrida [km]	Tiempo Total de Ruta [hs]
126,52	[0, 42, 108, 88, 195, 59, 188, 152, 91, 0]	20,39	142,16	6,96

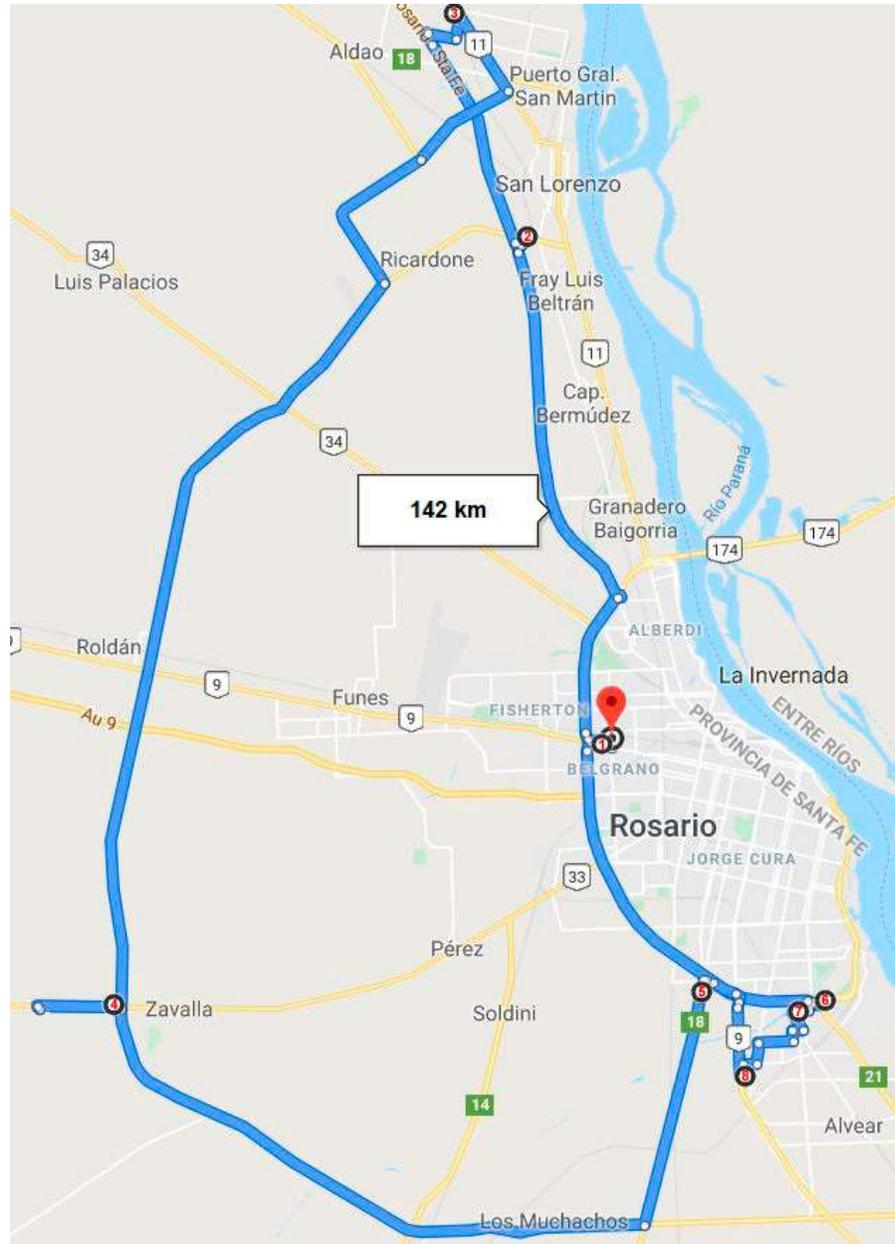


Figura 4 Ruta de muestra definida por el modelo PRP

Tabla 5 Resultados computacionales del modelo VRP táctico

VRP Táctico				
Costo de la ruta [USD]	Orden de Visita a los Clientes	Consumo de Combustible [litros]	Distancia Recorrida [km]	Tiempo Total de Ruta [hs]
131,05	[0, 42, 108, 88, 59, 188, 152, 91, 195, 0]	24,51	166,02	6,94

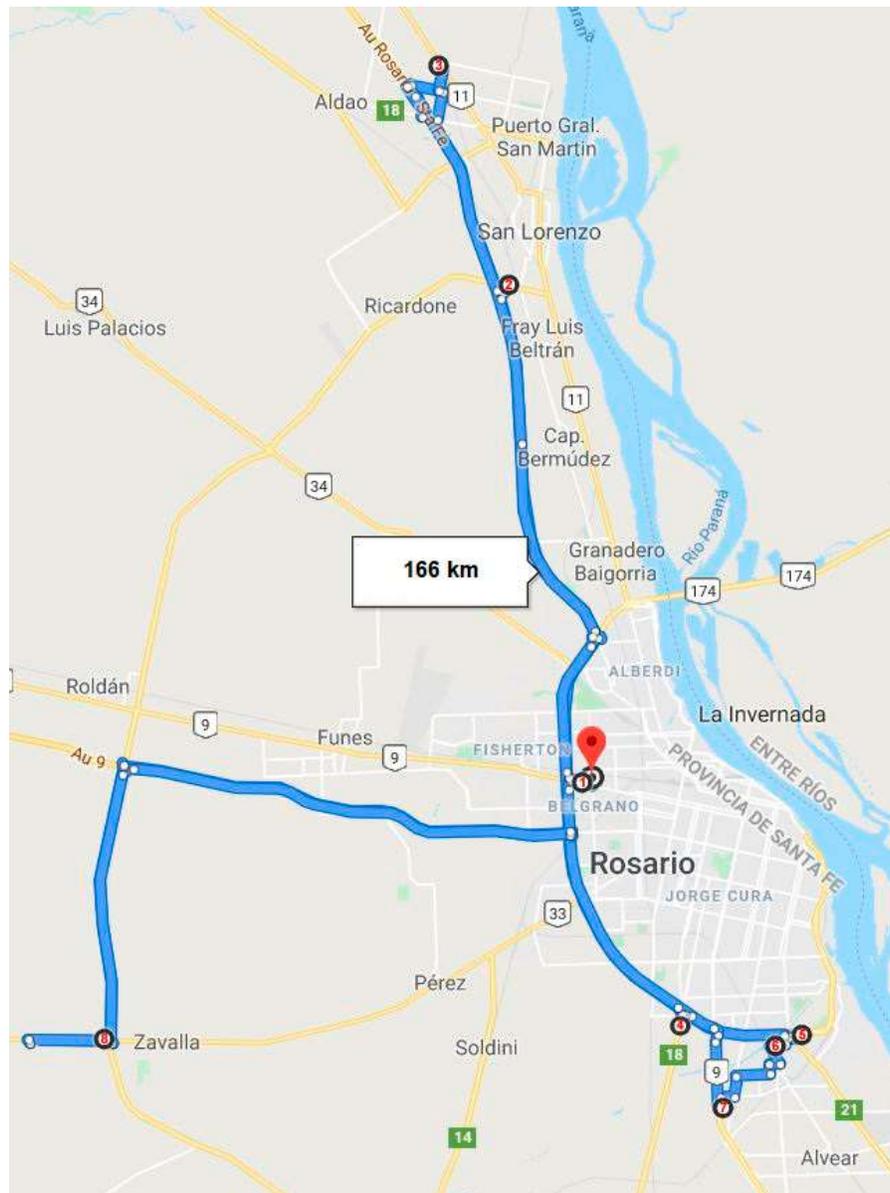


Figura 5 Ruta de muestra definida por el modelo PRP

A partir de los resultados computacionales obtenidos, se puede observar que el PRP táctico consume un 16,85% menos combustible que el VRP táctico, recorriendo una distancia un 14,37% menor. En contraste, el PRP táctico requiere un 0,28% más de tiempo para atender a la totalidad de los clientes. Desde gráficos de las rutas generadas, podemos observar que el VRP táctico prioriza la utilización de autopistas, en pos de minimizar los tiempos de traslado. En cambio, el PRP táctico selecciona las rutas de un modo estratégico, permitiendo reducir la carga transportada por kilómetro y la distancia total recorrida.

6. LIMITACIONES DEL MODELO E INVESTIGACION FUTURA

Uno de los principales objetivos de este trabajo consiste en motivar el desarrollo de investigaciones que permitan sortear las limitaciones del modelo desarrollado. Es por ello que en la presente sección se mencionarán múltiples posibilidades para extender el análisis realizado, permitiendo desarrollar modelos que se ajusten mejor a los sistemas de distribución reales. Sin embargo, no se pretende realizar una descripción absoluta o exhaustiva de las limitaciones y potenciales mejoras de dicho modelo.

En primer lugar, dentro del modelo se suponen conocidos y constantes una serie de características del sistema – demanda, tiempo de servicio, tiempo de traslado, entre otros –. Sin embargo, estas características suelen verse afectadas por incertidumbre en los sistemas reales. A partir de ello, dicha incertidumbre podría ser modelada mediante la incorporación de variables con distribuciones de probabilidad estimadas a partir de diversas fuentes, como información histórica.

En segundo lugar, el modelo realiza una serie de simplificaciones para estimar el combustible consumido. Estas simplificaciones – omitir la pendiente de las rutas, el estilo de conducción de los choferes o los efectos de aceleraciones y desaceleraciones – podrían generar grandes errores en la estimación del consumo de combustible. Dichos errores podrían mitigarse mediante el desarrollo de modelos de ruteo que analicen en mayor profundidad la relación entre todas variables intervinientes, si bien esta nueva relación podría traer aparejada la pérdida de linealidad del modelo.

Otra limitación del problema es su complejidad computacional. Dicha complejidad dificulta el alcance de soluciones de calidad aceptable mediante la utilización de métodos exactos – método de ramificación y acotación, por ejemplo – en tiempos computacionales razonables. Es por ello que futuras investigaciones podrían enfocarse en el desarrollo de algoritmos heurísticos – algoritmos que no garantizan alcanzar la solución óptima – que permitan alcanzar soluciones de calidad aceptable en tiempos computacionales reducidos.

Por otra parte, el modelo desarrollado contempla la utilización de un único depósito. Sin embargo, esta situación no es aplicable a la totalidad de las redes de distribución. Por ello, el modelo podría extenderse para contemplar la utilización de más de un depósito, sin cambiar el enfoque sustentable.

Luego, el PRP podría complejizarse al intentar definir la localización óptima del depósito, incorporando en el análisis una visión estratégica. Dichos problemas se denominan Location-Routing Problems.

Por otro lado, el surgimiento de vehículos eléctricos para el transporte de carga con autonomía reducida motiva la definición de modelos donde se debe analizar el momento de recarga de la batería. En línea con ello, el creciente aumento en el uso de drones dentro de la distribución de correspondencia requiere de modelos de ruteo innovadores que combinen la utilización de vehículos terrestres tripulados y aéreos no tripulados.

Asimismo, la presencia de redes de distribución con entregas y recogidas en simultáneo invita a desarrollar modelos que realicen ambas tareas de un modo sustentable.

Por último, se podrían desarrollar modelos de ruteo sustentables que contemplen la modificación de las rutas en tiempo real. Es decir, modelos que permitan alterar las rutas en función de los imprevistos que se produzcan – trayectos bloqueados, alteración en la demanda de un cliente, congestión en determinados tramos, existencia de nuevos pedidos, entre otros –.

7. CONCLUSIONES

El transporte de productos constituye una actividad extremadamente importante y de complejidad creciente en las áreas urbanas. Éste permite el desarrollo de la mayoría de las actividades en dichas áreas, mientras impacta negativamente en su entorno mediante la generación de ruido, emisiones y congestión vehicular. En este sentido, el diseño de redes de distribución adecuadas – incorporando decisiones estratégicas, tácticas y operativas – permite mitigar este impacto [9].

El presente trabajo aspira a mejorar la toma de decisiones en el plano táctico y operativo, incorporando el análisis de las externalidades ambientales. Dichas externalidades han sido omitidas durante años en los modelos de ruteo tradicionales al considerar que las rutas óptimas son aquellas que demandan una menor cantidad de tiempo. Este enfoque sería razonable de no existir una estrecha relación entre el combustible consumido, la velocidad del vehículo en cada tramo y el factor de carga del vehículo, entre otros factores. Luego, resulta evidente que la minimización del tiempo demandado para realizar la totalidad de las rutas es un objetivo parcialmente contrapuesto con la minimización del consumo de combustible de la flota y, por ende, con la reducción de las emisiones.

El PRP sortea la dificultad mencionada anteriormente al integrar dichos objetivos a partir de su costo. Al considerar la versión más simple del modelo es posible distinguir dos costos principales, uno asociado al combustible consumido y otro vinculado al tiempo demandado para realizar las rutas. Luego, al considerar que el VRP persigue la minimización del tiempo demandado para realizar dichas rutas, se puede concluir que este último modelo constituye un caso particular del PRP y, por ende, la solución óptima del PRP será mejor o igual a la solución óptima del VRP, en términos del costo total.

Lo anterior puede entonces trasladarse a aquellos modelos tácticos que incluyen los costos fijos de cada vehículo dentro del análisis, para determinar el tamaño óptimo de flota. Los resultados computacionales descritos en la Sección 5 reflejan las mejoras sustanciales que puede ofrecer el PRP táctico en términos de consumo de combustible, acompañadas de mejoras leves en los costos totales. Asimismo, dichos resultados reflejan que no es necesario relegar en gran medida el tiempo total demandado para atender a los clientes en virtud de conseguir reducciones significativas en el consumo de combustible y, generalmente, una reducción del costo global.

Por otra parte, las mejoras ofrecidas por el PRP táctico encuentran su origen en el posicionamiento racional de los clientes dentro de cada ruta, en comparación con el VRP táctico. En otras palabras, el primer modelo tiende a ubicar a aquellos clientes con mayor dropsize dentro de las primeras posiciones de atención de la ruta, permitiendo que el vehículo traslade menores cargas durante una mayor cantidad de kilómetros. Esto último se traduce en una reducción del combustible consumido.

Lo expuesto anteriormente refleja la necesidad de cambiar el paradigma actual con el que operan muchas empresas, para capitalizar los grandes beneficios que ofrecen los modelos de ruteo enmarcados dentro de la logística verde. Para aquellas empresas que persiguen únicamente la disminución de los costos, el PRP sugerido ofrece reducciones leves del costo total. De igual modo, para aquellas empresas que deseen operar de manera sustentable, las reducciones sustanciales de las emisiones de GEI – originadas por la minimización del combustible consumido – resultan sumamente atractivas.

Por otro lado, al realizar una comparativa del PRP táctico con su versión simplificada se pone de manifiesto la tendencia que posee el modelo seminal a sobredimensionar el tamaño de la flota. Este sobredimensionamiento se origina al omitir los costos fijos asociados a cada vehículo. En este sentido, el modelo propuesto podría resultar útil al momento de determinar tamaños de flota óptimos que minimicen los costos totales. Esto último refleja la sensibilidad del tamaño de la flota ante variaciones

de los costos fijos de cada vehículo. En determinados casos, con reducciones significativas en los costos fijos, una flota de mayor tamaño podría resultar más económica por permitir alcanzar mayores ahorros de combustible.

Asimismo, el PRP táctico propuesto demanda como información de entrada la totalidad de las distancias y tiempos de traslado asociados a cada tramo posible. Este mayor requerimiento de información, en relación a la versión introducida por Bektaş y Laporte [7], evita que el modelo realice el cálculo de las velocidades medias óptimas que permiten minimizar el combustible consumido en cada trayecto. Dicho cálculo carece de lógica dentro de las aplicaciones reales, puesto que la velocidad media dentro de un tramo no es una variable fácilmente manipulable por el conductor de un vehículo, encontrándose influenciada por las condiciones del entorno – estado de las rutas, congestión vehicular, entre otras –.

En esencia, este trabajo propone realizar las actividades de ruteo de un modo más responsable, comprendiendo y mitigando el gran impacto ambiental que estas actividades generan. Además, exhibe que la persecución de este objetivo no implica atentar contra los costos asociados a la operación de una flota de vehículos.

REFERENCIAS.

- [1] Crainic, T. G.; Laporte, G. (1997). "Planning models for freight transportation". Design and operation of civil and environmental engineering systems. Wiley-Interscience, p. 343-394. New York
- [2] Mora, C.; Frazier, A. G.; Longman R. J.; Dacks, R. S.; Walton, M. M.; Tong, E. J.; Sanchez, J. J.; Kaiser, L. R.; Stender, Y. O.; Anderson, J. M., et al. (2013). "The projected timing of climate departure from recent variability". Nature, vol. 502, no. 7470, p. 183-187.
- [3] Bernstein, L.; Bosch, P.; Canziani, O.; Chen, Z.; Christ, R.; Riahi, K. (2008). "Climate change 2007. Synthesis report"
- [4] Ríos, R. A.; Arango, F.; Acevedo-Daunas, R.; Vicentini, V. L. (2013). "Estrategias de Mitigación y Métodos para la Estimación de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en el Sector Transporte". Banco Interamericano Del Desarrollo, p. 45-48.
- [5] Sbihi, A.; Eglese, R. W. (2007). "Combinatorial optimization and green logistics". 4OR, vol. 5, no. 2, p. 99-116.
- [6] Dantzig, G. B.; Ramser, J. H. (1959). "The truck dispatching problem". Management science, vol. 6, no 1, p. 80-91.
- [7] Bektaş, T.; Laporte, G. (2011). "The pollution-routing problem". Transportation Research Part B: Methodological, vol. 45, no 8, p. 1232-1250.
- [8] Kramer, R.; Subramanian, A.; Vidal, T.; Lucídio dos Anjos, F. C. (2015). "A matheuristic approach for the pollution-routing problem". European Journal of Operational Research, vol. 243, no. 2, p. 523-539.
- [9] Mascarino, E. E. (2018). "Last-mile network design for urban commodity distribution in Latin America". Master dissertation, Massachusetts Institute of Technology.