



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

# Logística con *crossdocking* en productos de entrega inmediata

## Evaluación de sistema integrado de distribución

María Paz del Pino

Felipe Ruiz

Santiago Weigel

Proyecto presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la  
República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la  
obtención del título de Ingeniero de Producción

Tutor: Dr. Ing. Víctor Viana

Montevideo, Uruguay

Febrero de 2025



## Resumen ejecutivo

Este proyecto de grado se enfoca en el estudio de la distribución de correspondencia en Montevideo y su área metropolitana, operada por la empresa postal pública de Uruguay bajo el esquema de *crossdocking*. Como primera etapa, se llevó a cabo una revisión bibliográfica que permitió estructurar el Estado del Arte y comprender el contexto de la actualidad, estableciendo las bases para la propuesta de mejoras en los procesos existentes.

El análisis se centró en la logística de distribución unificada de cartas y paquetes desde su procesamiento en el Polo Logístico de Pando, hasta las unidades zonales responsables de la entrega final. Durante el intercambio con el Correo Uruguayo, en búsqueda de obtener una mayor comprensión de la operativa real, se identificaron diversas oportunidades de optimización. Con el objetivo de mejorar la eficiencia del servicio, se evaluaron la cantidad y ubicación de las unidades zonales, así como la planificación de rutas para el transporte diario.

En la primera etapa de modelado del proyecto, se formuló un modelo matemático diseñado para determinar la ubicación óptima de las unidades zonales dentro del área metropolitana de Montevideo. El objetivo fue integrar la distribución de cartas y paquetes, minimizando los costos operativos, tanto de las unidades zonales como del transporte hacia las zonas de distribución, asegurando al mismo tiempo el cumplimiento de la demanda.

Posteriormente, en la segunda fase, se implementó otro modelo matemático orientado a la optimización del enrutamiento y la asignación de cargas, con el fin de garantizar el abastecimiento eficiente de las unidades zonales previamente definidas, minimizando los costos de transporte asociados.

Los resultados obtenidos muestran una reducción de costos en comparación con el sistema actual, gracias a las estrategias de optimización propuestas. En primer lugar, se estableció la ubicación más conveniente para las unidades zonales dentro de las opciones evaluadas, asegurando la cobertura de la demanda y su posible crecimiento. Luego, a partir de este esquema, el segundo modelo permitió definir qué vehículos emplear, qué productos transportar en cada uno y cuáles serían las rutas más eficientes.

Este proyecto cumplió con sus objetivos al analizar la distribución unificada en una de las principales empresas del sector. Los modelos desarrollados facilitaron la identificación de ubicaciones estratégicas para las unidades zonales y la optimización de las rutas de distribución, lo que permitió una reducción significativa de costos operativos. Asimismo, la implementación de estas mejoras contribuirá a brindar un servicio al cliente de manera más eficiente.

**Palabras clave:** ruteo de vehículos, optimización matemática, planificación operativa, distribución postal.



## Agradecimientos

En primer lugar, el equipo agradece enormemente al Correo Uruguayo por la disposición y el apoyo brindado a lo largo de todo el proyecto. Particularmente al Ing. Leonardo Padrón, referente de la Gerencia General, quién nos abrió las puertas desde el primer momento y ofició de nexo con las otras áreas de la empresa. Además, destacamos y agradecemos a otras personas vinculadas al Correo Uruguayo como la Ing. Claudia Bonnacarrere, Gustavo Miraballes y Javier Zunino, quienes desde su lugar colaboraron con el proyecto en varias oportunidades.

También apreciamos profundamente la dedicación y ayuda constante de nuestro tutor Dr. Ing. Víctor Viana, quien, con su gran apoyo a través de las diferentes instancias del trabajo, nos guió y acompañó positivamente.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a nuestras familias y amigos por su incondicional apoyo y compañía a lo largo de este recorrido.



## Índice

1.	Introducción .....	13
2.	Marco Teórico.....	15
2.1.	Cadena de Suministro .....	15
2.2.	Métodos de distribución y almacenamiento .....	15
2.3.	Modelos matemáticos y optimización .....	16
2.3.1.	Localización de instalaciones .....	17
2.3.2.	Ruteo .....	17
3.	Definición del problema .....	19
3.1.	Acerca del Correo Uruguayo .....	19
3.2.	Descripción del caso de estudio .....	20
3.2.1.	Análisis de situación actual.....	20
3.2.2.	Problema a resolver.....	22
4.	Modelado de la realidad .....	25
4.1.	Etapa I: Modelo de localización.....	25
4.1.1.	Descripción de situación actual .....	25
4.1.2.	Alternativa planteada.....	25
4.2.	Etapa II: Modelado de la distribución.....	27
4.2.1.	Descripción de situación actual .....	27
4.2.2.	Alternativa planteada.....	27
4.3.	Modelos matemáticos y el <i>crossdocking</i> .....	28
5.	Relevamiento de datos.....	29
5.1.	Recopilación de información .....	29
5.1.1.	Unidades zonales .....	31
5.1.2.	Zonas de distribución .....	34
5.1.3.	Cartas y paquetes.....	35
5.1.4.	Flota .....	36
5.1.5.	CLM .....	37
6.	Etapa I: Modelo de localización .....	39
6.1.	Modelo Matemático .....	39
6.1.1.	Conjuntos: .....	39

6.1.2.	Parámetros: .....	39
6.1.3.	Variables de decisión.....	39
6.1.4.	Consideraciones .....	40
6.1.5.	Formulación del modelo 1 .....	40
6.2.	Procesamiento de datos.....	41
6.3.	Análisis de resultados .....	42
6.4.	Análisis de sensibilidad .....	44
6.4.1.	Aumento del radio de cobertura .....	45
6.4.2.	Aumento de demanda .....	48
7.	Etapa II: Modelado de la distribución.....	51
7.1.	Modelo Matemático .....	51
7.1.1.	Conjuntos .....	51
7.1.2.	Parámetros .....	51
7.1.3.	Variables de decisión.....	51
7.1.4.	Formulación del modelo etapa II .....	52
7.2.	Procesamiento de datos.....	53
7.3.	Análisis de resultados .....	54
7.4.	Análisis de sensibilidad .....	60
7.4.1.	Modificación de la flota vehicular .....	60
7.4.1.1.	Flota con capacidad uniforme de 11,5 m <sup>3</sup> .....	60
7.4.1.2.	Flota con capacidad uniforme de 15 m <sup>3</sup> .....	61
7.4.2.	Aumento de demanda .....	63
7.4.2.1.	Caso TEMU .....	63
7.4.2.2.	Aumento del 10% de la demanda .....	65
8.	Comparativa con la situación actual .....	67
9.	Recomendaciones.....	71
10.	Conclusiones.....	73
11.	Referencias .....	75
12.	Anexos.....	79
12.1.	Anexo I: Estado del Arte .....	79
12.2.	Anexo II: Resultados del análisis de sensibilidad de modelo Etapa I para radio de cobertura de 25km .....	107

## Índice de figuras

Ilustración 1: Diagrama de flujo del proceso actual. Elaboración propia .....	22
Ilustración 2: Diagrama de flujo de la distribución unificada. Elaboración propia .....	23
Ilustración 3: Ubicación de las unidades zonales en Montevideo y su área metropolitana. Imagen editada en [21].....	32
Ilustración 4: Comparativa de locales propios y alquilados    Comparativa de locales con atención al público. Elaboración propia.....	32
Ilustración 5: Unidades zonales en función del costo operativo. Elaboración propia .....	33
Ilustración 6: Distribución de funcionarios. Elaboración propia. ....	33
Ilustración 7: Distribución por medio de transporte. Elaboración propia .....	33
Ilustración 8: Distribución por medio de transporte por unidad zonal. Elaboración propia ...	34
Ilustración 9: Zonas de distribución. Imagen editada a partir de [21]. ....	34
Ilustración 10: Cantidad de cartas por mes por departamento. Elaboración propia .....	35
Ilustración 11: Cantidad de paquetes mayores a 2 kg por mes por departamento. Elaboración propia .....	35
Ilustración 12: Porcentaje de envíos que corresponden al CLM y a PLP. Elaboración propia.	36
Ilustración 13: Consumo de cada vehículo. Elaboración propia.....	37
Ilustración 14: Porcentaje de cartas por remito. Elaboración propia .....	37
Ilustración 15: Peso de las cartas y pesos total por remito. Elaboración propia. ....	37
Ilustración 16: Costo operativo diario por UZ. Elaboración propia. ....	44
Ilustración 17: Comparación del costo operativo respecto del radio de cobertura.....	47
Ilustración 18: Comparación del aumento en el costo de transporte respecto al aumento de demanda. Elaboración propia. ....	49
Ilustración 19: Diagrama del abastecimiento de la UZ11. Elaboración propia.....	59
Ilustración 20: Recorrido realizado por el camión 34. Imagen editada en [23]. ....	59
Ilustración 21: Zonas de distribución y unidades zonales de la situación actual. Imagen editada en [2].....	67
Ilustración 22: Mayor detalle de las zonas de distribución y unidades zonales de la situación actual. Imagen editada en [2]. ....	67
Ilustración 23: Zonas de distribución y unidades zonales de la alternativa planteada. Imagen editada en [2].....	68



## Índice de tablas

Tabla 1: ID y ubicación de cada UZ .....	31
Tabla 2: Resumen de la flota disponible .....	36
Tabla 3: Solución caso base modelado Etapa 1 .....	43
Tabla 4: Apertura de las unidades zonales .....	43
Tabla 5: Resumen de resultados para el aumento del radio de cobertura a 10 km .....	45
Tabla 6: Resumen de resultados para el aumento del radio de cobertura a 15 km .....	46
Tabla 7: Resumen de resultados para el aumento del radio de cobertura a 20 km .....	46
Tabla 8: Resumen de los costos asociados para cada escenario de aumento de demanda .	49
Tabla 9: Comparación de tiempos de ejecución, gap y costos de traslado .....	55
Tabla 10: Resumen de la asignación de camiones a las UZ .....	56
Tabla 11: Resumen de información de los vehículos .....	56
Tabla 12: Resumen de la utilización de los camiones para el abastecimiento de cada UZ....	57
Tabla 13: Resumen de la flota de vehículos con la modificación planteada .....	60
Tabla 14: Resumen de la asignación de camiones a las UZ para este escenario .....	61
Tabla 15: Resumen de la flota de vehículos con la modificación planteada .....	62
Tabla 16: Resumen de la asignación de camiones a las UZ para este escenario .....	62
Tabla 17: Resumen de la asignación de camiones a las UZ para este escenario .....	64
Tabla 18: Resumen de la asignación de camiones a las UZ para este escenario .....	65
Tabla 19: Costos de la situación actual en base diaria .....	68
Tabla 20: Costos de la Alternativa planteada en base diaria .....	69



## 1. Introducción

A raíz de la globalización, muchas de las actividades logísticas se vieron alteradas, exigiendo una rápida adaptación, debido al crecimiento de la demanda, expansión de mercados, aumento de la competitividad y reducción de tiempos de entregas, entre otros [1]. En esta misma línea, las empresas analizan e implementan diferentes modalidades de distribución con el objetivo de satisfacer su demanda en tiempo y forma, mientras reducen los costos asociados. Es en esta modalidad de distribución, cuya naturaleza exige entregas inmediatas, donde las empresas deben optimizar sus procesos.

En nuestro país, el Correo Uruguayo ha sido históricamente un pilar fundamental en la infraestructura de comunicaciones, adaptándose a una variedad de actividades que abarcan desde la distribución de correspondencia, hasta la entrega de paquetes en todo el territorio nacional.

Como muchas otras empresas a nivel mundial, el Correo Uruguayo debe adaptarse a los cambios e innovaciones tecnológicas para seguir siendo competitivo. La digitalización de documentos, facturas y cartas ha llevado a una disminución en la impresión de estas, reduciendo la distribución. Sin embargo, la pandemia de COVID-19 impulsó un aumento significativo del comercio electrónico, incrementando la distribución de paquetes. Esta tendencia ha llevado a un aumento significativo en la cantidad de paquetería y una disminución en la correspondencia [2].

Un factor que representa un gran desafío, en línea con lo mencionado previamente, es la variedad de competencia del mercado en lo que refiere a la distribución de paquetería. En nuestro país hay muchas empresas que se dedican a esto, con un total de 84 registros según la URSEC [3]. Por lo tanto, brindar un buen servicio al cliente resulta esencial para competir.

Siguiendo el hilo del presente trabajo, sería conveniente focalizar en aumentar la eficiencia en la distribución de cartas y paquetes, con el objetivo reducir costos. A través de una detallada descripción de los procesos operativos y la identificación de problemas actuales, se buscará plantear soluciones viables que permitan a la empresa mantenerse competitiva y adaptarse a las nuevas demandas del mercado.

El primer objetivo abordado durante el proyecto significó una revisión bibliográfica del concepto de *crossdocking* vinculado al envío de productos, con la finalidad de realizar un documento de Estado del Arte. En dicho informe se profundiza sobre la definición del concepto, las distintas clasificaciones que existen y los beneficios y limitaciones de su implementación. *Crossdocking* será un término que acompañará al lector a lo largo del trabajo, por lo que se cree importante fijar las bases conceptuales.

Posteriormente, bajo la motivación de ofrecer un mejor servicio a la sociedad uruguaya en el contexto anteriormente mencionado, se abordó la temática de la distribución de cartas y paquetes en la ciudad de Montevideo y su área metropolitana por parte del Correo Uruguayo.

Los objetivos se definieron junto a la dirección de la contraparte y buscan aumentar la eficiencia y disminución de los costos asociados a la operativa.

Para abordar el problema se relevaron datos con los referentes de las diferentes áreas de la empresa, en instancias presenciales y virtuales, para comprender los procesos involucrados en las operaciones y las observaciones de cada uno de ellos. Una de las principales oportunidades de mejora detectadas consiste en la unificación de la distribución de las cartas y paquetes dentro del territorio mencionado. Actualmente las cartas y paquetes se manejan operativamente de forma distinta, lo que en algunos casos resulta ineficiente.

Profundizando en las oportunidades de mejora, se plantean dos modelos de optimización matemática para disminuir los costos asociados a la operación de distribución de la correspondencia. En primer lugar, se busca definir las ubicaciones óptimas de las unidades zonales (UZ). Es decir, dónde se deben localizar las oficinas desde donde comienza la distribución de la correspondencia en las diferentes zonas de la ciudad, para disminuir los costos de distribución. La siguiente etapa define el ruteo de la distribución, indicando los vehículos y las cantidades a enviar. Este segundo modelo, por lo tanto, detalla para cada vehículo qué productos debe transportar y su recorrido visitando las distintas UZ.

El presente trabajo se busca aportar elementos que contribuyan a la mejora en las operaciones del Correo Uruguayo, fundamentalmente en lo que respecta a la distribución de correspondencia en la capital del país y sus alrededores. Los resultados obtenidos representan información valiosa para la toma de decisiones de la empresa, además de conclusiones interesantes desde el punto de vista operativo.

El documento está estructurado de la siguiente forma: en la Sección 2 se describe el marco teórico, abordando los conceptos claves necesarios para el desarrollo del análisis. En la Sección 3 se plantea la problemática, definiendo el contexto y los componentes fundamentales del caso de estudio. A continuación, en la Sección 4 se describe el modelado de la realidad, detallando los supuestos y enfoques adoptados. En la Sección 5 se expone el relevamiento de datos, especificando las fuentes utilizadas y la metodología empleada para su recopilación. Posteriormente, en las Secciones 6 y 7 se desarrollan los modelos matemáticos correspondientes a la localización y distribución, respectivamente, incluyendo el procesamiento de datos, el análisis de resultados y sus análisis de sensibilidad. En la Sección 8 se realiza una comparación con la situación actual, permitiendo evaluar el impacto de las soluciones propuestas. Las recomendaciones derivadas del estudio se presentan en la Sección 9, estructuradas en función de los hallazgos obtenidos. Finalmente, en la Sección 10 se exponen las conclusiones del trabajo.

## 2. Marco Teórico

En la presente sección, se introduce brevemente al lector en los conceptos claves de cadena de suministro, distribución y *crossdocking*, proporcionando un marco general que será ampliado en el Anexo 12.1 (Estado del Arte). Asimismo, se presentan los fundamentos de modelo matemático, optimización y ruteo, esenciales para el desarrollo del presente trabajo.

### 2.1. Cadena de Suministro

La expresión cadena de suministro (en inglés *supply chain*), es un concepto que comenzó a tomar fuerza en el ámbito empresarial en la década de los años 90. Una definición, brindada por [4], es la siguiente: *“La cadena de suministro es una red de organizaciones, personas, actividades, información y recursos involucrados en el movimiento de un producto o servicio desde el proveedor hasta el cliente final. Incluye todas las etapas como la obtención de materias primas, producción, almacenamiento, distribución y entrega.”*

A través de una buena gestión de esta, es posible obtener grandes ventajas competitivas respecto a otras compañías, haciendo crecer el valor del producto durante todo el trayecto, minimizando costos, aumentando la rapidez de entrega y mejorando la satisfacción del cliente. Sin embargo, esto no es para nada sencillo, ya que requiere gran coordinación entre los distintos participantes y una suma importante de variables.

Según indica [5] existen cinco componentes claves para una correcta gestión de la cadena de suministro:

1. **Planificación:** se definen las estrategias para satisfacer la demanda del producto o servicio en cuestión y se determina cómo evaluar el comportamiento de la cadena.
2. **Abastecimiento:** se detalla lo relacionado al proceso de aprovisionamiento de materias primas. Esto incluye la relación con los proveedores, recepción de materiales, gestión de inventario, entre otros elementos.
3. **Producción:** se lleva a cabo la fabricación del producto, siguiendo los estándares definidos previamente.
4. **Entrega:** se lleva a cabo la entrega del producto al cliente, involucrando los medios de transporte necesarios.
5. **Devolución:** hace referencia al retorno de los productos, ya sea por una entrega no realizada o por la devolución de productos defectuosos.

### 2.2. Métodos de distribución y almacenamiento

La distribución de productos es un tema fundamental en distintas etapas de la cadena de distribución, principalmente en el abastecimiento y en la entrega. A su vez, esto está estrictamente ligado a la modalidad de almacenamiento, siendo vital la coordinación entre ambos elementos.

Hoy en día se pueden encontrar diferentes métodos de distribución y almacenamiento en el mercado. Dependiendo la estrategia definida y los recursos disponibles, resulta conveniente la elección de uno sobre los restantes.

Algunos de los métodos más utilizados, de acuerdo con [6], son los siguientes:

- **Distribución directa:** los productos viajan directamente desde la fábrica hacia el consumidor final.
- **Distribución indirecta:** se involucran diferentes intermediarios como los mayoristas y minoristas.
- **Dropshipping:** El vendedor es un intermediario, no posee stock de los productos. Cuando recibe un pedido, compra el artículo y lo envía directamente al cliente.
- **Just in time (JIT):** los materiales y productos llegan en el momento que son necesitados, por lo que no existe inventario de estos.
- **Crossdocking:** Los productos se transfieren en una corta ventana de tiempo desde que llegan del proveedor al vehículo que los distribuye posteriormente. Para profundizar en este concepto, se recomienda la lectura del Estado del Arte realizado por el equipo.
- **Fulfillment centers:** corresponden a almacenes tercerizados que gestionan la recepción, procesamiento y envío de pedidos en nombre de las empresas.
- **Almacenamiento tradicional:** los artículos se encuentran almacenados en un depósito y se consumen en función de la demanda.
- **Logística Inversa:** tratamiento y almacenamiento de productos que devuelven los clientes y reciclan residuos.

### 2.3. Modelos matemáticos y optimización

Resulta interesante explicar acerca de los modelos matemáticos y su utilidad en diferentes ámbitos. Según [7], se puede definir como: *“El modelado matemático representa situaciones del mundo real utilizando estructuras matemáticas que permiten analizar, comprender y predecir el comportamiento de sistemas complejos”*.

Estos permiten simular situaciones y escenarios probables, facilitando la optimización y toma de decisiones en base a información y datos. Además, su aplicación es posible en diversos ámbitos como la biología, la economía, la ingeniería y la medicina, entre otros [8].

Por su parte, la optimización hace referencia a la capacidad de resolver algún problema de la manera más eficiente posible. Para un mismo problema, pueden existir múltiples soluciones que se adecuen. Por lo tanto, los modelos matemáticos de optimización se utilizan para resolver problemas minimizando o maximizando cierta función deseada, con la finalidad de hallar la mejor solución dentro de todas las posibles. En el caso de minimizar se podría pensar en costos o tiempos. Por el contrario, si se habla de maximizar podría considerarse la producción o las ganancias, por ejemplo [9].

### 2.3.1. Localización de instalaciones

Uno de los problemas clásicos de optimización vinculados a la cadena de suministro, consiste en la localización de instalaciones logísticas que representen un punto intermedio entre el lugar de fabricación y el destinatario final [10]. Este problema se basa en seleccionar el o los mejores puntos dentro de una serie de potenciales opciones, considerando determinadas restricciones. El objetivo, por lo tanto, es seleccionar las ubicaciones de las instalaciones deseadas minimizando los costos, valorando los costos de apertura, distancias y demanda de cada lugar [11].

Algunos de los ejemplos más representativos de este problema pueden ser la localización de hospitales, vertederos de basura, gasolineras o centros comerciales. En todos los casos mencionados, la ubicación resulta un factor fundamental para la viabilidad del proyecto, por lo que se utilizan a menudo modelos matemáticos de optimización para su resolución.

### 2.3.2. Ruteo

Otro de los problemas típicos de optimización en el ámbito de las cadenas de suministro es el ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés). El mismo consiste en determinar la mejor asignación de vehículos a un cliente específico, de manera de minimizar costos cumpliendo con determinadas restricciones. Por ejemplo, considerando la cantidad de vehículos y ventanas de tiempos de entrega [12].

De esta forma se definen varios elementos simultáneamente. Por un lado, el mejor recorrido que se debe realizar para satisfacer las necesidades, incluyendo las diferentes paradas. Por otra parte, la cantidad de vehículos a utilizar y sus cargas.

Los problemas de ruteo de vehículos se pueden dividir en diferentes tipos. A continuación, se presenta una clasificación dada por [13]:

- **Clásico:** los vehículos poseen la misma capacidad y deben entregar los productos al cliente.
- **Con ventanas de tiempo:** los clientes tienen definidos diferentes intervalos de tiempo para recibir los productos.
- **Recolección y entrega:** los vehículos deben recoger y entregar los productos en diferentes ubicaciones.
- **Heterogéneo:** los vehículos pueden poseer diferentes capacidades y costos al operar.
- **Multi depósito:** los vehículos pueden salir y regresar a diferentes depósitos.

Actualmente existen en el mercado diferentes productos dedicados a resolver este problema, principalmente en la distribución de artículos. Otras aplicaciones se pueden dar en los servicios de emergencia y en la recolección de residuos.



### 3. Definición del problema

Las siguientes secciones tienen como objetivo ofrecer una visión general del Correo Uruguayo, revisando brevemente su evolución histórica y destacando las principales actividades que desarrolla hoy día. Además, se analizará la situación actual de la distribución de correspondencia en el área metropolitana, con el fin de proporcionar un contexto al lector.

#### 3.1. Acerca del Correo Uruguayo

El Correo Uruguayo es una empresa pública dedicada a los servicios postales del Uruguay, fundada en el año 1827 a partir de un decreto del entonces gobernador Luis Eduardo Pérez. Inicialmente tuvo su sede en Durazno y, dos años después, se mudó a la ciudad de Montevideo. Originalmente surgió debido a la necesidad de comunicación entre las personas, siendo las cartas su único producto [14]. Con el tiempo, en 1880, se incorporó a instituciones internacionales en el rubro, como la Unión Postal Universal (UPU), ampliando así su red de servicios alrededor del mundo.

Los objetivos de todas las empresas de correo a nivel mundial se vieron obligados a adaptarse a nuevas necesidades. A raíz de la aparición de nuevas tecnologías como el Internet y el aumento considerable de la demanda de los usuarios, el Correo debió replantearse su estrategia para seguir siendo competitivo. La inclusión de tecnologías, campañas comerciales, rediseño de procesos y mejoras en la gestión lograron aumentar significativamente la calidad del servicio brindado.

Un hito importante en esta evolución se dio en el año 2021, con el comienzo operativo de la Planta Logística Postal (PLP), ubicada en el Parque Industrial de Pando, Canelones. Esta planta cuenta con 8.500 metros cuadrados donde se concentra la operativa ligada a la correspondencia y la paquetería nacional e internacional. Gracias a la inclusión de una máquina *sorter*, se optimizan los procesos de clasificación, distribución y facturación. El *sorter* es un sistema de clasificación automática que, dado un código de barras, lo clasifica a la rampa de salida correspondiente al programa de clasificación utilizado, además de registrar peso y dimensiones del envío [15].

Hoy en día, el objetivo de la empresa estatal es *“materializar el acceso universal para toda la sociedad uruguaya, facilitando la satisfacción de sus demandas de comunicación, servicios logísticos y financieros”* [14]. Así, la compañía actúa como un elemento de inclusión para la sociedad uruguaya, conectando e integrando a las personas entre sí. Actualmente, a través de la Red Nacional Postal, el Correo Uruguayo cubre el 100% de las zonas urbanas con más de 500 habitantes en los 19 departamentos del Uruguay.

Los servicios brindados más importantes se pueden clasificar de la siguiente manera:

#### **Distribución de paquetes** [16]:

- Paquetes internacionales.

- Paquetes nacionales: posibilidad de enviar, seguir y cobrar en cualquier parte del país.
- Paquete estudiantil: servicio para estudiantes de nivel secundario y terciario.

#### **Distribución de correspondencia [17]:**

- Cartas y documentos: envíos nacionales.
- Express internacional: envíos internacionales.
- Casilla de correo: recibir correspondencia en un casillero perteneciente al Correo.

#### **Comercio electrónico [18]:**

- Casilla Mía: ofrece una dirección física en Estados Unidos para realizar compras por internet y posteriormente recibir los productos en Uruguay.
- Declaración de compras: posibilidad de declarar compras exigida por la Dirección Nacional de Aduanas.

#### **Giros [19]:**

- Correogiros: enviar y recibir dinero.
- Giros nacionales.
- Giros internacionales.

### **3.2. Descripción del caso de estudio**

En el contexto de Montevideo y su área metropolitana, la eficiencia en la distribución de estos productos se ha convertido en un desafío crucial. Esta sección se centrará en dar una visión global sobre los procedimientos utilizados actualmente por el Correo Uruguayo para la distribución de correspondencia y paquetes en la región mencionada, con el objetivo de identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y reducir costos.

#### **3.2.1. Análisis de situación actual**

La distribución de correspondencia en Montevideo y su área metropolitana comienza en la nueva Planta Logística Postal ubicada en Pando. Esta planta centraliza el abastecimiento de lunes a viernes desde varios puntos, incluyendo locales del Correo del interior del país y del área metropolitana, la Unidad de Servicios Empresariales en el Centro Logístico Montevideo ubicado en el barrio Maroñas (CLM) y el Aeropuerto de Carrasco, así como clientes particulares que llevan su carga directamente.

Cuando los productos arriban, se clasifican según su peso. El proceso continúa de acuerdo con dos categorías:

- cartas y paquetes menores o iguales a dos kilogramos.
- cartas y paquetes mayores a dos kilogramos.

Las cartas y paquetes menores o iguales a dos kilogramos se envían directamente desde la PLP hacia las UZ, donde los carteros recogen los artículos al comienzo de su jornada laboral y

los distribuyen a pie, en bicicleta o en motocicleta, según la zona de trabajo. Las UZ, ubicadas estratégicamente en Montevideo y su área metropolitana, reciben los artículos según la ubicación del destinatario final y actúan como centros de *crossdocking*, lo que minimiza el tiempo de almacenamiento y reduce costos de alquiler y seguridad.

Por otro lado, los paquetes de más de dos kilogramos son enviados desde la PLP hacia el CLM. Estos productos permanecen en el CLM aproximadamente seis horas. Durante este tiempo, cada cartero con su chofer se dedica a la clasificación y preparación antes de enviarlos a los destinatarios finales. En este caso el CLM actúa como centro de *crossdocking*.

El uso en la distribución del CLM y la PLP, implica que, a veces, un mismo destinatario final pueda ser visitado en dos o más oportunidades en un día. Esto puede suceder cuando, por ejemplo, un cartero entrega correspondencia a pie y posteriormente una camioneta entrega un paquete en la misma dirección. Aquí claramente se manifiesta una de las oportunidades de mejora.

Durante toda la operativa, el Correo Uruguayo utiliza un sistema informático de gestión de stock desarrollado a medida, este permite registrar las entradas y salidas de productos en los diferentes puntos mediante códigos de barra. Los empleados cuentan con dispositivos móviles conectados en línea con este sistema, lo que incrementa la trazabilidad y reduce la pérdida de elementos, especialmente en los paquetes, brindando un alto porcentaje de seguimiento en tiempo real.

Cuando se centra el foco en el interior del país, la operativa cambia. Las UZ se encargan del envío de todas las cartas y paquetes correspondientes, sin discriminar según sus características. Esta situación motivó al equipo de trabajo a analizar una eventual aplicación del mismo método de envío unificado dentro de Montevideo y su área metropolitana.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que describe el proceso actual de distribución de correspondencia en Montevideo y su área metropolitana, detallando el flujo de los envíos y los puntos clave de procesamiento.

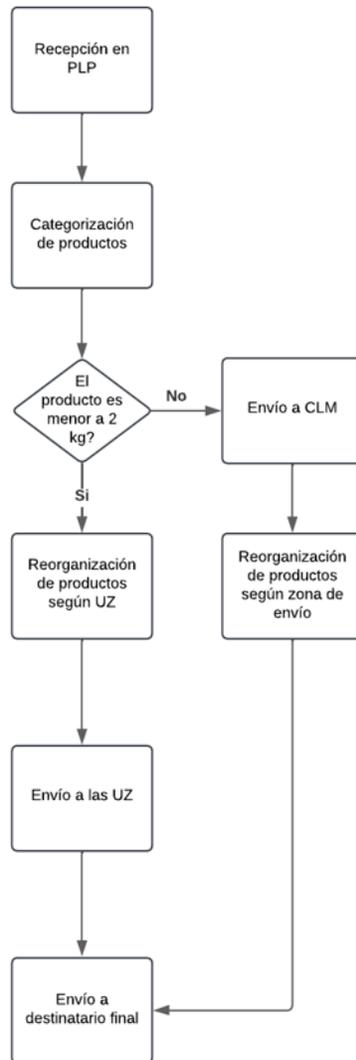
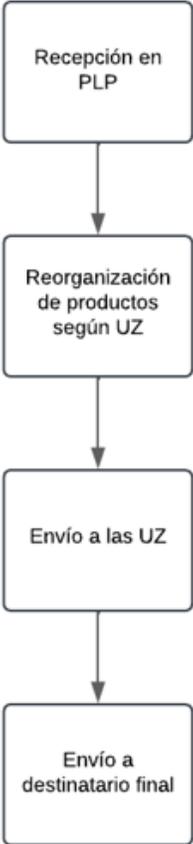


Ilustración 1: Diagrama de flujo del proceso actual. Elaboración propia

### 3.2.2. Problema a resolver

Considerando lo planteado anteriormente, el problema consiste en determinar la ubicación óptima de las UZ en el área Metropolitana, con el objetivo de unificar los servicios de cartas y paquetes y minimizar los costos asociados a su distribución. Además, se pretende optimizar la logística de entrega de cartas y paquetes utilizando la PLP, como centro *de crossdocking* principal, así como las UZ como centros adicionales de *crossdocking*. La resolución del problema implica diseñar una estrategia centralizada en la PLP, que permita enviar los productos hacia las UZ y, desde allí, a sus destinos finales, reduciendo los costos totales de traslado y optimizando el uso de los recursos disponibles.

El siguiente diagrama de flujo muestra la propuesta de distribución unificada, destacando los cambios en la operativa y la eliminación de pasos intermedios para mejorar la eficiencia del sistema.



*Ilustración 2: Diagrama de flujo de la distribución unificada. Elaboración propia*



## 4. Modelado de la realidad

En esta sección se profundizará en la situación actual de la distribución de correspondencia en Montevideo y su área metropolitana, con el objetivo de obtener un proceso detallado. Además, se introducen los cambios propuestos por el equipo y su relación con el trabajo posterior. Estos cambios se dividirán en dos etapas, para simplificar el problema y concretar un abordaje específico en cada caso.

### 4.1. Etapa I: Modelo de localización

La primera etapa se centra en la ubicación óptima de las UZ y sus zonas de distribución asignadas.

#### 4.1.1. Descripción de situación actual

En las primeras horas de la mañana de cada día, arriba a cada UZ un vehículo desde la PLP con las cartas y paquetes chicos, menores a 2 kilogramos, correspondientes a la zona de distribución indicada.

Los carteros se encargan de clasificar las cartas asignadas a su respectiva zona de distribución, de forma de realizar su recorrido de la manera más eficiente posible. Una vez planificado el trayecto, se realiza la carga del vehículo y emprende su rumbo. El método anterior lo realizan todos los carteros, utilizando el medio de transporte que le corresponda, ya sea a pie, moto o bicicleta. Luego de completar sus labores, aquellos paquetes que no llegaron a sus destinatarios retornan a la unidad zonal, donde podrán ser recogidos por los mismos.

Las UZ están ubicadas en cada zona de entrega y los carteros que trabajan en las mismas realizan la distribución a pie, en moto o en bicicleta, pero esto limita bastante su radio de entrega.

Los paquetes de más de dos kilogramos se distribuyen desde el CLM directamente a los destinatarios finales.

#### 4.1.2. Alternativa planteada

El modelo desarrollado plantea una alternativa similar a la operativa ya descrita, pero con algunas operaciones adicionales.

Se considerará la siguiente clasificación, que fue establecida con la contraparte. Los paquetes pequeños son aquellos cuyo peso es inferior a 2 kg, independientemente de sus dimensiones. En cuanto a los paquetes medianos y grandes, ambos superan los 2 kg de peso, pero se distinguen por sus dimensiones. Los paquetes medianos tienen un volumen inferior a  $0,25 \text{ m}^3$ , mientras que los paquetes grandes son aquellos cuyo volumen supera los  $0,25 \text{ m}^3$ .

Haciendo alusión al proceso actual, cuando arriban cartas y paquetes chicos, se propone incorporar además los paquetes medianos y grandes de la zona de distribución asignada a la

UZ. Adicionalmente, se plantea ampliar el radio de cobertura actual de las UZ, logrando así distribuir a más zonas desde el mismo centro de distribución. La forma de lograr esta alternativa es con la incorporación de una flota de camionetas, o la reasignación de camionetas ya existente dentro del Correo Uruguayo. Aunque la forma en la que se realizará la distribución posterior de estos productos hacia su destinatario final escapa al alcance del trabajo actual, se puede afirmar a través del intercambio con la contraparte que las UZ pueden reforzarse con camionetas.

En resumen, se busca adoptar un funcionamiento análogo al que se utiliza en el interior del país, donde la UZ se encarga de la distribución de las cartas y los paquetes, sean chicos, medianos o grandes. Es por esto, que la modificación planteada permite la integración en la distribución de todos los productos, contemplando las restricciones existentes relacionadas con las cargas de los carteros, pero sin alterarlas, ya que se podrá recorrer mayor distancia con un esfuerzo menor.

Profundizando en la alternativa planteada, se propone un modelo matemático que se encargue de seleccionar aquellas UZ que deberían permanecer abiertas y asignándoles qué zonas de distribución cubrirá cada una. La viabilidad de este ajuste es posible con la incorporación de camionetas a la flota de las UZ, debido a dos motivos. Por un lado, se tendría la facultad de transportar todos los productos, y no solo cartas y paquetes chicos. En segundo lugar, el radio de cobertura se ampliará de forma de poder unificar varias zonas de distribución.

En resumen, el objetivo del modelo matemático es minimizar los costos de traslado y funcionamiento de las UZ, decidiendo cuáles de ellas permanecerán abiertas y qué zonas cubrirá cada una.

A continuación, se presentan algunas consideraciones relevantes a la alternativa planteada. Cabe destacar que se profundizará en cada una de ellas en secciones posteriores.

Para las UZ, se tienen en cuenta varios factores importantes. La capacidad física de almacenamiento de estas no es considerada una limitante, dado que existe un gran espacio disponible para depósito. Sin embargo, la capacidad que sí restringe es la capacidad de distribución, es decir, cuántos productos se pueden distribuir con los recursos existentes. Esto está determinado por la cantidad de carteros, cantidad de vehículos y su capacidad de traslado. Además, se evalúan los costos de alquiler, de luz y de agua de las UZ. También se toma en cuenta el radio de cobertura de cada unidad, para determinar su eficiencia en la distribución.

En cuanto a las zonas de distribución se utiliza la demanda diaria de cada zona, que se clasifica en términos de cartas, paquetes pequeños, medianos y grandes. Estos productos se categorizan según sus medidas y su peso.

Entre las consideraciones clave está la distancia en kilómetros entre las UZ y la zona de distribución, además de un parámetro, que penaliza dicha distancia, para optimizar la eficiencia del sistema de distribución.

## 4.2. Etapa II: Modelado de la distribución

En esta oportunidad, el foco se centra en la distribución de los productos desde la PLP hacia las UZ definidas previamente. Se utilizan los resultados de la etapa anterior para estudiar la distribución de correspondencia en Montevideo y Área Metropolitana.

### 4.2.1. Descripción de situación actual

Diariamente, una gran cantidad de personas a lo largo y ancho del país se aproximan a la oficina del Correo Uruguayo de su conveniencia, entregan el producto y posteriormente su destinatario lo recibe. Detrás de esa acción se desarrolla una gran gestión logística por parte de la empresa. A continuación, se detalla dicho proceso.

Como primer paso, una vez llegado el producto a la oficina de correo, es etiquetado con su información correspondiente. Luego, un vehículo lo recoge y transporta a la PLP, donde se concentran todos los productos y ocurre el *crossdocking*. Allí, el producto se procesa a través de un *sorter* y se clasifica. Si su destino es el área metropolitana, según sean sus características, puede tomar dos caminos:

- A. Centro Logístico de Montevideo (CLM), si el peso del paquete es mayor a 2 kg.
- B. Unidad zonal asignada próxima al destino final, para cartas y paquetes con peso menor a 2 kg.

En el primer caso, una vez arribado al CLM, durante la madrugada, se realiza una reclasificación de los paquetes, pero esta oportunidad de forma manual. Posteriormente, los productos se ordenan según el recorrido deseado, se cargan en el vehículo correspondiente y parten rumbo a la zona de distribución para ser entregados.

En el segundo caso, los productos se cargan directamente en los medios de transporte correspondientes y se envían rumbo a las UZ donde ocurre la distribución descrita en la etapa I.

### 4.2.2. Alternativa planteada

Considerando el escenario expresado en la Etapa I, el equipo de trabajo propone unificar algunos procesos. En particular, se plantea eliminar el CLM con el objetivo de unificar todos los envíos, sin discriminar. Es decir, se mantendría el proceso de forma análoga hasta el momento de salida de la PLP, donde eventualmente se enviarían todos los productos hacia las correspondientes UZ definidas en la etapa anterior.

De esta forma, eludiendo el traslado hacia el CLM, se evitarían diversos costos. Por un lado, se ahorraría el traslado hacia allí, con todo lo que esto conlleva. A su vez, se ahorraría el costo de la mano de obra involucrada en la reclasificación realizada en este lugar. Por otro parte, se evitarían también los costos de mantenimiento del lugar físico.

A partir de lo expresado, se formula un modelo matemático que se encarga de especificar qué productos viajan, su medio de transporte y el recorrido, de forma de cumplir con la demanda

de las diferentes zonas de distribución y minimizar los costos asociados. Estos elementos se definen en función de las distancias, costos de envíos y la capacidad de los diferentes medios de transporte.

Para el establecimiento de las UZ debe considerarse algunos factores que resultan fundamentales, tales como, las demandas de las diferentes zonas de distribución que deben abastecerse y las distancias entre las propias UZ.

Con relación a los medios de transporte, se contemplan la capacidad en volumen medida en metros cúbicos, y el costo por kilómetro recorrido.

En lo que respecta a los productos, se clasifican según sus dimensiones y peso, en cartas, paquetes pequeños (CH), medianos (M) y grandes (G). Teniendo un factor de conversión entre unidades de producto y su volumen.

#### 4.3. Modelos matemáticos y el *crossdocking*

Por un lado, se encuentra el modelo encargado de la localización estratégica de las Unidades Zonales. Este modelo es clave para garantizar la buena práctica del *crossdocking*, ya que dicha eficiencia depende en gran medida de la proximidad entre los Centros Logísticos y las ubicaciones seleccionadas para las Unidades Zonales. De esta manera, se facilita una transferencia rápida de productos, evitando almacenamientos prolongados.

Por otro lado, el modelo de ruteo pretende optimizar el uso de camiones y sus recorridos. En el contexto de la logística con *crossdocking*, esto permite establecer una conexión eficiente entre el Centro Logístico, donde se realiza el *crossdocking*, y la carga de los camiones, asegurando el cumplimiento de los tiempos críticos que este proceso requiere.

Es por lo mencionado en las secciones y párrafos anteriores que se considera correcta la integración de ambos modelos matemáticos con el esquema logístico *crossdocking*. La sinergia que logran estos tres conceptos de forma conjunta puede llevar al sistema logístico a una mayor eficiencia en el uso de los recursos, así como también una minimización directa de los costos incurridos.

## 5. Relevamiento de datos

En la presente sección se aborda lo relacionado al relevamiento de datos necesario para llevar a cabo el proyecto.

Participantes clave:

- Ing. Leonardo Padrón - Gerencia General del Correo – Asesor de Presidencia.
- Javier Zunino – División Distribución Zonal – Gerente de División.
- Gustavo Miraballes Botello – Unidad de Geomática – Gerente de División.
- Ing. Claudia Bonnacarrere - División Centro Logístico Montevideo (CLM) – Gerente de Área.

### 5.1. Recopilación de información

El proceso de relevamiento comenzó con una reunión con Leonardo Padrón, asesor de Presidencia del Correo, para identificar los datos disponibles. Durante esta reunión, se realizó un cuestionario de 20 preguntas sobre el funcionamiento y la operativa del correo, con énfasis en los traslados y envíos en la zona metropolitana.

Esta instancia fue importante para el trabajo, ya que nos permitió corroborar la viabilidad del proyecto, mediante el uso de datos reales brindados por la contraparte. Basándose en un caso de ruteo general, el equipo de trabajo ajustó el modelo a la nueva realidad planteada como solución para la empresa. Dada la complejidad del problema se planteó un proceso de optimización en dos etapas, donde algunos conjuntos de datos son comunes a ambas.

El ingeniero Padrón también proporcionó una base de datos con información sobre las UZ, incluyendo localidades, departamentos y ubicaciones. Para profundizar en los detalles, se realizó una reunión con Gustavo Miraballes, gerente de la Unidad de Geomática. Esta instancia permitió visualizar las UZ y sus zonas de distribución, a través de una herramienta web asociada al mapa del área metropolitana. Allí se observaron las zonas de paquetes, que refieren a la distribución de la paquetería, las zonas postales, que refieren a la subdivisión del código postal (radios de cartero) para la distribución de comunicaciones, y el código postal, que es el área de influencia de una unidad de distribución en el negocio de las comunicaciones.

El siguiente paso consistió en determinar los costos operativos que incurren las UZ durante una operativa normal. Se obtuvo un promedio mensual, así como información detallada sobre cuáles locales son propios, cuáles alquilados y cuáles comparten la locación con una unidad comercial de atención al público. Esta distinción resultó necesaria, ya que las UZ que incluyen atención al público incrementan sus costos. Sin embargo, como explicó el asesor, “*sería sumamente difícil separar los costos de una y otra unidad*”, refiriéndose, en este caso, a la unidad de reparto y la unidad de atención al cliente.

Por otro lado, se obtuvo información de la base de recursos humanos por UZ, con los detalles del personal asociado a cada una de ellas, la cantidad de empleados y quienes de ellos desempeñan la función de carteros. Adicionalmente, se conoció el costo de RRHH total mensual para cada unidad. Esto incluye las remuneraciones de todos los funcionarios de esa unidad, las leyes sociales, las cuotas que forma parte de aguinaldos, el aporte patronal, entre otros.

Por último, se accedió a la base de datos de volúmenes de distribución de cada UZ en el área metropolitana. Esta información, desglosada mes a mes para 2023, incluyó el origen de los envíos (CLM o PLP), el tipo de envío (paquete o carta) y el destino asignado (zona de distribución o unidad zonal responsable).

Para obtener información más específica sobre la capacidad de las UZ, se contactó a Javier Zunino, gerente de la División Seguridad Postal. Él proporcionó detalles sobre la capacidad de los carteros en términos de volumen y paquetes, según los medios de transporte utilizados (pie, moto, bicicleta o vehículo). Estos datos complementaron a los ya obtenidos a través del asesor de Presidencia del Correo, permitiendo calcular la capacidad de envío por UZ.

Al seguir profundizando, se consideró pertinente realizar una visita al CLM, ubicado en la calle Veracierta 2663 esquina Nuñez de Arce. El objetivo de esta visita fue observar la operación de primera mano y establecer una reunión personal con Claudia Bonecarrarere, gerente del área.

Durante este encuentro, Claudia se encargó de explicar y desarrollar toda la operación logística del Correo Uruguayo, no solo del CLM o el área metropolitana. Esta introducción permitió al equipo tener un intercambio fluido con ella, presentando las ideas más relevantes del trabajo y evocando dudas relacionadas. Después se recorrió el centro para relevar el proceso en las diferentes zonas que se habían explicado previamente en su oficina, en un pizarrón, pasando así de la teoría a la práctica en pocas horas. Se observaron las operaciones de carga de camionetas, descarga de jaulas con paquetes para ser enviados, y se visitó la zona de clasificación de paquetes, equipada con largas mesas, donde se tomaron medidas de los productos efectivamente trasladados por el Correo Uruguayo.

El intercambio con ella fue muy enriquecedor, mostrando gran afinidad con el proyecto. Después de este encuentro, se apoyó al equipo con detalles adicionales relacionados con el CLM, compartiendo algunos remitos reales para relevar la cantidad de envíos en cada pedido y la distribución por tipo de paquete en general. Además, se obtuvo el detalle de toda la flota del CLM, con especificaciones de las marcas, modelos, años de fabricación, capacidad expresada en términos de volumen ( $m^3$ ), entre otros. También fue de gran ayuda tener acceso a casos reales típicos, como tandas de pedidos de TEMU y ZARA, o casos más particulares como sillas de ruedas, camillas, etc.

En cuanto a la distancia entre las UZ o entre las diferentes zonas de distribución y las UZ, se utilizó la herramienta Google Maps, con el objetivo de obtener las rutas más eficientes de acuerdo con el algoritmo utilizado por la misma. En relación con el traslado y recorrido de los

vehículos, se estimó el consumo de combustible por kilómetro recorrido como un promedio de los consumos teóricos. Finalmente, en lo que respecta al combustible y su precio, se tomó como base para todo el trabajo, de forma conservadora, el precio máximo al público decretado por el Poder Ejecutivo, según [20], al 20 de junio de 2024.

### 5.1.1. Unidades zonales

El área metropolitana cuenta con 24 unidades zonales distribuidas en Montevideo, Canelones y San José. Cada una de ellas ubicadas en diferentes zonas dentro de su departamento correspondiente, encargadas de la distribución y en algunos casos recepción de productos. Las UZ son oficinas o locales operativos encargados de la eficacia de la distribución por zonas, son el lugar destinado a realizar las entregas de los envíos en domicilio. Están ubicadas en todo el país, donde se recibe la carga y se asigna a los carteros para la distribución [15]. Cabe destacar que la zona mencionada en la Tabla 1, es donde se ubican los inmuebles, lo que no quiere decir que estos barrios sean las zonas de distribución, ya que estas pueden abarcar más de un barrio. Se ahondará en este concepto en la sección siguiente.

ID	Zona	Departamento	ID	Zona	Departamento
UZ1	Sayago	Montevideo	UZ13	Belvedere	Montevideo
UZ2	Pocitos	Montevideo	UZ14	Cerrito	Montevideo
UZ3	Unión	Montevideo	UZ15	Maroñas	Montevideo
UZ4	Cerro	Montevideo	UZ16	Pando	Canelones
UZ5	Cordon	Montevideo	UZ17	Lagomar	Canelones
UZ6	Ciudad Vieja	Montevideo	UZ18	Barros blancos	Canelones
UZ7	Punta Gorda	Montevideo	UZ19	Salinas	Canelones
UZ8	La Blanqueada	Montevideo	UZ20	Las Piedras	Canelones
UZ9	Malvin	Montevideo	UZ21	Toledo	Canelones
UZ10	Aguada	Montevideo	UZ22	Atlantida	Canelones
UZ11	Reducto	Montevideo	UZ23	San luis	Canelones
UZ12	Colon	Montevideo	UZ24	Ciudad del Plata	San José

Tabla 1: ID y ubicación de cada UZ

De estas UZ, el 75% operan en inmuebles alquilados, mientras que el restante 25% son propiedad del Correo Uruguayo. La mitad de las unidades cuentan con oficinas con atención al público, mientras que la otra mitad carece de este servicio.



Ilustración 3: Ubicación de las unidades zonales en Montevideo y su área metropolitana. Imagen editada en [21].

El costo operativo mensual promedio de todas las UZ se encuentra en el entorno de \$1.300.000 pesos uruguayos, y cada UZ ronda en los \$55.000 pesos uruguayos mensuales. Se observa en la Ilustración 5 que hay una tendencia lógica de aumento de costos en función de la propiedad o no del inmueble, debido a los costos incurridos en alquiler.

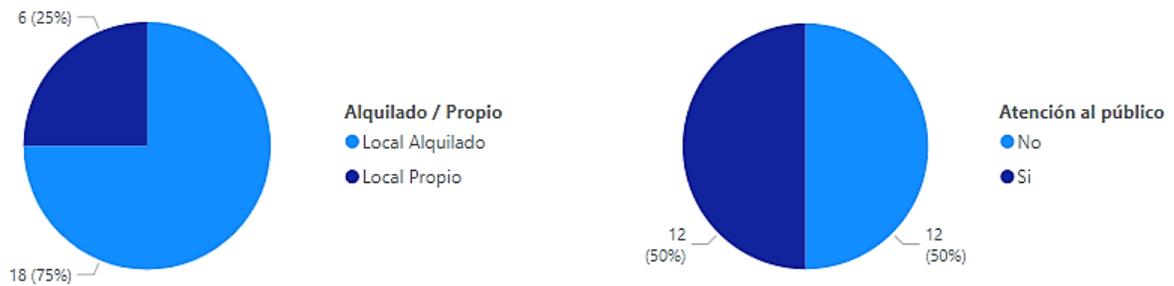


Ilustración 4: Comparativa de locales propios y alquilados || Comparativa de locales con atención al público. Elaboración propia

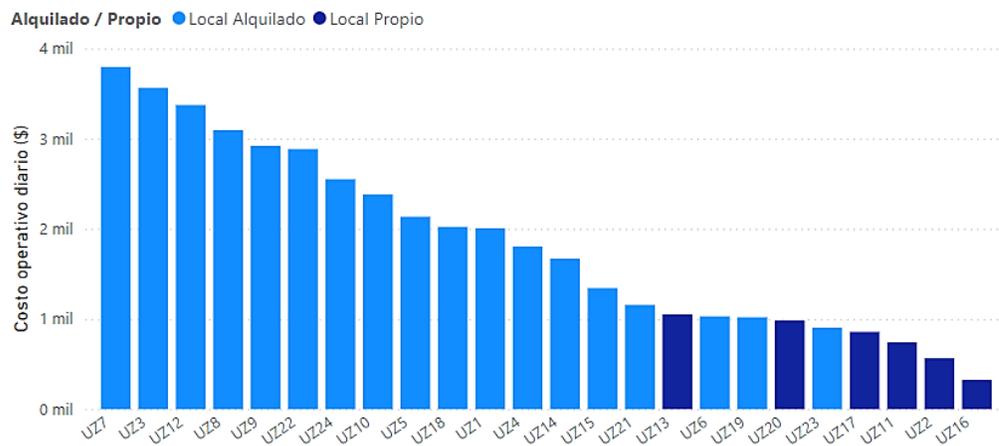


Ilustración 5: Unidades zonales en función del costo operativo. Elaboración propia

Para mantener en funcionamiento y realizar las distintas operaciones, se emplean alrededor de 710 personas, de las cuales 340 son carteros (Ilustración 6).

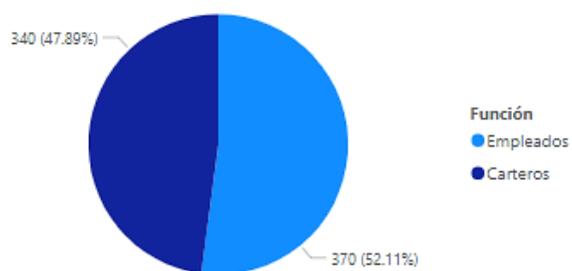


Ilustración 6: Distribución de funcionarios. Elaboración propia.

De entre esos carteros se logró identificar que un 54% realiza su recorrido de entrega a pie, mientras que el 39% se maneja en moto y el restante 7% lo hace en bicicleta (Ilustración 7).

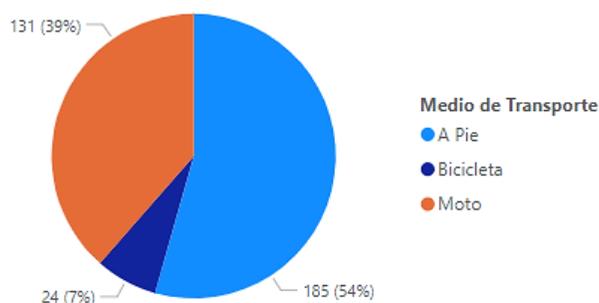


Ilustración 7: Distribución por medio de transporte. Elaboración propia

La tendencia que se muestra en la Ilustración 8, refiere a que cuanto más en la periferia se encuentra la unidad zonal, mayor es el uso de motos y luego de bicicleta. Mientras que, cuanto más se acerca al centro de la ciudad, aumenta la distribución a pie considerablemente.

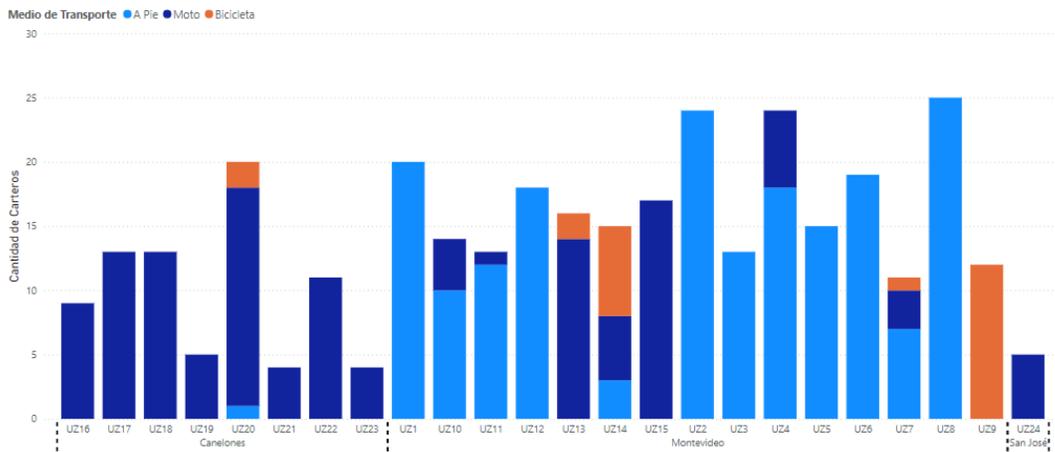


Ilustración 8: Distribución por medio de transporte por unidad zonal. Elaboración propia

### 5.1.2. Zonas de distribución

Respecto a las zonas de distribución, la cantidad es 24, igual que las unidades zonales, también repartidas en Montevideo, Canelones y San José. Como bien se mencionaba en la sección anterior, una zona de distribución puede llegar a abarcar más de un barrio. Estas zonas delimitan el área de distribución de los servicios postales, centralizan operaciones postales y servicios necesarios, mejorando la calidad de estos [22].

En la Ilustración 9 se observa que, a medida que se aleja del centro de la ciudad, el área de reparto a cubrir se expande. Esto es coherente con la densidad demográfica y la distribución de los envíos en las zonas mencionadas.

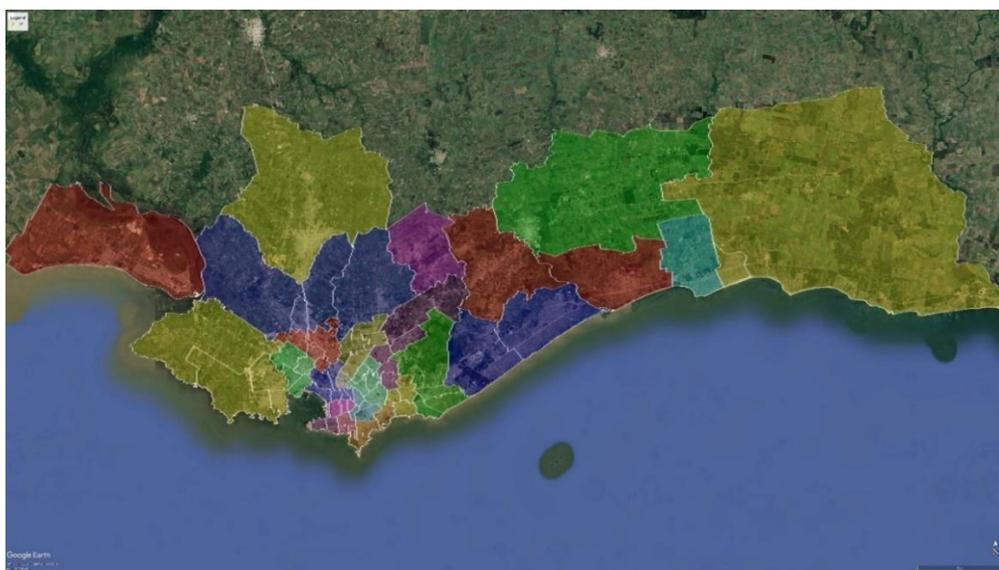


Ilustración 9: Zonas de distribución. Imagen editada a partir de [21].

### 5.1.3. Cartas y paquetes

En el año 2023 se realizó la distribución de unas aproximadamente 16.400.000 cartas y unos 420.000 paquetes de todo tipo, peso y tamaño. En la paquetería hay una división entre los paquetes chicos repartidos por los carteros de las unidades zonales, que representan alrededor del 35 % de los paquetes (145.000 paquetes). El 65 % restante son paquetes medianos y grandes, que el CLM entrega diariamente a cada destinatario correspondiente.

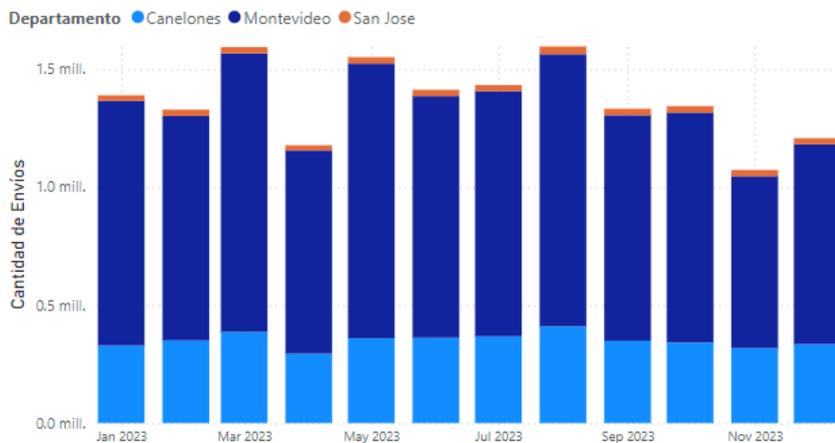


Ilustración 10: Cantidad de cartas por mes por departamento. Elaboración propia

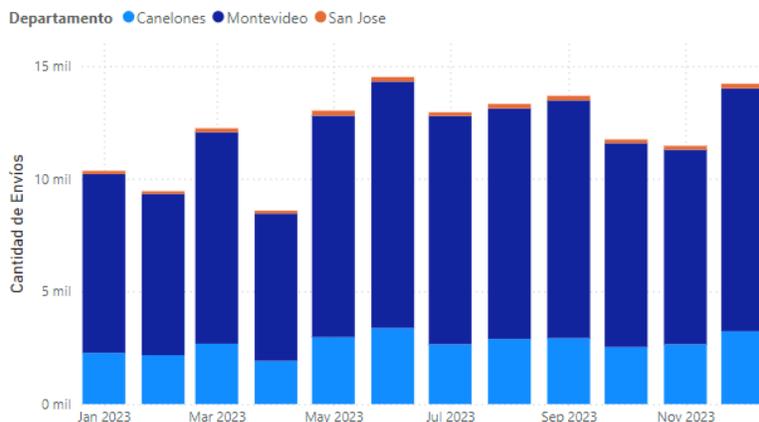


Ilustración 11: Cantidad de paquetes mayores a 2 kg por mes por departamento. Elaboración propia

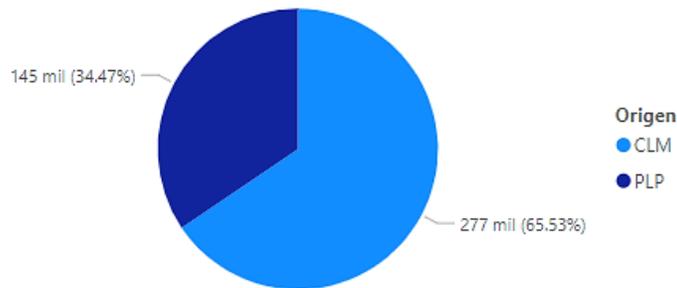


Ilustración 12: Porcentaje de envíos que corresponden al CLM y a PLP. Elaboración propia.

#### 5.1.4. Flota

En cuanto a la flota del CLM, esta cuenta con aproximadamente 38 vehículos, entre camiones y camionetas. Se consideró que estos recursos eran base para el análisis, evitando así generar gastos adicionales en nuevas inversiones. Del total, el 97% corresponde a camionetas, con un único camión identificado: un Mercedes-Benz Atego 1418.

Marca	Modelo	Año	Cantidad	Capacidad (m3)	Consumo (Litro/km)
Mercedes Benz	Sprinter 515	2015	1	14,5	0,13
Mercedes Benz	415 CDI F/3250	2015	5	7,5	0,11
Peugeot	New Boxer L2H2	2015	6	11,5	0,12
Renault	MASTER L2H2	2019	8	10,8	0,12
Renault	MASTER L1H1	2019	10	8	0,11
Peugeot	Partner 1,6 B9	2019	2	4	0,08
Peugeot	Boxer FT L4H2	2019	4	15	0,12
Hyundai	H350	2015	1	5,2	0,12
Mercedes	Atego 1418	2021	1	41	0,25

Tabla 2: Resumen de la flota disponible

Las marcas de la flota incluyen Mercedes-Benz, Peugeot, Renault y Hyundai, con capacidades que varían entre los 4 m<sup>3</sup> y los 15 m<sup>3</sup>. En cuanto al consumo de combustible, se estima un promedio de 0,13 litros por kilómetro recorrido. La Peugeot Partner destaca como el vehículo más eficiente, con un consumo de 0,08 litros por kilómetro, mientras que el camión Atego, de mayor capacidad, presenta un consumo más elevado de 0,25 litros por kilómetro.

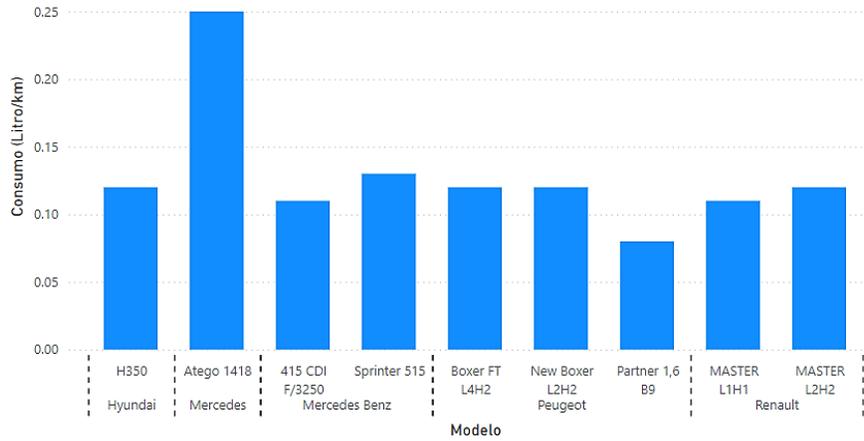


Ilustración 13: Consumo de cada vehículo. Elaboración propia.

### 5.1.5. CLM

En lo que refiere a los remitos del CLM, se revisaron casos reales donde lo que se midió fue el peso, en kilogramos, que representaban las cartas sobre el peso total del remito. Las mismas representaban entre un 25% a un 36% del peso completo de los diferentes envíos.

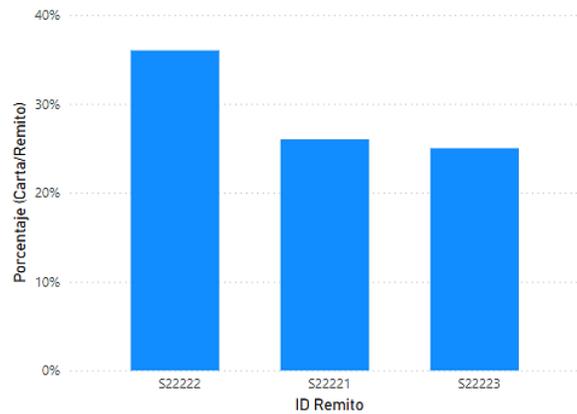


Ilustración 14: Porcentaje de cartas por remito. Elaboración propia

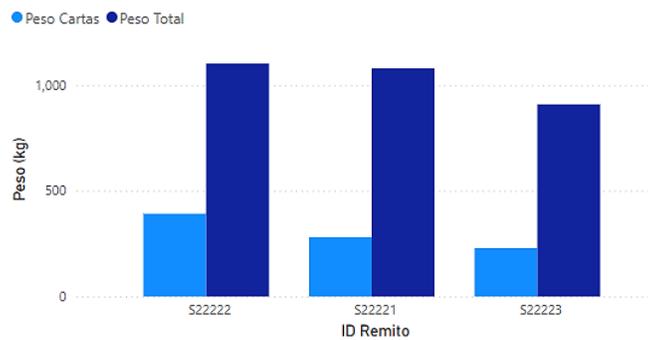


Ilustración 15: Peso de las cartas y pesos total por remito. Elaboración propia.



## 6. Etapa I: Modelo de localización

En esta sección se desarrollará el modelado matemático formulado para la Etapa 1, junto al procesamiento de datos que fue necesario realizar para obtener los parámetros de entrada del modelo. Luego, en la sección 6.3 se muestran los resultados obtenidos para el caso base. Por último, en sección 6.4, se presentan los análisis de sensibilidad realizados con sus resultados.

### 6.1. Modelo Matemático

El primer modelo que presentará el equipo de trabajo busca minimizar los costos fijos asociados a la operativa de las unidades zonales. Esto incluye a todos los costos asociados a la apertura unidades zonales y a la asignación zonas de distribución a las mismas.

El problema de optimización se ajusta como un modelo de Programación Lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés), enfocado a la resolución de un problema de localización y asignación discreta. El modelo busca determinar la ubicación óptima de las UZ y su asignación a zonas de distribución para minimizar los costos totales. Se considera un radio  $R$ , que garantiza la distribución en la última milla mediante medios utilizados, y se incluyen restricciones de capacidad y cobertura para asegurar la viabilidad logística y la eficiencia del sistema.

#### 6.1.1. Conjuntos:

- $P$ : conjunto de productos a distribuir.
- $M$ : conjunto de posibles unidades zonales a utilizar.
- $N$ : conjunto de zonas de distribución a abastecer.

#### 6.1.2. Parámetros:

- $ca_i$ : costo de operación fijo asociado a la unidad zonal  $i \in M$ , en pesos uruguayos.
- $CT$ : costo por kilómetro recorrido entre la zona de distribución  $j \in N$  y la unidad zonal  $i \in M$ , en pesos uruguayos.
- $q_{ik}$ : capacidad de distribución del producto  $k \in P$  de la unidad zonal  $i \in M$ , en unidades.
- $\omega_{jk}$ : cantidad enviada de producto  $k \in P$  a la zona de distribución  $j \in N$ , en unidades.
- $d_{ij}$ : distancia entre las unidades zonales  $i \in M$  y las zonas de distribución  $j \in N$ , en kilómetros.
- $R$ : radio de cobertura permitido para la distribución de productos, en kilómetros.

#### 6.1.3. Variables de decisión

- $y_i$ : variable binaria que vale 1 si se abre la unidad zonal  $i \in M$  y 0 si no.
- $x_{ij}$ : variable binaria que vale 1 si la zona de distribución  $j \in N$  se la asigna a la unidad zonal  $i \in M$  y 0 si no.

#### 6.1.4. Consideraciones

La contraparte informó al equipo de trabajo que la capacidad de almacenamiento de las UZ no constituye una limitante para la cantidad de envíos diarios unificados. En este contexto, se toma en cuenta la capacidad de distribución, que se define como la cantidad máxima de cartas y paquetes que cada UZ puede distribuir desde su ubicación, hasta los destinatarios finales. Esta capacidad depende del volumen de los productos y de los medios de transporte utilizados por los carteros (a pie, en moto, bicicleta o camión). El valor de la capacidad de distribución fue determinado a partir de la información proporcionada por el personal del Correo, como fue mencionado en la Sección 5 de Relevamiento de datos, considerando las capacidades individuales de los carteros asignados a cada UZ. Además, se espera que no existan grandes fluctuaciones en la capacidad de cada UZ, logrando de esta manera que no se vea afectada la operativa.

En el modelo, tanto las cartas como los paquetes chicos fueron tratados como productos, incorporándose tanto las cantidades demandadas como las capacidades de reparto en el análisis. Sin embargo, al evaluar los resultados de la alternativa propuesta, estos productos no recibieron especial atención, ya que la operativa actual es suficiente para su distribución. Es decir, los costos operativos ya contemplan el reparto de cartas y paquetes pequeños, y la capacidad de distribución disponible excede considerablemente la demanda promedio, incluso con la consolidación de las zonas de distribución. El foco al evaluar los resultados se centró principalmente en los paquetes medianos y grandes, dada la complejidad que implica su distribución, como puede llegar a ser la asignación de camionetas a las UZ y los costos asociados a esta actividad.

#### 6.1.5. Formulación del modelo 1

$$\min \sum_i C a_i y_i + \sum_i \sum_j CT d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_j \sum_k \omega_{jk} x_{ji} \leq \sum_k q_{ik} y_i, \forall i \in M \quad (2)$$

$$x_{ji} \leq y_i, \forall i \in M, j \in N \quad (3)$$

$$d_{ij} x_{ij} \leq R, \forall i \in M, j \in N \quad (4)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1, \forall i \in M, j \in N \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in M, j \in N \quad (6)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \forall i \in M, j \in N \quad (7)$$

La función objetivo (1) busca minimizar los costos vinculados al funcionamiento de las unidades zonales. El primer término refiere al costo de operación fijo por la apertura de una UZ. El segundo hace referencia a los costos asociados al transporte de productos desde las unidades zonales hasta las zonas de distribución.

La restricción (2) corresponde a la satisfacción de la demanda. La cantidad total de productos asignados a una UZ  $i$  no puede exceder la capacidad de esta, y la capacidad solo se considera activa cuando  $y_i = 1$ .

Por su parte, la restricción (3) asegura que una zona de distribución  $j$  solo puede ser asignada a una unidad zonal si esta última está abierta ( $y_i = 1$ ).

Luego, la restricción (4) considera un radio de cobertura para la asignación. Una zona de distribución  $j$  solo puede ser asignada a una unidad zonal  $i$  si la distancia entre ambas está dentro del radio de cobertura permitido  $R$ . Este radio de cobertura está diseñado para que la distribución desde la unidad zonal hacia las zonas asignadas pueda ser realizada de manera eficiente utilizando los medios de transporte de la última milla; como carteros a pie, bicicleta o moto.

Para forzar que la asignación sea única se incluye la restricción (5), que asegura que cada zona de distribución  $j$  debe ser asignada a una y solo una unidad zonal  $i$ .

Por último, las restricciones (6) y (7) definen los dominios de las variables.

## 6.2. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos constituyó una etapa clave para convertir la información recopilada a parámetros específicos que alimentaran el modelo de optimización.

Una de las variables fundamentales fue el costo operativo fijo diario asociado a cada unidad zonal. Este costo consideró dos componentes principales: por un lado, los costos generales provistos directamente por el Correo, que incluyen gastos de infraestructura y mantenimiento; y por otro, los costos relacionados con la operación de vehículos. En este último caso, se estimó el impacto de la cantidad de camionetas necesarias para distribuir paquetes medianos y grandes según el volumen a enviar a cada UZ, considerando datos sobre consumo de combustible y su precio unitario publicado por [20] al 20 de junio de 2024.

Además, se calcularon los costos por kilómetro recorrido entre cada zona de distribución y la UZ. Para ello, se utilizó información sobre el consumo específico de cada modelo de camión para la flota dada y el precio del combustible. Esto permitió obtener un valor ajustado del costo por kilómetro, dato esencial para modelar el impacto económico de las rutas de distribución. Cabe destacar que no se consideran variaciones en el precio de los combustibles, siendo este un valor fijo para todos los cálculos, ni costos asociados al mantenimiento de los vehículos.

Otro parámetro central fue la capacidad de distribución de cada unidad zonal de cada producto. Este valor, determinado a partir de la información provista por el personal del Correo, refleja la cantidad máxima de cartas y paquetes (según tamaño) que cada UZ puede distribuir desde su ubicación hasta los destinatarios finales. Para su cálculo, se consideraron las capacidades individuales de los carteros, segmentadas por su medio de transporte (a pie, en moto, bicicleta o camión) y la cantidad asignada a cada UZ.

El volumen enviado de cada producto hacia una zona de distribución fue determinado utilizando el percentil 95 de los datos históricos del año 2023. Esta decisión respondió a la necesidad de capturar picos de demanda y garantizar que el sistema pueda absorber variaciones significativas en los flujos de cartas y paquetes, considerando su estacionalidad.

Asimismo, la distancia entre las posibles ubicaciones de las UZ y las zonas de distribución se calculó utilizando rutas optimizadas provistas por Google Maps. Esta herramienta permitió estimar las distancias más eficientes según las condiciones del tránsito y las características del área de cobertura, ajustando el modelo a escenarios reales.

Finalmente, se definieron radios de cobertura para las UZ. Estos permiten que la distribución desde la unidad zonal hacia las zonas asignadas pueda ser realizada de manera eficiente utilizando los medios de transporte de la última milla; como carteros a pie, moto o camioneta. Se entiende que se les asignarán a los carteros a pie las zonas más cercanas y las camionetas a los envíos más lejanos.

Este análisis sirvió como punto de partida para evaluar la viabilidad de diferentes configuraciones operativas y garantizar que las soluciones propuestas estuvieran alineadas con las realidades logísticas y económicas de la empresa.

### 6.3. Análisis de resultados

En esta sección se estudian los resultados obtenidos del modelo matemático para la Etapa I, brindando una visión del desempeño de este.

El modelo matemático es categorizado como un problema de programación lineal entera. Su ejecución se realizó en AMPL (versión 20240308) a través del solucionador Gurobi (versión 11.0.3). Tanto para la resolución del caso base como para sus análisis de sensibilidad se empleó un sistema operativo Microsoft Windows 11 (versión 22631.2), con 16 GB de memoria RAM y un procesador Intel Core i7-1065G7 @ 1.30GHz. El tiempo de ejecución fue de 0.014 segundos, arrojando el resultado de inmediato. Cabe destacar que esta es la solución óptima del problema.

En primera instancia se puede destacar que, de un total de 24 Unidades Zonales disponibles, la solución establece la apertura de 16 de ellas. Es posible satisfacer la demanda de Montevideo y el Área Metropolitana solo con estos locales. Por lo tanto, no sería imprescindible la operativa de los 8 locales restantes.

A continuación, se pueden apreciar cuáles son las Unidades Zonales definidas y qué zona de distribución abastece cada una.

Situación Caso Base Etapa 1								
UZ	Zonas Asignadas	Zona de la UZ	Costo Operativo (\$)	Paquete M	Paquete G	Volumen (m3)	Camionetas (8m3)	Costo Camionetas (\$)
UZ1	Sayago	Sayago	2,006	46	12	16.5	2	870
	Colon							
UZ2	Pocitos	Pocitos	565	159	40	56.7	7	3045
	Cordon							
	La Blanqueada							
UZ6	Aguada	Ciudad Vieja	1,029	146	36	52.0	7	3045
	Ciudad Vieja							
UZ9	Punta Gorda	Malvin	2,918	52	13	18.4	2	870
	Malvin							
UZ11	Reducto	Reducto	742	56	14	20.0	3	1305
	Cerrito							
UZ13	Cerro	Belvedere	1,051	100	25	35.6	4	1740
	Belvedere							
UZ15	Union	Maroñas	1,342	65	16	23.0	3	1305
	Maroñas							
UZ16	Pando	Pando	326	19	5	6.8	1	435
UZ17	Lagomar	Lagomar	857	51	13	18.2	2	870
UZ18	Barros Blancos	Barros Blancos	2,022	26	7	9.4	1	435
UZ19	Salinas	Salinas	1,018	17	4	6.0	1	435
UZ20	Las Piedras	Las Piedras	984	38	9	13.5	2	870
UZ21	Toledo	Toledo	1,155	8	2	3.0	1	435
UZ22	Atlántida	Atlántida	2,884	17	4	6.2	1	435
UZ23	San Luis	San Luis	903	11	3	4.0	1	435
UZ24	Ciudad Del Plata	Ciudad Del Plata	2,549	12	3	4.2	1	435
			<b>22,351</b>				<b>16,965</b>	

Tabla 3: Solución caso base modelado Etapa 1

Por otra parte, el costo total diario que brinda la solución planteada es de \$39.316 pesos uruguayos. Este monto representa el costo de mantener operativas las 16 Unidades Zonales mencionadas anteriormente, incluyendo los costos de mantenimiento de cada local y las camionetas adquiridas.

ID	Zona	Costo operativo diario (\$)	Departamento	Apertura
UZ1	Sayago	2006	Montevideo	Si
UZ2	Pocitos	565	Montevideo	Si
UZ3	Unión	3561	Montevideo	No
UZ4	Cerro	1802	Montevideo	No
UZ5	Cordon	2134	Montevideo	No
UZ6	Ciudad Vieja	1029	Montevideo	Si
UZ7	Punta Gorda	3795	Montevideo	No
UZ8	La Blanqueada	3094	Montevideo	No
UZ9	Malvin	2918	Montevideo	Si
UZ10	Aguada	2380	Montevideo	No
UZ11	Reducto	742	Montevideo	Si
UZ12	Colon	3371	Montevideo	No
UZ13	Belvedere	1051	Montevideo	Si
UZ14	Cerrito	1670	Montevideo	No
UZ15	Maroñas	1342	Montevideo	Si
UZ16	Pando	326	Canelones	Si
UZ17	Lagomar	857	Canelones	Si
UZ18	Barros blancos	2022	Canelones	Si
UZ19	Salinas	1018	Canelones	Si
UZ20	Las Piedras	984	Canelones	Si
UZ21	Toledo	1155	Canelones	Si
UZ22	Atlantida	2884	Canelones	Si
UZ23	San luis	903	Canelones	Si
UZ24	Ciudad del Plata	2549	San José	Si

Tabla 4: Apertura de las unidades zonales

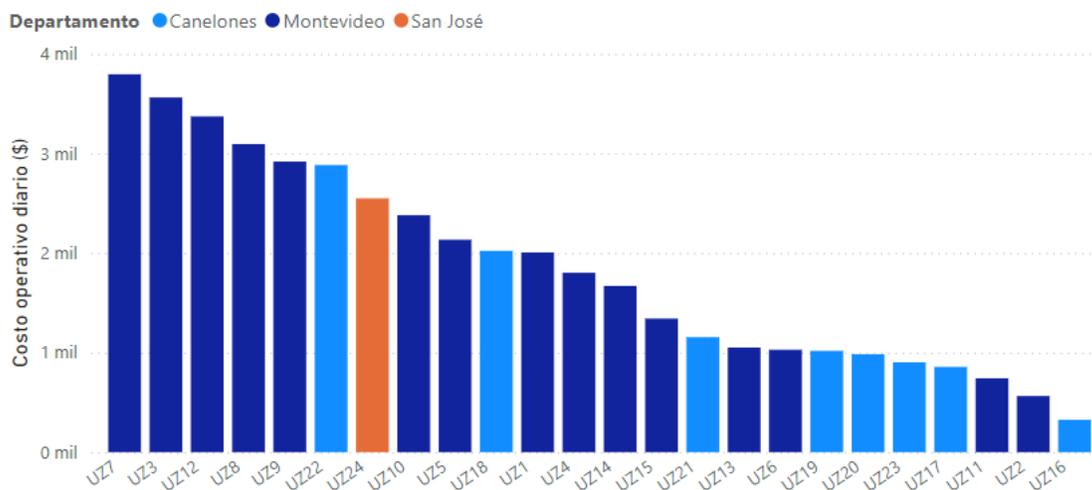


Ilustración 16: Costo operativo diario por UZ. Elaboración propia.

A partir de la Tabla 4, se puede visualizar que las Unidades Zonales seleccionadas dentro de Montevideo, son mayoritariamente las de menor costo. Por lo tanto, como sucede de forma intuitiva, el modelo se inclina por aquellas con menor costo operativo, contemplando su capacidad de reparto y ubicación en la ciudad.

Se puede afirmar que en la zona central de Montevideo es posible abastecer las zonas de distribución con una menor cantidad de Unidades Zonales. Sin embargo, observando las zonas periféricas de Montevideo, se percibe que son necesarias más Unidades Zonales para cumplir con lo demandado. Comparando ambas situaciones se deduce que esto se debe al tamaño de las zonas de distribución, ya que aumentan su tamaño a medida que las distancias al centro de la ciudad son más grandes.

Al unificar la distribución de cartas y paquetes dentro de las Unidades Zonales (UZ), será necesario utilizar camionetas para la entrega de paquetes medianos y grandes. Una vez finalizada esta tarea, dichas camionetas podrán ser utilizadas para asistir en el reparto indistinto de cartas y paquetes en las zonas más alejadas dentro de la zona de reparto correspondiente. Por ejemplo, áreas como La Blanqueada y Pocitos podrían beneficiarse de este apoyo logístico, optimizando así el uso de los recursos disponibles y mejorando la eficiencia en la entrega.

La cantidad de camionetas a utilizar se determina a través del volumen a enviar de los paquetes, medianos y grandes, a las nuevas zonas de distribución. Para el cálculo se utilizó una camioneta Renault, modelo Master L1H1, con una capacidad de 8 m<sup>3</sup>. A través del costo promedio de mantener una camioneta operativa durante el año, se obtuvo el costo de transporte de \$16.925 pesos uruguayos.

#### 6.4. Análisis de sensibilidad

En esta sección se examinarán los resultados obtenidos y el funcionamiento del modelo matemático frente a cambios en las hipótesis. En particular, se analizará el comportamiento

al modificar los parámetros referidos al radio de cobertura y a la demanda, ya que se consideran elementos de gran valor en el escenario planteado.

#### 6.4.1. Aumento del radio de cobertura

El radio de cobertura de las UZ es un parámetro fundamental en la planificación de la distribución, ya que define el área que cada una puede abastecer y, por lo tanto, impacta en la cantidad de unidades necesarias, los costos operativos y la eficiencia del servicio.

Un radio más amplio permite reducir la cantidad de UZ activas, lo que disminuye los costos fijos asociados a su mantenimiento. Sin embargo, esta expansión también puede afectar negativamente la distribución de última milla, ya que implica recorridos más largos hasta el destinatario final e incrementos en los costos de transporte.

Para evaluar estos efectos, se analizan distintos escenarios donde el radio de cobertura se amplía progresivamente a 10, 15, 20 y 25 km, partiendo de un caso base donde se operan 16 de las 24 UZ, con un costo operativo de \$22.351 y un costo de transporte de \$16.965. Es importante señalar que el costo de transporte se mantiene constante en todos los escenarios, ya que el volumen de paquetes transportados no cambia en estos escenarios.

Para un radio de cobertura de 10 km, se obtienen los resultados observados en la Tabla 5. En este escenario, el número de UZ activas se reduce a 13, lo que genera una disminución del costo operativo del 35%.

Situación Caso Radio 10 Etapa 1								
UZ	Zonas Asignadas	Zona de la UZ	Costo Operativo (\$)	Paquete M	Paquete G	Volumen (m3)	Camionetas (8m3)	Costo Camionetas (\$)
UZ2	Pocitos	Pocitos	565	166	41	58.6	7	3,045
	PuntaGorda							
	LaBlanqueada							
UZ6	Malvin	Ciudad Vieja	1,029	128	32	45.6	6	2610
	Cordon							
UZ11	Reducto	Reducto	742	89	22	31.4	4	1740
	Aguada							
UZ13	Sayago	Belvedere	1,051	126	31	44.3	6	2,610
	Belvedere							
	Cerro							
UZ15	Union	Maroñas	1,342	95	24	34.2	4	1,740
	Maroñas							
	Cerrito							
UZ16	Pando	Pando	326	19	5	6.8	1	435
UZ17	Lagomar	Lagomar	857	51	13	18.2	2	870
UZ18	Barros Blancos	Barros Blancos	2,022	26	7	9.4	1	435
UZ19	Salinas	Salinas	1,018	34	9	12.7	2	870
	Atlántida							
UZ20	Colon	Las Piedras	984	59	15	21.3	3	1305
	LasPiedras							
UZ21	Toledo	Toledo	1,155	8	2	2.9	1	435
UZ23	San Luis	San Luis	903	11	3	4.2	1	435
UZ24	Ciudad Del Plata	Ciudad Del Plata	2,549	12	3	4.3	1	435
			<b>14,543</b>				<b>16,965</b>	

Tabla 5: Resumen de resultados para el aumento del radio de cobertura a 10 km

Para un radio de cobertura de 15 km, se obtienen los resultados observados en la Tabla 6. En este caso, la cantidad de UZ operativas se reduce a 12, lo que genera una disminución del 44% en los costos operativos respecto al caso base.

Situación Caso Radio 15 Etapa 1								
UZ	Zonas Asignadas	Zona de la UZ	Costo Operativo (\$)	Paquete M	Paquete G	Volumen (m3)	Camionetas (8m3)	Costo Camionetas (\$)
UZ2	Pocitos	Pocitos	565	166	41	58.6	7	3,045
	PuntaGorda							
	LaBlanqueada							
	Malvin							
UZ6	Cordon	Ciudad Vieja	1,029	128	32	45.6	6	2610
	Ciudad Vieja							
UZ11	Reducto	Reducto	742	89	22	31.4	4	1740
	Aguada							
UZ13	Cerro	Belvedere	1,051	126	31	44.3	6	2,610
	Belvedere							
	Sayago							
UZ15	Union	Maroñas	1,342	95	24	34.2	4	1,740
	Maroñas							
	Cerrito							
UZ16	Pando	Pando	326	19	5	6.8	1	435
UZ17	Lagomar	Lagomar	857	77	20	27.6	3	1305
	Barros Blancos							
UZ19	Salinas	Salinas	1,018	34	9	12.7	2	870
	Atlantida							
UZ20	Colon	Las Piedras	984	59	15	21.3	3	1305
	Las Piedras							
UZ21	Toledo	Toledo	1,155	8	2	2.9	1	435
UZ23	San Luis	San Luis	903	11	3	4.2	1	435
UZ24	CiudadDelPlata	Ciudad Del Plata	2,549	12	3	4.3	1	435
			<b>12,521</b>				<b>16,965</b>	

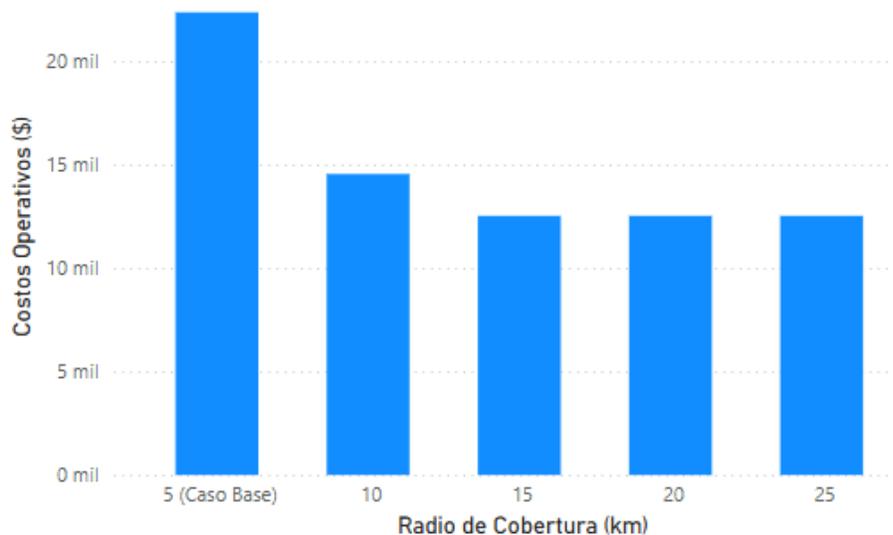
Tabla 6: Resumen de resultados para el aumento del radio de cobertura a 15 km

Para un radio de cobertura de 20 km, se obtienen los resultados observados en la Tabla 7. En este escenario, la cantidad de UZ activas se mantiene igual que en el caso de 15 km, lo que significa que los costos operativos no se reducen más allá de este punto.

Situación Caso Radio 20 Etapa 1								
UZ	Zonas Asignadas	Zona de la UZ	Costo Operativo (\$)	Paquete M	Paquete G	Volumen (m3)	Camionetas (8m3)	Costo Camionetas (\$)
UZ2	Pocitos	Pocitos	565	166	41	58.6	7	3,045
	PuntaGorda							
	LaBlanqueada							
	Malvin							
UZ6	Cordon	Ciudad Vieja	1,029	128	32	45.6	6	2610
	Ciudad Vieja							
UZ11	Reducto	Reducto	742	89	22	31.4	4	1740
	Aguada							
UZ13	Sayago	Belvedere	1,051	126	31	44.3	6	2,610
	Belvedere							
	Cerro							
UZ15	Union	Maroñas	1,342	95	24	34.2	4	1,740
	Maroñas							
	Cerrito							
UZ16	Pando	Pando	326	19	5	6.8	1	435
UZ17	Lagomar	Lagomar	857	77	20	27.6	3	1305
	Barros Blancos							
UZ19	Salinas	Salinas	1,018	34	9	12.7	2	870
	Atlántida							
UZ20	Colon	Las Piedras	984	59	15	21.3	3	1305
	Las Piedras							
UZ21	Toledo	Toledo	1,155	8	2	2.9	1	435
UZ23	San Luis	San Luis	903	11	3	4.2	1	435
UZ24	Ciudad Del Plata	Ciudad Del Plata	2,549	12	3	4.3	1	435
			<b>12,521</b>				<b>16,965</b>	

Tabla 7: Resumen de resultados para el aumento del radio de cobertura a 20 km

Finalmente, para un radio de cobertura de 25 km, los resultados son idénticos a los obtenidos para 20 km. La tabla de resultados se encuentra disponible en el anexo Tabla A2.



*Ilustración 17: Comparación del costo operativo respecto del radio de cobertura*

En función de los resultados obtenidos en los distintos escenarios, se comentan las siguientes consideraciones.

En primer lugar, se observa que, al aumentar el radio de cobertura, disminuyen los costos operativos, ya que se necesita una menor cantidad de UZ para cubrir la demanda. Esto permite aprovechar mejor la capacidad de las UZ abiertas, reduciendo costos fijos al prescindir de aquellas que pueden ser cerradas. Sin embargo, a partir de 15 km, la cantidad de UZ activas se mantiene constante, por lo que los costos operativos dejan de reducirse. Es decir, más allá de este punto, ampliar el radio no genera ahorros adicionales en costos fijos.

Debido a este comportamiento, se puede afirmar que el radio de cobertura deja de ser un factor clave para valores superiores a 15 km, y comienzan a influir otras restricciones, como la capacidad de reparto y la eficiencia en la asignación de zonas.

Debido a este comportamiento, se puede afirmar que el radio de cobertura deja de ser un factor clave para valores superiores a 15 km, y comienzan a influir otras restricciones, como la capacidad de reparto y la eficiencia en la asignación de zonas.

Si bien el análisis muestra que un radio de 15 km minimiza los costos operativos, no es necesariamente la opción más eficiente en términos logísticos y de servicio. Algunas razones son que, al aumentar los radios de cobertura, disminuyen las UZ operativas, lo que significa que cada una debe manejar una carga de trabajo mayor. Esto puede generar problemas de capacidad y eficiencia, especialmente en períodos de alta demanda. Además, al cubrir áreas más grandes, se requiere un mayor uso de vehículos en lugar de métodos de entrega más

económicos, como bicicletas o entregas a pie. Esto puede contrarrestar el ahorro en costos fijos, aumentando los costos de transporte de la última milla.

Por último, se observa una tendencia de concentración en las UZ céntricas, que absorben más zonas de distribución, mientras que las UZ en áreas periféricas mantienen su configuración. Esto se debe al tamaño de las zonas de distribución en Canelones y la periferia de Montevideo, donde la dispersión geográfica reduce el impacto del radio de cobertura en la reasignación de zonas.

La operativa del Correo Uruguayo tiene una estructura basada en la distribución eficiente de última milla, con rutas optimizadas y tiempos de entrega establecidos. Cambiar significativamente el radio de cobertura podría alterar estas dinámicas y generar inconvenientes en la ejecución diaria.

#### 6.4.2. Aumento de demanda

Uno de los aspectos fundamentales en cualquier sistema logístico es su capacidad para adaptarse a fluctuaciones en la demanda. En el contexto del modelo propuesto, es clave analizar qué ocurre cuando el volumen de correspondencia y paquetería se incrementa, ya que esto puede generar una mayor carga sobre la red de distribución y requerir ajustes en la operativa.

Este análisis busca determinar si el sistema actual tiene la flexibilidad suficiente para absorber aumentos en la demanda sin necesidad de cambios estructurales, o si, por el contrario, es necesario reconfigurar la red de Unidades Zonales (UZ) y los recursos logísticos. Para ello, se evaluaron distintos escenarios en los que la demanda aumenta progresivamente y se analizó su impacto en los costos operativos, el uso de la flota de transporte y la capacidad de distribución de las UZ.

En Tabla 8, se presentan los costos asociados a cada escenario de aumento de demanda, mientras que la Ilustración 18 muestra la relación entre el incremento en la demanda y los costos de transporte. A continuación, se detallan los resultados obtenidos y su impacto en la operativa del sistema.

Situaciones Caso Aumento Demanda - Etapa 1							
UZ	Zonas Asignadas	Zona de la UZ	Costo Operativo (\$)	Costo Camionetas (\$) (Caso Base)	Costo Camionetas (\$) (10%)	Costo Camionetas (\$) (20%)	Costo Camionetas (\$) (30%)
UZ1	Sayago	Sayago	2,006	870	870	1305	1305
	Colon						
UZ2	Pocitos	Pocitos	565	3045	3480	3915	3915
	Cordon						
	La Blanqueada						
UZ6	Aguada	Ciudad Vieja	1,029	3045	3045	3480	3480
	Ciudad Vieja						
UZ9	Punta Gorda	Malvin	2,918	870	1305	1305	1305
	Malvin						
UZ11	Reducto	Reducto	742	1305	1305	1305	1305
	Cerrito						
UZ13	Cerro	Belvedere	1,051	1740	2175	2175	2610
	Belvedere						
UZ15	Union	Maroñas	1,342	1305	1305	1305	1740
	Maroñas						
UZ16	Pando	Pando	326	435	435	435	435
UZ17	Lagomar	Lagomar	857	870	1305	1305	1305
UZ18	Barros Blancos	Barros Blancos	2,022	435	435	435	870
UZ19	Salinas	Salinas	1,018	435	435	435	435
UZ20	Las Piedras	Las Piedras	984	870	870	870	870
UZ21	Toledo	Toledo	1,155	435	435	435	435
UZ22	Atlántida	Atlántida	2,884	435	435	435	435
UZ23	San Luis	San Luis	903	435	435	435	435
UZ24	Ciudad Del Plata	Ciudad Del Plata	2,549	435	435	435	435
			<b>22,351</b>	<b>16,965</b>	<b>18,705</b>	<b>20,010</b>	<b>21,315</b>

Tabla 8: Resumen de los costos asociados para cada escenario de aumento de demanda

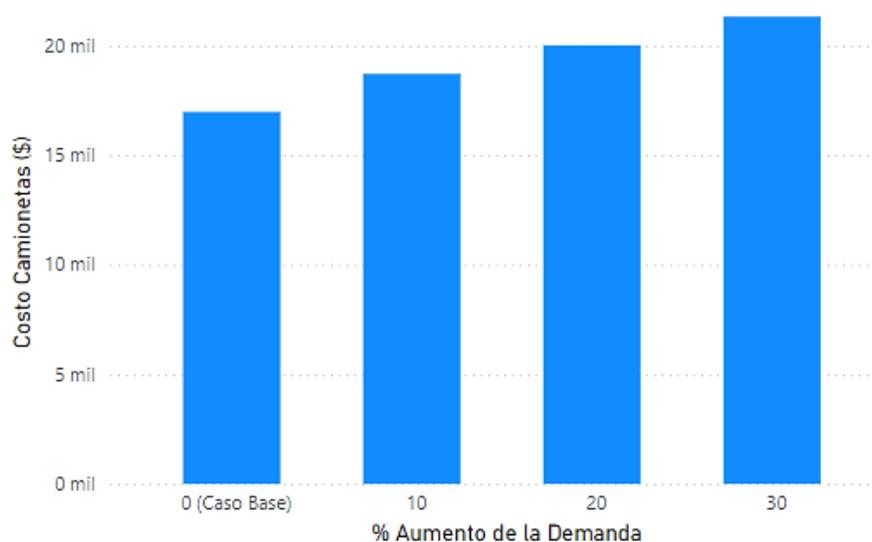


Ilustración 18: Comparación del aumento en el costo de transporte respecto al aumento de demanda. Elaboración propia.

En primer lugar, se observa que el modelo mantiene la misma selección de Unidades Zonales (UZ) y la misma asignación de zonas de distribución que en el caso base. Esto significa que, a pesar del aumento de la demanda, la estructura de distribución permanece sin cambios, lo que indica que el sistema tiene margen suficiente para absorber incrementos sin necesidad de reconfiguración.

Dado que las UZ activas siguen siendo las mismas, los costos operativos fijos no se ven afectados. La única variable que cambia en comparación con el escenario inicial es la cantidad de camionetas necesarias para la distribución. A medida que la demanda aumenta,

se requiere un mayor número de vehículos, lo que incrementa los costos de transporte. Sin embargo, este aumento no es significativo en relación con el costo total del sistema.

Por otro lado, el hecho de que las UZ seleccionadas no cambien su distribución sugiere que existe capacidad ociosa en estas unidades, lo que refuerza lo planteado inicialmente por la contraparte. Esta capacidad no se limita únicamente al espacio físico disponible para almacenamiento, sino que también se debe a la disponibilidad de carteros. Los resultados sugieren que, con la dotación actual de personal, es posible absorber aumentos de demanda sin necesidad de ajustes en la estructura operativa.

En conclusión, el análisis indica que un incremento en la demanda no representa un desafío significativo para la operativa del sistema, ya que los recursos actuales permiten mantener la distribución sin cambios sustanciales.

## 7. Etapa II: Modelado de la distribución

En esta sección se presenta el modelo propuesto para la Etapa 2, incluyendo su formulación matemática. Luego, se detalla cómo se ajustaron los datos relevados y los supuestos considerados. Junto con esto, se presenta un análisis de los resultados obtenidos para el caso base. Finalmente, se incluyen los escenarios de sensibilidad con sus resultados para evaluar cómo se comporta el modelo ajustando ciertos parámetros.

### 7.1. Modelo Matemático

El siguiente modelo del equipo de trabajo busca minimizar los costos de la distribución de los productos desde la PLP hacia las diferentes unidades zonales. Es importante destacar que las unidades zonales utilizadas en esta etapa son las que seleccionó el modelo de la etapa 1.

Este problema de optimización, al igual que el anterior, se formula como un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MILP). El modelo busca determinar las rutas óptimas y la utilización de vehículos, minimizando los costos totales.

#### 7.1.1. Conjuntos

- $P$ : conjunto de productos a distribuir.
- $M$ : unidades zonales seleccionadas en la etapa 1.
- $T$ : medios de transporte utilizados para la distribución.

#### 7.1.2. Parámetros

- $C_t$ : costo por kilómetro recorrido por el medio de transporte  $t \in T$ , medido en pesos uruguayos por kilómetro.
- $q_t$ : capacidad de cada medio de transporte  $t \in T$ , en  $m^3$ .
- $w_{jk}$ : cantidad de producto  $k \in P$  enviado a la unidad zonal  $j \in M$ , en unidades.
- $d_{ij}$ : distancia entre las unidades zonales y la PLP con  $i, j \in M$ , en kilómetros.
- $f_k$ : factores de conversión utilizados para convertir las cantidades de producto  $k \in P$  a  $m^3$ , en  $m^3$  por unidad.
- $\beta$ : constante entera, equivalente a la cantidad de elementos en el conjunto  $P$  más 1.
- $\gamma$ : constante entera grande del orden de  $10^{12}$ .

#### 7.1.3. Variables de decisión

- $x_{jit}$ : variable binaria que vale 1 si el medio de transporte  $t \in T$  se utiliza para ir desde la UZ  $j \in M$  hacia  $i \in M$ , y 0 en caso contrario.
- $z_{itk}$ : fracción de volumen de producto  $k \in P$  transportado a la UZ  $i \in M$  por el medio de transporte  $t \in T$ .
- $y_{ti}$ : variable binaria que vale 1 si el vehículo  $t \in T$  se utiliza para ir a la UZ  $i \in M$ , y 0 si no.

#### 7.1.4. Formulación del modelo etapa II

$$\min \sum_i \sum_j \sum_t c_t x_{ijt} d_{ij} \quad (8)$$

s.a.

$$\sum_i x_{ipt} = \sum_j x_{pjt}, \forall t \in T, p \in M \quad (9)$$

$$\sum_{i,j \neq PLP} x_{PLPjt} \geq \sum_{i,i \neq PLP} \sum_{j,j \neq PLP} x_{ijt}, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{j,j \neq PLP} x_{PLPjt} \leq 1, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_t z_{itk} = 1, \forall i \in M, i \neq PLP, k \in P \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_k w_{ik} f_k z_{itk} \leq q_t, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_k z_{itk} \leq \sum_i \beta x_{ijt}, \forall j \in M, t \in T \quad (14)$$

$$x_{iit} \leq 0, \forall i \in M, t \in T \quad (15)$$

$$\sum_j x_{ijt} = y_{ti}, \forall i \in M, t \in T \quad (16)$$

$$\sum_i x_{ijt} = y_{tj}, \forall j \in M, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_i x_{ijt} \leq \sum_k \gamma z_{jtk}, \forall t \in T, j \in M, j \neq CLM \quad (18)$$

$$z_{it} \geq 0, \forall i \in M, t \in T \quad (19)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \in M \quad (20)$$

La función objetivo (8) busca minimizar los costos del abastecimiento de las unidades zonales, que está determinado por la distancia recorrida por cada medio de transporte y el costo asociado a su operación.

La restricción (9) corresponde al balance de flujos y asegura que los medios de transporte que llegan a una unidad zonal también deben salir de la mismas.

La siguiente restricción (10) garantiza que los medios de transporte que se utilizan tengan como punto de partida la PLP y la restricción (11) limita a los medios de transporte utilizados a salir una única vez de la PLP.

Luego, la restricción (12) asegura la asignación completa de los productos, o sea, todo el volumen de cada producto  $k$  debe asignarse a una unidad zonal.

Por su parte, la restricción (13) corresponde a la capacidad de transporte. La suma del volumen transportado por el medio de transporte utilizado no puede superar su capacidad.

Para vincular la activación de rutas con la asignación de productos se utiliza la restricción (14), asegurando que solo se permite transportar volúmenes si la ruta entre esos puntos está activa.

La restricción (15) evita la acumulación en un nodo.

En cuanto a las restricciones (16) y (17), garantizan la trazabilidad de las rutas activadas y los medios de transporte asignados. La primera de estas asegura que, si un medio de transporte está presente en una UZ, debe haber al menos una ruta saliente activa desde esa unidad. La segunda, que si un medio de transporte llega a una UZ debe haber al menos una ruta entrante hacia esa unidad.

La restricción (18) impone que si no hay volumen de productos transportados ( $z_{jtk} = 0$ ), entonces tampoco pueden asignarse medios de transporte  $x_{jit}$ . Es decir, evita la asignación de transporte innecesaria y garantiza coherencia entre el uso de vehículos y el volumen transportado.

Por último, (19) y (20) definen los dominios de las variables.

## 7.2. Procesamiento de datos

El procesamiento de datos para este modelo, como para la etapa 1, buscó transformar la información recolectada en parámetros de entrada para el modelo. En este caso, se consideraron aspectos relacionados con los costos de transporte, capacidades de carga, volúmenes de productos enviados, distancias entre puntos clave y factores de conversión.

El costo por kilómetro recorrido, para cada medio de transporte, se determinó a partir de los valores promedio de consumo de combustible por kilómetro de cada vehículo disponible, multiplicado por el precio unitario del combustible utilizado para este caso de estudio publicados en [20] al 20 de junio de 2024. Los consumos específicos de cada vehículo se obtuvieron a partir de la información proporcionada por los responsables del CLM y de las fichas técnicas de los modelos de vehículos utilizados.

La capacidad de cada medio de transporte se calculó en volumen según las especificaciones técnicas de los vehículos. Esta información incluía la marca, modelo y capacidad máxima de carga en volumen de cada unidad, que se encontraba detallada en la base de datos proporcionada por el CLM.

En cuanto al volumen de productos enviados a cada unidad zonal, el mismo se estimó utilizando el percentil 95 de las series históricas de volúmenes mensuales del 2023, divididas por tipo de producto y considerando el total de los envíos que cubriría la zona en cuestión.

Las distancias entre las UZ y la PLP fueron calculadas mediante Google Maps, considerando las rutas más eficientes sugeridas por el algoritmo. Esto incluyó tanto las distancias entre las UZ, como las distancias entre estas y la PLP, lo que fue esencial para determinar los costos de transporte asociados.

Para convertir las cantidades de producto a volumen, se emplearon factores de conversión específicos. Estos valores, expresados en unidad de producto, se calcularon considerando los datos de dimensiones promedio proporcionados por el CLM de cada tipo de paquete por categoría y las observaciones realizadas durante la visita a sus instalaciones. En este sentido, se diferenciaron los factores de conversión para cartas, paquetes pequeños, medianos y grandes, asegurando la fidelidad en la representación de la carga.

Finalmente, se incluyó una constante entera para garantizar que la asignación de productos solo ocurra en rutas activas. Esto permite vincular correctamente las variables del modelo y evitar inconsistencias en la distribución, asegurando flexibilidad sin comprometer la factibilidad.

De esta forma, el procesamiento de datos permitió estructurar los parámetros clave necesarios para optimizar las operaciones de distribución, respetando las restricciones físicas y económicas del sistema.

### 7.3. Análisis de resultados

En esta sección, se presentan los resultados que brinda el modelo matemático desarrollado en la Etapa II.

El modelo matemático se categoriza como un problema de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés). La ejecución se llevó a cabo en AMPL (versión 20240308) utilizando el solucionador Gurobi (versión 11.0.3). Para la resolución del caso base y los análisis de sensibilidad, se empleó un sistema operativo Microsoft Windows 11 (versión 22631.2), con 16 GB de memoria RAM y un procesador Intel Core i7-1065G7 @ 1.30GHz.

Debido a la complejidad del problema se estableció un límite de 6 horas para el tiempo de ejecución, obteniendo una solución con un gap del 11,3 %. El gap indica cuán lejos está la mejor solución encontrada del óptimo teórico. En este caso, Gurobi detuvo la ejecución al alcanzar el límite de tiempo definido, sin considerar el valor del gap. El 11,3 % refleja la diferencia entre la mejor solución obtenida y la cota inferior en ese momento. A continuación, se presentan los resultados para tiempos de ejecución mayores, que respaldan esta decisión.

Tiempo de ejecución (h)	Gap (%)	Costo traslado PLP/UZ (\$)
6	11,3	17.470
10	10,9	17.470
14	10,4	17.470
18	10,1	17.470

*Tabla 9: Comparación de tiempos de ejecución, gap y costos de traslado*

En primera instancia, se destaca que la solución del modelo matemático brindó las cantidades a distribuir de cada producto para cada camión, además del recorrido de este. El problema de ruteo se resolvió satisfactoriamente, ya que, a partir de la solución obtenida, se puede saber qué transportará cada camión y cómo será su recorrido diariamente.

Por otra parte, el costo diario incurrido en la distribución de todos los productos en Montevideo y su Área metropolitana es de \$17.470 pesos uruguayos. Esto corresponde al costo total de los traslados realizados por los medios de transporte.

La programación de la distribución mencionada es la siguiente. Para cada camión, se posee la información de qué Unidad Zonal visita y en qué orden. Esto se aprecia de forma horizontal, es decir por columna. Por ejemplo, en los casos que el valor en la matriz es un 2, significa que es la segunda parada que hace el camión.

	PLP	UZ1	UZ2	UZ6	UZ9	UZ11	UZ13	UZ15	UZ16	UZ17	UZ18	UZ19	UZ20	UZ21	UZ22	UZ23	UZ24
C1								1									
C2																	
C3																	
C4																	
C5																	
C6																	
C7			1														
C8							1										
C9						1											
C10		1															
C11		1															
C12			1														
C13										1							
C14						1											
C15													1				2
C16													1				
C17			1														
C18								1	2								
C19			1														
C20			2	1													
C21											1						
C22															1		
C23											1						
C24										1		2					
C25					1												
C26					1			2									
C27												2				1	
C28									1								
C29										1							
C30					1												
C31															1		
C32								1									
C33			1														
C34				2		1											
C35							1										
C36							1										
C37																	
C38				1													

Tabla 10: Resumen de la asignación de camiones a las UZ

ID Vehículo	Tarifa \$ / km	Capacidad (m3)	Relación Capacidad / Tarifa	Cantidad	Capacidad Total por Modelo (m3)
C1	10	14,5	1,44	1	14,5
C2-C6	9	7,5	0,88	5	37,5
C7-C12	9	11,5	1,24	6	69,0
C13-C20	9	10,8	1,16	8	86,4
C21-C30	9	8	0,94	10	80,0
C31-C32	6	4	0,64	2	8,0
C33-C36	9	15	1,61	4	60,0
C37	9	5,2	0,56	1	5,2
C38	19	41	2,12	1	41,0

Tabla 11: Resumen de información de los vehículos

Unidad Zonal	Camión	Producto	Porcentaje de Entrega
UZ1	C10	Carta	100%
UZ1	C10	PaqueteCH	100%
UZ1	C10	PaqueteM	100%
UZ1	C10	PaqueteG	26%
UZ1	C11	PaqueteG	74%
UZ2	C7	PaqueteCH	100%
UZ2	C7	PaqueteM	100%
UZ2	C7	PaqueteG	8%
UZ2	C12	Carta	100%
UZ2	C12	PaqueteG	5%
UZ2	C17	PaqueteG	22%
UZ2	C19	PaqueteG	22%
UZ2	C20	PaqueteG	14%
UZ2	C33	PaqueteG	30%
UZ6	C20	PaqueteG	9%
UZ6	C34	Carta	100%
UZ6	C34	PaqueteCH	100%
UZ6	C34	PaqueteM	100%
UZ6	C38	PaqueteG	91%
UZ9	C25	Carta	100%
UZ9	C25	PaqueteM	100%
UZ9	C25	PaqueteG	9%
UZ9	C26	PaqueteCH	100%
UZ9	C26	PaqueteG	42%
UZ9	C30	PaqueteG	49%
UZ11	C9	PaqueteCH	100%
UZ11	C9	PaqueteM	100%
UZ11	C9	PaqueteG	50%
UZ11	C14	Carta	100%
UZ11	C14	PaqueteG	37%
UZ11	C34	PaqueteG	13%
UZ13	C8	PaqueteG	37%
UZ13	C35	PaqueteCH	100%
UZ13	C35	PaqueteG	46%
UZ13	C36	Carta	100%
UZ13	C36	PaqueteM	100%
UZ13	C36	PaqueteG	17%
UZ15	C1	Carta	100%
UZ15	C1	PaqueteCH	100%
UZ15	C1	PaqueteG	37%
UZ15	C18	PaqueteM	100%
UZ15	C18	PaqueteG	38%
UZ15	C26	PaqueteG	5%
UZ15	C32	PaqueteG	20%

Unidad Zonal	Camión	Producto	Porcentaje de Entrega
UZ16	C18	PaqueteCH	100%
UZ16	C18	PaqueteM	38%
UZ16	C28	Carta	100%
UZ16	C28	PaqueteM	62%
UZ16	C28	PaqueteG	100%
UZ17	C13	Carta	100%
UZ17	C13	PaqueteCH	100%
UZ17	C13	PaqueteM	100%
UZ17	C13	PaqueteG	24%
UZ17	C24	PaqueteG	27%
UZ17	C29	PaqueteG	49%
UZ18	C21	Carta	100%
UZ18	C21	PaqueteCH	100%
UZ18	C21	PaqueteM	100%
UZ18	C21	PaqueteG	62%
UZ18	C23	PaqueteG	38%
UZ19	C24	Carta	100%
UZ19	C24	PaqueteCH	100%
UZ19	C24	PaqueteM	100%
UZ19	C24	PaqueteG	38%
UZ19	C27	PaqueteG	62%
UZ20	C15	Carta	100%
UZ20	C15	PaqueteCH	100%
UZ20	C15	PaqueteM	100%
UZ20	C15	PaqueteG	4%
UZ20	C16	PaqueteG	96%
UZ21	C31	Carta	100%
UZ21	C31	PaqueteCH	100%
UZ21	C31	PaqueteM	100%
UZ21	C31	PaqueteG	100%
UZ22	C22	Carta	100%
UZ22	C22	PaqueteCH	100%
UZ22	C22	PaqueteM	100%
UZ22	C22	PaqueteG	100%
UZ23	C27	Carta	100%
UZ23	C27	PaqueteCH	100%
UZ23	C27	PaqueteM	100%
UZ23	C27	PaqueteG	100%
UZ24	C15	Carta	100%
UZ24	C15	PaqueteCH	100%
UZ24	C15	PaqueteM	100%
UZ24	C15	PaqueteG	100%

Tabla 12: Resumen de la utilización de los camiones para el abastecimiento de cada UZ

A raíz de esta información se percibe que se utilizan 32 de los 38 camiones disponibles y los restantes 6 quedan sin usar. Si se considera la información sobre el costo de cada camión, esta decisión resulta lógica, ya que se utilizan los vehículos con la mejor relación costo/capacidad, descartando los camiones C2 a C6 y el C37, que, según se observa en la Tabla 11, son los grupos con los valores más bajos en comparación con los demás grupos de camiones. Demostrando un buen uso de los camiones, priorizando aquellos grupos con una mayor relación costo/capacidad y, de forma directa, reduciendo los costos.

Una observación interesante es que en todas las unidades zonales encontramos que la entrega de cartas, paquetes chicos y paquetes medianos se realizan de forma individual. Es decir, todas las cartas las entregará un camión, todos los paquetes chicos los entregará otro camión y lo mismo sucede con los paquetes medianos (exceptuando la UZ16). Sin embargo,

para los paquetes grandes, en el 95% de los casos la entrega la realizan varios camiones, que se pueden identificar como varias tandas. Resulta intuitivo que las entregas se den de esta forma debido al volumen que representa cada tipo de producto, siendo más fácil cargar las camionetas.

Por otra parte, se puede afirmar que no existe ningún vehículo que visite más de 2 unidades zonales en el mismo día, por lo que cada camión usado tiene una o dos paradas. Este punto es interesante si se piensa en el hipotético caso de rotura de un camión, exceso de tráfico o accidentes en el recorrido, ya que el vehículo en cuestión no se sobrecarga de paradas y es viable pensar en una alternativa que solucione el problema de forma ágil.

Otro aspecto destacable es que la mayoría de las UZ periféricas son abastecidas por un solo camión, mientras que las zonas más céntricas cuentan con varios. Esto se debe a la minimización de costos, específicamente los kilómetros recorridos, siendo más rentable realizar un único viaje con un solo camión que cubra toda la demanda, en lugar de dividir los productos en varios viajes.

A modo ilustrativo y para profundizar en el análisis, se considerará exclusivamente la distribución asociada a la Unidad Zonal 11.

En este caso, se contempla que para abastecer los productos de esta Unidad Zonal son necesarios 3 camiones. En el camión 9 se distribuye el 100% de los paquetes chicos, el 100% de los paquetes medianos y el 50% de los paquetes grandes. Por su parte, en el camión 14 se traslada el 100% de las cartas y el 37% de los paquetes grandes. Por último, en el camión 34, se reparte el 13% restante de los paquetes grandes.

Cabe mencionar que, para uno de estos camiones, la Unidad Zonal 11 es un punto más de su recorrido. Es decir, el vehículo traslada los productos mencionados junto a otros productos con destino final otras UZ.

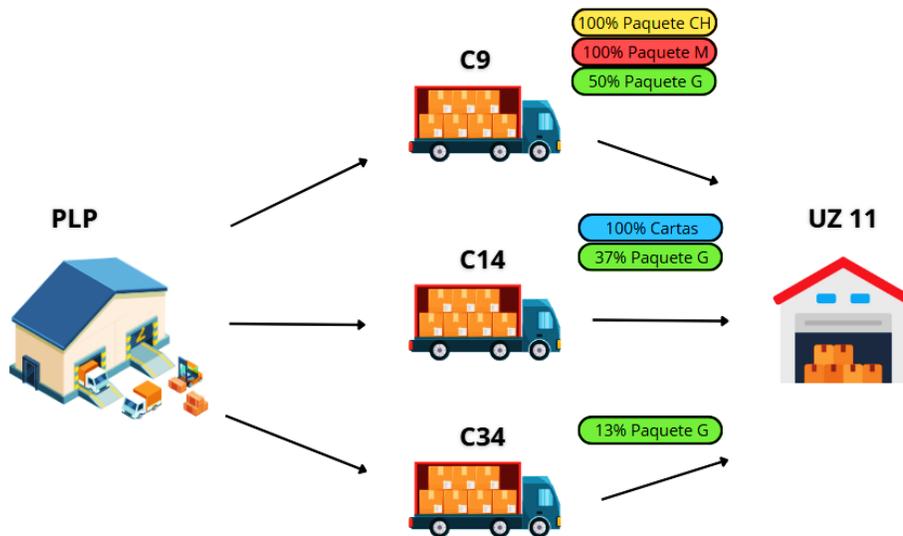


Ilustración 19: Diagrama del abastecimiento de la UZ11. Elaboración propia.

Para destacar lo explicado previamente, en esta oportunidad se analizará el recorrido del camión 34. El foco en este caso se centrará en el camión y su recorrido por las diferentes unidades zonales.

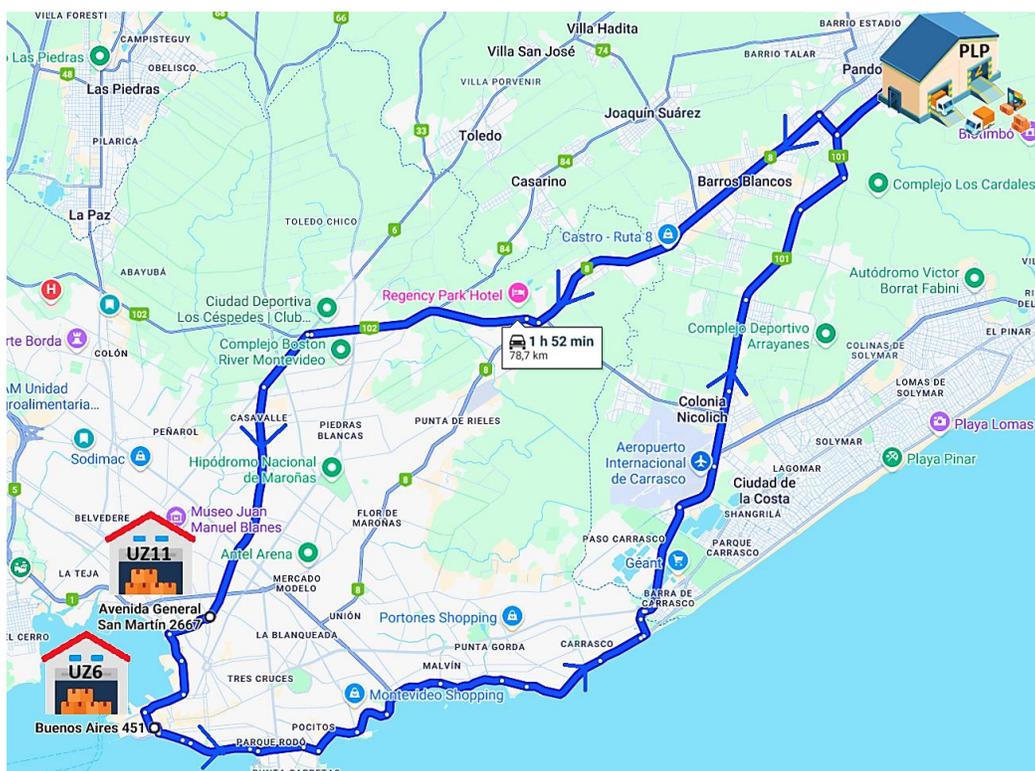


Ilustración 20: Recorrido realizado por el camión 34. Imagen editada en [23].

En este contexto el camión 34 sale de la PLP y su primera parada es la UZ11, donde se encarga de entregar el 13% de los paquetes grandes de la unidad. Luego sigue hacia la UZ6

descargando el 100% de las cartas, paquetes chicos y medianos, para finalmente regresar a la PLP. Los camiones 20 y 38 son los encargados de la logística de los restantes paquetes grandes de esta última unidad zonal mencionada.

## 7.4. Análisis de sensibilidad

En este análisis, se evalúa el comportamiento del modelo matemático ante modificaciones de dos factores clave de la operación logística: la capacidad de la flota vehicular y la demanda de envíos. Ambos análisis permitirán determinar si el sistema actual tiene la flexibilidad suficiente para adaptarse a cambios operativos y de volumen de envíos, o si es necesario realizar ajustes estructurales en la red de distribución y transporte.

### 7.4.1. Modificación de la flota vehicular

Por un lado, la modificación de la flota busca optimizar la relación entre la capacidad de carga y la tarifa por kilómetro recorrido, permitiendo analizar si una mayor homogeneidad en los vehículos genera ahorros operativos. Para ello, se plantean dos escenarios con distintas capacidades de carga para los vehículos.

#### 7.4.1.1. Flota con capacidad uniforme de 11,5 m<sup>3</sup>

En el primer escenario, se decidió estandarizar una parte de la flota, utilizando únicamente vehículos con una tarifa de 9 pesos uruguayos por kilómetro y asignándoles una capacidad uniforme de 11,5 m<sup>3</sup>. Esto se logró reemplazando los vehículos C2-C30 y C33-C37 por el modelo Peugeot New Boxer L2H2, manteniendo la capacidad del resto de la flota sin cambios.

El objetivo de esta modificación mejorar la eficiencia del transporte sin alterar el costo por kilómetro (9 \$/km), permitiendo una mayor capacidad de carga en aquellos vehículos cuya tarifa se mantuvo constante

ID Camiones	Tarifa \$ / km	Capacidad (m3)	Relación Capacidad / Tarifa	Cantidad	Capacidad Total por Modelo (m3)
C1	10	14,5	1,44	1	14,5
C2-C30	9	11,5	1,24	29	333,5
C31-C32	6	4	0,64	2	8,0
C33-C37	9	11,5	1,24	5	57,5
C38	19	41	2,12	1	41,0

Tabla 13: Resumen de la flota de vehículos con la modificación planteada

Los resultados obtenidos indican que esta modificación permitió lograr una reducción en el costo de transporte, alcanzando un total de \$16.963 pesos uruguayos, lo que representó un 3% ahorro respecto al caso base.

	PLP	UZ1	UZ2	UZ6	UZ9	UZ11	UZ13	UZ15	UZ16	UZ17	UZ18	UZ19	UZ20	UZ21	UZ22	UZ23	UZ24
C1						1					1						
C2											1						
C3										1					2		
C4																	
C5																	
C6					1												
C7																	
C8			1														
C9								1	2								
C10				2				1									
C11			1														
C12				1													
C13																	
C14								1		2							
C15									1								
C16				1													
C17																	
C18		1						2									
C19																	
C20												1				2	
C21			1														
C22			1														
C23																	
C24				1													
C25										1							
C26		1															
C27																1	
C28				1													
C29													1				
C30						1											
C31																	
C32															1		
C33													1				2
C34								2	1								
C35					1												
C36			2					1									
C37			1														
C38							1										

Tabla 14: Resumen de la asignación de camiones a las UZ para este escenario

En términos operativos, se observó que con esta configuración se necesitaron 31 de los 38 vehículos disponibles para realizar la distribución, lo que sugiere que algunos camiones quedaron sin utilizar. Además, al igual que en el escenario base, los vehículos no visitaron más de dos unidades zonales por recorrido, lo que demuestra que la estrategia de asignación de rutas se mantuvo sin alteraciones significativas.

#### 7.4.1.2. Flota con capacidad uniforme de 15 m<sup>3</sup>

En el segundo caso, se realizó una sustitución similar a la del primer escenario, pero empleando vehículos con una capacidad de 15 m<sup>3</sup>. Para ello, se reemplazaron todos los vehículos con una tarifa de 9 \$/km por el modelo Peugeot Boxer FT L4H2. Esto implicó modificar las capacidades de los vehículos identificados como C2-C30 y C33-C37, aumentando de manera significativa la capacidad global de la flota. Además, este cambio permitió mejorar la relación capacidad/tarifa, particularmente en aquellos casos donde la capacidad original era inferior a la del modelo propuesto.

ID Camiones	Tarifa \$ / km	Capacidad (m3)	Relación Capacidad / Tarifa	Cantidad	Capacidad Total por Modelo (m3)
C1	10	14,5	1,44	1	14,5
C2-C30	9	15	1,61	29	435,0
C31-C32	6	4	0,64	2	8,0
C33-C37	9	15	1,61	5	75,0
C38	19	41	2,12	1	41,0

Tabla 15: Resumen de la flota de vehículos con la modificación planteada

	PLP	UZ1	UZ2	UZ6	UZ9	UZ11	UZ13	UZ15	UZ16	UZ17	UZ18	UZ19	UZ20	UZ21	UZ22	UZ23	UZ24
C1																	
C2			1														
C3																	
C4																	
C5													1				2
C6																	
C7				2		1											
C8																	
C9				1													
C10			1														
C11				1													
C12										1							
C13															2	1	
C14			1														
C15						1											
C16								2	1								
C17																	
C18																	
C19				1													
C20													1	2			
C21																	
C22										1							
C23																	
C24			2		1												
C25										2		1					
C26																	
C27		2					1										
C28																	
C29					1												
C30									1								
C31																	
C32																	
C33																	
C34								2	1								
C35			1														
C36		1															
C37																	
C38						2	1										

Tabla 16: Resumen de la asignación de camiones a las UZ para este escenario

Los resultados obtenidos en este caso fueron aún más favorables. El costo total de transporte se redujo a \$13.734 pesos uruguayos, lo que representó un ahorro del 21,4% respecto a la configuración original. Además, con esta modificación en la flota, se logró optimizar el uso de los recursos disponibles, ya que solo fue necesario emplear 23 de los 38 vehículos, dejando 15 camiones sin uso.

El objetivo de este análisis fue evaluar el impacto de modificar la capacidad de los vehículos y observar el comportamiento del modelo ante estos cambios. Los resultados confirman que

una flota con una mejor relación capacidad/tarifa permite reducir los costos operativos, mientras que una flota con menor eficiencia en esta relación genera un costo de distribución más elevado. A medida que se incrementó la capacidad de los vehículos y se optimizó la relación capacidad/tarifa, los costos de transporte fueron disminuyendo progresivamente.

Además, se evidencia que el modelo tiene la capacidad de ponderar correctamente entre la capacidad de carga y la tarifa por kilómetro recorrido, ajustando su selección de vehículos según las condiciones del escenario. Dependiendo del tipo de producto a distribuir, la ruta y el destino final de los envíos, el modelo elige la opción más conveniente para minimizar los costos y garantizar una distribución eficiente.

#### 7.4.2. Aumento de demanda

El aumento de la demanda es una condición cada vez más relevante en la operación logística, especialmente en el contexto del crecimiento sostenido del comercio electrónico y su impacto en la red de distribución del Correo Uruguayo. A medida que más consumidores optan por realizar compras en línea, la cantidad de envíos gestionados diariamente aumenta considerablemente, lo que representa un desafío para la capacidad operativa del sistema.

Con el objetivo de evaluar la capacidad del modelo para absorber este crecimiento sin comprometer su eficiencia, se analizaron distintos escenarios de incremento en la cantidad de envíos. Entre ellos, se incluyó un caso extremo, basado en el impacto de plataformas como TEMU, cuyo crecimiento exponencial en el mercado ha generado una carga adicional en la distribución.

##### 7.4.2.1. Caso TEMU

Uno de los fenómenos más relevantes en el comercio electrónico actual es la rápida expansión de TEMU, una plataforma que ha impulsado significativamente el volumen de compras en línea. Este crecimiento tiene un impacto directo en la operativa del Correo Uruguayo, ya que la empresa es responsable de la distribución de los paquetes dentro del territorio nacional [24].

Para representar este fenómeno en el análisis, se consideró un aumento del 200% en la cantidad de paquetes medianos, tomando como referencia el percentil 95 de los valores históricos de 2023, que corresponde a 824 paquetes diarios. Aplicando este incremento, la cantidad estimada de paquetes medianos a distribuir se elevó a 1.667 unidades diarias, mientras que el volumen del resto de los productos se mantuvo sin cambios.

Este análisis permite evaluar si el sistema puede absorber este incremento sin requerir modificaciones estructurales o si, por el contrario, es necesario ajustar la capacidad operativa para garantizar la continuidad y eficiencia del servicio.

A continuación, se presentan los resultados de este análisis.

	PLP	UZ1	UZ2	UZ6	UZ9	UZ11	UZ13	UZ15	UZ16	UZ17	UZ18	UZ19	UZ20	UZ21	UZ22	UZ23	UZ24
C1						1											
C2									1								
C3																	1
C4								1			1						
C5								1	2								
C6					1												
C7						1											
C8				1													
C9			2					1									
C10			1														
C11							1										
C12					2					1							
C13			1														
C14			1														
C15						1		2									
C16							1										
C17			1														
C18		1													2		
C19								1	2								
C20													2	1			
C21										1							
C22												1					
C23										1							
C24																1	
C25													1				
C26														1			2
C27										1							
C28											1						
C29					1												
C30								1	2								
C31																	
C32											1						
C33						1	2										
C34		1															
C35			1														
C36			1														
C37																	
C38				1													

Tabla 17: Resumen de la asignación de camiones a las UZ para este escenario

Los resultados obtenidos en este escenario se resumen en la Tabla 17, donde se observa un aumento significativo en la cantidad de vehículos necesarios para la distribución. Para hacer frente al incremento del 200% en los paquetes medianos, el modelo asignó 36 de los 38 vehículos disponibles para los envíos, lo que representa un uso casi total de la flota.

Este comportamiento resulta esperable, ya que el volumen de productos a distribuir se incrementó considerablemente. En consecuencia, también se registró un aumento en los costos de transporte, alcanzando un valor total de \$19.827 pesos uruguayos.

A pesar de este crecimiento en la demanda, el modelo mantuvo la estructura operativa utilizada en el caso base, asegurando que ningún vehículo visitara más de dos unidades zonales en su recorrido. Este resultado indica que, incluso bajo un escenario de alta exigencia, la lógica de asignación y distribución sigue siendo eficiente y operativamente viable.

Por lo tanto, se puede afirmar que el sistema tiene la capacidad de absorber un aumento significativo en la demanda sin comprometer su operativa, permitiendo gestionar el volumen adicional sin necesidad de modificar la estructura de distribución.

#### 7.4.2.2. Aumento del 10% de la demanda

Para complementar el análisis, se evaluó un escenario con un incremento más moderado de 10% en la demanda de todos los productos, lo que equivale a un volumen de unos 390 m<sup>3</sup>. Este estudio permite identificar el nivel de flexibilidad del sistema antes de alcanzar su límite operativo y evaluar si es posible manejar aumentos graduales sin ajustes en la flota.

	PLP	UZ1	UZ2	UZ6	UZ9	UZ11	UZ13	UZ15	UZ16	UZ17	UZ18	UZ19	UZ20	UZ21	UZ22	UZ23	UZ24
C1		1															
C2									1								
C3																	
C4															2	1	
C5													1				
C6															1		
C7				2		1											
C8			1														
C9						1											
C10					1					2							
C11						1											2
C12				1													
C13			1			2											
C14					1												
C15			2		1												
C16			1														
C17								1	2								
C18			1														
C19													1				
C20		1															
C21										1							
C22												1					
C23						1											
C24								2	1								
C25										1							
C26								2	1								
C27											1						
C28										1							
C29			1														
C30								1	2								
C31														1			
C32											1						
C33							1										
C34			1														
C35							1										
C36							1										
C37																	
C38				1													

Tabla 18: Resumen de la asignación de camiones a las UZ para este escenario

Los resultados de este escenario se presentan en la Tabla 18, donde se observa que, al igual que en el caso anterior, se utilizaron casi todos los vehículos disponibles, dejando únicamente dos sin uso. Este comportamiento se debe a que el incremento en la cantidad de envíos generó una mayor demanda de transporte, lo que obligó a maximizar el uso de la flota.

En términos de costos, el valor total del transporte fue de \$19.495 pesos uruguayos, lo cual es consistente al compararlo con el escenario de TEMU, dado que ambos reflejan un aumento en la utilización de los recursos logísticos. Además, se mantuvo la misma lógica operativa, asegurando que cada vehículo visitara un máximo de dos unidades zonales por recorrido, lo que optimiza la distribución y evita recorridos excesivos.

Este análisis también indica que la capacidad de envíos está alcanzando el límite máximo con la flota actual. Al profundizar en el estudio, se determinó que el volumen máximo de envíos que puede ser gestionado con la estructura actual es de 402 m<sup>3</sup>. En caso de que la demanda continúe aumentando, será necesario evaluar opciones como la ampliación de la flota o la optimización de otros procesos para evitar posibles restricciones operativas.

## 8. Comparativa con la situación actual

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos en ambas etapas y se compararán con el escenario de funcionamiento actual de la empresa.

En primera instancia, se presenta la disposición de las UZ a lo largo del territorio y se analiza el antes y el después de la ejecución del modelo. Se puede visualizar en la Ilustración 21, y con mayor detalle en la Ilustración 22, las UZ y las zonas de distribución en el escenario actual.

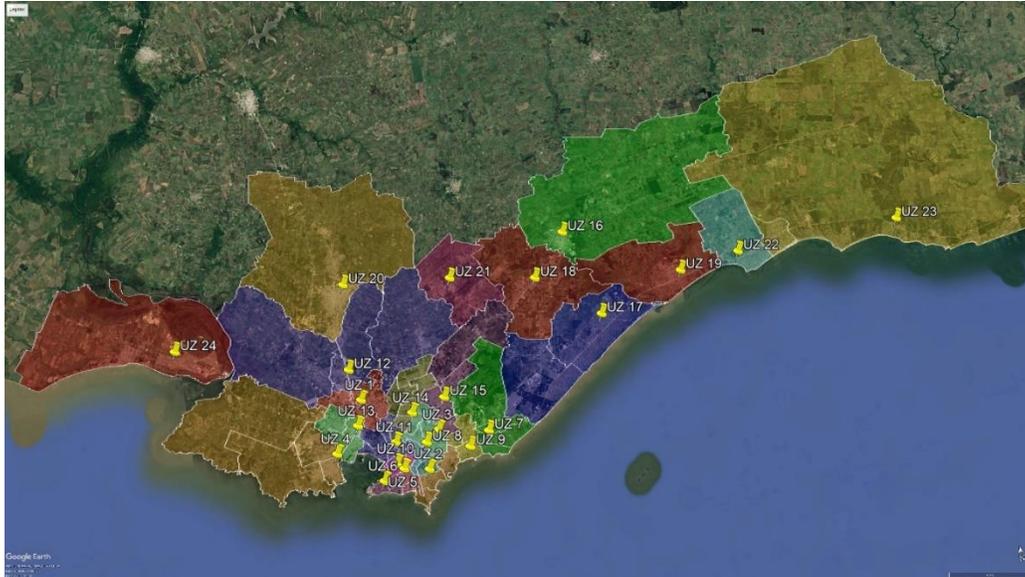


Ilustración 21: Zonas de distribución y unidades zonales de la situación actual. Imagen editada en [2].



Ilustración 22: Mayor detalle de las zonas de distribución y unidades zonales de la situación actual. Imagen editada en [2].

Se puede apreciar en la Ilustración 23 que, debido al aumento del radio de cobertura, el modelo en la etapa 1 agranda considerablemente las zonas de distribución.

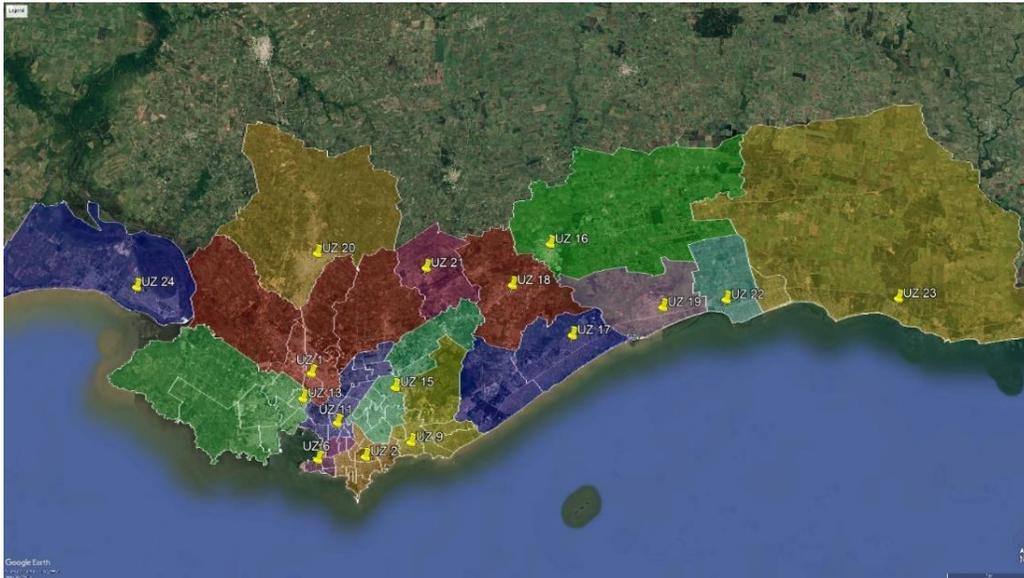


Ilustración 23: Zonas de distribución y unidades zonales de la alternativa planteada. Imagen editada en [2].

Esto permite la apertura de un menor número de UZ, logrando el objetivo planteado de optimizar el uso de la capacidad de reparto de estas. Es necesario mencionar que el uso de camionetas en esta alternativa es clave, ya que permite la integración de cartas y paquetes.

Para lograr un análisis correcto y profundo, se considera necesario detallar los conceptos incurridos en la situación actual y luego en la alternativa planteada por el equipo de trabajo. Para esto es importante integrar la operativa de principio a fin realizando el análisis de la etapa 1 y 2 de forma conjunta, ya que describe la situación completa.

Situación actual	
Concepto	Costo (\$)
Operación UZ	44,158
Operación CLM	90,000
Traslados PLP - UZ	6,700
Traslados PLP - CLM	2,850
Traslados CLM - Zonas de distribución	7,400
	<b>151,108</b>

Tabla 19: Costos de la situación actual en base diaria

Para estimar los costos de la situación actual, se consideraron todas las UZ abiertas, sumando todos los costos operativos de las mismas.

Luego, para obtener un costo de reparto, se utilizó el mismo modelo matemático que para la alternativa planteada, de forma de obtener una comparativa coherente entre ellas. Por lo tanto, para los traslados desde la PLP a las UZ de cartas y paquete chicos, se corrió el modelo

solamente con estos productos. Mientras que para los traslados de CLM a las zonas de distribución de los paquetes medianos y grandes, corrió el modelo con estos productos y las distancias correspondientes a este nuevo centro de *crossdocking*. Por último, se suma el traslado desde la PLP al CLM, donde se consideraron 5 camiones Mercedes, modelo Atego 1418, llenos de paquetes medianos y grandes. Donde el costo es el producto de la tarifa (19 \$/km) y la distancia entre los centros (30 km). Cerrando esta línea de razonamiento, se adicionó el costo operativo del CLM, brindado por la contraparte.

<b>Alternativa Planteada</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Costo (\$)</b>
Operación UZ	22,351
Operación Vehículos	16,965
Traslados PLP - UZ	17,470
	<b>56,786</b>

*Tabla 20: Costos de la Alternativa planteada en base diaria*

En cuanto a la alternativa planteada como resultado del modelo de la etapa 1, específicamente el caso base, se obtuvieron los costos para mantener operativas las UZ y las camionetas de reparto pertenecientes a ellas. Por otra parte, según los resultados obtenidos en la etapa 2, se llega a un costo de traslado entre PLP y las diferentes UZ, en este caso, con la integración completa de todos los productos.

Observando la Tabla 19 y Tabla 20 se percibe un ahorro en la operativa diaria ya que en la situación actual se incurre en unos \$151.000 pesos uruguayos, mientras que con la alternativa planteada se desembolsarían aproximadamente \$57.000 pesos uruguayos. Esto resulta en una disminución de más de un 60% de los costos y representa un ahorro diario de \$94.000 pesos uruguayos que, llevados a una estimación anual, significan unos \$ 34.000.000 pesos uruguayos.



## 9. Recomendaciones

Según los resultados y observaciones planteadas, se identificaron diversas acciones para mejorar la eficiencia y reducir costos en la distribución de correspondencia en Montevideo y su área metropolitana.

En primer lugar, se recomienda unificar la distribución de todos los productos de correspondencia, incorporando los paquetes medianos y grandes en el traslado directo desde la Planta Logística Postal (PLP) hacia las Unidades Zonales (UZ), eliminando su paso por el Centro Logístico de Montevideo (CLM). Esta medida evitaría costos operativos asociados al CLM, como los de almacenamiento y clasificación intermedia. Asimismo, al reducir la cantidad de traslados intermedios, se simplificaría la operativa y se disminuiría la congestión en los centros logísticos actuales.

Por otra parte, se sugiere optimizar la cantidad de Unidades Zonales operativas, especialmente en la zona central de Montevideo. Este ajuste implicaría la eliminación de algunas UZ y un aumento del radio de cobertura de las restantes, permitiendo abastecer la demanda actual con menores costos sin afectar la calidad del servicio. Además, la reorganización de las UZ permitiría una mejor asignación de recursos, minimizando el mantenimiento de locales con baja eficiencia operativa.

Para implementar esta medida, se propone la aplicación del modelo matemático formulado en la Etapa I del estudio, que determina la ubicación óptima de las UZ. Dado que la modificación de la infraestructura operativa no puede realizarse en el corto plazo, se recomienda planificar su ejecución en un horizonte de mediano a largo plazo, estableciendo etapas progresivas para minimizar impactos en la operativa actual. Como parte de este proceso, se sugiere la adquisición de camionetas para facilitar el traslado de paquetes medianos y grandes desde las UZ hasta su destino final, permitiendo una distribución más eficiente y con mayor alcance territorial. La inclusión de estos vehículos dentro de la operativa también permitiría ampliar la flexibilidad en la asignación de rutas, lo que contribuiría a mejorar la utilización de los recursos disponibles.

Es importante señalar que, para la correcta implementación de estas recomendaciones, se deberá realizar una redistribución de los recursos humanos, asignando personal para la conducción de las camionetas y la gestión de los productos transportados. Esta reestructuración deberá considerar la demanda de cada UZ y su radio de cobertura, garantizando una distribución equitativa del personal sin generar sobrecarga en determinadas zonas.

Finalmente, se propone la utilización diaria del modelo matemático desarrollado en la Etapa II para optimizar la programación de la distribución. Con su implementación, se lograría definir las cantidades y recorridos óptimos de los operarios, simplificando la gestión logística y reduciendo costos de transporte. Además, este enfoque permitiría una mayor flexibilidad para

adaptarse a cambios en la demanda y mejorar la planificación de recursos, asegurando que la capacidad de distribución se mantenga acorde a las necesidades del sistema.

En conjunto, estas medidas permitirán reducir costos operativos y mejorar la eficiencia de distribución, fortaleciendo la competitividad del Correo Uruguayo en el mercado logístico. La implementación progresiva de estas estrategias permitirá adaptar la operativa a nuevas demandas y optimizar la estructura de distribución en el largo plazo.

## 10. Conclusiones

En el presente documento se analizó la distribución de correspondencia en Montevideo y su área metropolitana por parte del Correo Uruguayo, bajo la modalidad de *crossdocking*.

En primer lugar, se alcanzaron los objetivos del proyecto al estudiar esta modalidad logística aplicada a productos de entrega inmediata en Uruguay. Aunque el concepto es ampliamente reconocido y utilizado a nivel mundial, se identificó una limitada cantidad de bibliografía específica sobre este tema en el contexto nacional, lo que destaca la relevancia de este estudio.

En esta misma línea, el equipo de trabajo se siente orgulloso de contribuir al desarrollo del Correo Uruguayo, una empresa estatal comprometida con el servicio a toda la población a lo largo y ancho del territorio nacional.

Como primer punto, se llevó a cabo una exhaustiva investigación sobre el concepto de *crossdocking*, culminando en el desarrollo de un documento de Estado del Arte. Este trabajo permitió al equipo profundizar en la temática, analizando sus ventajas, desventajas y aplicaciones, y sentando así las bases para el desarrollo posterior del proyecto.

En un segundo momento, se realizó un análisis detallado, en colaboración con el Correo Uruguayo, de los procesos involucrados en la distribución de cartas y paquetes en Montevideo y su área metropolitana. A partir de este diagnóstico, se identificaron oportunidades de mejora en la operativa actual, siendo la más relevante la propuesta de unificar el proceso de distribución de productos de correspondencia, evitando el envío hacia el CLM y distribuyendo directamente desde la PLP todos los productos.

Luego, considerando las mejoras propuestas, se formuló un modelo matemático para determinar cuáles Unidades Zonales deberían mantenerse operativas para satisfacer la demanda de manera eficiente, minimizando los costos. Como resultado principal de esta etapa, se comprobó que es posible cubrir la demanda con una menor cantidad de Unidades Zonales en Montevideo y su área metropolitana, lo que se traduce en un ahorro significativo.

En una segunda etapa, y teniendo en cuenta las Unidades Zonales definidas previamente, se desarrolló un modelo matemático para resolver el problema de enrutamiento de vehículos, optimizando la distribución mediante la asignación adecuada de vehículos, determinación de cargas y planificación de recorridos. Los resultados del modelo indican una reducción de más del 60% en los costos operativos diarios, lo que se proyecta como un ahorro anual estimado de \$34.000.000 pesos uruguayos.

Por otra parte, la implementación del esquema de *crossdocking* en la distribución del Correo Uruguayo demostró ser una estrategia eficiente, optimizando los procesos logísticos al minimizar el tiempo de almacenamiento intermedio. Aunque esta metodología ya se aplicaba previamente, el presente proyecto permitió reevaluar y actualizar su aplicación, aportando un enfoque moderno y ajustado a las necesidades actuales.

Además, uno de los aspectos más destacados del trabajo es la posibilidad de aplicar esta metodología a la distribución de otros productos de entrega inmediata, lo cual resulta factible dada la similitud del escenario logístico actual.

Como trabajo a futuro, se sugiere ampliar el análisis del modelo de enrutamiento para evaluar su aplicación en la distribución de correspondencia en todo el territorio uruguayo. Esto implicaría mayor trabajo y la necesidad de contar con un nivel de información más detallado sobre los traslados en el interior del país, pero los beneficios potenciales en la optimización de costos y asignación de recursos justificarían esta ampliación del alcance.

Adicionalmente, se sugiere considerar otras alternativas para abordar el problema presentado en la segunda etapa, con el fin de reducir los tiempos de resolución obtenidos en este trabajo. Una estrategia clave para hacer factible la ejecución diaria del modelo matemático de la Etapa II: Modelado de la distribución y evitar soluciones subóptimas es la implementación de una heurística, tal como se exploró en el Estado del Arte. Esto permitiría reducir significativamente el tiempo de ejecución, logrando que el modelo pueda ejecutarse todos los días sin comprometer la viabilidad operativa.

## 11. Referencias

- [1] Nugent, M. A. L. M., Quispe, J. T., Llave, A. M. T., & Morales, J. A. F. (2019). Gestión de cadena de suministro: una mirada desde la perspectiva teórica. Redalyc.org. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29062051009>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [2] Ecommerce el ganador de esta pandemia. (s. f.). <https://www.kantar.com/latin-america/inspiracion/consumidor/ecommerce-el-ganador-de-esta-pandemia?par=mx/Noticias-/Ecommerce-el-ganador-de-esta-pandemia>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [3] URSEC. (s. f.). <https://operadores.ursec.gub.uy/operadores/servlet/hllamadapg?HURPortalConsultaOperadores,,DSP,,,0,0,0,0,0,,1>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [4] Peralta, F. (2024, 30 septiembre). Cadena de suministro: qué es, cómo funciona, tipos, importancia. Driv.in. <https://driv.in/blog/cadena-de-suministro-que-es-importancia#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20una%20cadena%20de,encargan%20de%20los%20usuarios%20finales>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [5] Marketing SCM. (2023, 10 julio). Qué es la cadena de suministro y cuáles son sus fases | SCM Logística Barcelona. SCM Logística Barcelona. <https://www.scmlogistica.es/supply-chain-que-es-la-cadena-de-suministro-y-cuales-son-sus-fases/>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [6] Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2006). The Handbook of Logistics and Distribution Management. Kogan Page Publishers.
- [7] Unir, V. (2024, 2 septiembre). Introducción al Modelado Matemático. Universidad Virtual | UNIR Ecuador - Maestrías y Grados Virtuales. <https://ecuador.unir.net/actualidad-unir/introduccion-modelado-matematico/>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [8] Strogatz, S. H. (2018). Nonlinear Dynamics and Chaos. En CRC Press eBooks. <https://doi.org/10.1201/9780429492563>.
- [9] IBM. (2023, 17 noviembre). Modelo de optimización. ¿Qué es el modelado de optimización? <https://www.ibm.com/mx-es/topics/optimization-model#:~:text=El%20modelado%20de%20optimizaci%C3%B3n%20es,considerando>

%20limitaciones%20y%20objetivos%20espec%3%ADficos. Revisado el 11 de febrero de 2025.

- [10] García, A. (2022, 7 junio). El problema de la localización en Logística. OGA. <https://www.oga.ai/blog/el-problema-de-la-localizacion-en-logistica/>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [11] Facility location problems — Mathematical Optimization: Solving Problems using Gurobi and Python. (s. f.). <https://scipbook.readthedocs.io/en/latest/flp.html>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [12] Braekers, K., Nieuwenhuysse, I. V., & Ramaekers, K. (2015, diciembre). The Vehicle Routing Problem: State of the Art Classification and Review. ResearchGate. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>.
- [13] NetAkıl. (s. f.). logvrp - Route Optimization and Fleet Planning Web Application - VRP Types and Algorithms. [https://logvrp.com/logvrpsite/en/vrp.types.algorithms.html#:~:text=Open%20vehicle%20routing%20problem%20\(OVRP\)%20Depot%20Count:,linehaul%20\(delivery\)%20customer%20and%20backhaul%20customer%20\(pick%2Dup\)](https://logvrp.com/logvrpsite/en/vrp.types.algorithms.html#:~:text=Open%20vehicle%20routing%20problem%20(OVRP)%20Depot%20Count:,linehaul%20(delivery)%20customer%20and%20backhaul%20customer%20(pick%2Dup)). Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [14] Sobre nosotros - Correo Uruguayo. (s. f.). <https://www.correo.com.uy/nosotros>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [15] Glosario de términos - Correo Uruguayo. (s. f.). <https://www.correo.com.uy/glosario>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [16] [Paquetes - Correo Uruguayo. (s. f.). <https://www.correo.com.uy/paquetes>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [17] Correspondencia - Correo Uruguayo. (s. f.). <https://www.correo.com.uy/correspondencia>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [18] Comercio electrónico - Correo Uruguayo. (s. f.). <https://www.correo.com.uy/comercio-electronico>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [19] Giros - Correo Uruguayo. (s. f.). <https://www.correo.com.uy/giros>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [20] Precios combustibles. (s. f.). <https://www.ancap.com.uy/2093/1/precios-combustibles.html>. Revisado el 20 de junio de 2024.
- [21] Google Earth. (s. f.). Google Earth. <https://earth.google.com/web/@-34.75980162,-55.99151031,25.34293061a,100330.44002794d,30.26144732y,0h,0t,0r/data=CgRCA>

ggBMikKJwolCiExNGNr bHVuWmXrUXo2RWdVU1ZVNzF4QzhkdnZ0eWlaclUgAToDCgEwQgIIAEoICN6Du\_UHEAE. Revisado el 11 de febrero de 2025.

- [22] [Geonetwork. (s. f.). <https://geo.correo.com.uy/geonetwork/srv/spa/metadata.show?id=85&currTab=simple>. Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [23] [Google Maps. (s. f.). Google Maps. [https://www.google.com/maps/@-34.9018118,-56.1477084,15z?entry=tту&g\\_ep=EgoyMDI1MDEyOS4xIKXMDSOASAFQAw%3D%3D](https://www.google.com/maps/@-34.9018118,-56.1477084,15z?entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDEyOS4xIKXMDSOASAFQAw%3D%3D). Revisado el 11 de febrero de 2025.
- [24] De Marco, J. P. (2024, 30 septiembre). Temu bombardea con publicidad en Uruguay, despierta a «clientes adormecidos» y el aumento de compras complican la operativa del Correo. El Observador. <https://www.elobservador.com.uy/ciencia-y-tecnologia/temu-revoluciona-el-servicio-del-correo-y-expertos-e-commerce-hablan-su-impacto-uruguay-n5962971>. Revisado el 11 de febrero de 2025.



## 12. Anexos

### 12.1. Anexo I: Estado del Arte





UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

# Logística con *crossdocking* en productos de entrega inmediata

Estado del Arte

María Paz del Pino

Felipe Ruiz

Santiago Weigel

Tutor: Dr. Ing. Víctor Viana

Montevideo, Uruguay

Febrero de 2025

## Índice

Glosario .....	3
Introducción .....	4
Metodología de Revisión.....	5
Marco Teórico.....	6
Políticas de envío .....	6
Definiciones de <i>crossdocking</i> .....	9
Clasificación y tipos de <i>crossdocking</i> .....	10
Beneficios y limitaciones.....	11
Beneficios.....	11
Limitaciones .....	12
Implementación de <i>crossdocking</i> .....	14
Aplicación en cadenas de suministro sustentables .....	14
Problemas y Estrategias de Resolución .....	16
Decisiones en <i>Crossdocking</i> .....	16
Análisis Bibliográfico .....	17
Conclusiones.....	20
Referencias .....	22

## Glosario

**Cadena de suministro:** se compone de operaciones interrelacionadas que abarcan el movimiento de productos, información y recursos financieros desde proveedores hasta consumidores finales, para atender de forma eficiente y efectiva las necesidades de la demanda.

**Globalización:** refiere al proceso en el que los países y sus ciudadanos están cada vez más conectados e interrelacionados, a nivel económico, político, social y cultural.

**Industria 4.0:** nuevo modelo de organización y control de la cadena de valor a través del ciclo de vida del producto y a lo largo de los sistemas de fabricación apoyado y hecho posible por las tecnologías de la información.

**Sustentabilidad:** busca el equilibrio entre el medio ambiente y los recursos naturales a través de un consumo racional y responsable.

**Almacén:** espacio físico diseñado y equipado para el almacenamiento, gestión y distribución de mercancías.

**Teoría de colas:** estudio matemático de filas de espera que se producen cuando llegan clientes a determinado servicio, esperando si no se les puede atender inmediatamente y partiendo cuando se les brinda el servicio.

**Multi escalón:** estudia la cadena de suministro considerando toda la red de distribución de forma global, en lugar de hacerlo por separado (un solo nivel).

**Lead Time:** tiempo que transcurre entre que se genera el pedido y la entrega de este.

**Picking:** se refiere al proceso dentro de la gestión de almacenes en la que los productos son seleccionados, recogidos o extraídos de su lugar de almacenamiento para cumplir con pedidos específicos de los clientes o para su posterior distribución.

**Stock:** refiere al inventario o reserva de productos, materiales o mercancías que una organización mantiene almacenados en sus instalaciones o en ubicaciones estratégicas.

**Layout:** disposición física y organización de los elementos, espacios o componentes dentro de una instalación.

## Introducción

La globalización ha afectado de forma directa e indirecta numerosas actividades, entre ellas se encuentra la cadena de suministro. Este impacto se ve reflejado en las distintas decisiones y operaciones logísticas llevadas a cabo por las empresas a nivel mundial.

La internacionalización de los mercados ha brindado la posibilidad de satisfacer nuevas demandas, a nivel geográfico, lo que lleva a una adaptación y optimización de la cadena de suministro. El aumento de demanda y expansión de mercados también viene acompañado de una intensificación de la competencia. Obligando a la gran mayoría de los agentes de la cadena, a reducir tiempos de entrega y ser más eficientes en las operaciones. Es evidente que el nivel de complejidad aumenta, lo que requiere una coordinación y comunicación muy fluida entre los diferentes eslabones de la cadena de suministro [3].

Analizando en profundidad las necesidades de la globalización, podemos concluir, a través de razones y argumentos sólidos, que el *crossdocking* se presenta como una solución o herramienta para este desafío.

Comenzando por la reducción de costos, que es necesaria para mantener un alto nivel de competitividad y operaciones eficientes, el *crossdocking* se presenta como un modelo que aborda y favorece esta necesidad desde el principio. El reducir stock elimina casi por completo los costos de almacenamiento y ayuda a mejorar el flujo, permitiendo una distribución más directa de los productos [4].

Siguiendo esta línea de razonamiento, la globalización exige una mayor eficiencia logística sinónimo de rapidez a la hora de entregar los productos, ya sea a clientes finales como a agentes intermedios en la cadena. En este contexto, el *crossdocking* como política de envío, garantiza una notable reducción de tiempos, lo cual contribuye de manera significativa al mejoramiento del rendimiento logístico.

El poder de adaptación y flexibilidad también se ve puesto a prueba en las diferentes empresas. En este sentido, el *crossdocking* emerge como una solución que permite una mayor capacidad de respuesta frente a los cambios en la demanda. De esta forma, se pueden satisfacer las fluctuaciones, sin necesidad de grandes cambios en las operaciones habituales, dado que constantemente se actualizan y modifican las órdenes de llegada, así como las de salida.

El presente documento de Estado del Arte se realiza con intenciones de obtener un panorama actual de la temática *crossdocking*, a través de la investigación y análisis de los avances existentes en la materia. Así, además de contribuir al conocimiento general, permitirá contextualizar y fundamentar el desarrollo del problema que se tratará después.

## Metodología de Revisión

Previo a comenzar con el desarrollo de la revisión bibliográfica, se explicará brevemente la metodología utilizada para la realización de Estado del Arte.

El procedimiento consistió en primer lugar, en buscar información en diferentes sitios web de bibliografía académica. Por un lado, se utilizaron Google Scholar y Timbó. El primero representa el buscador de Google destinado a los documentos académicos. Mientras que Timbó permite el acceso a bases de datos de bibliografía científica y tecnológica a nivel mundial. Por otro lado, se hizo uso de buscadores asistidos con inteligencia artificial, como lo son los sitios Connected Papers, Elicit, Litmaps. Estos simplificaron notoriamente la búsqueda, ya que permiten relacionar la bibliografía existente con filtros más precisos.

Las palabras claves utilizadas para indagar fueron las siguientes:

- *Crossdocking.*
- *Crossdocking immediate delivery.*
- *Crossdocking Review.*
- *Crossdocking Logistic.*
- *Crossdocking perishable.*
- *Crossdocking zero inventory.*

En una primera etapa, se realizó una selección de artículos en función del título y el resumen del mismo, creando de esta manera un primer repositorio de información. En este momento se consideró la no duplicación de estos. Al finalizar esta etapa se contaba con 75 trabajos.

La segunda etapa se dedica al estudio detallado de cada documento seleccionado anteriormente. Aquí se lleva a cabo el segundo filtrado, descartando los artículos que no contemplaban el objetivo del trabajo. Por ejemplo, aquellos que estaban fuera del alcance de interés en cuanto a su fecha de publicación o los que no presentaban metodologías de resolución a los problemas planteados. Como resultado, se obtuvo un número de 67 artículos.

Finalmente, se utilizaron 37 artículos con los que se trabajó a lo largo del desarrollo del estudio.

## Marco Teórico

### *Políticas de envío*

El propósito de esta sección es un acercamiento a las políticas de envío presentes hoy.

Para el diseño de un sistema de distribución, nos enfrentaremos a algunos costos que incluyen el inventario, transporte, instalaciones y costos de información. Según la naturaleza y el tipo de productos y las estrategias de la cadena de suministro, los productos se distribuyen de acuerdo con cinco políticas, como plantea el trabajo [5].

- *Direct Shipment* (Envío directo).
- *Milk Run* (Ruta de leche).
- *Hub and Spoke* (Centro de distribución y rueda).
- *Poll Distribution* (Distribución en grupo).
- *Crossdocking*.

En la política de *Direct Shipment*, los productos se envían de forma directa de los proveedores hacia los clientes. Este sistema es muy eficaz en lo que refiere a reducción de tiempos y costos, siempre y cuando la cantidad enviada coincida con la capacidad total del transporte. Este caso particular es conocido como *Full Truckload (FTL)*, que se traduce como “Carga Completa” o “Camión Completo”. Es por eso que, este modelo se suele utilizar con cargas a gran escala o cuando el cliente necesita recibir de forma rápida y directa los productos en cuestión.

Sin duda, en el caso de que la cantidad de productos sea igual a la capacidad de los camiones (FTL), esta política es la más económica para satisfacer la demanda del cliente. Pero, en el caso de que la cantidad total de productos transportados sea menor que la capacidad de los camiones, conocido como *Less Than Truckload (LTL)*, se implementan otros tipos de redes de transporte [6].

*Milk Run* es una estrategia de distribución en la cual los productos son entregados desde un proveedor a varios minoristas mediante un vehículo. Como lo dice su nombre, traducido al español “Ruta de la leche”, este proveedor se encarga de hacer un recorrido programado, recogiendo y entregando productos, como sucedía con la leche algunas décadas atrás. Esta es una posible estrategia alternativa en caso de encontrarnos con una carga LTL, consolidando varios envíos de este tipo en uno solo. Al ser rutas programadas, se buscará el recorrido óptimo, sumado a una reducción de costos debido a la eficiencia en lo que respecta a espacio de carga.

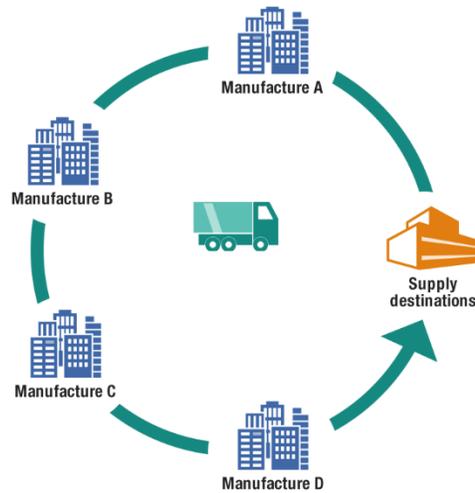


Figura 1: Diagrama de *Milk Run*. Extraído de [7].

Otra estrategia es *Hub and Spoke*. Esta se basa en la recolección de productos de diferentes proveedores, que luego serán consolidados en diferentes centros de distribución (*Hubs*), para posteriormente ser enviados a sus destinos finales. Los puntos de recolección y destino final son conocidos como *Spoke*, de ahí el nombre de esta política de envío.

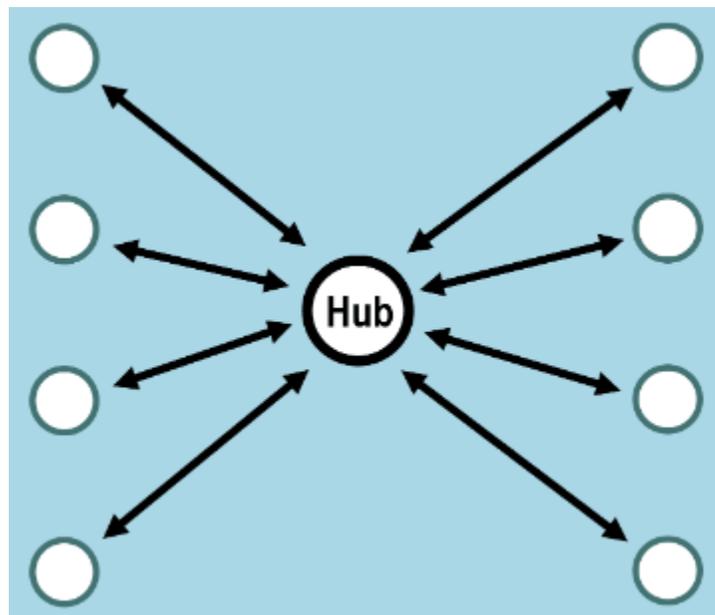


Figura 2: Diagrama de *Hub and Spoke*. Extraído de [8].

*Pool Distribution* es la cuarta estrategia. En esta se consolidan los productos de diferentes proveedores en un punto central, para luego ser enviados a los diferentes clientes. A primera

vista, esta política parece ser casi idéntica a la estrategia anterior, sin embargo, podemos encontrar algunas diferencias. Una de ellas, es que *pool distribution* presenta un punto central de consolidación, mientras que en *Hub and Spoke* encontramos varios *hubs*. Por otra parte, la diferencia que más las distingue es su escala, la tercera estrategia es más adecuada para redes grandes y complejas, mientras que la última se adapta mejor a actividades de menor tamaño.

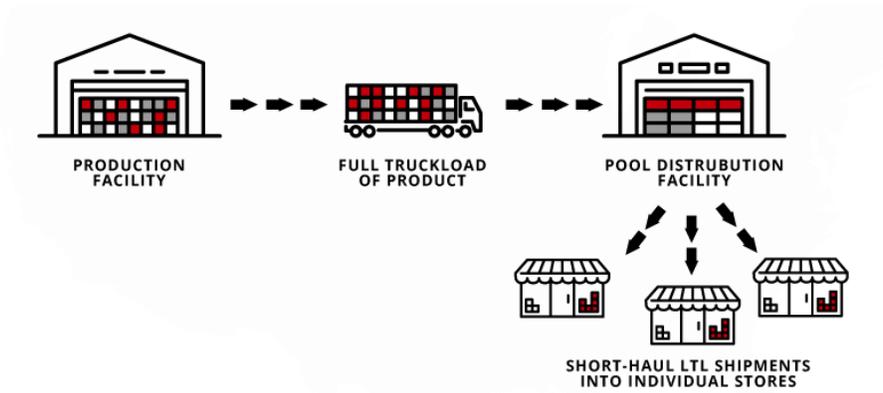


Figura 3: Diagrama de *Pool Distribution*. Extraído de [9].

La estrategia de *crossdocking* optimiza la distribución al reducir inventarios, buscando mejorar la satisfacción del cliente. Los productos se reúnen en un nodo central, antes de ser enviados a los destinos finales. Tras la clasificación, etiquetado y agrupación, según corresponda, se transfieren rápidamente a los clientes, evitando el almacenamiento prolongado. Esta táctica agiliza el flujo de productos, minimiza costos, riesgos, y potencia la satisfacción del cliente. En la próxima sección se profundizará en esta estrategia.



Figura 4: Diagrama de *crossdocking*. Extraído de [10].

### Definiciones de *crossdocking*

A lo largo de esta sección se hará una recopilación de las definiciones del concepto de *crossdocking*, provenientes de diferentes fuentes bibliográficas. Aunque en su mayoría los autores coinciden en ella, hay aspectos que se resaltan según sus criterios particulares.

Para comenzar, se presentará una serie de definiciones provenientes de [11].

[12] explica el concepto a través del proceso que se lleva a cabo. Primero se reciben los productos desde los proveedores o fabricantes, se consolidan los que tengan destinos comunes y luego se produce la entrega final.

Por su parte, [13] afirma que en *crossdocking*, los productos llegan desde los proveedores al centro de distribución y luego se entregan lo más rápido posible a las tiendas.

Una explicación más detallada la brinda [14], argumentando que el *crossdocking* es una estrategia de almacenamiento eficiente y enumerando sus ventajas. En 24 horas se realizan todas las operaciones que consisten en la recepción y descarga de materiales desde diferentes destinos, consolidación y salida de estos.

Por otra parte, la *Material Handling Industry of América* [15] define el *crossdocking* como el proceso de trasladar mercancías desde el muelle de recepción hasta el muelle de expedición para su correspondiente envío, sin almacenamiento previo.

Finalmente, la revisión del artículo termina con el análisis de [16]. Los autores comentan que es una práctica común utilizada por las empresas para hacer envíos de diferentes productos desde múltiples orígenes hacia múltiples destinos, reduciendo costos de almacenamiento y transporte.

En la revisión literaria de [17] se menciona la definición de [18], quien dice que el *crossdocking* es una estrategia operativa que mueve los elementos a través de los centros de consolidación, evitando el almacenamiento. Además, afirma que los directores de logística recurren a ella por su capacidad de disminuir el inventario.

Según [19], corresponde a un tipo de preparación de pedido sin colocación de mercancía en *stock* ni operación de *picking*. Permite la consolidación de mercancías provenientes de diferentes orígenes y con diversos destinos, sin ningún tipo de almacenaje intermedio. Esto admite reducir los plazos de entrega necesarios, por lo que se usa especialmente para productos frescos por grandes distribuidores.

Para culminar la revisión, [20] alude que consiste en un sistema de distribución justo a tiempo y ajustado que contribuye de forma esencial a la circulación de mercancías, a través del envío directo de los productos recibidos desde los camiones de entrada a los de salida.

### *Clasificación y tipos de crossdocking*

Si bien los objetivos de la herramienta están claros, luego de analizar las definiciones, es posible clasificar el *crossdocking* en función de diferentes aspectos que representan variantes en la estrategia a implementar.

A continuación, se hará una revisión de las diferentes clasificaciones de acuerdo con diversos autores.

Por un lado, [11] presenta dos tipos de clasificaciones. La primera, dada por Napolitano, clasifica en función del lugar de asignación de los productos.

- Tipo 1: Productos ya consolidados y el destino viene definido por el proveedor con antelación.
- Tipo 2: El operador consolida los productos y el destino se asigna en el almacén.
- Tipo 3: Productos ya consolidados y el destino se asigna en el almacén.

La segunda clasificación está basada en qué tipo de cadena de suministro brinda los servicios:

- Manufactura: recepción y consolidación de productos para abastecer *Just in time*.
- Distribución: consolidación de productos de múltiples proveedores y envío cuando se completa a diferentes lugares.
- Transporte: consolidación y desconsolidación para transportar eficientemente.
- Minorista: consolidación de productos de múltiples proveedores y envío a un local.
- Oportunista: transferencia desde un muelle de recepción a uno de expedición.

Por otra parte, [21] cataloga el *crossdocking* en dos tipos diferentes, en relación con el momento de asignación de los productos:

- Pre-distribución: mercadería ya organizada en las cantidades a comercializarse y seleccionada por puntos de entrega.
- Consolidado: la mercadería se recibe y consolida en un área del almacén destinada a eso.

De forma análoga, se presenta la clasificación dada por [22]. En este caso, los términos utilizados son:

- Directo: entregas que prepara el proveedor según cada cliente final. La mercancía se recibe, descarga y despachada de inmediato sin manipulación.
- Indirecto: El operador desconsolida la carga para entregar a distintos clientes y/o anexar otros productos al despacho.

En la metodología directa, el autor menciona que algunas ventajas son minimizar los errores y agilizar el proceso, reduciendo los costos asociados.

Finalmente, se tiene la caracterización brindada por [17]. En esta ocasión, el criterio se basa en las características de la red de distribución y las funciones que desempeñan en el proceso de distribución.

- Terminales de fin de línea de carga LTL: se reciben y distribuyen productos hacia diferentes ubicaciones.
- Terminales de consolidación de carga LTL: funcionan como puntos de transbordo eficientes y permiten optimizar el uso de los vehículos en la red de transporte.
- Terminales de *crossdocking* minorista: se ubican estratégicamente cerca de grupos de tiendas minoristas y son responsables de la distribución de productos a esas tiendas.

Cabe destacar que la elección del tipo de *crossdocking*, es un aspecto fundamental a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo esta estrategia. Si bien es viable la posibilidad de utilizar más de una opción de las mencionadas en un mismo almacén, es necesario que se organicen las tareas y los espacios, entre otras cosas.

### Beneficios y limitaciones

En esta sección se abordarán los diferentes beneficios y limitaciones que presenta la implementación de esta herramienta. En primer lugar, se pondrá el foco en los aspectos positivos y, luego, se tratarán las limitantes encontradas en la bibliografía estudiada.

#### *Beneficios*

[11] menciona los siguientes beneficios del *crossdocking*, de acuerdo con diversos autores:

- Aceleración del flujo de productos y minimización de los tiempos de ciclo debido a la eliminación de un punto de almacenamiento en la cadena de suministro [23].
- Consolidación eficiente de productos, reducir el inventario y entregas más frecuentes. El flujo acelerado de materiales reducirá la obsolescencia del inventario. Además, aumenta la capacidad de manipulación del almacén con el uso mínimo de las instalaciones [24].
- Reducción de costos (costos de almacenamiento, costos de mantenimiento de inventario, costos de manipulación, costos de transporte, costos laborales), una mejor utilización de los recursos, una mejor coincidencia entre las cantidades de envío y la demanda real, y un mejor control de las operaciones de distribución [25].
- Entrega efectiva y consistente que reducirá los costos de la cadena de suministro, mejorará la satisfacción del cliente y aumentará la ventaja de marketing, con su consiguiente aumento en la lealtad y las ventas potenciales [26].

En [27], los autores coinciden mencionando con las ventajas expresadas anteriormente, resaltando la reducción de *lead times* como una de las principales.

Dentro de los beneficios mencionados por [28], se destaca la reducción de la degradación de la calidad de los productos, el riesgo de daños y la obsolescencia de estos. Esto en particular

es muy importante al tratar con productos perecederos, que de esta manera pasan menos tiempo almacenados.

Por su parte, [29] indica que “las industrias aplican una estrategia de *crossdocking* para mejorar las entregas "justo a tiempo" dentro de su cadena de suministro, con el objetivo de minimizar el número de camiones de entrada y salida y mejorar la sostenibilidad.” Además, resalta la importancia de la combinación de cargas que comparten destinos, la optimización de recursos y un mayor control sobre los plazos de entrega.

Los autores de [30] enumeran las mismas ventajas que se mencionan a lo largo de los puntos anteriores. Adicionalmente, nombran la reducción del espacio de almacenamiento como una de las ventajas del *crossdocking* en comparación con los centros de distribución tradicionales.

Para finalizar con los beneficios, [31] resalta la reducción de costos a través de la consolidación de los envíos. En lugar de enviar los camiones sin completar su capacidad (LTL), el *crossdocking* consolida pequeños pedidos hasta completar la capacidad de estos.

### Limitaciones

Al momento de implementar una estrategia de *crossdocking*, es fundamental tener claro múltiples elementos que pueden causar el éxito o fracaso de la misma. Al tratarse de una cadena de distribución, es lógico que haya muchos involucrados que son partícipes de la logística de un producto. Es vital contar con una buena planificación de los procesos que engloban el negocio y el contexto en el que se realizan.

Para comenzar, se presenta una pregunta sumamente interesante introducida por [32]:” ¿Cuándo usar *crossdocking*, en función del costo de inventario y tipo de demanda?” Para responder este cuestionamiento, el autor exhibe el siguiente diagrama que resume de gran manera la respuesta, identificando según la demanda del producto y su costo.

		Product demand rate	
		Constant and stable	Unstable
Unit inventory cost	High	Cross-docking can be implemented with appropriate systems and design tools	Tradicional warehouse usage the preferred
	Low	Cross-docking is preferred	Cross-docking can be implemented with appropriate systems and design tools

Figura 5: Uso del *crossdocking* según características del producto. Extraído de [32].

Se puede apreciar que el escenario de excelencia para implementar una estrategia de *crossdocking*, consiste en productos cuya demanda sea estable y su costo unitario sea bajo. En otros casos, de igual forma es posible su implementación mediante una previa adaptación y utilización de herramientas de diseño.

Continuando con el hilo de la pregunta, [33] coincide en que el escenario ideal se ve representado por un flujo predecible, ya que si las demandas son muy cambiantes se corre riesgo de quiebre de stock teniendo en cuenta que con esta modalidad no existe almacenamiento. Sumado a esto, menciona que es preferible la implementación con productos perecederos y que poseen una gran demanda.

Por otra parte, presenta una serie de limitantes a considerar si se está pensando en utilizar la modalidad de *crossdocking*.

En primer lugar, explica las restricciones a nivel de los diferentes recursos:

- De espacio: si se implementa en un almacén ya diseñado puede haber complicaciones, por ejemplo, con el espacio para que esperen los camiones.
- De mano de obra: se requiere más personal ya que los movimientos son muy intensos.
- De equipamiento: maquinaria para mover los materiales de forma dinámica.

Luego, expresa las relacionadas con el diseño y *layout* del centro de distribución, ya que esto impacta en la eficiencia del proceso:

- No usar techos altos, ya que dificulta la dinámica de los productos.
- Considerar espacio para heladeras y congeladores.
- Minimizar distancias a recorrer con los materiales.

Por último, los autores resaltan las siguientes características de la red de distribución, que son importantes considerar para la planificación y programación de los envíos:

- Buenos proveedores: entregan la cantidad requerida en el momento que se necesita.
- Flujo de información preciso y rápido: preferentemente sin papeles.
- Personal capacitado que entienda el sistema y sus procesos.

Adicionalmente, [34] acota que las características físicas y geográficas de la red de distribución tienen un gran impacto en el desarrollo de transportes con *crossdocking*.

Por otro lado, [20] comenta que los centros de *crossdocking* deben contar con cierta flexibilidad para soportar exitosamente variaciones que se puedan presentar a nivel de volúmenes de trabajo, disponibilidad de recursos e interrupciones en los procesos.

### Implementación de *crossdocking*

Para realizar el objetivo exitosamente, existen aspectos a considerar. En esta sección se mencionan, en primer lugar, elementos que son importantes considerar a la hora de interesarse en la utilización del *crossdocking*. Luego, se tratarán bajo sus respectivos subtítulos diferentes enfoques y contextos en los que puede darse la elección de esta estrategia por parte de una empresa.

Primero, [35] enumera una serie de factores a los que se les debe prestar atención si se busca una buena implementación. Entre los puntos señalados, se destaca la disponibilidad de la información en toda la cadena de suministro. Los horarios de salidas y llegadas, destinos y cargas deben estar disponibles fácilmente al alcance de todos para concretar una buena planificación de las tareas. Además, se menciona la importancia de la confianza a los transportes involucrados, desde el punto de vista de la puntualidad.

Continuando, en [36] se detalla una lista de requerimientos necesarios para lograr una correcta implementación. Entre ellos, resaltan que poseen conocimientos de la cadena de abastecimiento, que tienen buena relación con los proveedores y que tengan pronósticos de demanda exactos.

Por otro lado, algunos autores analizaron los indicadores que pueden utilizar en este ámbito y arrojan valiosos resultados.

En [17] se afirma que el indicador de rendimiento de un centro de *crossdocking* consta de 3 componentes interrelacionados como lo son el tiempo de entrega, el tamaño de la plantilla de personal y el volumen de carga gestionado.

Por su parte, [37] expresa que los indicadores de performance están dados por el nivel de inventario, la desviación de tiempo de procesamiento del camión, la distancia recorrida dentro del almacén y el *makespan* (intervalo de tiempo entre el inicio del procesamiento del primer trabajo y el tiempo de finalización del último trabajo).

Para culminar, es oportuno mencionar la relación del *crossdocking* con la Industria 4.0. Si bien afirma que aún hay muy poca información que los vincule, son conceptos que están ganando interés a nivel global y vale la pena destacar.

El desarrollo de la cuarta revolución industrial y los avances tecnológicos que esta trae consigo, pueden tener un gran impacto en la adopción de esta estrategia en un futuro cercano. Algunos ejemplos podrían ser el incremento de la trazabilidad a través del Internet de los productos, uso de sensores para la automatización de procesos o la integración de la cadena de suministro a partir de la interconexión entre los actores.

### Aplicación en cadenas de suministro sustentables

Una cadena de suministro sustentable es aquella que integra plenamente las prácticas éticas y medioambientales responsables dentro de un modelo competitivo y exitoso. Busca

minimizar los impactos ambientales y sociales adversos, abordando cuestiones tales como el consumo de agua y energía, la contaminación, las condiciones laborales de los trabajadores, la bioseguridad, las comunidades marginadas, la biodiversidad y el uso de la tierra [35].

En el ámbito del *crossdocking*, [27] relaciona esta modalidad con la idea de la sustentabilidad a través de un caso de estudio. El transporte terrestre actualmente genera altos niveles de contaminación del aire y sonora, además de tráfico y accidentes. El transporte sustentable reduce el consumo de energía a través de la inclusión de vehículos eléctricos, por ejemplo. Como resultados del estudio, los autores explican que se logró reducir los costos y las emisiones de gases a través del diseño de una red de transporte sustentable. Finalmente, el artículo destaca que el *crossdocking* es la forma más atractiva de lograr esto, debido a las características de este.

Continuando con la idea de la sustentabilidad, la combinación del *crossdocking* con la logística inversa, contribuyen a la disminución de la degradación del medio ambiente [36]. Según [37], el *crossdocking* es el mecanismo que permite la integración de la logística inversa a la cadena de suministro inteligente. Para llevarlo a cabo, es necesaria la implementación de un almacén *crossdocking* de flujo directo y otro de flujo inverso. En el primer caso, el centro de distribución recibe productos de los centros de producción y luego de su consolidación, los envía a los destinos correspondientes. En el caso inverso, como es de esperar, el centro de distribución recibe materiales de los destinos finales, los clasifica, y los envía a las plantas de producción. De esta forma se reciclan varios productos que, de otra manera, serían descartados sin considerar su reutilización.

## Problemas y Estrategias de Resolución

En las partes anteriores se plasmaron diferentes aspectos relacionados al *crossdocking*, desde su definición hasta llegar a aspectos claves de la implementación. Sin embargo, trasladándose a una visión más práctica del tema, aún resta por estudiar los diferentes problemas y estrategias de resolución que existen actualmente.

En la presente sección se estudiarán los problemas existentes en la literatura: sus objetivos, modelos y soluciones. Se incluirá una recopilación de estos datos para realizar un análisis crítico, según criterios cuantificables.

### *Decisiones en Crossdocking*

Cuando se habla de *crossdocking*, hay una gran variedad de aspectos en los que se debe tomar decisiones, en función del objetivo que se esté buscando.

En su literatura, [5] hace referencia a un resumen de las categorías de decisiones hecho por Van Bell et al:

- Ubicación de los centros de *crossdocking*.
- Diseño de los almacenes (layout).
- Diseño de la red de *crossdocking*.
- Ruteo de vehículos.
- Asignación de puertas de muelle.
- Programación de camiones y almacenamiento temporal.

Por su parte, [38] hace una clasificación menos detallada y afirma que existen 3 niveles de decisión:

- Estratégico: localización y layout del almacén.
- Táctico: diseño de las redes de *crossdocking*.
- Operativo: ruteo de vehículos, programación de camiones, asignación de recursos.

Los mismos autores hacen referencia a otra clasificación, en este caso de Ladier y Alpan:

- Asignación camión/puerta: qué puerta se le asigna a cada uno.
- Secuenciación camión/puerta: qué puerta se le asigna, minimizando distancia recorrida dentro de la terminal.
- Secuenciación y programación camión/puerta: foco en el tiempo, no asigna las puertas, solo tiene en cuenta no excederse del máximo.

Como se aprecia, la variedad de decisiones a tomar se asocia con el tipo de problema que se quiere solucionar. Si bien todos los aspectos están relacionados al *crossdocking* en sí, cada una de las cuestiones se resuelven a través de diferentes métodos.

## Análisis Bibliográfico

A lo largo de esta sección se hará una recopilación de la bibliografía analizada, poniendo el foco en los problemas existentes y el abordaje de su solución. Para el desarrollo de los gráficos, fue utilizada la herramienta Power BI de Microsoft.

En primer lugar, se refleja la información del país de origen de los artículos analizados. Por un lado, se observa la distribución en un planisferio y luego se ve la distribución gráficamente a partir de un diagrama.

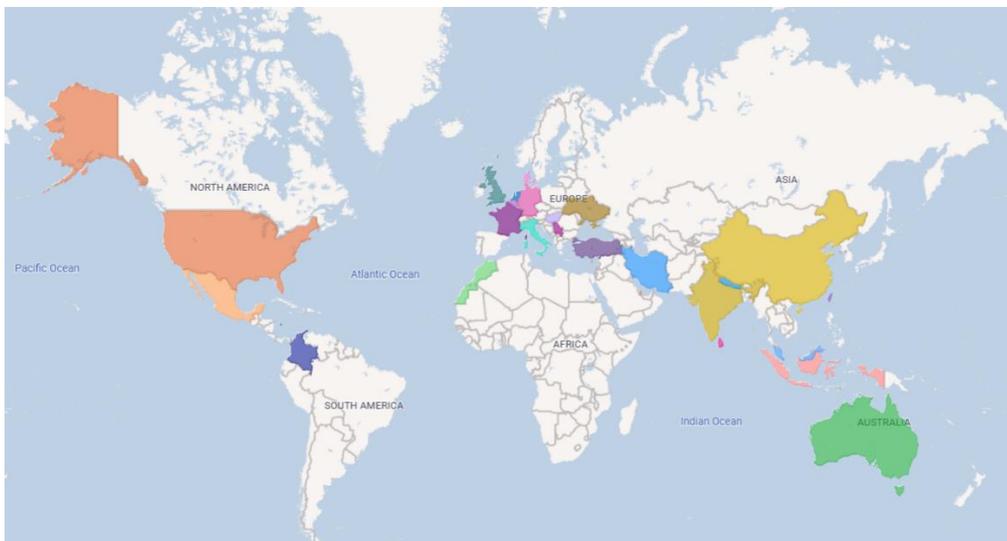


Figura 5: Mapa con los países de origen de los artículos estudiados. Elaboración propia.

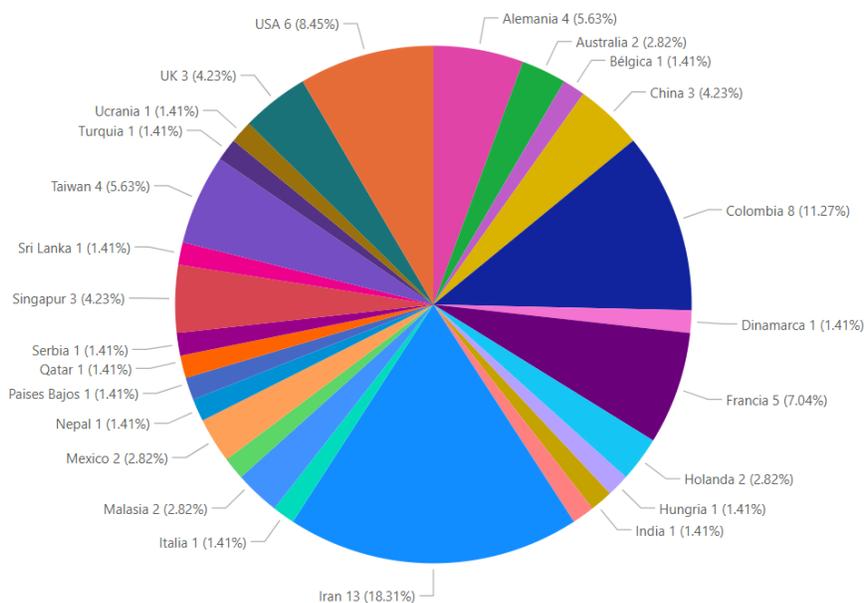


Figura 6: Cantidad de artículos por país. Elaboración propia

Luego, se puede ver a través de un diagrama de barras el año de publicación de los artículos. El intervalo de publicaciones abarca prácticamente desde principios de los 2000 hasta el año 2023.

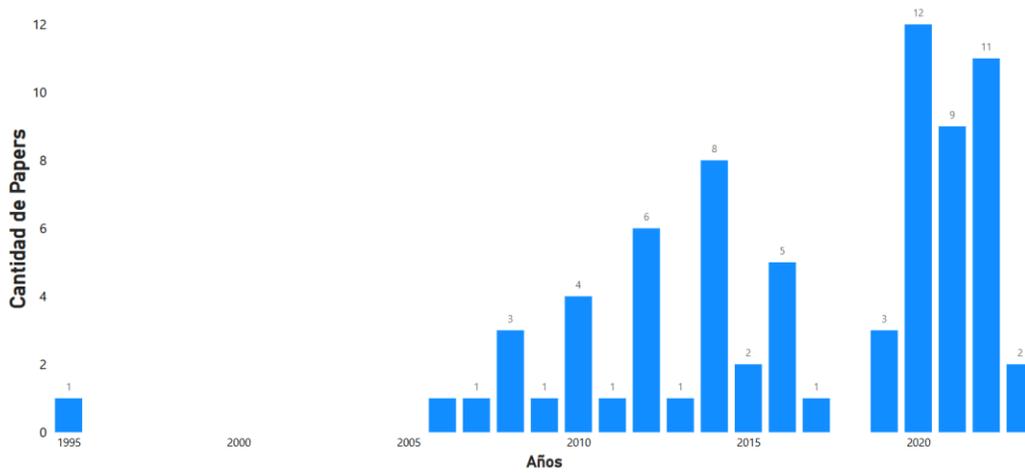


Figura 7: Cantidad de artículos por año. Elaboración propia

Por otro lado, se representa el objetivo principal de los problemas planteados en la bibliografía estudiada. Cabe destacar que no todos los artículos presentaban un modelo, por lo que para la representación estos no se consideraron.

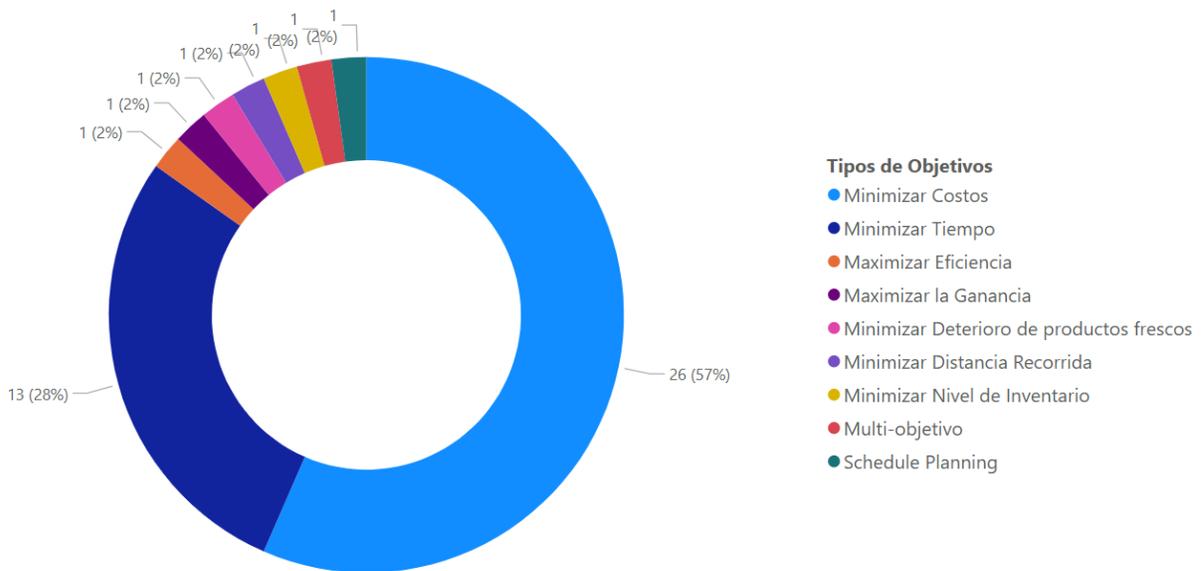


Figura 8: Cantidad de artículos por tipo de objetivo. Elaboración propia

Por último, se muestra la siguiente tabla que enumera los artículos que presentan un problema a resolver, indicando su objetivo y su método de resolución.

ID	Modelo	Objetivo	Grupo de Solución
2	Programación entera mixta	Minimizar Costos	Heurísticas
9	Programación lineal, modelos de programación entera mixta, modelos de programación no lineal, modelos de programación dinámica, de simulación y heurísticos	Minimizar Costos	Heurísticas
11	Programación cuadrática entera mixta (MIQP), programación matemática lineal o no lineal, algoritmos de búsqueda local	Minimizar Tiempo	Metaheurísticas
12	Modelos de programación lineal entera mixta, modelos de simulación y metaheurísticas	Minimizar Costos	Métodos Exactos
15	Programación lineal entera	Minimizar Costos	Métodos Exactos
17	Programación lineal, Programación entera mixta	Minimizar Costos	Métodos Exactos
19	Programación lineal entera	Minimizar Tiempo	Heurísticas
20	Programación entera mixta de múltiples objetivos	Minimizar Tiempo	Metaheurísticas
21	Programación entera mixta	Minimizar Costos	Métodos Exactos
23	Enfoque heurístico basado en la Optimización por Enjambre de Partículas (ePSO)	Minimizar Costos	Heurísticas
25	Modelo no lineal	Minimizar Costos	Métodos Exactos
28	Programación lineal mixta	Minimizar Tiempo	Otras Técnicas
29	Programación no lineal entero mixto	Minimizar Costos	Heurísticas
30	Programación entera mixta	Minimizar Costos	Otras Técnicas
34	Programación lineal entera mixta (MILP)	Minimizar Costos	Metaheurísticas
38	Programación no lineal mixta con variables reales	Minimizar Costos	Métodos Exactos
42	Programación entera mixta	Minimizar Costos	Metaheurísticas
45	Programación entera mixta	Minimizar Costos	Metaheurísticas
46	Programación no lineal entero mixto	Minimizar Costos	Métodos Exactos
47	Modelo no lineal	Minimizar Costos	Metaheurísticas
48	Modelo no lineal	Minimizar Tiempo	Otras Técnicas
51	Programación entera mixta	Minimizar Costos	Métodos Exactos
55	Programación lineal entera mixta (MILP)	Minimizar Costos	Metaheurísticas
57	Programación entera mixta	Minimizar Tiempo	Metaheurísticas
59	Algoritmos de sistemas de agentes múltiples	Minimizar Nivel de Inventario	Otras Técnicas
60	Mixed integer, nonlinear programming	Schedule Planning	Métodos Exactos
61	Modelo no lineal	Multi-objetivo	Metaheurísticas
64	Programación entera mixta	Minimizar Deterioro de productos frescos	Metaheurísticas
68	Programación entera mixta	Minimizar Distancia Recorrida	Heurísticas
70	Programa Lineal Entero Mixto de Demanda Fija en Tiempo y Espacio (TSFD-MIP)	Maximizar la Ganancia	Heurísticas

Figura 9: Tabla de artículos junto a su objetivo y metodología de solución

## Conclusiones

En primer lugar, se profundizará en el análisis de los gráficos presentados en la sección previa.

Observando el gráfico que muestra la cantidad de artículos, en función de la fecha de publicación de los mismos, se puede afirmar que existe una tendencia creciente que se mantiene hasta hoy en día. Esto significa que el *crossdocking* comenzó como un concepto nuevo hace pocos años y cada vez genera más repercusiones, acercándose a más personas. Seguramente, esta tendencia seguirá en aumento ya que es una estrategia que no se ha explotado en su totalidad y existen muchos aspectos para continuar investigando.

Respecto al origen de los artículos analizados, se puede apreciar que es un concepto que, en mayor o menor medida, abarca diferentes continentes. En particular, se destacan Irán, Colombia y Francia como países de referencia. La gran mayoría de los artículos, sin embargo, se concentran en Europa y Asia, donde se encuentran la mayor cantidad de investigaciones relacionadas al *crossdocking*.

Analizando los objetivos de los problemas planteados en los artículos estudiados, se destaca notoriamente la minimización de costos como el aspecto más evaluado. Esto es lógico, ya que una de las ventajas más importantes de esta herramienta es la disminución de los costos asociados, de almacenamiento, de manipulación y transporte. En segundo lugar, se resalta el tiempo como el aspecto a minimizar más evaluado. Nuevamente, en este caso, coincide con otra de las ventajas mencionadas del *crossdocking*, como lo es la reducción de tiempos de entrega. Cabe destacar que, en muchos casos, los problemas eran multiobjetivo. Esto significa que en la resolución de un problema se considera más de un objetivo para su resolución.

En relación con los métodos de resolución de los problemas, se evidencia una gran gama de herramientas. Dentro de estas, se destacan los algoritmos heurísticos como los más utilizados para determinar la solución. Estos algoritmos se basan en la búsqueda de soluciones aproximadas y eficientes, en lugar de buscar soluciones óptimas. Esto se da en problemas complejos, donde obtener una solución exacta puede ser muy costoso o directamente imposible.

Asimismo, se identificaron diversos enfoques metodológicos en los estudios analizados. Predomina el uso de programación entera mixta (MIP) y programación lineal entera, seguidas por modelos no lineales y enfoques metaheurísticos. En cuanto a los objetivos, la minimización de costos es el criterio más abordado, alineándose con la literatura previa sobre *crossdocking*. También se encontraron estudios orientados a minimizar el tiempo y optimizar otros aspectos logísticos, como la gestión de inventario. En términos de métodos de solución, las heurísticas y metaheurísticas son ampliamente utilizadas, lo que refleja la complejidad computacional de estos problemas. No obstante, los métodos exactos también tienen un papel relevante, especialmente en modelos lineales.

A modo de resumen, la información planteada concuerda con el caso de estudio que se tratará posteriormente, donde el objetivo consiste en analizar la red de distribución de las cartas y paquetes en Montevideo y el área metropolitana, minimizando los costos.

Para finalizar, el equipo de trabajo desea plantear la motivación que este desafío representa, considerando que el área está en pleno crecimiento. Al tratarse de un área relativamente nueva, se cree que aún resta mucho trabajo por realizarse y es nuestro objetivo poder aportar desde nuestro lugar.

## Referencias

- [1] Lambert, D. M., Cooper, M., & Pagh, J. D. (1998). Supply Chain Management: implementation issues and research opportunities. *The International Journal of Logistics Management*, 9(2), 1-20. <https://doi.org/10.1108/09574099810805807>
- [2] Stiglitz, J. E. (2003, 1 agosto). *El rumbo de las reformas. hacia una nueva agenda para América Latina*. <https://hdl.handle.net/11362/10893>
- [3] Manrique Nugent, M. A. L., Teves Quispe, J., Taco Llave, A. M., & Flores Morales, J. A. (2019). Supply chain management: A look from the theoretical perspective. *Revista Venezolana de Gerencia*, 24(88), 1136-1146.
- [4] Gupta, M., & Boyd, L. (2008). Theory of Constraints: A theory for operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, 28(10), 991-1012. <https://doi.org/10.1108/01443570810903122>
- [5] Theophilus, O., Dulebenets, M. A., Pasha, J., Abioye, O. F., & Kavooosi, M. (2019). Truck scheduling at Cross-Docking Terminals: A Follow-Up State-Of-The-Art Review. *Sustainability*, 11(19), 5245. <https://doi.org/10.3390/su11195245>
- [6] Du, Timon & Wang, Fu-Kwun & Lu, Pu-Yun. (2007). A real-time vehicle-dispatching system for consolidating Milk runs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 43. 565-577. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.03.001>
- [7] Surajmech. (2022, 27 octubre). Milk run concept in lean manufacturing. *SurajMech - APQP, FMEA, SPC, MSA, PPAP, ISO 9000, IATF16949*. <https://www.surajmech.com/2020/02/milk-run-concept-in-lean-manufacturing.html>. Revisado el 16 de julio 2024.
- [8] *Point-to-Point versus Hub-and-Spoke networks | The geography of transport Systems*. (2023, 12 Junio). The Geography of Transport Systems | The spatial organization of transportation and mobility. <https://transportgeography.org/contents/chapter2/geography-of-transportation-networks/point-to-point-versus-hub-and-spoke-network/>. Revisado el 16 de julio 2024.
- [9] Pool Distribution | Beitler Logistics. (2022, 16 Junio). Beitler Logistics Services. <https://beitlerlogistics.com/pool-distribution-logistics/>. Revisado el 16 de julio 2024.
- [10] Arango, A. (2023b). ¿Qué es cross-docking y por qué se considera una de las mejores prácticas para trabajar procesos logísticos? *Logístiko*. <https://logistiko.es/blog/que-es-el-cross-docking-por-que-se-considera-una-de-las-mejores-practicas-para-trabajar-procesos-logisticos/>. Revisado el 16 de julio 2024.
- [11] Ahangamage, N., Niwunhella, H., Vidanagamachchi, K., & Wickramarachchi, R. (2020). Implementing a Cross-Docking system in a warehouse -A systematic review of

- literature. ResearchGate.  
[https://www.researchgate.net/publication/342052608\\_Implementing\\_a\\_Cross-Docking\\_System\\_in\\_a\\_Warehouse\\_-A\\_Systematic\\_Review\\_of\\_Literature](https://www.researchgate.net/publication/342052608_Implementing_a_Cross-Docking_System_in_a_Warehouse_-A_Systematic_Review_of_Literature)
- [12] Kinnear, E. (1997). Is there any magic in cross-docking? *Supply Chain Management*, 2(2), 49-52. <https://doi.org/10.1108/13598549710166096>
- [13] Benrqya, Y. (2019). Costs and benefits of using cross-docking in the retail supply chain. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 47(4), 412-432. <https://doi.org/10.1108/ijrdm-07-2018-0119>
- [14] Alpan, G., Ladier, A., Larbi, R., & Penz, B. (2011). Heuristic solutions for transshipment problems in a multiple door cross docking warehouse. *Computers & Industrial Engineering*, 61(2), 402-408. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.09.010>
- [15] MHI - the industry that makes supply chains work. (s. f.). <https://www.mhi.org/>.  
 Revisado el 16 de julio 2024.
- [16] Konur, D., & Golias, M. M. (2013). Analysis of different approaches to cross-dock truck scheduling with truck arrival time uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 65(4), 663-672. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.05.009>
- [17] Buijs, P. (s. f.). *Comparing industry and academic perspectives on cross-docking operations*. Digital Commons@Georgia Southern. [https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr\\_2014/16/](https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2014/16/). Revisado el 16 de julio.
- [18] Z. Li, W. He, C. Sim and C. Chen, "A Solution for Cross-docking Operations Planning, Scheduling and Coordination," *Journal of Service Science and Management*, Vol. 5 No. 2, 2012, pp. 111-117. <https://doi.org/10.4236/jssm.2012.52014>.
- [19] Darío, B. P. R. (2012). *Análisis Cross docking en la estructura logística Organización FedEx*. hdl:20.500.12010/1707. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/1707>
- [20] Ardakani, A.(A). and Fei, J. (2020), "A systematic literature review on uncertainties in cross-docking operations", *Modern Supply Chain Research and Applications*, Vol. 2 No. 1, pp. 2-22. <https://doi.org/10.1108/MSCRA-04-2019-0011>
- [21] Bacca, A. (2014, 24 noviembre). *El cross docking como herramienta importante en la cadena de abastecimiento*. <http://hdl.handle.net/10654/13461>. Revisado el 16 de julio 2024.
- [22] Bacca, A. P. (2014, 8 agosto). *Análisis de operaciones cross docking directas e indirectas en Colombia*. <http://hdl.handle.net/10654/12616>. Revisado el 16 de julio 2024.

- [23] Kumar S., A study of the supermarket industry and its growing logistics capabilities, *International Journal of Retail & Distribution Management*, Vol. 36 No. 3, pp. 192-211,2008. [10.1108/09590550810859150](https://doi.org/10.1108/09590550810859150)
- [24] Ertek, G., A tutorial on cross-docking, *Proceedings of 3rd International Logistics & Supply ChainCongress*,2005. [https://www.researchgate.net/publication/233756751\\_A\\_Tutorial\\_On\\_Crossdocking](https://www.researchgate.net/publication/233756751_A_Tutorial_On_Crossdocking)
- [25] Jan Van Belle, et al, *Cross-docking: State of the art*, 2011. [https://www.researchgate.net/publication/241756785\\_Cross-Docking\\_State\\_of\\_the\\_Art](https://www.researchgate.net/publication/241756785_Cross-Docking_State_of_the_Art)
- [26] John Joseph Vogt, *The Design Principles and Success Factors for The Operation Of Cross-dock Facilities In Grocery And Retail Supply Chains*, 2004. <http://hdl.handle.net/10019.1/50133>. Revisado el 16 de julio.
- [27] Mogale, D., De, A., Ghadge, A., & Tiwari, M. K. (2022). Designing a sustainable freight transportation network with cross-docks. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1455-1478. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2037777>
- [28] Kusuma, P. D. (2021). Truck scheduling model in the cross-docking terminal by using multi-agent system and shortest remaining time algorithm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(7). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2021.0120715>
- [29] Mavi, R. K., Goh, M., Mavi, N. K., Jie, F., Brown, K., Biermann, S., & Khanfar, A. A. (2020). Cross-Docking: A Systematic Literature review. *Sustainability*, 12(11), 4789. <https://doi.org/10.3390/su12114789>
- [30] Van Belle, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. (2012). Cross-docking: state of the art. *Omega*, 40(6), 827-846. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.01.005>
- [31] Yang, K. K., Balakrishnan, J., & Cheng, C. H. (2010). AN ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING CROSS DOCKING OPERATIONS. *Journal of Business Logistics*, 31(1), 121-148. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2010.tb00131.x>
- [32] Bodnár, B., & Juhász, J. (2023). Examination of the development possibilities of the cross-docking strategy. *Advanced logistic systems*, 17(1), 33-38. <https://doi.org/10.32971/als.2023.004>
- [33] Gonzalez-Feliu, J. (2012). Freight Distribution Systems with Cross docking: A multidisciplinary analysis. *Journal of the Transportation Research Forum*, 51(1). <https://doi.org/10.5399/osu/jtrf.51.1.2821>
- [34] Ladier, A., & Alpan, G. (2016). Cross-docking operations: Current research versus industry practice. *Omega*, 62, 145-162. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.09.006>

- [35] Cadenas de suministro sostenibles. (s. f.). ITTO International Tropical Timber Organization. [https://www.itto.int/es/economic\\_market/supply\\_chains/](https://www.itto.int/es/economic_market/supply_chains/). Revisado el 16 de julio 2024.
- [36] Hernando, J. D. F. (2020). Cadena de suministro inteligente, sistemas cross docking y logística inversa como mecanismos integradores y sostenibles: una revisión. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/5522>. Revisado el 16 de julio 2024.
- [37] Virtualpro (s. f.). *Biblioteca Virtual Pro - Repositorio Digital de Información*. VirtualPro.co. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/logistica-inversa-y-su-integracion-a-la-cadena-de-suministro-inteligente-como-estrategia-de-competitividad-empresarial-propuesta-de-aplicacion-a-sistemas-cross-docking>. Revisado el 16 de julio 2024.



## 12.2. Anexo II: Resultados del análisis de sensibilidad de modelo Etapa I para radio de cobertura de 25km

Situación Caso Base Etapa Radio 25								
UZ	Zonas Asignadas	Zona de la UZ	Costo Operativo	Paquete M	Paquete G	Volumen (m3)	Camionetas (8m3)	Costo Camionetas (\$)
UZ2	Pocitos	Pocitos	565	166	41	58.6	7	3,045
	PuntaGorda							
	LaBlanqueada							
UZ6	Malvin	Ciudad Vieja	1,029	128	32	45.6	6	2610
	Cordon							
UZ11	Ciudad Vieja	Reducto	742	89	22	31.4	4	1740
	Reducto							
UZ13	Aguada	Belvedere	1,051	126	31	44.3	6	2,610
	Sayago							
UZ15	Belvedere	Maroñas	1,342	95	24	34.2	4	1,740
	Cerro							
	Union							
UZ16	Maroñas	Pando	326	19	5	6.8	1	435
	Cerrito							
UZ17	Pando	Lagomar	857	77	20	27.6	3	1305
	Lagomar							
UZ19	Barros Blancos	Salinas	1,018	34	9	12.7	2	870
	Salinas							
UZ20	Atlántida	Las Piedras	984	59	15	21.3	3	1305
	Colon							
UZ21	LasPiedras	Toledo	1,155	8	2	2.9	1	435
UZ23	Toledo	San Luis	903	11	3	4.2	1	435
UZ24	San Luis	Ciudad Del Plata	2,549	12	3	4.3	1	435
			<b>12,521</b>					<b>16,965</b>

Tabla A2: Resumen de resultados para el aumento del radio de cobertura a 25 km