

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**MODELO DE DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA DE DRONES PARA LA
DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS SANGUINEOS EN SANTIAGO DE
CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
INDUSTRIAL**

AUTOR

ALEJANDRO ESTEBAN NÚÑEZ STÖBERG

PROFESOR GUÍA:

RODRIGO MENA

PROFESOR CORREFERENTE:

PABLO VIVEROS

SANTIAGO DE CHILE, SEPTIEMBRE, 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la presente investigación a mi familia por todo el apoyo que me han brindado, en especial durante mi paso por la universidad. También quiero agradecer a Constanza por su apoyo incondicional y los consejos que me ha dado durante este proceso. A Cristóbal y Lucas por el conocimiento en medicina que me prestaron. Al equipo docente de la UTFSM por entregarme los conocimientos necesarios para desarrollarme como profesional, en especial a mi profesor guía Rodrigo Mena por su apoyo durante esta investigación.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio tiene por objetivo el diseño de un marco metodológico para el dimensionamiento de una flota de drones para la distribución de productos mediante modelos de optimización de ruteo de vehículos. Para esto se toma como aplicación de interés la distribución de productos sanguíneos realizada por el Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos en Santiago de Chile.

Este escenario cuenta con características específicas que complejizan la formulación de un modelo de ruteo de vehículos tradicional y que, en conjunto, requieren del análisis y desarrollo de formulaciones de restricciones y supuestos. Dentro de las características del escenario se destacan las siguientes: distribución de múltiples productos, partición de entregas debido a una baja capacidad de carga, tiempos de autonomía limitados de los vehículos y múltiples viajes por vehículos dado el objetivo de minimización de flota.

El estudio comienza con una revisión de la literatura sobre la aplicación a considerar y una revisión del estado del arte respecto a modelos de ruteo de vehículos, considerando diversas variantes relevantes para la aplicación, así como también distintas alternativas de formulación para el tratamiento del problema de subciclos.

En base a lo anterior, se proponen tres formulaciones al problema de distribución de productos sanguíneos con drones considerando tanto variables de ventanas de tiempo como variables de flujo, detallando cada restricción y supuesto considerado, para luego, presentar los resultados obtenidos para el dimensionamiento de la flota con cada formulación previa definición del caso de estudio basado en la red de distribución atendida por el Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos en Santiago de Chile.

La motivación de presentar diversas formulaciones corresponde a proponer una alternativa que logre resolver instancias reales del problema en un tiempo de resolución razonable para aplicaciones reales.

En consiguiente, se procede a realizar un análisis de sensibilidad sobre características de importancia de los drones, como la velocidad promedio de transporte y la capacidad de carga, analizando su impacto en los resultados obtenidos, de este modo, se busca evidenciar la aplicación del marco metodológico presentado para estimaciones de inversión y/o comparación de modelos de drones.

Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio destacando aquellos hitos relevantes en la formulación de los modelos y sugiriendo enfoques para estudios adicionales.

Palabras Clave: Dimensionamiento de flotas, Problema de ruteo de vehículos, Drones para transporte, Modelos de optimización.

Contenido

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	7
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo General.....	11
2.2 Objetivos Específicos	11
3. MARCO TEÓRICO.....	12
3.1 Producción y Consumo de productos sanguíneos.....	12
3.1.1 Producción y Consumo de productos sanguíneos en Santiago de Chile	13
3.2 Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)	15
3.2.1 El problema de la formación de subciclos.....	17
3.3.1 VRP con múltiples productos	20
3.3.2 VRP con múltiples viajes	22
3.3.3 VRP con partición de entrega.....	26
3.3.4 VRP con drones	28
4. METODOLOGÍA	31
4.1 Planteamiento del problema.....	31
4.2 Formulación con ventanas de tiempo (TW).....	33
4.3 Formulación con variables de flujo (F1).....	40
4.4 Formulación con variables de flujo y división de productos (F2)	42
5. RESULTADOS.....	45

5.1	Estimación de parámetros	45
5.1.1	Distancia	46
5.1.2	Demanda	47
5.1.3	Peso	49
5.1.4	Característica del vehículo	50
5.2	Resolución de modelos	52
5.3	Análisis de Sensibilidad	56
6.	Conclusiones	60
7.	BIBLIOGRAFÍA	63

Índice de tablas

Tabla 1: Distribución de productos sanguíneos realizados por el CMST.	14
Tabla 2: Cantidad de paquetes distribuidos el día 15/01/2018.	48
Tabla 3: Características de los productos sanguíneos.	49
Tabla 4: Características de drones.	50
Tabla 5: Estimación de la cantidad máxima de paquetes de productos sanguíneos que es posible transportar en forma simultánea utilizando el modelo de dron Matrice 600.	52
Tabla 6: Resultados obtenidos de los modelos TW, F1 y F2 para los escenarios destacados	53
Tabla 7: Resultados formulación F1 en escenario 12H4M.	55
Tabla 8: Cantidad máxima de paquetes a transportar por escenario	58
Tabla 9: Distancia entre hospitales	70

Índice de figuras

Figura 1: Distribución geográfica de hospitales seleccionados para el estudio de los modelos.	46
Figura 2: Distribución geográfica de hospitales en la región metropolitana.....	71

Índice de gráficos

Gráfico 1: Distribución de productos sanguíneos entre enero y noviembre del 2018.	48
Gráfico 2: Análisis de Sensibilidad - Velocidad.....	57
Gráfico 3: Análisis de sensibilidad - Capacidad de Carga	59

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Sumidas en un entorno competitivo, las empresas se encuentran en una constante búsqueda de mejoras en su desempeño, ya sea aumentando sus ingresos y/o reduciendo sus costos. Dentro de la estructura de costos, el transporte adquiere gran relevancia, puesto que abarca en promedio un 8% de los ingresos totales y hasta un 6% en las empresas más eficientes, permitiendo hasta un 25% de ahorro en costos de distribución para aquellas organizaciones que, estando en la media, desean establecerse como empresas de clase mundial (Ruffin, Shehorn, Banerjee, & Lapin, 2018). La importancia del transporte aumenta cuando los productos a transportar son perecibles, ya que se requiere un mayor control de las condiciones del transporte tales como la temperatura, la humedad e inclusive de los tiempo de viaje (Yeoh, 2017).

Para entender esta diferencia en los costos de transporte con los que cuentan distintas empresas, aún perteneciendo a la misma industria, se debe ahondar en las tendencias e innovaciones aplicadas a los procesos de abastecimiento y distribución, que han tenido lugar, entre otros factores, gracias a nuevas tecnologías. Una de las tendencias que se ha podido observar en los últimos años recae en el uso de drones para la distribución de “última milla” de productos, es decir, directo al cliente, situación que es caracterizada por requerimientos de capacidad de carga menores que justifica la utilización de este medio de transporte para obtener menores costos y mejores niveles de servicio (Robinson, 2019).

Algunas empresas que han logrado implementar este medio de transporte en sus cadenas de abastecimiento y distribución son, por ejemplo, DHL y Amazon. En primer lugar, DHL en conjunto con EHang, empresa de vehículos aéreos autónomos, han lanzado, en mayo del

2019, su primer servicio de reparto completamente automatizado utilizando drones para Guangzhou en China logrando reducir, no sólo los tiempos de entrega, sino que también los costos de transporte en aproximadamente un 80% (Rehkopf, 2019). Del mismo modo Amazon planea lanzar su servicio Amazon Primer Air, ofreciendo entregas en 30 minutos o menos gracias a la utilización de drones (D'Onfro, 2019).

La aplicación adecuada de este tipo de vehículos para el suministro de productos requiere de herramientas o modelos matemáticos que permitan su análisis, ya sea para evaluar la factibilidad de la implementación como para mantener operaciones eficientes. En este contexto, se suelen utilizar modelos de optimización que corresponden a diversas variantes del “Problema de ruteo de vehículos” (Vehicle routing problem, VRP), el cual ha sido estudiado desde su primer planteamiento en 1959 por Dantzig y Ramser, permitiendo obtener las rutas a seguir para lograr satisfacer a un conjunto de clientes al menor costo (Dantzig & Ramser, 1959). Vale destacar, que los modelos de VRP también son útiles para el dimensionamiento de flotas considerando requerimientos operativos detallados, denominados en la literatura como “Rich VRP” (Bielli, Bielli, & Rossi, 2011). No obstante, dada la complejidad del problema, este ha sido clasificado como NP-Hard, lo cual implica que sea poco probable de solucionar en un tiempo polinomial (Archetti, Feillet, Gendreau, & Grazia Speranza, 2011). Es por esta razón, que para muchos de los modelos de VRP desarrollados no se busca una solución óptima, si no una cercana al óptimo a través de heurísticas o metaheurísticas (Laporte, 1992).

La variante de VRP utilizando drones, también conocida como VRPD, corresponde a un problema actual con alrededor de 5 años de estudio, siendo por primera vez presentado como una variante del “Problema del vendedor ambulante” por (Murray & Chu, 2015).

Aplicaciones recientes presentan formulaciones basadas en sistemas de transporte multimodales, por ejemplo, utilizando camiones y drones para la distribución de uno o más productos. Un estudio realizado por (Wang & Sheu, 2019), presenta un escenario donde un dron puede viajar dentro de un camión, despegar desde una parada, atender a las necesidades de los clientes y aterrizar en un centro de servicio para finalmente retornar con otro camión, para este modelo se propone un algoritmo de Branch and Price. Otro modelo, diseñado por (Schermer, Moeini, & Wendt, 2019), permite obtener rutas factibles para la distribución de productos utilizando, igual al caso anterior, camiones y drones. En esta formulación, los camiones se sitúan en lugares estratégicos para que los drones puedan despegar, entregar productos y retornar al camión, para que este pueda ubicarse en un nuevo punto estratégico o retornar al centro de distribución, a diferencia del modelo anterior, este es resuelto a través de una heurística.

La implementación de este medio de transporte no tiene una motivación exclusivamente comercial. También ha sido implementado en el área de la salud donde los focos principales corresponden a la reducción de tiempos de entrega en adición a la disminución de costos (Drew, 2019). Un ejemplo de lo anterior corresponde al programa piloto lanzado por la empresa UPS en conjunto con el hospital WakeMed en Carolina del Norte, Estados Unidos, donde se utilizan drones para la distribución de suministros médicos entre hospitales con el objetivo de evitar la dependencia de WakeMed a la flota de autos de mensajería al mismo tiempo que mejora la velocidad del servicio (Sheetz, 2019). De este modo, cada implementación de estos medios de transporte para una cadena de abastecimiento requiere del desarrollo de sus propias herramientas matemáticas que permitan evaluar la factibilidad de la implementación, ajustándose a las características de esta.

En Santiago de Chile, el Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos (CMST) distribuye productos sanguíneos, tales como glóbulos rojos, plasma, plaquetas y crioprecipitados, a 19 centros médicos ubicados en la Región Metropolitana del país. Actualmente, la distribución de estos productos se realiza a través de una empresa externa elegida mediante una licitación realizada año a año (Ministerio de Salud, 2018).

Dentro de las características de su cadena de distribución se destacan un abastecimiento diario, estimado y comprometido desde el principio del año, rangos de temperatura definidos para cada producto que se deben cumplir durante el transporte, para no afectar la calidad de estos, y la ubicación del CMST en el centro de Santiago donde la distancia a la mayoría de los centros médicos abastecidos no supera los veinte kilómetros (Ministerio de Salud, 2018).

Considerando dichas características de la cadena de distribución y una estimación de la demanda diaria de los productos sanguíneos, es posible evaluar la implementación de drones para la distribución de los productos sanguíneos del CMST, sin embargo, ¿Es posible diseñar una herramienta que permita determinar las características necesarias (capacidad, velocidad o tiempo de autonomía, etc.) que deben tener los drones para implementar este medio de transporte de manera económicamente eficiente y manteniendo la calidad de los productos sanguíneos?, ¿Es posible, mediante un modelo de VRP, obtener una estimación certera respecto al número necesario de drones para cubrir la demanda por productos sanguíneos de los centros médicos?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar un marco metodológico basado en modelos VRP para el dimensionamiento de una flota de drones para la distribución de productos sanguíneos del Centro Metropolitano de Sangres y Tejidos en Santiago de Chile.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar diversas variantes de modelos VRP para consolidar en un único modelo, aquellas que contemplen características propias de la aplicación bajo estudio.
- Obtener los parámetros necesarios para el desarrollo del modelo mediante estimaciones de distancias y revisión de especificaciones de modelos de drones, con el objetivo de tener una base para el modelamiento de la red de distribución de productos sanguíneos en Santiago de Chile.
- Plantear diferentes formulaciones del modelo utilizando restricciones de ventanas de tiempo y variables de flujo para evaluar el desempeño computacional en su resolución.
- Establecer supuestos razonables en la formulación del modelo de VRP que permitan abordar la complejidad del problema obteniendo tiempos de resolución razonables.
- Realizar un análisis de sensibilidad de los resultados con la velocidad y la capacidad del vehículo para identificar las especificaciones más relevantes en la situación de estudio.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Producción y Consumo de productos sanguíneos

A modo de desarrollar un modelo de dimensionamiento acorde a la aplicación propuesta, es necesario conocer las características del servicio de abastecimiento, producción y distribución de productos sanguíneos en Santiago de Chile.

Los productos sanguíneos consisten en cualquier sustancia terapéutica que es obtenida a partir de la sangre humana y cuya utilización está orientada a mejorar la esperanza y calidad de vida posibilitando la realización de procedimientos médicos y quirúrgicos (63.^a Asamblea Mundial De La Salud, 2009). Por otra parte, los bancos de sangre son los entes encargados de la producción y distribución tanto de productos sanguíneos como de otros insumos médicos para abastecer a los centros médicos de una región determinada (Rozengway, Vallecillo, & Alvarado, 2016).

Dado que el uso de los productos sanguíneos afecta directamente a la salud de sus consumidores finales, tanto sus procedimientos de elaboración, almacenamiento y distribución están resguardados mediante reglamentaciones sanitarias, de esta forma se evita riesgos bacterianos, víricos, entre otros (Poullin & Lefevre, 2003).

Dentro de los productos sanguíneos existentes, se destacan los siguientes como relevantes para el estudio en cuestión:

1. **Glóbulos Rojos:** Corresponde a un componente que se adquiere a través de centrifugación y supresión de plasma de la sangre total, adicionalmente se le añade una solución conservante que aumenta su vida útil hasta en 42 días (Centro

Metropolitano de Sangre y Tejido, 2019). Por otro lado, su densidad se estima en 1060 [kg/m³] (Cutnell & Johnson, 1998) y suele transportarse en paquetes de 280 ± 60 [ml] manteniéndose a una temperatura de 4 ± 2 [°C] (Ministerio de Salud, 2013).

2. Plaquetas: La obtención de plaquetas se logra a través de una unidad de sangre total con una baja cantidad de leucocitos en un volumen reducido de plasma (Centro Metropolitano de Sangre y Tejido, 2019), las plaquetas poseen una densidad entre 1040 a 1080 [kg/m³] (Chamberlain & Penington, 1988), se transportan en volúmenes de 50 ± 10 [ml] a una temperatura de 22 ± 2 [°C] (Ministerio de Salud, 2013)
3. Plasma Sanguíneo: Este componente se adquiere a través de la extracción de leucocitos de la sangre total a bajas temperaturas para evitar la coagulación de este. Su tiempo de caducidad corresponde a alrededor de un año (Centro Metropolitano de Sangre y Tejido, 2019). Su densidad se estima en 1025 [kg/m³] (Benson, 1999), suele transportarse en paquetes de 150 [ml] a una temperatura de -25[°C], aunque es posible transportarlo a 22 ± 2[°C] si es que será utilizado dentro de las próximas 4 horas (Ministerio de Salud, 2013).
4. Crioprecipitado: Su obtención se logra a partir de plasma congelado, separando la crioglobulina (Factor VIII) obteniendo un volumen final de 20 [ml] (Centro Metropolitano de Sangre y Tejido, 2019). Su transporte se debe realizar a 4 ± 2 [°C] (Ministerio de Salud, 2013)

3.1.1 Producción y Consumo de productos sanguíneos en Santiago de Chile

Desde octubre de 2009, el Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos (CMST) ha tenido por objetivo “abastecer de componentes sanguíneos a toda la red de hospitales públicos de la Región Metropolitana con altos estándares de calidad, de manera oportuna y con equidad.”

(Centro Metropolitano de Sangre y Tejido, 2019). Siendo el centro de mayor tamaño en Chile, el CMST abastece a un total de 24 hospitales, 19 en forma directa y el resto a través de traslados entre hospitales. Actualmente, sus procesos de distribución son licitados a un tercero (Ministerio de Salud, 2018) donde se estipula una aproximación de la cantidad de kilogramos de productos a transportar durante un año (ver tabla 1).

Tabla 1: Distribución de productos sanguíneos realizados por el CMST.

N°	Hospital	Abreviación	Promedio Mensual Estimado [Kg]	Días de Distribución
1	Barros Luco	HBL	2770	LU-MAR-MI-JU-VIE
2	Sotero del Rio	HSR	2778	LU-MAR-MI-JU-VIE-SAB
3	San José	HSJ	2158	LU-MAR-MI-JU-VIE
4	Colecta Móvil	CM	2370	-
5	Padre Hurtado	HPH	1268	LU-MAR-MI-JU-VIE
6	El Salvador	HDS	2535	LU-MAR-MI-JU-VIE-SAB
7	El Carmen de Maipú	HCM	1205	LU-MI-VIE
8	Roberto del Rio	HRR	488	LU-MI-VIE
9	La Florida	HDF	1015	LU-MI-VIE
10	El Pino	HEP	397	LU-JU
11	Exequiel González	HEG	215	MAR-JU-SAB
12	Talagante	HDT	141	MAR-VIE
13	Melipilla	HDM	99	MAR-VIE
14	Luis Calvo Mackenna	HLM	637	MAR-JUE-VIE
15	Luis Tisne	HLT	616	MAR-JUE
16	Buin	HDB	67	MI
17	Peñaflor	HDP	48	MAR-VIE
18	Tórax	HT	430	LU-MI-SAB

Fuente: (Ministerio de Salud, 2018)

Dada la rotación de inventario de los productos sanguíneos, ya sea debido a su tiempo de caducidad, costos de almacenamiento, entre otros. Las entregas de estos productos abastecen alrededor de una semana, por lo cual, el ciclo de aprovisionamiento es semanal y las cantidades suelen ser menores. Dicho esto, es posible plantear una distribución utilizando drones, sin embargo, para poder realizar un análisis en mayor detalle se requieren de herramientas matemáticas como modelos de optimización para el ruteo de vehículos, también conocidos como VRP.

3.2 Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)

El problema de ruteo de vehículos, o VRP por sus siglas en inglés “*Vehicle Routing Problem*”, fue planteado por primera vez por (Dantzig & Ramser, 1959) quienes buscaban establecer las rutas óptimas que debían seguir camiones de gasolina para abastecer por completo diversas estaciones de servicio. Los autores formularon este problema como una extensión del problema del vendedor viajero, abreviado como TSP, el cual consiste en encontrar la ruta que permita satisfacer todos los nodos de demanda recorriendo la menor distancia (Flood, 1956). A diferencia del TSP, el VRP se caracteriza en que la capacidad del vehículo es menor que la suma de todas las demandas a satisfacer, pero mayor que la máxima demanda entre todos los nodos, de esta forma, se requiere de más de un viaje para poder satisfacer toda la demanda (Dantzig & Ramser, 1959). A continuación, se presenta la definición y formulación de VRP Capacitado (CVRP), el cual considera adicionalmente la capacidad máxima de los vehículos (Toth & Vigo, 2002).

Sea $G = (V, A)$ un grafo, donde $V = \{0, 1, \dots, n\}$ corresponde al conjunto de vértices y $A = \{(i, j) | i, j \in N\}$ corresponde al conjunto de arcos. El vértice 0 representa al centro de distribución donde una flota de u vehículos idénticos, con una capacidad limitada Q , está disponible para abastecer las demandas d_i de los nodos $1, \dots, n$, los cuales, representan a los clientes que deben ser suministrados. cada arco $(i, j) \in A$ tienen asociados un tiempo de viaje t_{ij} . El CVRP consiste en encontrar las u rutas necesarias para satisfacer el total de la demanda al menor costo total (o tiempo total en ruta), considerando lo siguiente:

- Cada ruta debe comenzar y terminar el centro de distribución.
- Cada cliente debe ser visitado solamente por un vehículo en su ruta.
- La suma de las demandas de los clientes en una misma ruta no debe superar la capacidad Q de los vehículos.

De esta forma, se plantea la siguiente formulación:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} t_{ij} x_{ij}, \quad (1.1)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1, \quad (j \in V \setminus \{0\}), \quad (1.2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1, \quad (i \in V \setminus \{0\}), \quad (1.3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0} = u, \quad (1.4)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j} = u, \quad (1.5)$$

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq r(S), \quad (\forall S \subset V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset), \quad (1.6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad ((i,j) \in A), \quad (1.7)$$

En esta formulación x_{ij} corresponde a una variable binaria que toma el valor 1 cuando el arco $(i,j) \in A$ es utilizado en algunas de las rutas. La función objetivo (1.1) busca reducir el tiempo total empleado para satisfacer toda la demanda, las restricciones (1.2) y (1.3) implican que cada nodo será visitado en una única ocasión por algún vehículo en su ruta, las ecuaciones (1.4) y (1.5) imponen el número de rutas a formar en la solución del problema, siendo estas igual a la cantidad de vehículos disponibles. Finalmente, la restricción (1.6) impide la existencia de subciclos, es decir, rutas que no comienzan ni terminan en el centro distribuidor (tema que se analiza en mayor detalle en el inciso 3.2.1), además, la ecuación respeta la capacidad de los vehículos, dado que la definición de $r(S)$ corresponde al número mínimo de vehículos necesarios para satisfacer la demanda en S .

Desde su formulación en 1959, el VRP ha tenido diversas variantes que contemplan características adicionales a la situación base, tales como, distribución para más de un producto, flotas de vehículos heterogéneas, realización de más de un viaje por vehículo, clientes visitados en más de una ocasión, etc. (Braekers, Ramaekers, & Van Nieuwenhuyse, 2016)

3.2.1 El problema de la formación de subciclos

El modelo de VRP busca establecer rutas que permitan la distribución de uno o más productos desde uno o más centros de distribución, es por esta razón, que todas las rutas resultantes deben comenzar y terminar en este centro. Algunas de las restricciones que permiten

satisfacer esta necesidad son mencionadas por (Orman & Williams, 2004) quienes basan su estudio clasificando las restricciones en cuatro: convencionales, secuenciales, por ventanas de tiempo y a través de variables de flujo. A continuación, se dará una definición y ejemplo de cada una considerando las definiciones del modelo de VRP mencionadas anteriormente.

- Convencionales: Las siguientes ecuaciones fueron presentadas por (Dantzig, Fulkerson, & Johnson, 1954).

$$\sum_{i,j \in M | i \neq j} x_{ij} \leq |M| - 1, \quad (M \subset N \setminus \{1\} \notin M, |M| \leq 2), \quad (2.1)$$

En este caso el conjunto M corresponde a un subconjunto de N eliminando el centro de distribución, de esta forma, la restricción (2.1) establece que solamente se pueden utilizar $|M| - 1$ arcos pertenecientes al subconjunto, por lo cual, no es posible terminar la ruta en un nodo perteneciente al conjunto M .

- Secuenciales: Este método fue introducido por (Miller, Zemlin, & Tucker, 1960), el cual, añade la variable secuencial u_i que tiene por objetivo representar la secuencia en que es visitado el nodo i cuando $i \neq 1$, además de la siguiente restricción:

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad (i, j \in N \setminus \{1\}), \quad (2.2)$$

De esta forma, al dar un orden a los nodos visitados, no es posible retornar a un nodo distinto al centro de distribución, puesto que la ecuación (2.2) no se cumpliría.

- Ventanas de tiempo: Un ejemplo de la utilización de ventanas de tiempo para abordar el problema de los subciclos es descrito por (Kallehauge, Larsen, Madsen, &

Solomon, 2005) donde se añade la variable s_i que indica el instante de tiempo en el que se abastece el nodo i , además, se incluye la siguiente restricción:

$$x_{ij}(s_i + t_{ij} - s_j) \leq 0, \quad ((i, j) \in A), \quad (2.3)$$

En forma similar al método de variables secuenciales, la variable s_i permite evitar la formación de subciclos dado que, al volver a un nodo diferente al centro de distribución, la restricción no se cumple, sin embargo, la formulación presentada no corresponde a un modelo lineal, lo cual puede complejizar la resolución de este.

- Variables de flujo: Un ejemplo de este método es definido por (Gavish & Graves, 1978) para el cual se incluye la variable de flujo y_{ij} la cual representa la cantidad transportada entre los nodos i hasta el j , como también, las siguientes restricciones.

$$y_{ij} \leq (n - 1)x_{ij}, \quad ((i, j) \in A), \quad (2.4.1)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{1\}} y_{1j} = n - 1, \quad (2.4.2)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ij} - \sum_{k \in N} y_{jk} = 1, \quad (j \in N \setminus \{1\}), \quad (2.4.3)$$

La restricción (2.4.1) permite que exista flujo solamente si el arco (i, j) es recorrido, por otro lado, las restricciones (2.4.2) y (2.4.3) implican que desde el centro de distribución pueden salir hasta $n - 1$ unidades de producto y cada nodo se abastecerá con una unidad.

A continuación, se presentan diversas variantes de VRP que cumplen con características relevantes para el estudio.

3.3.1 VRP con múltiples productos

La extensión del VRP para la distribución de más de un producto en forma simultánea ha sido una de las variantes con más años de estudio, como ejemplo, está el modelo propuesto por (Golden, 1975) cuya formulación se presenta a continuación:

Conjuntos:

- V : Conjunto de vértices.
- K : Conjunto de vehículos.
- M : Conjunto de productos.

Parámetros:

- Q_k : Capacidad del vehículo k .
- T_k : Tiempo máximo permitido por ruta para el vehículo k .
- d_{im} : Demanda del producto m en el vértice i .
- l_i : Tiempo requerido para entregar o recolectar en el vértice i .
- t_{ij} : Tiempo de viaje entre los vértices i al j .
- $S_{im} \begin{cases} 1 & \text{si existe demanda del producto } m \text{ en el nodo } i. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$

Variables:

- $x_{ijk} \begin{cases} 1 & \text{Si el arco } (i, j) \text{ es recorrido por el vehículo } k. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$
- $y_{ijk}^m \begin{cases} 1 & \text{Si el producto } m \text{ es transportado en el vehículo } k \text{ desde el vértice } i \text{ al } j. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$
- u_i : Variable secuencial para satisfacer restricción (1.9)

Función Objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_i^V \sum_j^V \sum_k^K t_{ij} x_{ijk}, \quad (3.1)$$

Restricciones:

$$\sum_i^V \sum_k^K x_{ijk} \geq 1, \quad (j \in V \setminus \{0\}), \quad (3.2)$$

$$\sum_i^V x_{ipk} - \sum_j^V x_{pjk} = 0, \quad (k \in K, p \in V), \quad (3.3)$$

$$Q_k - \sum_M^M \sum_i^V d_{im} \sum_j^V y_{ijk}^m \geq 0, \quad (k \in K), \quad (3.4)$$

$$T_k - \sum_i^V l_i \sum_j^V x_{ijk} + \sum_i^V \sum_j^V t_{ij} x_{ijk} \geq 0, \quad (k \in K), \quad (3.5)$$

$$\sum_i^V \sum_k^K y_{ijk}^m = S_{jm}, \quad (j \in V \setminus \{0\}, m \in M), \quad (3.6)$$

$$x_{ijk} \geq \frac{1}{M} \sum_m^M y_{ijk}^m, \quad ((i, j) \in A, k \in K), \quad (3.7)$$

$$\sum_j^{V \setminus \{0\}} x_{ijk} \leq 1, \quad (k \in K), \quad (3.8)$$

$$u_i - u_j + V \sum_k^K x_{ijk} \leq V - 1, \quad (i \neq j \in V \setminus \{0\}), \quad (3.9)$$

$$x_{ijk}, y_{ijk}^m \in \{0,1\}, \quad (i, j \in V, k \in K, m \in M), \quad (3.10)$$

La ecuación (3.1) implica que el tiempo total en ruta será minimizado, la ecuación (3.2) asegura que cada nodo será visitado al menos una vez, la continuidad de las rutas es representada por la restricción (3.3), mientras que las ecuaciones (3.4) y (3.5) corresponden a las restricciones de capacidad y tiempo respectivamente para cada ruta, por otro lado, la restricciones (3.6) y (3.7) apuntan a que la demanda de cada producto en cada nodo sea abastecida, en adición, la restricción (3.8) asegura que la disponibilidad de vehículos no sea superada y, finalmente, la restricción (3.9) corresponde a una variante de la restricción Miller-Tucker-Zemlin para evitar la formación de subciclos, la cual es vista en mayor profundidad en el apartado del problema de los subciclos (3.2.1).

Dentro de los supuestos asumidos en la formulación de VRP para múltiples productos desarrollada por (Golden, 1975) se destaca que la demanda de cada nodo y cada producto no debe superar la capacidad de los vehículos de carga. Cuando este supuesto no se cumple la formulación de VRP, ya sea para un producto o múltiples productos, no logra obtener resultados factibles, además del supuesto de que cada nodo es visitado en una única ocasión, estas son algunas de las razones por las cuales se estudia las variantes de VRP con múltiples viajes o con partición de entregas.

3.3.2 VRP con múltiples viajes

La variante de VRP que permite a un vehículo realizar más de un viaje es conocida en la literatura como MTVRP, por sus siglas en inglés “*Multiple Trips Vehicle Routing Problem*”, su relevancia recae en los intereses de no sobredimensionar una flota para la distribución de productos y ser una vía para posibilitar el análisis en el uso de vehículos de menor capacidad

o con menor autonomía como los vehículos eléctricos (Cattaruzza, Absi, & Feillet, 2016). El modelo de MTVRP es definido de la siguiente forma:

El modelo MTVRP busca definir un conjunto de rutas y asignar estas a un vehículo, tal que el tiempo de total en ruta sea minimizado y se cumplan las siguientes condiciones (Cattaruzza, Absi, & Feillet, 2018):

- Cada ruta debe comenzar y terminar en el centro de distribución.
- Cada cliente debe ser visitado exactamente una vez.
- La suma de las demandas de los clientes en una ruta no debe superar la capacidad Q de los vehículos.
- La suma de las duraciones de las rutas asignadas a un vehículo no debe exceder el tiempo de retorno T_H .

Un ejemplo de formulación de este modelo es la realizada por (Azi, Gendreau, & Potvin, 2010) la cual corresponde a:

Conjuntos:

- N : Conjunto de nodos donde 0 representa al centro de distribución y $1, \dots, n$ a los clientes a abastecer.
- A : Conjunto de arcos (i, j) con i y j pertenecientes a N .
- R : Conjunto de rutas.

Parámetros:

- t_{ij} : Tiempo de viaje desde el nodo i hasta el nodo j .
- T_H : Tiempo máximo de retorno de los vehículos al centro de distribución.

- Q : Capacidad de un vehículo.
- d_i : Demanda del cliente i .
- M : Valor mayor constante.

Variables:

- $x_{ij}^r \begin{cases} 1 & \text{Si la ruta } r \text{ contiene el arco } (i, j). \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$
- $y_i^r \begin{cases} 1 & \text{Si el nodo } i \text{ es visitado por la ruta } r. \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$
- t_i^r : Instante de tiempo en el cual la ruta r pasa por el nodo i , t_0^r y t_{N+1}^r representan los tiempos de partida y llegada respectivamente.
- $z_{rs} \begin{cases} 1 & \text{Si la ruta } r \text{ es seguida inmediatamente por la ruta } s \text{ en el mismo vehículo.} \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$

Función Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} t_{ij} \sum_{r \in R} x_{ij}^r, \quad (4.1)$$

Restricciones:

$$\sum_{r \in R} y_i^r = 1, \quad (i \in N \setminus \{0\}), \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}^r = \sum_{j \in N} x_{ji}^r = y_i^r, \quad (i \in N, r \in R), \quad (4.3)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} d_i y_i^r \leq Q, \quad (r \in R), \quad (4.4)$$

$$t_i^r + t_{ij} \leq t_j^r + M(1 - x_{ij}^r), \quad (i \in N, j \in N \setminus \{0\}, r \in R), \quad (4.5)$$

$$t_i^r + t_{i0} \leq t_{N+1}^r + M(1 - x_{i0}^r), \quad (i \in N \setminus \{0\}, r \in R), \quad (4.6)$$

$$t_{N+1}^r \leq t_0^s + M(1 - z_{rs}), \quad (r, s \in R | r < s), \quad (4.7)$$

$$t_{N+1}^r \leq T_H, \quad (r \in R), \quad (4.8)$$

$$|R| - \sum_{r \in R} \sum_{s \in R | r < s} z_{rs} \leq |V|, \quad (4.9)$$

$$\sum_{r \in R | r < s} z_{rs} \leq 1, \quad (s \in R), \quad (4.10)$$

$$\sum_{r \in R | s < r} z_{sr} \leq 1, \quad (s \in R), \quad (4.11)$$

$$x_{ij}^r \in \{0,1\}, \quad (r \in R, (i,j) \in A), \quad (4.12)$$

$$y_i^r \in \{0,1\}, \quad (r \in R, i \in N), \quad (4.13)$$

$$t_i^r \geq 0, \quad (r \in R, i \in N \cup \{N+1\}), \quad (4.14)$$

$$z_{rs} \in \{0,1\}, \quad (r, s \in R | r < s), \quad (4.15)$$

En este modelo, la restricción (4.2) asegura que cada nodo será visitado exactamente una vez, la restricción (4.3) establece la continuidad de cada ruta, la capacidad del vehículo no se puede superar dada la restricción (4.4), las restricciones de la (4.5) a la (4.8) corresponden a ventanas de tiempo que, además de resolver los problemas de subciclos, permiten establecer una continuidad entre las rutas realizadas, la ecuación (4.9) permite limitar el número de vehículos a utilizar, las restricciones (4.10) y (4.11) evitan que la

variable z_{rs} tome el valor 1 cuando no corresponda y permiten asegurar que el lado izquierdo de la ecuación (4.9) represente el número de vehículos utilizados (Azi et al., 2010).

Si bien, esta variante de VRP permite acercarse más a una herramienta de análisis para el dimensionamiento de una flota requerido para la distribución de productos, aún presenta el supuesto de que cada nodo es visitado únicamente una vez, lo cual no es factible cuando la capacidad de carga de los vehículos es menor a la demanda de al menos un nodo que es, en general, lo que ocurre en aplicaciones con drones.

3.3.3 VRP con partición de entrega

El modelo de VRP con partición de entregas o SDVRP, por sus siglas en inglés “*Split Delivery Vehicle Routing Problem*”, corresponde a una variante que permite extender el supuesto de que cada nodo es visitado únicamente una vez, adicionalmente, la motivación del estudio de esta variante recae en la posibilidad de generar ahorros en la distribución de productos, dada una mayor flexibilidad de las rutas y una mejor utilización de la capacidad ociosa de los vehículos de la flota (Archetti & Speranza, 2008).

La definición del problema es similar a la presentada para el MTRVP salvo por ciertas consideraciones. En primer lugar, para este tipo de aplicación se debe definir la cantidad de vehículos necesarios como $m = \sum_{i \in N} \frac{Q_i}{Q}$, en segundo lugar, a diferencia de la formulación propuesta por (Azi et al., 2010), la formulación de (Archetti & Speranza, 2008) considera un conjunto de vehículos V en vez de uno de rutas. Por otro lado, las siguientes variables son definidas:

- $x_{ij}^v \begin{cases} 1 & \text{Si el vehículo } v \text{ viaja desde el nodo } i \text{ hasta el nodo } j. \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$

- y_i^v : Corresponde a la cantidad suministrada al nodo i por el vehículo v .

La formulación del modelo propuesto por (Archetti & Speranza, 2008) se muestra a continuación.

Función Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{v \in V} t_{ij} x_{ij}^v, \quad (5.1)$$

Restricciones:

$$\sum_{i \in N} \sum_{v \in V} x_{ij}^v \geq 1, \quad (j \in N), \quad (5.2)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ip}^v - \sum_{j \in N} x_{pj}^v = 0, \quad (p \in N, v \in V), \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij}^v \leq |S| - 1, \quad (v \in V, S \subseteq V - \{0\}), \quad (5.4)$$

$$y_i^v \leq Q_i \sum_{j \in N} x_{ij}^v, \quad (i \in N, v \in V), \quad (5.5)$$

$$\sum_{v \in V} y_i^v = Q_i, \quad (i \in N), \quad (5.6)$$

$$\sum_{i \in N} y_i^v \leq Q, \quad (v \in V), \quad (5.7)$$

$$x_{ij}^v \in \{0,1\}, \quad (v \in V, (i,j) \in A), \quad (5.8)$$

$$y_i^v \geq 0, \quad (i \in N, v \in V), \quad (5.9)$$

Para esta formulación, la restricción (5.2) implica que cada nodo será visitado al menos una vez, mientras que la ecuación (5.3) establece la continuidad de la ruta a definir, el problema de subciclos es abordado a través de la restricción (5.4). La restricción (5.5) impone que el vehículo v podrá abastecer al nodo i solamente si este es visitado por el vehículo, por otro lado, las restricciones (5.6) y (5.7) permiten abastecer el total de la demanda en cada nodo y evitar que se supere la capacidad de los vehículos respectivamente.

Dentro de las variantes de VRP mencionadas previamente, cabe destacar que su desarrollo se encuentra basado principalmente en vehículos terrestres, sin embargo, existen variantes de VRP diseñadas desde un principio para la distribución utilizando otras clases de vehículos como, por ejemplo, drones.

3.3.4 VRP con drones

Aquella variante de VRP que estudia la distribución, ya sea utilizando solamente drones o drones en conjunto con otro vehículo, es llamada VRPD. Esta variante lleva solamente algunos años en estudio siendo la más reciente respecto de las previamente mencionadas. Dentro de las motivaciones principales en la utilización de drones para la distribución de productos, al menos para la última milla, se encuentra un menor tiempo de viaje en rutas congestionadas por el flujo vehicular, un costo por kilómetro menor, la posibilidad de operar sin piloto, entre otros (Wang & Sheu, 2019).

En general, los modelos de VRPD buscan establecer una distribución basada en el uso de camiones con el apoyo de drones para la distribución de “última milla”. Un ejemplo de desarrollo de este tipo de modelos es presentado por (Schermer et al., 2019) el cual considera un escenario donde se deben abastecer a un conjunto de nodos, cada uno con una

demanda definida, al menor tiempo posible utilizando una flota homogénea de camiones donde cada uno carga la misma cantidad de drones homogéneos entre sí. Adicionalmente el modelo responde a los siguientes supuestos:

- Una vez que un dron ha despegado de un camión, este puede abastecer solamente un nodo, posterior a esto, el dron debe retornar al mismo camión. Se considera que los camiones tendrán capacidad suficiente.
- Se asume que cada dron tiene una capacidad limitada en cuanto a distancia de viaje, luego de retornar a un camión, la batería del dron debiera ser cargada o intercambiada en forma instantánea.
- Se establecen tiempos de despegue y aterrizaje para los drones, además, dos o más drones podrían despegar en paralelo desde un mismo camión.
- Los drones solo deben poder despegar o aterrizar desde un nodo.

Adicional al modelo mencionado, existen variantes de VRPD donde la utilización de drones no está ligada a la utilización de camiones, un ejemplo de esto corresponde al modelo desarrollado por (Cannioto, D'Alessandro, Lo Bosco, Scudero, & Vitale, 2017) donde se busca dimensionar una flota de drones necesaria para el monitoreo de daños difusos alrededor de Sicilia, Italia, tras un posible sismo. En este modelo, el conjunto de nodos representa ubicaciones alrededor de Sicilia las cuales deberán ser visitadas por exactamente un dron y cuyo objetivo consisten en evaluar la flota necesaria en base a la autonomía de los vehículos.

Tal como se mencionó en los modelos vistos anteriormente, el problema de subciclos se encuentra presente en cada desarrollo de VRP o variante de VRP, es por esto por lo que

es necesario conocer las diferentes herramientas para, entender en qué consiste este problema y cómo abordarlo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Planteamiento del problema

La formulación de los modelos de optimización requiere de la especificación del problema o escenario a modelar, para este caso, se define de la siguiente forma:

Sea $G = (V, A)$ un grafo donde los conjuntos $V = \{0, 1, \dots, n\}$ y $A = \{(i, j) | i, j \in V\}$ representan los vértices y arcos respectivamente. Cada elemento del conjunto V representa un hospital a excepción del vértice 0, el cual define al Centro Metropolitano de Sangre y Tejido. Se define un conjunto $M = \{1, 2, \dots, m\}$ de productos sanguíneos y un conjunto de rutas $K = \{1, 2, \dots, k_{ub}\}$ donde k_{ub} representa la máxima cantidad de viajes permitidos. Adicionalmente, para cada vértice se define un tiempo de carga o descarga l_i con $i \in V$, además, cada hospital $i \in V \setminus \{0\}$ posee una demanda d_i^m del producto m . Por otra parte, se asocia un tiempo de viaje t_{ij} con $(i, j) \in A$ y un tiempo total del horizonte de planificación T . Finalmente se define la máxima capacidad de un dron para transportar el producto m como Q^m .

El objetivo del modelo consiste en definir las rutas a seguir para satisfacer la demanda de todos los productos sanguíneos para cada hospital en el menor tiempo posible, de esta forma, se logra minimizar la cantidad de drones necesarios para la distribución. Se presentan los siguientes supuestos:

- Cada ruta debe comenzar y terminar en el CMST.
- Las rutas obtenidas solamente deben pasar por aquellos arcos cuyo tiempo de viaje sea menor al tiempo de autonomía de los drones.

- En base al punto anterior, se considerará que al momento de aterrizar en un hospital o en el CMST será posible cambiar la batería del vehículo dentro del tiempo de carga o descarga. No existe un límite para la cantidad de baterías disponibles en cada vértice.
- Dado que es posible que la demanda de algún producto en un hospital supere a la capacidad de los vehículos, es posible realizar una partición de las entregas, permitiendo visitar a un hospital más de una vez para satisfacer toda la demanda de algún producto.
- Debido a que los productos poseen diferentes especificaciones necesarias para su transporte, tal como la temperatura, solamente se podrá transportar un tipo de producto a la vez en una ruta.
- Al tener por objetivo el dimensionamiento de la flota de vehículos, se debe permitir a un mismo vehículo realizar más de un viaje siempre que este tenga la disponibilidad necesaria.

A continuación, se proponen tres versiones del modelo en base a dos tipos de restricciones para la eliminación de subciclos, ventanas de tiempo y variables de flujo, además de la separación del modelo por producto.

4.2 Formulación con ventanas de tiempo (TW)

En primer lugar, se propone la siguiente formulación del modelo utilizando una variante de las restricciones de ventanas de tiempo presentadas por (Kallehauge et al., 2005).

Conjuntos:

- V : Conjunto de nodos i del grafo G , donde cada uno representa un hospital a excepción del primero ($i = 0$) que representa al Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos.
- A : Conjunto de arcos (i, j) del grafo G , uniones permitidas del grafo. Solamente se considerarán aquellos arcos que son factibles dada la velocidad y autonomía de los drones.
- U : Conjunto de drones $\{1, \dots, u_{UB}\}$, donde u_{UB} corresponde a la flota disponible para realizar la distribución de productos a los hospitales.
- K : Conjunto de viajes. Se define el conjunto como $\{1, \dots, k_{UB}\}$ donde k_{UB} corresponde a la cantidad máxima de viajes realizados durante el periodo de evaluación.
- M : Conjunto de productos sanguíneos.

Parámetros:

- t_{ij} : Tiempo de viaje en minutos desde el hospital i al hospital j .
- Q^m : Cantidad de paquetes del producto sanguíneo m que puede cargar un dron.
- T : Minutos totales que contiene el horizonte de planificación.
- d_i^m : Demanda del hospital i del producto m .

- l_i : Tiempo de carga/descarga en el hospital i o en el CMST.
- k_{UB} : Cantidad de viajes máximos permitidos realizados por todos los drones.
- u_{UB} : Cantidad de drones disponibles para la distribución
- N : Valor constante utilizado en restricciones.

Variables:

- $x_{ij}^{mk} \begin{cases} 1 & \text{Si el arco } (i, j) \text{ pertenece al viaje } r_k \text{ en la distribución del producto } m. \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$
- q_i^{mk} : Cantidad de producto m abastecido para el hospital i durante el viaje r_k .
- $\varphi_k^m \begin{cases} 1 & \text{Si el viaje } r_k \text{ transporta el producto } m. \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$
- $\sigma_k^u \begin{cases} 1 & \text{Si el viaje } r_k \text{ es realizado por el dron } u. \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$
- $y_{kl}^u \begin{cases} 1 & \text{Si el viaje } r_l \text{ es realizado después del viaje } r_k \text{ por el dron } u. \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$
- $\delta_i^{mk} \begin{cases} 1 & \text{Si el hospital } i \text{ es visitado por la ruta } r_k \text{ en la distribución del producto } m. \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$
- S_i^k : Tiempo de partida de la entrega para el cliente i visitado en la ruta r_k .
- α^k : Tiempo de carga/descarga del viaje r_k en el CMST.
- d_k^{start} : Tiempo de partida del viaje r_k .
- d_k^{back} : Tiempo de llegada al CMST del viaje r_k .

Función Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{mk} (t_{ij} + l_i) , \quad (6.1)$$

Restricciones:

$$\sum_{\{j \in V \mid (i,j) \in A\}} x_{ij}^{mk} = \delta_i^{mk}, \quad (i \in V \setminus \{0\}, k \in K, m \in M), \quad (6.2)$$

$$\sum_{k \in K} \delta_i^{mk} \geq 1, \quad (i \in V \setminus \{0\}, m \in M), \quad (6.3)$$

$$\sum_{m \in M} \delta_i^{mk} \leq 1, \quad (i \in V \setminus \{0\}, k \in K), \quad (6.4)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} \delta_i^{mk} \leq \varphi_k^m * N, \quad (m \in M, k \in K), \quad (6.5)$$

$$\sum_{\{j \in V \mid (i,j) \in A\}} x_{ij}^{mk} - \sum_{\{j \in V \mid (i,j) \in A\}} x_{ji}^{mk} = 0, \quad (i \in V, k \in K, m \in M), \quad (6.6)$$

$$\sum_{\{j \in V \mid (i,j) \in A\}} x_{0j}^{mk} \leq \varphi_k^m, \quad (k \in K, m \in M), \quad (6.7)$$

$$q_i^{mk} \leq d_i^m * \delta_i^{mk}, \quad (i \in V \setminus \{0\}, k \in K, m \in M), \quad (6.8)$$

$$\sum_{k \in K} q_i^{mk} = d_i^m, \quad (i \in V \setminus \{0\}, m \in M), \quad (6.9)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{0\}} q_i^{mk} \leq Q^m, \quad (k \in K, m \in M), \quad (6.10)$$

$$\sum_{m \in M} \varphi_k^m = 1, \quad (k \in K), \quad (6.11)$$

$$\alpha^k = \sum_{m \in M} \sum_{\{i \in V \setminus \{0\}\}} l_i \delta_i^{mk}, \quad (k \in K), \quad (6.12)$$

$$S_i^k + t_{ij} - S_j^k + N x_{ij}^{mk} \leq N, \quad ((i,j) \in A, i, j \neq 0, k \in K, m \in M), \quad (6.13)$$

$$S_i^k + t_{i0} - d_k^{back} + Nx_{i0}^{mk} \leq N, \quad ((i, 0) \in A, k \in K, m \in M), \quad (6.14)$$

$$d_k^{start} + \alpha^k + t_{0i} - S_i^k + Nx_{0i}^{mk} \leq N, \quad ((0, i) \in A, k \in K, m \in M), \quad (6.15)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{\{i \in V \setminus \{0\} | (0, i) \in A\}} x_{0i}^{mk} - \sum_{u \in U} \sigma_k^u = 0, \quad (k \in K), \quad (6.16)$$

$$\sigma_k^u + \sigma_l^u - y_{kl}^u - y_{lk}^u \leq 1, \quad (k, l \in K, k \neq l, u \in U), \quad (6.17)$$

$$1 - y_{kl}^u - y_{lk}^u \geq 0, \quad (k, l \in K, k \neq l, u \in U), \quad (6.18)$$

$$d_k^{back} - d_l^{start} + Ny_{kl}^u \leq N, \quad (k, l \in K, k \neq l, u \in U), \quad (6.19)$$

$$0 \leq S_i^k \leq T \sum_{m \in M} \delta_i^{mk}, \quad (i \in V \setminus \{0\}, k \in K), \quad (6.20)$$

$$0 \leq d_k^{start} \leq T, \quad (k \in K), \quad (6.21)$$

$$0 \leq d_k^{back} \leq T, \quad (k \in K), \quad (6.22)$$

$$x_{ij}^{mk} \in \{0, 1\}, \quad ((i, j) \in A, k \in K, m \in M), \quad (6.23)$$

$$y_{kl}^u \in \{0, 1\}, \quad (k, l \in K, u \in U), \quad (6.24)$$

$$q_i^{mk} \geq 0, \quad (i \in V \setminus \{0\}, k \in K, m \in M), \quad (6.25)$$

$$\varphi_k^m \in \{0, 1\}, \quad (k \in K, m \in M), \quad (6.26)$$

$$\sigma_k^u \in \{0, 1\}, \quad (k \in K, u \in U), \quad (6.27)$$

$$\delta_i^{mk} \in \{0, 1\}, \quad (i \in V \setminus \{0\}, k \in K, m \in M), \quad (6.28)$$

$$\alpha^k \geq 0, \quad (k \in K), \quad (6.29)$$

La igualdad presentada en la ecuación (6.2) permite enlazar los valores de las variables x_{ij}^{mk} y δ_i^{mk} , dado que, a pesar de que ambas cumplen el rol de identificar aquellos hospitales visitados por un dron en una ruta k cuando se distribuye el producto sanguíneo m , estas son utilizadas para diferentes formulaciones de otras restricciones. La restricción (6.3) implica que cada hospital sea visitado al menos una vez para la distribución de cada uno de sus productos, permitiendo que la demanda de cada uno de estos se pueda abastecer en más de un viaje en caso de ser necesario, por otro lado, las restricciones (6.4), (6.5), (6.7) y (6.11) restringen, en conjunto, que solamente un tipo de producto sanguíneo pueda ser distribuido a lo largo de una misma ruta. Por otro lado, la formula (6.6) permite la estructuración de la ruta, mientras que la cantidad de producto distribuida a cada hospital en cada ruta está limitada por la ecuación (6.8). La satisfacción de la demanda y el cumplimiento de la capacidad máxima de los drones son impuestas por las restricciones (6.9) y (6.10), respectivamente. La ecuación (6.12) permite obtener el tiempo total de carga y descarga para cada ruta establecida, por otra parte, las ecuaciones (6.13), (6.14), (6.15) permiten establecer los tiempos de despegue y aterrizaje en cada vértice en conjunto con las restricciones (6.20), (6.21) y (6.22), logrando resolver el problema de los subciclos en forma similar a las propuesta por (Kallehauge et al., 2005) en la restricción (2.3). La asignación de rutas a la flota de vehículos es resuelta por la ecuación (6.16), definiendo un orden para las rutas mediante las restricciones (6.17), (6.18) y (6.19). Finalmente, las restricciones de la (6.23) a la (6.29) definen los dominios de las variables del modelo.

Como ventaja, este modelo permite obtener un programa de las rutas que debe realizar cada dron con el objetivo de abastecer la demanda de los hospitales, sin embargo, cuenta con una gran cantidad de variables, por lo cual, su resolución puede requerir de mayores recursos

y/o tomar más tiempo computacional. Dentro de los parámetros que se requieren para la resolución del modelo se destacan los valores k_{UB} y u_{UB} , puesto que el objetivo final del modelo es dimensionar la flota mínima requerida para satisfacer la demanda de los hospitales, por esta razón, se propone obtener una estimación del peor escenario para luego sensibilizar sobre estos parámetros, hasta obtener los valores mínimos factibles, es decir, el tamaño de flota de drones óptimo.

El peor escenario es definido como la cantidad de drones y viajes necesarios, cuando la distribución de los productos se realiza utilizando rutas de ida y vuelta a cada hospital hasta abastecer por completo la demanda. Para su cálculo se propone la siguiente formulación.

Sea t_i el tiempo total del viaje de ida y vuelta en minutos desde el CMST hasta el hospital i y c_m^i la cantidad de viajes necesarios para abastecer por completo la demanda del producto m del hospital i , definidos por las siguientes ecuaciones:

$$t_i = l_0 + t_{0,i} + l_i + t_{i,0}, \quad (7.1)$$

$$c_i^m \begin{cases} \left\lceil \frac{d_i^m}{Q^m} \right\rceil & \text{Si } Q^m \text{ es múltiplo de } d_i^m. \\ \left\lceil \frac{d_i^m}{Q^m} \right\rceil + 1 & \text{En caso contrario.} \end{cases}, \quad (7.2)$$

De esta forma las estimaciones de k_{UB} y u_{UB} son obtenidas a través de las siguientes fórmulas:

$$k_{UB} = \sum_{m \in M} \sum_{i \in V \setminus \{0\}} c_i^m, \quad (7.3)$$

$$u_{UB} = \left\lceil \frac{\sum_{m \in M} \sum_{i \in V \setminus \{0\}} c_i^m t_i}{T} \right\rceil, \quad (7.4)$$

Finalmente, para incluir las características de los vehículos que conformaran la flota se propone lo siguiente:

- La velocidad promedio del vehículo será utilizada para estimar los tiempos de viaje para cada arco en conjunto con las distancias de estos, para lo cual, y dado que el viaje de los drones se puede modelar como un viaje en línea recta, se plantea la siguiente aproximación:

$$t_{i,j} = \frac{dist_{i,j}}{v}, \quad (7.5)$$

Donde $dist_{i,j}$ representa la distancia entre los vértices i y j , mientras que v corresponde a la velocidad promedio del vehículo.

- El tiempo de autonomía del vehículo se incluirá al modelo excluyendo del conjunto A todos los arcos cuyo tiempo de viaje superen la autonomía de los drones, para este punto se debe tener como precaución que el tiempo de autonomía debe permitir llegar a cada hospital en al menos una ruta.
- La capacidad del dron influye en la cantidad máxima de paquetes de productos sanguíneos que puede transportar un dron a la vez para cada producto, por esta razón se define como estimación de Q^m la siguiente ecuación:

$$Q^m = \left\lfloor \frac{Cap}{p^m} \right\rfloor, \quad (7.6)$$

Donde Cap corresponde a los gramos que puede transportar el vehículo, mientras que p^m representa los gramos necesarios para transportar el producto m .

De esta forma, a través de las características de los vehículos a evaluar, información de demanda, distancia y de los productos a abastecer, es posible obtener la cantidad de vehículos necesarios mediante el siguiente algoritmo:

Algoritmo 1: Resolución modelo TW (Fuente: Elaboración propia)

1. Se calculan los valores $t_{i,j}$, Q^m , k_{UB} y u_{UB} en base a los parámetros y las ecuaciones respectivas.
2. Se resuelve el modelo TW.
3. Si se obtiene una solución infactible se deberá toma $u_{UB} = u_{UB} + 1$ volviendo al punto 2, en caso contrario termina la resolución del modelo con la última solución como óptima.

4.3 Formulación con variables de flujo (F1)

Es posible plantear otra formulación del modelo utilizando variables de flujo, para esto, se requiere adaptar las restricciones (2.4.1) a la (2.4.3) propuestas por (Gavish & Graves, 1978) logrando de esta forma resolver el problema de los subciclos al mismo tiempo que se cumple con la partición de las entregas. Este modelo, a diferencia del anterior, no requiere de un conjunto U de drones, del mismo modo, las variables y_{kl}^u , S_i^k , d_k^{start} y d_k^{back} dejan de ser necesarias, mientras que la variable q_i^{mk} es reemplazada por la variable de flujo f_{ij}^{mk} que representa el flujo de producto m transportado a través del arco (i, j) durante el viaje r_k .

Esta formulación mantiene la función objetivo (6.1) y las restricciones (6.5), (6.6), (6.11), (6.12), (6.23), (6.26), (6.28) y (6.29), añadiendo las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{j \in V \setminus \{0\}} f_{0j}^{mk} \leq Q^m * \varphi_k^m, \quad (k \in K, m \in M), \quad (8.1)$$

$$f_{ij}^{mk} \leq d_j^m * x_{ij}^{mk}, \quad ((i, j) \in A, m \in M, k \in K), \quad (8.2)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} f_{ji}^{mk} \geq \sum_{j \in V \setminus \{i\}} f_{ij}^{mk}, \quad (i \in V \setminus \{0\}, k \in K, m \in M), \quad (8.3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} f_{ji}^{mk} - \sum_{k \in K} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} f_{ij}^{mk} = d_i^m, \quad (i \in V \setminus \{0\}, m \in M), \quad (8.4)$$

$$f_{i0}^{mk} = 0, \quad (i \in V \setminus \{0\}, k \in K, m \in M), \quad (8.5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{(i, j) \in A} t_{ij} * x_{ij}^{mk} + \sum_{k \in K} \alpha^k \leq u_{UB} * T, \quad (8.6)$$

$$f_{ij}^{mk} \geq 0, \quad ((i, j) \in A, k \in K, m \in M), \quad (8.7)$$

La ecuación (8.1) restringe el valor del flujo de salida del CMST a la capacidad del dron para llevar un producto, al mismo tiempo que restringe llevar un producto diferente al definido para el viaje r_k , en forma similar, la restricción (8.2) limita el valor del flujo de producto m cuando el arco (i, j) no pertenece al viaje r_k , por otro lado, la fórmula (8.3) obliga al flujo a disminuir, o como máximo mantenerse, al pasar por el hospital i . La satisfacción de la demanda de cada producto para cada hospital se logra restando los flujos de salida con los de entrada, esta igualdad se expresa en la ecuación (8.4), además, la restricción (8.5) obliga que el retorno al CMST se realice sin carga de ningún producto. La ecuación (8.6) restringe que se supere la cantidad de tiempo disponible por la flota durante el horizonte de planificación. Finalmente, la formula (8.7) indica el dominio de la variable de flujo.

A diferencia de la formulación TW, este modelo presenta una menor cantidad de variables, perdiendo la información sobre la asignación de rutas a los vehículos, sin embargo, cumple el objetivo de disminuir la flota necesaria disminuyendo el tiempo total de viaje requerido para satisfacer toda la demanda. Una limitación adicional del modelo recae en la ecuación (8.6), dado que no es posible discriminar qué vehículo realizará cada ruta, no se logra definir una restricción lineal del tiempo total disponible por vehículo. Una alternativa a este inconveniente se presentará en el modelo propuesto en el apartado (4.4).

Para la resolución de este modelo se propone un algoritmo similar al algoritmo 1:

Algoritmo 2: Resolución del modelo F1 (Fuente: Elaboración propia)

1. Se calculan los valores $t_{i,j}$, Q^m , k_{UB} y u_{UB} en base a los parámetros y las ecuaciones respectivas.
2. Se resuelve el modelo F1.
3. Si se obtiene una solución infactible se deberá tomar $u_{UB} = u_{UB} + 1$ volviendo al punto 2, en caso contrario termina la resolución del modelo con la última solución como óptima.

4.4 Formulación con variables de flujo y división de productos (F2)

Para esta última formulación se volverán a considerar las adaptaciones de las variables de flujo propuesta por (Gavish & Graves, 1978), sin embargo, a diferencia del modelo F1 se dividirá el modelo en cuatro instancias, una por producto, para luego consolidar los resultados en uno solo a partir de un modelo secundario para la asignación de rutas a la flota, de esta forma, se espera obtener los mismos resultados en un menor tiempo de ejecución gracias al supuesto que obliga a realizar la distribución de los productos en forma separada.

El planteamiento de este modelo se basa en una formulación del modelo F1 cuando el conjunto M solamente contiene un elemento, luego los índices de este conjunto se pueden obviar y, por tanto, eliminar del modelo. Además, la variable φ_k^m deja de ser relevante en conjunto con la restricción (8.1) como también la restricción (8.6).

El desafío de este modelo radica en consolidar los resultados de los m modelos en una única solución, demostrando su factibilidad. Para esto se propone el siguiente modelo o problema secundario (C):

Conjuntos:

- U : Conjunto de drones $\{1, \dots, u_{UB}\}$.
- K : Conjunto de rutas $\{1, \dots, k_{UB}\}$.

Parámetros:

- T : Tiempo total del horizonte de planificación en minutos.
- t_k : Tiempo total requerido para realizar el viaje r_k , obtenido de la resolución de los m modelos F2.
- k_{UB} : Cantidad total de rutas obtenidas en la resolución de los m modelos F2.
- u_{UB} : Estimación de la cantidad de drones necesaria para la distribución de productos, se puede obtener a través de la fórmula (6.4)

Variables:

- $\sigma_k^u \begin{cases} 1 & \text{Si el viaje } r_k \text{ es realizado por el dron } u. \\ 0 & \text{En caso contrario.} \end{cases}$

Función objetivo:

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sigma_k^{u_{UB}} t_k, \quad (9.1)$$

Restricciones:

$$\sum_{u \in U} \sigma_k^u = 1, \quad (k \in K), \quad (9.2)$$

$$\sum_{k \in K} \sigma_k^u t_k \leq T, \quad (u \in U), \quad (9.3)$$

La función objetivo (9.1) busca minimizar la utilización del último dron de la flota, de esta forma si su resultado es cero, es posible eliminar este dron para luego volver a ejecutar el modelo. La restricción (9.2) obliga que cada ruta este asignada únicamente a un vehículo, mientras que la ecuación (9.3) limita la asignación de rutas al tiempo disponible por vehículo. De esta forma, el modelo C permite enfrentar la dificultad de la restricción (8.6).

A diferencia de la formulación TW, la formulación F2 no permite distinguir el orden de las rutas realizadas por un vehículo, sin embargo, sigue cumpliendo el objetivo de minimizar la flota de drones.

Para resolver el modelo F2 se propone el siguiente algoritmo:

Algoritmo 3: Resolución del modelo F2 (Fuente: Elaboración propia)

1. Se calculan los valores $t_{i,j}$ y Q^m en base a los parámetros y las ecuaciones respectivas.
2. Para cada producto m se resuelve una instancia del modelo F2.
3. Se calculan y almacenan los valores de t_k (tiempo de cada ruta perteneciente a la solución de la instancia de F2) en base a los resultados obtenidos.

4. Se estiman los valores de k_{UB} y u_{UB} en base a los valores de t_k .
5. Se busca una solución factible del modelo secundario C utilizando los parámetros del paso anterior.
6. Si existe una solución factible, se considera u_{UB} como la solución del algoritmo, en caso contrario se vuelve a ejecutar el modelo secundario para $u_{UB} = u_{UB} + 1$.

El algoritmo 3 representa un marco metodológico que busca, a través de la separación de instancias por producto, minimizar los tiempos de resolución del problema. Esto es posible dado el supuesto de que en cada ruta solamente se podrá transportar un tipo de producto. Para la consolidación de los resultados obtenidos en cada instancia, se recurre a un modelo secundario que busca, mediante la asignación de rutas a vehículos, demostrar la factibilidad de las soluciones obtenidas dado un horizonte de planificación definido.

5. RESULTADOS

5.1 Estimación de parámetros

Tal como se menciona en los algoritmos 1, 2 y 3, el primer paso corresponde a la estimación de los parámetros necesarios para la ejecución del modelo. Por esta razón, en base a información de las operaciones del Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos, se da a lugar la estimación de las distancias entre hospitales, demanda y pesos de los productos para el planteamiento de caso base en el cual se probará los resultados de los modelos. Adicionalmente, se realizará una revisión a las especificaciones con los que cuentan los vehículos para tomar un caso más cercano a la realidad.

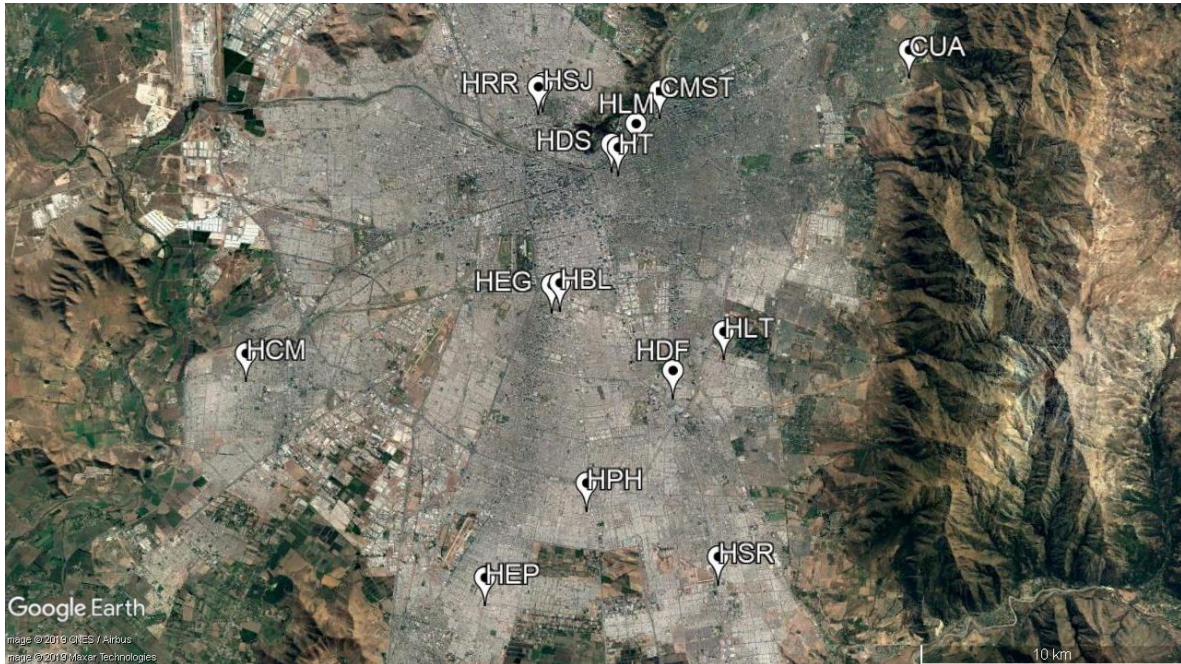
5.1.1 Distancia

Tal como se puede apreciar en la tabla 1, la distribución de productos sanguíneos realizada por el CMST tiene por objetivo 18 hospitales de la región metropolitana de Chile (excluyendo la colecta móvil dado que no cuenta con una ubicación fija), por esta razón, es necesario conocer la distribución de los hospitales y del CMST para poder definir los tiempos de viaje.

La tabla 9 (ver anexo 1) contiene las distancias en kilómetros de todos los arcos formados por el CMST y los hospitales. Vale destacar, que estas distancias fueron medidas en línea recta, ya que corresponde a una aproximación de los tramos de ruta que seguiría un dron al viajar entre cualquiera de los dos puntos. Tal como se puede apreciar en la figura 2 (ver anexo 2) existen cuatro hospitales ubicados al suroeste de la región, estos son: Hospital de Buin, Hospital de Talagante, Hospital de Melipilla y Hospital de Peñaflor, como se puede comprobar en la tabla 9, la distancia entre el CMST y estos hospitales supera los 30 [km], además de presentar demandas inferiores al 1% (ver tabla 1), por esta razón, se decide excluir estos hospitales del estudio, puesto que al incluirlos aumentarían los requerimientos de los vehículos a implementar, tales como velocidad o tiempo de autonomía.

A continuación, se ilustra en la figura 1 la ubicación del CMST en conjunto con los hospitales para los cuales se desarrollará el modelo:

Figura 1: Distribución geográfica de hospitales seleccionados para el estudio de los modelos.



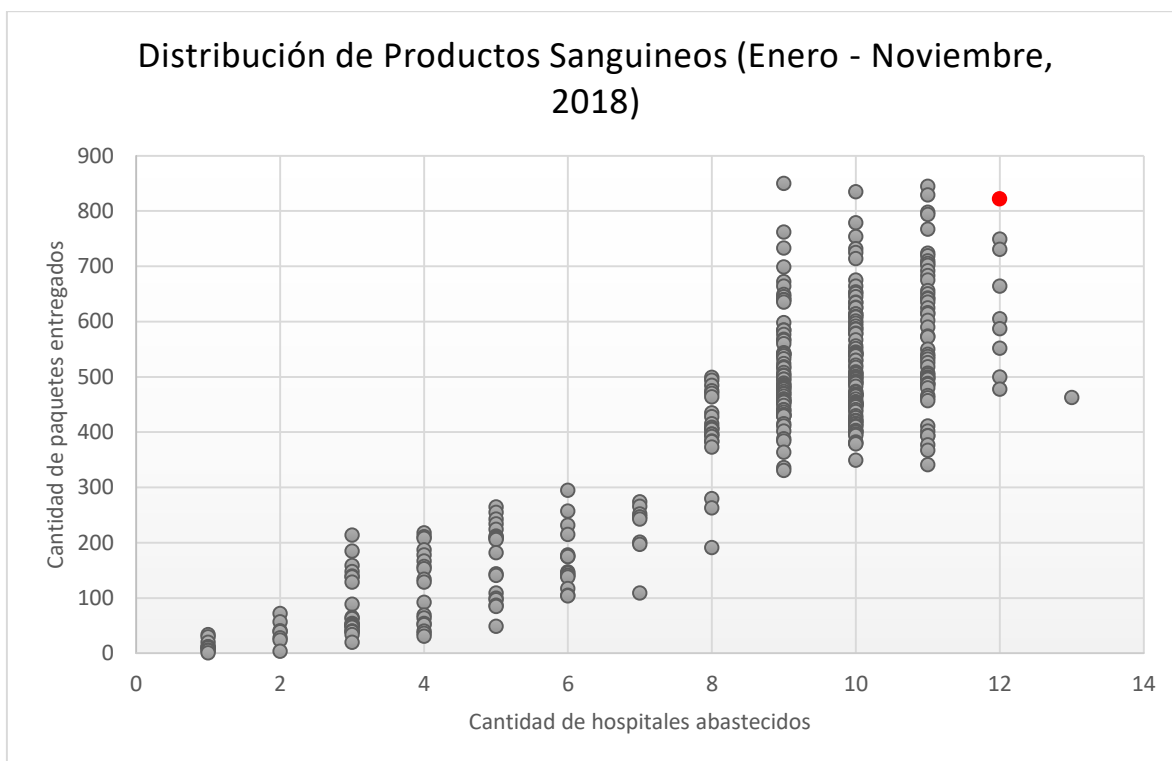
Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Demanda

Ya sea debido a costos de almacenamiento o a los periodos de caducidad de los productos, la distribución de estos se realiza en forma semanal o, incluso, diaria (ver tabla 1). Es por esta razón que el horizonte de planificación consistirá en un día de operación. La estimación de las cantidades demandadas por producto y hospital se obtienen de la base de datos proporcionada por el CMST (Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos, 2018), que abarca desde principios de enero hasta finales de noviembre del año 2018. Para poder realizar una estimación de la cantidad de vehículos necesarios, se debe ejecutar el modelo con los datos del día de mayor demanda abasteciendo a la mayor cantidad de hospitales. A continuación, se ilustra el gráfico 1, que muestra la relación entre la cantidad de hospitales abastecidos y el total de paquetes entregados para cada día entre enero y noviembre del año 2018. A partir de

estos datos, se selecciona el día 15/01/2018 como escenario base para la ejecución de los modelos, donde se abastecen 12 hospitales entregando un total de 822 paquetes.

Gráfico 1: Distribución de productos sanguíneos entre enero y noviembre del 2018.



Fuente: Elaboración propia a partir de (Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos, 2018)

Finalmente, la tabla 2 muestra las cantidades de paquetes entregados durante el día 15/01/2018 por tipo de producto sanguíneo y hospital.

Tabla 2: Cantidad de paquetes distribuidos el día 15/01/2018.

#	ID	GLOBULOS ROJOS	PLAQUETAS	PLASMA	CRIOPRECIPITADO
1	CUA	22	0	24	30
2	HBL	40	40	0	0
3	HCM	8	6	0	0
4	HDF	26	0	25	0

5	HDS	21	47	26	0
6	HEG	7	20	20	0
7	HEP	26	18	3	6
8	HLM	3	0	0	0
9	HPH	11	22	10	0
10	HRR	19	16	5	0
11	HSJ	64	27	30	6
12	HSR	82	78	15	19
Total		329	274	158	61

Fuente: Elaboración propia a partir de (Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos, 2018).

5.1.3 Peso

Para poder definir la cantidad de paquetes de cada producto que transportar simultáneamente el vehículo en estudio, se requiere conocer las características físicas del paquete, tales como peso, volumen, temperatura de almacenamiento, entre otros. Para realizar una estimación de estas variables, se recopilará la información presentada en el inciso (3.1) Producción y Consumo de Productos Sanguíneos, a través de la siguiente tabla.

Tabla 3: Características de los productos sanguíneos.

Producto	Volumen [ml]	Densidad [gr/ml]	Peso Estimado [gr]	Temperatura [°C]
Glóbulos Rojos	220 - 340	1,06	300	2 - 6
Plaquetas	40 - 60	1,04 - 1,08	60	20 - 24
Plasma	150	1,025	160	-25
Crioprecipitado	20	-	25	2 - 6

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3 contiene las estimaciones de los pesos de cada paquete, esta es obtenida de la multiplicación de la densidad promedio por el volumen promedio del producto sanguíneo más un porcentaje de tolerancia. Por otro lado, dado que los productos requieren ser transportados en un rango de temperatura fijo, y estando congelados en el caso del plasma

sanguíneo, se requiere utilizar un contenedor isotérmico. Dicho esto, para poder estimar la cantidad de paquetes que es posible transportar en forma simultánea de cada tipo de producto sanguíneo, se debe considerar la utilización de estos contenedores, implicando un peso adicional a transportar. Este peso es estimado como 2 [kg] obteniéndose del modelo de contenedor DSX12 proporcionado por la empresa Tempack, el cual permite transportar productos entre -21°C hasta 22°C durante alrededor de 4 días (Tempack, 2019). Adicionalmente, se considerará el uso de al menos 1 [kg] de paquetes de gel refrigerante como resguardo adicional para mantener la temperatura durante el transporte, la estimación de este peso se obtiene a través de los paquetes de gel refrigerante de la empresa Modopack, empresa dedicada a soluciones de aislación y embalajes (Modopack, 2019).

5.1.4 Característica del vehículo

Finalmente, dentro de los parámetros necesarios para el dimensionamiento de la flota en la distribución de los productos, se requiere de las especificaciones de los vehículos a evaluar. Para esto se presenta una recopilación de tres modelos de drones diseñados para transporte de cargas en la tabla 4, indicando su velocidad, capacidad de carga y tiempo de autonomía.

Tabla 4: Características de drones.

Modelo	Velocidad [km/hr]	Cap. Carga [kg]	Autonomía [Hr]
WingCopter 178 Heavy Lift	80 crucero 150 máxima	6	2
MATRICE 600	65	6	0,3
Deltaquad Pro #CARGO	60 crucero 90 máxima	1,2	2

Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes indicadas en el apartado (5.1.4).

En primer lugar, se presenta al modelo WingCopter 178 Heavy Lift desarrollado por la empresa alemana WingCopter, este modelo de cuatro hélices destaca por su gran velocidad de hasta 150 [km/hr] lograda a través del cambio de dirección de sus hélices, pasando de vertical para el despegue a horizontal para el resto del trayecto. Adicionalmente, WingCopter ofrece este vehículo con un compartimento aislado cuya capacidad permite transportar hasta 6 [Kg], adecuándose al escenario en estudio. El precio de este modelo ronda los 75000 € (WingCopter, 2019). En segundo lugar, se destaca al modelo Matrice 600 fabricado por la empresa DJI, este vehículo fue diseñado para aplicaciones industriales y fotografía aérea profesional, por lo cual, cuenta con una capacidad máxima de 6 [Kg] suficiente para cargar cámaras fotográficas profesionales como otros artefactos o contenedores. Su velocidad ronda los 65 [km/hr] y cuenta con una autonomía aproximada de 0,3 [Hr] al estar cargado por completo (DJI, 2019), el precio de este modelo ronda los 5300 € (Provideo, 2019). Finalmente, se considera el modelo Deltaquad Pro #Cargo diseñado por la empresa Vertical Technologies, el cual destaca por su alta velocidad estando completamente cargado de hasta 90 [km/hr] con una autonomía que ronda las 2 [hr], es un modelo diseñado para el transporte de cargas de bajo peso, teniendo una capacidad de carga máxima de tan solo 1,2 [kg]. Su precio ronda los 9000 €.

Entre los modelos presentados en la tabla 4, si bien el modelo adecuado para el escenario en estudio corresponde al WingCopter 178 Heavy Lift, dada su alta velocidad y capacidad de carga, además de su compartimento aislado, su alto precio elevaría los niveles de inversión, generando un estudio poco factible económicamente. Por otro lado, el modelo Deltaqua Pro #Cargo no cuenta con la capacidad de carga suficiente para transportar productos que requieran de regulación de temperatura, tal como se trató en el apartado

anterior. Es por estas razones que, las evaluaciones de los modelos de optimización se realizarán basándose en las características del modelo de dron Matrice 600.

Considerando una capacidad de carga de 6 [Kg], un peso de embalaje isotérmico de 2 [Kg], un peso de paquetes de gel refrigerante de 1 [Kg] y los pesos de los productos sanguíneos aproximados en la tabla 3, se estiman las cantidades máximas a transportar en la tabla 5.

Tabla 5: Estimación de la cantidad máxima de paquetes de productos sanguíneos que es posible transportar en forma simultánea utilizando el modelo de dron Matrice 600.

Producto Sanguíneo	Capacidad de paquetes a transportar
Glóbulos Rojos	10
Plaquetas	50
Plasma	18
Crioprecipitado	100

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Resolución de modelos

Considerando las estimaciones y aproximaciones realizadas en el apartado 5.1, se procede a evaluar los modelos TW, F1 y F2 propuestos en el apartado 4. Para esto se considerarán cuatro escenarios de pruebas basados en los datos de demanda de la tabla 3, cada uno será identificado con la nomenclatura XHYM, donde X representa la cantidad de hospitales a abastecer e Y la cantidad de productos sanguíneos para los cuales existe demanda. De esta forma el escenario 12H4M corresponderá al día de mayor demanda y, por tanto, al escenario para el cual se realiza el dimensionamiento de la flota de vehículos. Con el fin de observar los tiempos de ejecución obtenidos por los modelos, se evaluarán los escenarios 8H1M, con los 8 hospitales con mayor demanda de glóbulos rojos, 8H2M, con los mismos hospitales del escenario anterior contemplando las demandas de glóbulos rojos y plasma sanguíneo y,

finalmente, el escenario 4H4M, considerando la demanda de los cuatro productos sanguíneos para aquellos 4 hospitales que presentan demanda de crioprecipitado.

La programación de los modelos se desarrolla a través del lenguaje de programación Python, mediante la implementación de las funcionalidades de la librería Pyomo para el diseño de modelos de optimización. Los modelos son resueltos utilizando el solver comercial Gurobi, en un computador con procesador de seis núcleos Intel Core i7-8750H de 2,2 GHz de procesamiento y 8 Gb de memoria RAM.

Se establece como tiempo límite en la ejecución de los modelos 12 horas para el escenario 12H4M y 8 horas para el resto de los escenarios. A continuación, se muestran los resultados obtenidos, considerando el valor de la función objetivo, porcentaje de GAP en caso de no haber alcanzado el valor óptimo dentro del tiempo límite, tiempo de ejecución y estimación de la flota.

Tabla 6: Resultados obtenidos de los modelos TW, F1 y F2 para los escenarios destacados

<i>Escenario</i>	<i>Característica</i>	<i>TW</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>
4H4M	Tiempo [s]	28800	1867,32	1,64
	GAP [%]	8,25%	0,00%	0,00%
	Resultado [min]	1053,50	1037,07	1037,07
	Flota	3	3	3
8H1M	Tiempo [s]	28800	25534,91	105,75
	GAP [%]	20,52%	0,00%	0,00%
	Resultado [min]	1001,05	963,41	963,41
	Flota	3	3	3
8H2M	Tiempo [s]	28800	28800	296,38
	GAP [%]	30,96%	2,34%	0,00%
	Resultado [min]	1202,76	1191,53	1191,53
	Flota	3	3	3
12H4M	Tiempo [s]	43200	43200	39898,49
	GAP [%]	-	21,60%	0,00%
	Resultado [min]	-	1533,77	1515,03
	Flota	-	4	4

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 6 contiene los resultados obtenidos en la resolución de los modelos TW, F1 y F2 para los escenarios definidos, en ella se muestra el tiempo total de ejecución concurrido, considerando los límites de tiempo establecidos de 8 horas (28800 segundos) y 12 horas (43200 segundos), además, cuando la ejecución del modelo no logra llegar al valor óptimo durante el límite de tiempo se muestra el porcentaje de GAP de la solución encontrada, es decir, que tan cerca del óptimo se encuentra la solución. Finalmente se muestran el resultado de la función objetivo, es decir, la suma total de todas las rutas pertenecientes a la solución y el dimensionamiento de la flota determinado para la solución.

Como se puede apreciar en la tabla 6, los tiempos de resolución varían dependiendo de la formulación considerada, siendo el modelo F2 el cual obtiene resultados óptimos en menores tiempos a pesar de que la cantidad de modelos a resolver para esta formulación corresponde a la cantidad de productos a abastecer más una instancia para demostrar la factibilidad de la distribución con la cantidad de vehículos obtenida. Por otro lado, los resultados obtenidos para la resolución de los primeros tres escenarios a través de los modelos F1 y F2 son equivalentes, esto implica que, a pesar de que el modelo F1 no logra demostrar la optimalidad de su solución para el escenario 8H2M dado un GAP de 2,34%, el modelo F2 logra demostrarlo en un tiempo de ejecución menor. Por otra parte, la formulación TW cuenta con los tiempos de resolución más altos, sin haber logrado encontrar una solución óptima para los primeros tres escenarios dentro del tiempo límite establecido, teniendo porcentajes de gap entre 8% hasta 30% más aún, el modelo no logró llegar a una solución factible para el escenario 12H4M tras las 12 horas de ejecución.

Entendiendo que el escenario 12H4M representa datos de demanda real para un día de operación del CMST y que la formulación F2 es la única que logra obtener un resultado

óptimo dentro del límite de tiempo definido, se presentan los resultados obtenidos para esta instancia obtenidos con esta formulación.

Tabla 7: Resultados formulación F2 en escenario 12H4M.

<i>Producto</i>	<i>N° Ruta</i>	<i>Ruta</i>	<i>Flujo</i>	
1	1	(0,13,0)	(10,10,0)	
	2	(0,12,0)	(10,10,0)	
	4	(0,11,0)	(9,9,0)	
	5	(0,1,0)	(10,10,0)	
	6	(0,2,0)	(10,10,0)	
	7	(0,2,0)	(10,10,0)	
	8	(0,12,0)	(10,10,0)	
	9	(0,13,0)	(10,10,0)	
	10	(0,12,0)	(10,10,0)	
	11	(0,12,5,0)	(10,10,8,0)	
	13	(0,12,0)	(10,10,0)	
	14	(0,2,0)	(10,10,0)	
	15	(0,2,0)	(10,10,0)	
	16	(0,11,0)	(10,10,0)	
	17	(0,1,0)	(10,10,0)	
	18	(0,13,0)	(10,10,0)	
	19	(0,6,0)	(10,10,0)	
	20	(0,13,0)	(10,10,0)	
	21	(0,8,7,0)	(10,10,7,0)	
	22	(0,3,1,0)	(10,10,2,0)	
	23	(0,13,0)	(10,10,0)	
	24	(0,12,0)	(10,10,0)	
	25	(0,3,12,0)	(10,10,2,0)	
	26	(0,10,6,0)	(9,9,8,0)	
	27	(0,10,0)	(10,10,0)	
	29	(0,13,6,0)	(10,10,8,0)	
	30	(0,3,0)	(10,10,0)	
	31	(0,13,0)	(10,10,0)	
	33	(0,12,0)	(10,10,0)	
	35	(0,13,0)	(10,10,0)	
	36	(0,13,0)	(10,10,0)	
	2	1	(0,10,13,0)	(50,50,28,0)
		2	(0,12,11,0)	(43,43,16,0)
		3	(0,13,0)	(50,50,0)
		6	(0,2,0)	(40,40,0)
		7	(0,7,6,5,0)	(44,44,24,6,0)

3	1	(0,1,0)	(18,18,0)
	2	(0,7,6,10,0)	(18,18,13,10,0)
	5	(0,3,0)	(18,18,0)
	8	(0,11,12,0)	(18,18,13,0)
	9	(0,13,0)	(15,15,0)
	11	(0,7,0)	(15,15,0)
4	4	(0,12,6,13,1,0)	(61,61,55,49,30,0)

Fuente: Elaboración propia.

La solución ilustrada en la tabla 7, cuenta con un tiempo total de 1515,03 [min] para el abastecimiento de los cuatro productos sanguíneos con las demandas del día 15/01/2018, para ello requiere de 4 drones, modelo Matrice 600. La solución cuenta con un total de 43 rutas, de las cuales 12 contienen más de un hospital como destino, diferenciándose así del análisis del peor escenario.

A continuación, se procede a estudiar la magnitud de las fluctuaciones en las soluciones obtenidas al momento de variar dos de las características principales del vehículo en estudio, velocidad y capacidad de carga.

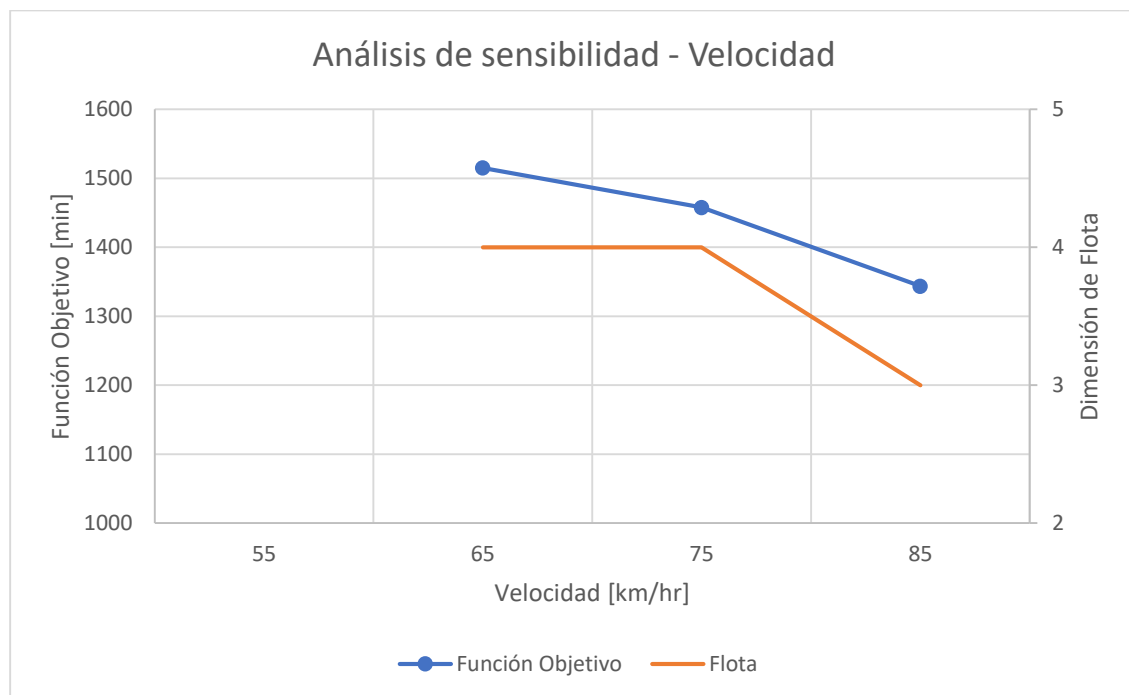
5.3 Análisis de Sensibilidad

Dentro de las aplicaciones de modelos de optimización para la resolución de problemas, está el análisis de sensibilidad, la cual permite analizar, a través de un estudio cuantitativo, cómo las variaciones en ciertos parámetros afectan a las soluciones óptimas obtenidas. De esta forma, realizar un análisis de sensibilidad para un problema de ruteo de vehículos considerando las características del vehículo en estudio, permite obtener información relevante para la selección del modelo de vehículo a utilizar, afectando directamente a los costos de inversión de la implementación, este tipo de análisis permite responder a preguntas tales como ¿Es económicamente conveniente utilizar un modelo de vehículo A sobre un modelo B, considerando las características de ambos modelos? ¿En cuánto disminuye la flota

necesaria cuando la velocidad media de viaje (o la capacidad de carga), aumenta en tal valor? Es por esta razón que se propone para el análisis del dimensionamiento de la flota, analizar la sensibilidad del modelo F2 con respecto a la velocidad y la capacidad de carga del dron en estudio.

En primer lugar, se procede a analizar la sensibilidad del modelo respecto a la velocidad del vehículo. Para esto, se considerarán cuatro escenarios con las velocidades 55, 65, 75 y 85 [km/hr], vale destacar, que el escenario con velocidad 65 [km/hr] ya fue resuelto en el apartado anterior. Los resultados obtenidos se presentan en el siguiente gráfico.

Gráfico 2: Análisis de Sensibilidad - Velocidad



Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos se destaca la infactibilidad del escenario con una velocidad de 55 [Km/hr], esto debido a que el tiempo de autonomía del vehículo impide visitar a al menos un hospital, imposibilitando la distribución completa de los productos, por

otro lado, el dimensionamiento de la flota, solamente se vio afectado para el escenario de velocidad de 85 [Km/hr], de esta forma, aumentar la velocidad de los vehículos a 75 [Km/hr] solamente disminuiría la utilización de estos.

En segundo lugar, se realiza un análisis de la sensibilidad del modelo respecto de la capacidad de carga del vehículo. De esta forma, se considerarán cuatro escenarios con las capacidades de carga 5, 6, 7 y 8 [Kg] destacando, al igual que para el caso anterior, que el escenario de capacidad de carga 6 [Kg] corresponde al estudiado en el apartado anterior. Para este análisis se ilustra en primera instancia las cantidades de productos que se logran transportar en forma simultánea para cada capacidad de carga, vale decir que, dado el bajo peso y poca demanda del producto 4 (crioprecipitado), este no afecta la decisión de capacidad de carga para los escenarios definidos, por tanto, se supondrá que la cantidad de paquetes del producto 4 a transportar para un mismo viaje será constante en cada escenario.

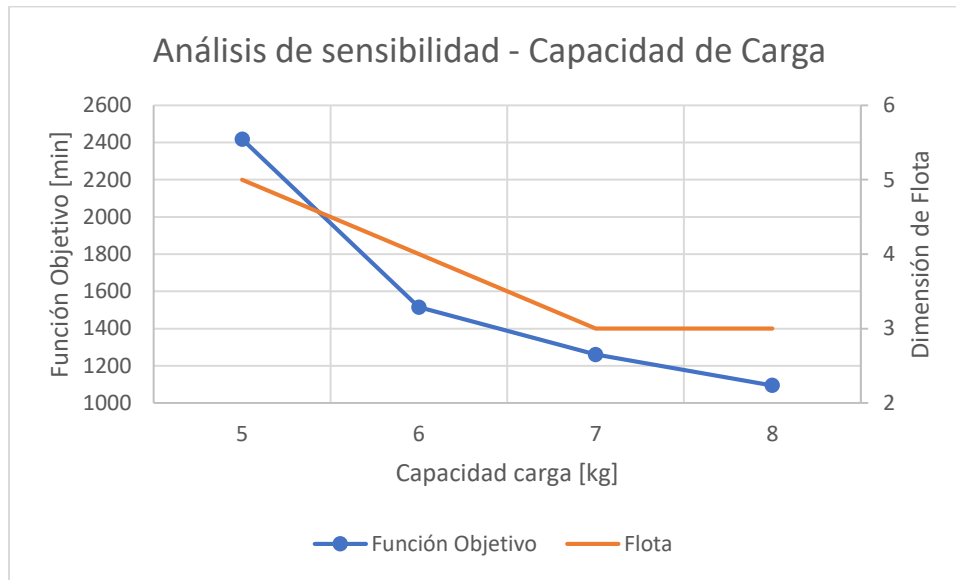
Tabla 8: Cantidad máxima de paquetes a transportar por escenario

<i>Capacidad [Kg]</i>	<i>Límite de paquetes a transportar del producto</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
5	6	33	12	100
6	10	50	18	100
7	13	66	25	100
8	16	83	31	100

Fuente: Elaboración propia.

Considerando la información propuesta en la tabla 8, se obtienen los siguientes resultados para cada escenario.

Gráfico 3: Análisis de sensibilidad - Capacidad de Carga



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran una mayor fluctuación tanto en el dimensionamiento de la flota como en el tiempo total de viaje en la planificación, respecto del análisis de sensibilidad sobre la velocidad del vehículo. En este análisis, se logra observar que un cambio en un kilogramo para la capacidad de carga del vehículo permite aumentar en un vehículo a la flota necesaria para el abastecimiento, esto a excepción del último tramo. Del mismo modo, al reducir la capacidad de carga a 5 [Kg] la magnitud de la función objetivo varía en mayor proporción a comparación con el resto de los escenarios, esto es debido a una menor flexibilidad para realizar viajes con más de un hospital como destino.

6. Conclusiones

Tras la revisión y aplicación de modelos de optimización para el ruteo de vehículos, se logra valorar su utilidad en problemas reales como el dimensionamiento de flotas. Estos modelos permiten realizar un análisis cuantitativo con una mayor certeza, logrando no solo establecer resultados si no también vislumbrando las fluctuaciones de estos frente a variaciones en los parámetros en estudio, los cuales pueden afectar a las decisiones del dimensionamiento y/o implementación de modelos de vehículos como tal.

De esta forma, fue posible diseñar un marco metodológico que permitiera determinar las características necesarias que debían poseer los drones para su implementación en la distribución de productos sanguíneos para el Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos en la región Metropolitana de Chile considerando características tales como, múltiples productos, partición de entregas y asignación de múltiples rutas a vehículos, logrando obtener una solución óptima en un tiempo razonable considerando características de un modelo de dron de uso comercial.

En contra parte, se destaca la complejidad de su formulación para lograr satisfacer las características del escenario en estudio, un apoyo de esto son las múltiples formulaciones que se encuentran hoy en día en la literatura, sin embargo, la integración de diversas variantes del problema de ruteo de vehículos, requiere de un estudio a fondo de las formulaciones de las restricciones a usar, teniendo un especial énfasis en aquellas restricciones que logran solventar el problema de los sub ciclos.

Del mismo modo, la resolución de modelos de enrutamiento de vehículos a través de métodos exactos también corresponde a un desafío para el cual se deben considerar las

restricciones, supuestos, velocidad de procesamiento y solvers a utilizar. A partir, de los resultados obtenidos, se logró evidenciar que diferentes formulaciones de un mismo problema obtienen tiempos de resolución con diferencias significativas.

Respecto a los resultados obtenidos para las tres formulaciones propuestas, es decir, con ventanas de tiempo, con variables de flujo y, con variables de flujo y separación de productos, se logró demostrar que aquellas formulaciones que utilizan las variables de flujo para solventar el problema de subciclos obtienen menores tiempos de resolución dada una menor cantidad de variables en comparación de la formulación con restricciones de variables de tiempo. Del mismo modo, se obtuvieron resultados con un menor tiempo de ejecución al momento de separar la planificación de la distribución entre productos para, de esta forma, lograr resolver un escenario con una mayor cantidad de hospitales a abastecer considerando una mayor cantidad de productos sanguíneos en forma óptima para un tiempo de resolución razonable de 12 horas.

Adicionalmente, se recalca la utilización de supuestos para lograr formular y resolver modelos de enrutamiento de vehículos con utilización de drones. Dentro de los supuestos utilizados en este estudio, se destaca la aseveración del almacenamiento de infinitas baterías en cada hospital a abastecer, como en el centro de distribución, este supuesto es sostenido dada la complejidad de incluir en la formulación los tiempos de carga de los vehículos y el bajo precio de las baterías de estos. Es por esta razón que, se sugiere la investigación de modelos que no contemplen este supuesto para un análisis más certero en la utilización de drones para la distribución de productos.

De la misma forma, se recomienda el estudio de otras alternativas de resolución para modelos de optimización de ruteo de vehículos como heurísticas y metaheurísticas que permitan obtener soluciones factibles, o idealmente óptimas, en un menor tiempo. De este modo, la utilización de modelos con restricciones de ventanas de tiempo podría ser aplicados para estudios similares contemplando una mayor información en las soluciones obtenidas como programas de rutas para los vehículos.

7. BIBLIOGRAFÍA

63.^a Asamblea Mundial De La Salud. (2009). Disponibilidad, seguridad y calidad de los productos sanguíneos. *Lei*, (sección 5), 1–7.

Archetti, C., Feillet, D., Gendreau, M., & Grazia Speranza, M. (2011). Complexity of the VRP and SDVRP. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 741–750. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.12.006>

Archetti, C., & Speranza, M. (2008). The Split Delivery Vehicle Routing Problem: A Survey. *Operations Research/ Computer Science Interfaces Series*, 43. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-5>

Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J. Y. (2010). An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.034>

Benson, K. (1999). *MCAT Review*. Emory University.

Bielli, M., Bielli, A., & Rossi, R. (2011). Trends in models and algorithms for fleet management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 4–18. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.004>

Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers and Industrial Engineering*, 99, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>

Cannioto, M., D'Alessandro, A., Lo Bosco, G., Scudero, S., & Vitale, G. (2017). Brief communication: Vehicle routing problem and UAV application in the post-earthquake

scenario. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(11), 1939–1946.
<https://doi.org/10.5194/nhess-17-1939-2017>

Cattaruzza, D., Absi, N., & Feillet, D. (2016). Vehicle routing problems with multiple trips. *Annals of Operations Research*, 271(1), 127–159. <https://doi.org/10.1007/s10288-016-0306-2>

Cattaruzza, D., Absi, N., & Feillet, D. (2018). Vehicle routing problems with multiple trips. *Annals of Operations Research*, 271(1), 127–159. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2988-7>

Centro Metropolitano de Sangre y Tejido. (2019). *Proceso Productivo*. 1–3. Retrieved from <https://donasangre.minsal.cl/cuales-son-los-usos-de-la-sangre/proceso-productivo/>

Centro Metropolitano de Sangre y Tejidos. (2018). *Distribución Enero-Noviembre 2018*.

Chamberlain, K. G., & Penington, D. G. (1988). Monoamine oxidase and other mitochondrial enzymes in density subpopulations of human platelets. *Thrombosis and Haemostasis*, 59(1), 29–33.

Cutnell, J., & Johnson, K. (1998). *Physics*. 2–3.

D’Onfro, J. (2019). Amazon ’ s New Delivery Drone Will Start Shipping Packages ’ In A Matter Of Months ’. Retrieved from <https://www.forbes.com/sites/jilliandonfro/2019/06/05/amazon-new-delivery-drone-remars-warehouse-robots-alexa-prediction/#d76d440145f3>

Dantzig, G. B., Fulkerson, D. R., & Johnson, S. M. (1954). Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, 1–804.

- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). *dantzig & Ramser-VRP-1959.pdf*.
- DJI. (2019). *Matrice 600 Specifications*. 0–3.
- Drew, J. (2019). Hospital using drones to fly blood samples between buildings. Retrieved from <https://www.apnews.com/9970c14cc938468fa588c012b67310d4>
- Flood, M. M. (1956). The Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, 4. <https://doi.org/10.1287/opre.4.1.61>
- Gavish, B., & Graves, S. C. (1978). The Travelling Salesman Problem and Related Problems. *Operations Research Center*.
- Golden, B. (1975). Vehicle Routing Problems: Formulations and Heuristics Solution Techniques. *Office of Naval Research*, (August).
- Kallehauge, B., Larsen, J., Madsen, O. B. G., & Solomon, M. M. (2005). Vehicle Routing Problem With Time Windows. *Column Generation*, 67–98. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/0-387-25486-2_3
- Laporte, G. (1992). The Vehicle Routing Problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operation Research*, 59, 345–358.
- Miller, C. E., Zemlin, R. A., & Tucker, A. W. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 7(4), 326–329. <https://doi.org/10.1145/321043.321046>
- Ministerio de Salud. (2013). *Estandares para obtención de componentes sanguíneos y gestión de inventario o stock*.

Ministerio de Salud. (2018). *BASES ADMINISTRATIVAS, TÉCNICAS Y ANEXOS DE LICITACIÓN PÚBLICA PARA EL ARRIENDO DE VEHICULOS DE transporte de sangre, componentes sanguíneos, TRASLADO DE PERSONAL Y MONTAJE Y DESMONTAJE DE COLECTAS MÓVILES PARA CENTRO METROPOLITANO DE SANGRE Y TEJIDOS*. Santiago, Chile.

Modopack. (2019). *Ficha de producto - Gel Refrigerante. 56684135*. Retrieved from <https://modopack.cl/wp/wp-content/uploads/2019/02/EMBALAJE-GEL-REFRIGERANTE.pdf>

Murray, C. C., & Chu, A. G. (2015). The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54, 86–109. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.005>

Orman, A., & Williams, H. (2004). A survey of different integer programming formulations of the travelling salesman problem. *Working Paper*, 25, 104–118. <https://doi.org/10.2307/43998959>

Poullin, P., & Lefevre, P. (2003). Productos sanguíneos lábiles. *EMC - Anestesia-Reanimación*, 29(2), 1–10. [https://doi.org/10.1016/s1280-4703\(03\)71835-0](https://doi.org/10.1016/s1280-4703(03)71835-0)

Provideo. (2019). *DJI Matrice 600*. Retrieved from <https://www.provideosevilla.com/comprar/dji-matrice-600/>

Rehkopf, T. (2019). DHL launches its first regular fully-automated and intelligent urban drone delivery service. Retrieved from DHL Group website: <https://www.dpdhl.com/en/media-relations/press-releases/2019/dhl-launches-its-first->

regular-fully-automated-and-intelligent-urban-drone-delivery-service.html

Robinson, A. (2019). The Top 2019 Logistics Trends Shippers Should Know. Retrieved from <https://cerasis.com/2019-logistics-trends/>

Rozengway, H., Vallecillo, L., & Alvarado, C. (2016). Supply and use of the blood products, blood bank of the University School Hospital, Tegucigalpa, Honduras. *Rev. Fac. Cienc. Méd.*

Ruffin, B. R., Shehorn, M., Banerjee, D., & Lapin, J. (2018). *Are Your Distribution and Transportation Costs Out of Control?* Retrieved from https://www.bain.com/contentassets/77dda2bc3d7d494db2a4eb9a0d38808f/bain_brief-are_your_distribution_and_transportation_costs_out_of_control....pdf

Schermer, D., Moeini, M., & Wendt, O. (2019). A matheuristic for the vehicle routing problem with drones and its variants. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 106(July), 166–204. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.06.016>

Sheetz, M. (2019). UPS is using drones to transport medical supplies between hospitals. Retrieved from <https://www.cnbc.com/2019/03/26/ups-is-using-drones-to-transport-medical-supplies-between-hospitals.html>

Tempack. (2019). Diagnosach - Contenedor Isotérmico. Retrieved from <https://www.tempack.com/productos-tempack/embalaje-isotermico/reutilizable/diagnosach-detail>

Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1137/1.9780898718515>

Wang, Z., & Sheu, J. B. (2019). Vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 350–364.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.03.005>

WingCopter. (2019). *Specifications WingCopter 178 Heavy Lift*. Retrieved from <https://wingcopter.com/technology/>

Yeoh, J. (2017). *The Logistics of Transporting Perishable Goods for Cold Chain Management*. 1–8. Retrieved from <https://sipmm.edu.sg/logistics-transporting-perishable-goods-cold-chain-management/>

ANEXOS

Anexo 1

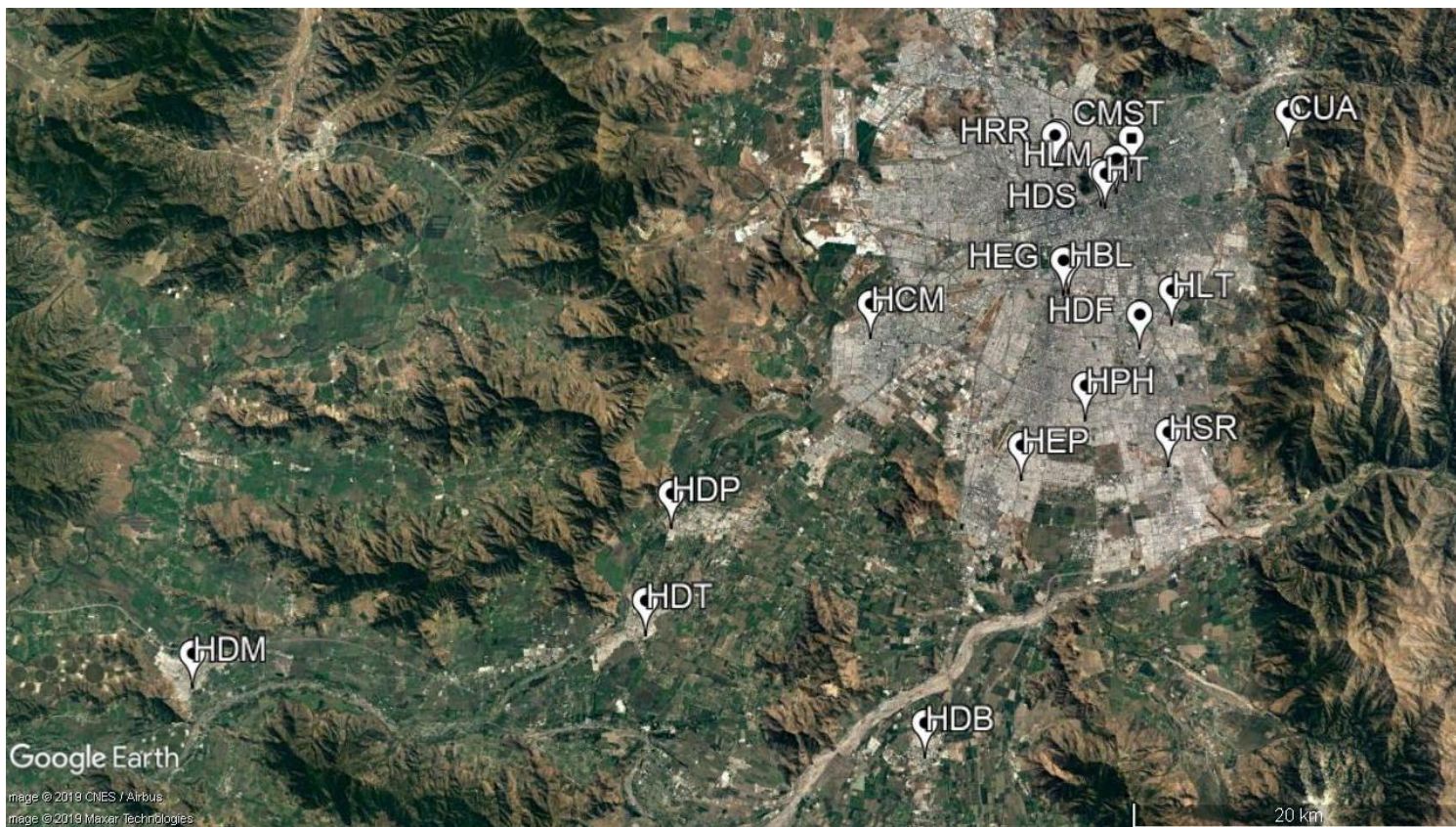
Tabla 9: Distancia entre hospitales

Dist. [Km]	CMST	CUA	HBL	HDB	HDF	HDM	HDP	HDT	HDS	HCM	HEP	HEG	HLM	HLT	HPH	HRR	HSJ	HSR	HT
CMST		9,6	8,2	37,2	10,6	64,3	34,9	40,3	2,7	18,5	19,6	8,4	1,5	9,5	15,1	4,6	4,4	17,8	2,7
CUA	9,6		15,7	42,7	15,0	73,2	43,3	48,3	11,5	27,4	25,6	16,0	10,4	12,8	20,4	13,7	13,5	20,6	11,6
HBL	8,2	15,7		29,1	5,4	57,7	27,7	32,6	5,6	12,2	11,5	0,3	6,7	6,5	7,6	7,5	7,6	12,0	5,6
HDB	37,2	42,7	29,1		27,7	44,2	20,5	18,3	34,7	25,3	17,6	29,0	35,7	29,9	22,4	36,1	36,2	22,8	34,7
HDF	10,6	15,0	5,4	27,7		60,4	30,1	30,3	8,9	16,2	10,6	5,6	9,5	2,4	5,4	11,9	11,9	7,3	8,7
HDM	64,3	73,2	57,7	44,2	60,4		30,4	27,4	61,8	45,8	51,4	57,4	62,0	62,8	56,0	60,4	60,6	60,1	61,9
HDP	34,9	43,3	27,7	20,5	30,1	30,4		6,6	32,2	16,5	21,2	27,4	33,4	32,4	25,7	31,5	31,7	30,1	32,4
HDT	40,3	48,3	32,6	18,3	30,3	27,4	6,6		37,6	22,4	24,4	32,4	38,8	36,7	29,4	37,2	37,4	33,0	37,7
HDS	2,7	11,5	5,6	34,7	8,9	61,8	32,2	37,6		13,9	16,2	4,9	3,3	9,2	12,5	2,7	2,8	16,1	0,3
HCM	18,5	27,4	12,2	25,3	16,2	45,8	16,5	22,4	13,9		12,4	11,9	17,1	18,1	13,8	15,0	15,2	19,5	16,1
HEP	19,6	25,6	11,5	17,6	10,6	51,4	21,2	24,4	16,2	12,4		11,4	18,1	13,0	5,3	18,7	18,8	8,9	17,1
HEG	8,4	16,0	0,3	29,0	5,6	57,4	27,4	32,4	4,9	11,9	11,4		6,9	6,7	7,6	7,5	7,6	12,1	5,8
HLM	1,5	10,4	6,7	35,7	9,5	62,0	33,4	38,8	3,3	17,1	18,1	6,9		8,5	13,7	4,0	3,8	16,7	1,1
HLT	9,5	12,8	6,5	29,9	2,4	62,8	32,4	36,7	9,2	18,1	13,0	6,7	8,5		7,7	11,6	11,6	8,5	8,1
HPH	15,1	20,4	7,6	22,4	5,4	56,0	25,7	29,4	12,5	13,8	5,3	7,6	13,7	7,7		15,1	15,2	5,7	12,8
HRR	4,6	13,7	7,5	36,1	11,9	60,4	31,5	37,2	2,7	15,0	18,7	7,5	4,0	11,6	15,1		0,2	19,1	3,8
HSJ	4,4	13,5	7,6	36,2	11,9	60,6	31,7	37,4	2,8	15,2	18,8	7,6	3,8	11,6	15,2	0,2		19,1	3,7
HSR	17,8	20,6	12,0	22,8	7,3	60,1	30,1	33,0	16,1	19,5	8,9	12,1	16,7	8,5	5,7	19,1	19,1		16,0
HT	2,7	11,6	5,6	34,7	8,7	61,9	32,4	37,7	0,3	16,1	17,1	5,8	1,1	8,1	12,8	3,8	3,7	16,0	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2

Figura 2: Distribución geográfica de hospitales en la región metropolitana



Fuente: Elaboración Propia.