



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

Informe 2

Minimización de las emisiones de CO₂ en el
transporte de empresas de delivery

Grupo 43

Guillermo Giesen Cruz 20625863 sección 4
Felipe Andrés Charpentier Videla 19637705 sección 4
Valentina Vargas Molina 21627231 sección 4
Rocío Opazo Barría 18642438 sección 4
Vicente Avendaño 20644159 sección 1
Sebastián Huidobro 20639988 sección 2

Fecha entrega: 4 de Septiembre de 2023

1. Definición del Problema

Índice

1. Definición del Problema	2
1.1. Contexto	3
1.2. Beneficios de resolver el problema	3
1.3. Objetivo	5
2. Modelación del Problema	5
2.1. Resumen	5
2.2. Supuestos	5
2.3. Conjuntos	6
2.4. Parámetros	6
2.5. Variables	6
2.6. Restricciones	6
2.6.1. Naturaleza de las Variables	7
2.7. Función Objetivo	8
3. Definición de Datos	8
4. Resolución del problema utilizando software	9
5. Validación del Resultado	9
6. Bibliografía	9

1.1. Contexto

Durante los últimos años, el comercio online (e-commerce) en Chile se ha desarrollado exponencialmente gracias al masivo acceso a internet, y la facilidad para acceder a él desde diversos dispositivos móviles. Según el reporte de industria de Blacksip, para el año 2021 el 63 % de la población chilena adquiría productos mediante internet (BlackSip, 2022), lo que se debe principalmente al aumento que tuvo este durante la pandemia por la inaccesibilidad a las compras presenciales, especialmente en productos como ropa, zapatos y electrónica, que actualmente lideran las categorías de compras online. El año 2021, el país alcanzó su máximo en ventas online y el 2022 tuvo una caída seguida por el mismo panorama durante primer trimestre del 2023. Se espera un crecimiento este segundo semestre del año actual de un 5 %, equivalente a 11.000 millones de dolares, considerable aumento en relación al año anterior (Cámara de comercio de Santiago, 2023).

Ampliando la mirada hacia el futuro, se espera un incremento de un 25 % en las ventas totales online al 2025 (Faúndez, 2023), considerando el aumento de las categorías de ventas y sus múltiples opciones de entregas.

Teniendo en cuenta la cantidad de compras online, específicamente en Santiago, la mayor parte de ellas incluyen un envío a domicilio o delivery desde la bodega de la empresa, directo a las casas de los usuarios que adquieren el producto, lo que contribuye a la cantidad de vehículos que transitan por las calles. La cantidad de vehículos destinados a delivery es considerable, y junto a eso la cantidad de emisiones de CO₂ que generan, siendo el transporte uno de los sectores que más contribuyen a sus emisiones. Por ejemplo, un auto grande genera alrededor de 1.815 kg/año, considerando 15.000 kilómetros recorridos y un auto pequeño 1.410 kg/año, por los mismos kilómetros mencionados (Mena, 2022). Teniendo en consideración que otro de los medios de transportes más utilizados para los envíos a domicilios son las motos, estas generan alrededor de 167 gramos por kilómetros recorridos, eso equivale, para la distancia recorrida mencionada anteriormente, a 2.505 kg/año (Universidad Nacional de Colombia, 2017). Junto a la cantidad de CO₂ que genera cada vehículo es importante destacar que existe una diferencia en la emisión de cada uno, dependiendo del tipo de combustible que ocupa y el año de fabricación del automóvil. En el caso de los bencineros, generan un 10 % más de emisiones de CO₂ que uno diesel (Alburquenque, 2022). Con respecto a la antigüedad del vehículo, un vehículo nuevo y catalítico, que quiere decir que cumple con los estándares de contaminación, contamina 20 veces menos que un auto antiguo no catalítico (Ministerio del Medio Ambiente, 2015).

En cuanto a lo mencionado anteriormente, uno de los desafíos fundamentales que tienen las empresas que trabajan con delivery en Santiago, que corresponden al tomador de decisiones, es poder disminuir las emisiones de CO₂ provocadas por los medios de transporte al momento de repartir las entregas de las compras realizadas por sus usuarios mediante internet. Al mismo tiempo, se debe considerar la capacidad de cada vehículo y los tiempos de envío.

1.2. Beneficios de resolver el problema

Resolver este problema daría una solución a un tema que tanto empresas como hasta gobiernos han intentado lograr: cómo conseguir que el tráfico del comercio virtual satisfaga su demanda a una velocidad aceptable para el cliente, pero también teniendo en cuenta el ángulo de la sustentabilidad, es decir, la eficiencia y el cuidado con el que los procesos interactúan con el medio ambiente y con la contaminación. Esto se ha intentado solucionar con impuestos, pero si se lograra una exportación más sustentable, se podría tanto progresar en los esfuerzos medioambientales como obtener los beneficios de los repartos.

Aparte, desde un punto de vista ético, es fundamental tratar de hacer el menor daño al ecosistema con la cantidad de repartos necesarios cada día, con el mayor interés de la población general sobre las consecuencias del cambio climático (Ipsos, 2022), demanden a que las empresas cambien su funcionamiento, y se inclinen a preferir aquellas que acatan estos nuevos estándares.

La ineficiencia es tanto una pérdida de tiempo y recursos como un déficit de sustentabilidad. En cada etapa que se hace de manera desprolija, se corre el riesgo de que los errores se acumulen, ya sea como paquetes perdidos o dañados o vehículos con algún defecto. Esto va a afectar de alguna manera la experiencia del cliente, el cual va a hacer un reclamo y se deberá responder a dicha queja. Resolver éstas y corregir todos los errores que volvieron al servicio insatisfactorio toma una gran cantidad de tiempo. Y, aunque el servicio al cliente básico está automatizado, eventualmente se tendrá que gastar mano de obra para resolverlo manualmente, por lo que modelar una manera óptima del proceso de asignación de paquetes y envíos, podría potencialmente ahorrar horas y parte del presupuesto.

Lo anterior va en línea con los principios de la Teoría de Six Sigma, los cuales incluyen: mejorar la satisfacción al cliente, reducir el tiempo de ciclo y reducir los defectos. "Las mejoras en estas áreas normalmente representan grandes ahorros de costos para los negocios, así como oportunidades para retener a los clientes, capturar nuevos mercados y construirse una reputación de empresa excelente en productos y servicios" (Mejía y Álvarez, 2012).

Además, la mala gestión de los envíos afecta aspectos aparte de las bodegas, debido a que una vez que los vehículos de mayor tamaño están en el camino, ocupan una cantidad de espacio considerable en la carretera y cuando hay varios de estos afecta al tráfico tanto comercial como civil. Es óptimo para distancias mas reducidas el uso de la bicicleta, tanto en relación al tiempo necesario, como a las emisiones que podría generar el automóvil en ese lapso de tiempo. Junto a estos problemas de gestión mencionados y a la sustentabilidad, es importante mencionar que cada trabajador debe tener un horario de colación, por ley, siendo este un tiempo no menor a 30 minutos según el artículo 34 del código del trabajo .

Pensando sustentablemente se concluye que se deberían cuidar las autopistas para que duren el mayor tiempo posible sin tener que ser reparadas, sin embargo el exceso de vehículos grandes hace que la duración de las autopistas sea menor. Evaluando el efecto de un camión en los caminos, "Cuando los vehículos pesados frenan, la transferencia de carga a los ejes delanteros puede resultar en un aumento localizado daño por fatiga del asfalto en un 100 % a 1000 % en pavimento flexible." y "Las maniobras en curva normalmente pueden aumentar la carga en un lado de un eje en un 20 % en ruedas individuales, lo que resulta en un aumento del 100 % en la fatiga y un aumento del 20 % en la formación de roderas." (Gillespie et al., 1993). Las autopistas en mal estado puede ser un problema para los mismos vehículos de la empresa, demorando el trayecto y arriesgando accidentes.

Hay distintos métodos de envío, y entre ellos están los express, aunque estos sean preferidos por algunos clientes, ofrecerlos indiscriminadamente ponen en conflicto las ganancias a corto plazo con los intereses ecológicos y el presupuesto diario. Podría ocurrir casos en que los vehículos no están en su máxima capacidad pero aún así van a salir. No sólo sacrifica el ámbito sustentable, sino que también uno económico, debido a que enviar vehículos que no estén a capacidad máxima significa que se tendrían que hacer mas viajes, y el presupuesto duraría menos de lo estimado, en el peor de los casos, no sería posible repartir el total de entregas agendadas para ese día. Por ejemplo, en un estudio evaluando las consecuencias ecológicas del crecimiento del sector comercial chino se hicieron estos descubrimientos: "13.7 ($\sigma = 2,2$) Mt de CO₂-equivalente (CO₂e) de emisiones de GHG fueron causados por la logística y el transporte de entregas express en China en 2018, más del 80 % de paquetes de compras en línea y casi 99 % de entregas interurbanas. Estas emisiones de GHG representaron aproximadamente el 7 % de las emisiones totales de GHG de toda la industria logística en China" (Kang et al., 2021). Sería un descubrimiento importante para la empresa encontrar el balance óptimo entre la cantidad de envíos, la frecuencia de uso de cada tipo de automóvil, entre auto, moto, bicicleta y furgoneta, y la cantidad de emisiones de CO₂ evitadas.

1.3. Objetivo

Considerando el contexto descrito, el objetivo del tomador de decisiones, en este supuesto la empresa misma, es mover todos los paquetes de compras online requeridos en el día de la manera más sustentable y eficaz, tomando en cuenta que los usuarios tienen expectativas de cierto tiempo de espera (variable entre empresas) y la mayoría de los negocios buscan hacer una cantidad de ganancias que cubra los costos, sin dejar atrás las restricciones presentes, que están basadas tanto en limitaciones logísticas como la capacidad, disponibilidad de vehículos, de presupuesto y distancia, junto a satisfacer el objetivo, y lograr la disminución de emisiones de CO₂ generadas por los vehículos al realizar el reparto del pedido. Debe existir una variedad de tipos de envíos para darle mayor satisfacción al consumidor, pero se debe tener en cuenta el volumen del pedido y la distancia, ya que de eso dependerá el tipo de vehículo más eficiente, el espacio disponible en cada uno y la emisión de CO₂ que generaría, por lo que los pedidos de mayor volumen deben tener un envío mas caro, para equilibrar el costo de oportunidad comparado con enviar mayor cantidad de paquetes de menor volumen. Además del volumen, hay que tener en cuenta el peso total, incluso si queda espacio libre, no se deben cargar más paquetes cuando se llega al límite máximo de peso. Se espera, en relación a las emisiones generadas por cada tipo de vehículo mencionadas anteriormente, que estas disminuyan considerablemente respetando las restricciones del modelo, pero manteniendo una eficacia óptima.

2. Modelación del Problema

2.1. Resumen

Se plantea un desafío para una ecommerce sobre los sistemas de deliveries diarios. El objetivo es reducir la emisión de gases contaminantes producidos por los vehículos que transportan los productos, donde se minimizará la cantidad de kilogramos de CO₂ producidos por estos. Se busca lograr una mejor toma de decisiones al momento de enviar los productos, donde se consideran los tiempos de entrega de cada medio de transporte disponible, la capacidad de volumen que cada uno de estos es capaz de transportar y el costo de estos transportes, todo esto con el fin de cumplir con un servicio eficiente, económico y amigable con el medio ambiente.

2.2. Supuestos

- Al inicio del día se conocen todos los pedidos que se entregaran y sus parámetros correspondientes.
- Al inicio del día se calculará el presupuesto diario a partir de la distancia total que se recorrerá al repartir los pedidos.
- El periodo de repartos ocurrirá durante las horas del día 6:00 a 20:00.
- Se asume que se deberá cumplir con el reparto de todos los pedidos el mismo día
- Se asume que no habrán mas pedidos de los que la empresa es capaz de repartir en un día
- Se asume que no solamente se debe cumplir con el reparto completo de los productos dentro del mismo día, sino que además antes del término del tiempo deben haber vuelto todos los medios de transporte al punto de partida.
- Se asume que la distancia recorrida desde la bodega al destino del producto es la misma que de vuelta desde el destino a la bodega.
- No se toman pedidos que excedan la capacidad máxima de todos los vehículos disponibles de la empresa.
- Cada conductor de la empresa tiene derecho a horario de colación.
- Cada conductor esta asignado a un vehículo del algún tipo k.

- No se pueden hacer pedidos en un horario que implique que el vehículo de entrega no alcance a volver a las bodegas.
- No se pueden agendar pedidos cercanos al cierre de repartos ($b_i \leq 780$).

2.3. Conjuntos

- K : Tipos de vehículos con los que cuenta la empresa = $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ 1 es moto, 2 es auto, 3 es bicicleta, 4 es furgoneta
- I : Conjunto de pedidos diarios = $i \in \{1, 2, \dots, n\}$
- T : Conjunto de tiempo laboral por día en minutos = $t \in \{1, 2, \dots, 840\}$

2.4. Parámetros

- v_k : Capacidad de volumen de cada vehículo k (m^3)
- d_i : Distancia de recorrido para cada pedido i (m)
- c_k : CO2 emitido por cada metro que recorre el vehículo k (kg/m)
- o_k : Costo de operar cada vehículo k por metro recorrido (\$/m)
- h_i : Volumen total del pedido i (m^3)
- vel_k : Velocidad promedio del vehículo k (m/s)
- n_k : número de vehículos tipo k con los que cuenta la empresa
- p : presupuesto diario asignado (\$)
- b_i : Minuto laboral para el cual se solicitó la entrega del pedido i

2.5. Variables

- $X_{ikt} = \begin{cases} 1 & \text{si se asigna el pedido } i \text{ al vehículo de tipo } k \text{ en el periodo de tiempo } t \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
revisar descripción
- $Y_{kt} = \begin{cases} 1 & \text{si vehículo del tipo } k \text{ está disponible en el periodo de tiempo } t \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $S_{kt} = \begin{cases} 1 & \text{si el conductor del vehículo del tipo } k \text{ esta en descanso en el tiempo } t \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$

2.6. Restricciones

1. No se pueden utilizar mas vehículos de los que tiene disponible la empresa al mismo tiempo:

$$\sum_{i \in I} X_{ikt} \leq n_k \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

2. Se debe asignar solo un tipo de vehículo para cada pedido:

$$\sum_{k \in K} X_{ikt} \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall i \in I$$

3. Volumen del pedido no puede superar la capacidad del vehículo:

$$h_i \leq \sum_{k \in K} X_{ikt} \cdot v_k \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

4. No se puede superar el presupuesto diario:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{ikt} \cdot o_k \cdot d_i \leq p$$

5. Un repartidor no puede repartir un producto al cual no alcance a volver a tiempo:

$$X_{ikt} \cdot \left(\frac{1}{60} \cdot \frac{d_i}{vel_k} \right) \leq 840 - b_i \quad \forall k \in K, \forall t \in T, \forall i \in I$$

6. Para poder asignar el tipo de vehículo k al pedido i en el tiempo t , este vehículo debe estar disponible:

$$X_{ikt} \leq Y_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T, \forall i \in I$$

7. Cada pedido i debe ser entregado en un rango de 2 horas (1 antes y 1 después) a partir de la hora solicitada (b_i):

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^{max(b_i-60,0)} X_{ikt} &\leq \frac{d_i}{60 \cdot vel_k} & \forall k \in K, \forall i \in I \\ \sum_{t=bi+60}^{840} X_{ikt} &\leq \frac{d_i}{60 \cdot vel_k} & \forall k \in K, \forall i \in I \\ \sum_{t=0}^{840} X_{ikt} &= \frac{d_i \cdot 2}{60 \cdot vel_k} & \forall k \in K, \forall i \in I \end{aligned}$$

8. El conductor de cada vehículo k debe descansar mínimo 45 minutos diarios:

$$\sum_{t \in T} S_{kt} = 45 \quad \forall k \in K$$

9. Solo un tipo de vehículo k puede estar descansando a la vez:

$$\sum_{k \in K} S_{kt} \leq 1 \quad \forall t \in T$$

10. Si el conductor del vehículo k está en descanso, no es posible asignarle un pedido:

$$S_{kt} + Y_{kt} \leq 1 \quad \forall t \in T, \forall k \in K$$

2.6.1. Naturaleza de las Variables

$$X_{ikt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T$$

$$Y_{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

$$S_{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall t \in T$$

2.7. Función Objetivo

Minimizar emisiones de CO2 en el transporte

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{ikt} \cdot c_k \cdot 2d_i$$

3. Definición de Datos

- o_k : Costo de operar cada vehículo k por metro recorrido (\$/m).

Este costo se calculó con el valor promedio entre las bencineras del país hasta el día 20 octubre del año actual (1364.4 (\$/L)) y el rendimiento de cada tipo de vehículos mencionado en las cadenas de automotoras vigentes en el mercado.

Para cada tipo de vehículo se encontró su rendimiento aproximado en litros consumidos por metro recorrido para multiplicarlo por el costo promedio de un litro de bencina.

Para las furgonetas, se tomo una muestra de 11 opciones del mercado, y se calculó el promedio entre todas ellas.

Para los autos livianos se recuperó el consumo promedio de los autos de delivery recientemente registrados

Para la moto se halló el rendimiento aproximado de motos de motor de tamaño 150cc, las motos de delivery más comunes

Los costos operacionales finales: Furgoneta: 0.14534051844 pesos por metro Auto: 0.0988392 pesos por metro Moto: 0.041118 pesos por metro Bicicleta: 0 pesos por metro

- c_k : CO2 emitido por cada metro que recorre el vehículo k . (citas de contexto. auto grande 0.000121 kg/m, auto chico 0.000094 kg/m, moto 0.000167 kg/m)

- v_k : Capacidad de volumen de cada vehículo k (m³).

Para este parámetro se utilizará como referencia la capacidad del maletero promedio de un auto pequeño (0,3 m³) y una furgoneta (3,3m³) . En el caso de las bicicletas y motos consideramos como la capacidad de volumen a la capacidad de la mochila para delivery (0,07 m³). Las capacidades fueron establecidas acorde a las características mencionadas en el mercado.

- d_i : Distancia de recorrido para cada pedido i (m).

Para la definición de este parámetro se definió una ubicación en el centro de la ciudad de Santiago, la cual corresponde a la bodega de la empresa y se definieron distancias al azar entre 0 y 15km, rango que abarca aproximadamente en radio de la ciudad.

- h_i : Volumen total del pedido i (m³)

Para este parámetro se utilizará un random entre 0 y la capacidad del vehículo más grande.

- vel_k : Velocidad promedio del vehículo k (m/s)

Para las furgonetas y los autos, se encontró que su velocidad promedio en Santiago es de 25km/h o bien, 6.94m/s.

Según el hallazgo anterior, junto con el dato de que las motocicletas se mueven en promedio un 10 % más rápido en ciudades, Concluimos una velocidad promedio de 7.634m/s.

Para las bicicletas, nos basamos en un estudio de la Organización No Chat , donde se observo una velocidad media de 21.3km/h entre cuatro zonas de analisis. Esto se traduce a 5.91667 m/s.

Para obtener este parámetro se considerará las capacidades de cada tipo de vehículo, según un modelo estándar para cada tipo k (gama media), se tomará en cuenta que la velocidad máxima es 50 (zona urbana).

- n_k : número de vehículos tipo k con los que cuenta la empresa
Este parámetro se definió arbitrariamente en base a los objetivos de alcance que se definieron para la empresa.
- p : presupuesto diario asignado (\$)
Se definió un presupuesto lo suficientemente grande como para cubrir 100 pedidos diarios.
- b_i : Minuto laboral para el cual se solicitó la entrega del pedido i .
Este dato se obtiene mediante un random entre 0 y 780.

4. Resolución del problema utilizando software

Se traspasó el modelo con las correcciones de la entrega anterior a Gurobi, pero no se pudo resolver ya que Gurobi entregó

5. Validación del Resultado

A partir de la ejecución del modelo en Python- Gurobi, no logramos obtener una solución factible al modelo planteado. Nos dimos cuenta al implementarlo que nos arrojaba que el modelo es inviable. Al analizar nuevamente nuestras restricciones y variables, y revisando el modelo en profundidad, es posible que el problema radique en que las restricciones no son suficientes para acotar el modelo o bien que alguna de estas no esté definidas correctamente, con posibles errores conceptuales, descartando errores al momento de implementarlo en Python-Gurobi.

Si bien la implementación del proyecto no arroja el resultado esperado, considerando los errores posibles y que con la corrección de estos, arrojaría el valor esperado para el modelo planteado, es importante destacar que aun así el proyecto tiene un potencial significativo en base a la función objetivo del proyecto.

6. Bibliografía

1. BlackSip(2022). Reporte de industria: El e Commerce en Chile.
2. Cámara de comercio de Santiago (2023). eCommerce Day Santiago 2023: CCS proyecta crecimiento de 5 % para ventas online este año.
3. Faundez, D (2023). ¿Qué está pasando con el e commerce en Chile? Clase ejecutiva UC.
4. Gillespie, T. Karamihas, S. Cebon, D. Sayers, M. Nasim, M. Hansen, W. Ehsan, N (1993). EFFECTS OF HEAVY VEHICLE CHARACTERISTICS ON PAVEMENT RESPONSE AND PERFORMANCE.
5. Ipsos (2022), Informe Día de la Tierra 2022
6. Kang, P., Song, G., Xu, M. et al. Low-carbon pathways for the booming express delivery sector in China. Nat Commun 12, 450 (2021)
7. Mena Roa, M (2022). Emisiones de CO2 ¿Cuánto contamina tu automóvil? Statista
8. Universidad Nacional de Colombia (2017). Motos, las que mas producen emisiones de CO2.

9. Alburquenque, C. (2022). DÍA NACIONAL SIN AUTO — ¿Sabe usted lo que contamina su vehículo? Bencina y diésel, ambos bajo la lupa. Universidad Andres Bello.
10. Ministerio del medio ambiente (2015). Autos con 10 años de uso contaminan 20 veces más que uno nuevo
11. Mejía, L. Álvarez, S. (2012). Modelo de direccion para la aplicación de Six Sigma
12. Código del trabajo. Art.34 (1996)
13. La voz (2021). Motos: una solución de movilidad que crece en la ciudad.
14. Walton, D. Buchanan, J (2012). Motorcycle and scooter speeds approaching urban intersections.
15. La Tercera (2015). Tiempos de desplazamiento en calles de Santiago suben un 12,5 % en cuatro años.
16. Emol (2019). Estudio detecta que la mitad de los ciclistas de Santiago circula a una velocidad sobre 20 kilómetros por hora.
17. GlobalPetrolPrices (2023). Chile precios de la gasolina.