

# Técnicas de optimización aplicadas a logísticas en gestión sustentable de residuos.

Master's in Management & Analytics



## Resumen ejecutivo

*En el presente trabajo se analiza la operativa logística de Abito SRL, una empresa dedicada a la gestión integral y sustentable de residuos empresariales en Montevideo, Uruguay. El crecimiento del sector se ve amparado por un marco normativo implementado a nivel nacional que obliga a las empresas a disponer de sus residuos.*

*Por medio del uso de métodos de optimización de ruteo aplicando heurísticas y la reducción de los tiempos de servicio se logran mejorar los recorridos de la operativa relevada en un 20%. Además, se desarrolla una herramienta como prueba de concepto para que la empresa pueda apreciar los beneficios de contar con un proceso automatizado para el armado de los recorridos diarios. Se introduce y analiza el concepto de regularidad de servicio multi-período.*

Diego Voulminot

Tutor: Juan José Miranda Bront

Junio 2020

# Optimization techniques applied to logistics in sustainable residue's management.

Master's in Management & Analytics



## Abstract

*This paper analyzes the logistics operations of Abito SRL, a company dedicated to the sustainable management of business' waste in Montevideo, Uruguay. The growth of this sector is supported by a regulatory framework implemented at a national level.*

*By applying routing optimization methods using heuristics and reducing service times, it was possible to improve by 20% the routes of the surveyed operation. In addition, a proof of concept tool was developed so that the company could appreciate the benefits of having an automated process for the assembly of daily routes. The benefits of multi-period service regularity were introduced and analyzed.*

Diego Voulminot

Tutor: Juan José Miranda Bront

June 2020

## Contenido

I - Motivación .....	7
II - Descripción del problema .....	11
Introducción al problema.....	11
Desarrollo del problema.....	12
Enfoque del problema.....	15
III - Contexto actual .....	17
Armado del cronograma.....	17
Operativa del camión .....	19
IV - Análisis de datos de operaciones.....	22
Líneas base .....	22
Análisis de las líneas base .....	23
Análisis de los recorridos de las líneas base .....	25
V - Modelado y técnica de resolución .....	27
Modelado .....	27
Técnica de resolución .....	27
VI - Modelo clásico de TSP .....	29
Problema .....	29
Modelo matemático del TSP .....	29
Optimización de hiper-parámetros .....	31
Resultados obtenidos .....	32
VII - Modelo de TSPTW.....	36
Problema .....	36
Modelo matemático del TSPTW.....	36
Optimización de hiper-parámetros .....	38
Resultados obtenidos .....	40
VIII - Modelo de TSPTW con heurística en dos fases.....	45
Problema .....	45
Heurística: preprocessamiento de datos.....	46
Optimización de hiper-parámetros .....	47
Escalabilidad del estado actual (1 camión) .....	49
IX - Problema multi-período y consistencia en el servicio .....	52
Problema .....	52
Modelo matemático del GenConVRP.....	52

Resultados obtenidos .....	54
X - Propuesta de solución.....	57
Escalabilidad de la herramienta propuesta.....	59
XI - Resultados.....	62
Análisis de resultados .....	62
¿Puede una herramienta de optimización contribuir a la operativa actual? .....	69
XII - Conclusiones y trabajo a futuro.....	71
XIII - Bibliografía.....	73
XIV - Anexo .....	74
Metodología de trabajo .....	74
Ingesta de datos .....	74
Datos de los clientes .....	75
Matriz de distancias/tiempos .....	75
Línea base .....	76
Tablas de consistencia de servicio.....	77
Simulaciones .....	79
La propuesta.....	80

## Tabla de ilustraciones

Ilustración 1: Campaña publicitaria conjunta .....	11
Ilustración 2: Planilla utilizada para el armado de los cronogramas.....	17
Ilustración 3: Imagen de un recorrido diario cargado en Google Maps.....	18
Ilustración 4: compartimentos del camión recolector.....	20
Ilustración 5: Mapa con los clientes existentes en octubre 2019 (LB1). El ‘depósito’ figura en amarillo. ....	22
Ilustración 6: Mapa con los clientes existentes en marzo 2020 (LB2). El depósito figura en rojo.....	23
Ilustración 7: Gráfico de cantidad de clientes por día de la semana.....	24
Ilustración 8: Clientes por frecuencia semanal .....	24
Ilustración 9: Clúster de los clientes de la LB1.....	24
Ilustración 10: Clúster de los clientes de la LB2. ....	25
Ilustración 11: Comparativa entre las distancias diarias de las LB. ....	26
Ilustración 12: Diagrama conceptual de la herramienta.....	28
Ilustración 13: Detalle del depósito de la LB1.....	29
Ilustración 14: Comparativa de los resultados de las distintas configuraciones (TSP).....	32
Ilustración 15: Resultados del TSP para la LB1. ....	33
Ilustración 16: Recorrido del lunes para la LB1. TSP vs benchmark .....	33
Ilustración 17: Resultados del TSP para la LB2. ....	34
Ilustración 18: Validación del resultado: TSP LB2. ....	35
Ilustración 19: Comparativa de los resultados de las distintas configuraciones (TSPTW)....	39
Ilustración 20: Resultados del TSPTW para la LB1.....	40

Ilustración 21: Comparativa entre un recorrido del TSP y el TSPTW de la LB1.....	41
Ilustración 22: Comparativa entre los recorridos diarios del TSPTW y el benchmark para la LB2 .....	43
Ilustración 23: Representación de la recta divisoria del plano para la agregación de clientes por zona.....	46
Ilustración 24: Gráfico de un recorrido testeado con TSPTW con heurística en dos fases y parada al mediodía. ....	49
Ilustración 25: Gráfico con los resultados de las instancias simuladas. ....	50
Ilustración 26: Variación del porcentaje de instancias resueltas en función de la cantidad de servicios.....	50
Ilustración 27: Variación del porcentaje de las instancias resueltas con infinito tiempo activo del camión. ....	51
Ilustración 28: Gráficos con los resultados de las variantes permitidas por la propuesta....	58
Ilustración 29: Gráficos con los resultados de un 'nuevo servicio' con diferentes amplitudes. ....	59
Ilustración 30: Gráfico con el resultado de un VRPTW con 3 camiones activos y 68 clientes.	59
Ilustración 31: Gráficos para validar la escalabilidad de la propuesta.....	60
Ilustración 32: Solución con preprocesamiento de datos por región.....	63
Ilustración 33: Gráfico de los recorridos totales y parciales de la instancia 3. ....	65
Ilustración 34: Comparativa entre los recorridos diarios del TSP y el benchmark para la LB2. ....	66
Ilustración 35: Comparativa entre el porcentaje de instancias resueltas con tiempos servicios de 4 y 5 minutos.....	68
Ilustración 36: Tiempos totales de recorridos testeados entre 42 y 48 servicios.....	68
Ilustración 37: Diagrama de los módulos de la herramienta .....	74
Ilustración 38: Ejemplos de unos de los recorridos simulados.....	80
Ilustración 39: Captura de pantalla: parámetros de la propuesta.....	80
Ilustración 40: Output de la propuesta.....	81
Ilustración 41: Ejemplo del resultado final del gráfico del recorrido. ....	81
Ilustración 42: Detalle de un cliente en el mapa. ....	81

## Tablas:

Tabla 1: Comparativa entre las características de las líneas base. ....	23
Tabla 2: Distancias de los recorridos diarios en cada una de las líneas base. ....	25
Tabla 3: Resultados de la optimización de hiper-parámetros. ....	31
Tabla 4: Comparativa de las distancias del TSP contra los del benchmark (LB1). ....	33
Tabla 5: Comparativa de las distancias del TSP contra los del benchmark (LB2). ....	35
Tabla 6: Resultados de la optimización de hiper-parámetros del TSPTW. ....	39
Tabla 7: Comparativa de las distancias del TSPTW contra los del benchmark (LB1).....	41
Tabla 8: Tiempo idle del camión para la LB1. ....	41
Tabla 9: Tiempos totales del TSPTW para la LB2.....	41
Tabla 10: Comparativa entre el TSP y el TSPTW para la LB1. (En minutos) .....	42
Tabla 11: Tiempos de recorrido (en minutos) del TSPTW y el benchmark para la LB2.....	43
Tabla 12: Tiempo idle del TSPTW y el benchmark para la LB2.....	44
Tabla 13: Tiempos totales (en minutos) del TSPTW y el benchmark para la LB2. ....	44
Tabla 14: Comparativa entre los tiempos totales (en minutos) del TSP contra el TSPTW. (LB2).....	44
Tabla 15: Resultados de la optimización de hiper-parámetros del TSPTW con heurística en dos fases. ....	48
Tabla 16: Análisis de los rangos de visita (en minutos) para la LB1. ....	55
Tabla 17: Análisis de los rangos de visita (en minutos) para la LB2. ....	55
Tabla 18: Resultados de la optimización de hiper-parámetros de la propuesta. ....	61
Tabla 19: Distancia promedio entre clientes para la LB2.....	62
Tabla 20: Validando la herramienta al dividir la instancia en partes menores.....	63
Tabla 21: Frecuencia semanal de servicios. ....	76
Tabla 22: Detalle de las ventanas de tiempo de la LB1.....	76
Tabla 23: Horario y rangos de vista de la LB1, obtenidos del TSPTW. ....	77
Tabla 24: Horario y rangos de vista de la LB2, obtenidos del TSPTW. ....	78

## I - Motivación

ABITO es una empresa de economía circular, que gestiona de forma sustentable y con trazabilidad los residuos (compostables, reciclables y basura) de empresas en Uruguay. La empresa inició sus operaciones a finales del 2018 y hoy se posiciona como referente en el segmento específico del mercado.

ABITO: Acciones sustentables por el Bien de TODOS, cuenta con una filosofía enfocada en la sostenibilidad ambiental. El core del negocio está en la creación de una cultura de conciencia ambiental que logran a través de capacitaciones y en el desarrollo de actividades de responsabilidad social corporativa (RSC) junto con sus clientes.

El crecimiento de la empresa viene acompañado de un marco regulatorio a nivel nacional, como por ejemplo el decreto 182/2013<sup>1</sup>, que establece que toda empresa debe gestionar sus propios residuos. Diariamente, en Montevideo se recolectan unas 1.700 toneladas de residuos: 1.200 toneladas corresponden a residuos domiciliarios y 500 toneladas a residuos generados en empresas. Únicamente unas 20 toneladas diarias son recicladas, lo que representa cerca del 1% del total de residuos generados. Según los estudios realizados por Intendencia de Montevideo (IMM), la cantidad de residuos con potencial reciclabl es del orden del 30%.<sup>2</sup> Esto muestra que aún hay un largo camino por recorrer y muchas oportunidades para que las empresas se alineen con esta política medioambiental impulsada desde el gobierno nacional.

Dentro de las políticas impulsadas por el gobierno se encuentra la Ley 19.829<sup>3</sup> referida a la Gestión Integral de Residuos. El objeto de esta ley es la “la protección del ambiente y la promoción de un modelo de desarrollo sostenible, mediante la prevención y reducción de los impactos negativos de todas las etapas de gestión de los residuos.”<sup>4</sup> Desde el Ministerio del Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, el exdirector Alejandro Nario afirma que, “Se estableció un mecanismo de tributo ambiental a las empresas que opten por este tipo de insumos, con el objetivo de desestimular su uso y favorecer los materiales más amigables con el ambiente. En el caso de los envases lo que queremos es promover la retornabilidad y que sean más amigables con el ambiente”.<sup>5</sup>

En resumidas cuentas, la Ley busca desestimular el uso de los embalajes y plásticos de un sólo uso por medio del gravado del impuesto específico (IMESI) a la vez que otorga un crédito fiscal a quienes fabriquen o importen bienes que utilicen para su comercialización envases retornables.

Sumado a esto, la conciencia por el cuidado medioambiental lleva a que cada vez más empresas se comprometan a desarrollar sus actividades de forma más sustentable. Hay quienes consideran que muchas de las iniciativas por parte de las empresas se deben más a

<sup>1</sup> Sacado de [https://www.mvotma.gub.uy/decretos-ministerio/item/download/10075\\_4522af71cf17fdf25e27332fc91a032](https://www.mvotma.gub.uy/decretos-ministerio/item/download/10075_4522af71cf17fdf25e27332fc91a032) el 13/5/20,

<sup>2</sup> Sacado de <https://www.elpais.com.uy/amp/informacion/sociedad/montevideo-reciclan-toneladas-basura-levantan-dia.html> el 12/5/20.

<sup>3</sup> Sacado de [https://medios.presidencia.gub.uy/legal/2019/leyes/09/cons\\_min\\_882.pdf](https://medios.presidencia.gub.uy/legal/2019/leyes/09/cons_min_882.pdf) el 12/5/20.

<sup>4</sup> Sacado de <https://www2.deloitte.com/uy/es/pages/tax/articles/Gestion-Integral-de-Residuos.html#> el 12/5/20.

<sup>5</sup> Sacado de <https://www.mvotma.gub.uy/novedades/noticias/item/10013248-uruguay-ya-aprobo-la-ley-de-gestion-integral-de-residuos> el 12/5/20.

la presión de la opinión pública que al interés genuino de velar por el cuidado ambiental. Sea cual sea el motivo, lo importante es que los cambios se están empezando a dar. Debido a las redes sociales y a los medios de comunicación, la opinión pública puede hacerse escuchar cada vez más, y las empresas son conscientes de ello. Para citar el encabezado de una noticia de diario El País (Uruguay) del 11 de mayo del 2020, “No hay nada más poderoso que la opinión de la gente, como consumidores y votantes; son los que al final del día deciden los cambios”<sup>6</sup>.

Cabe mencionar que lo que para muchos de los lectores es considerado residuo o desperdicio, en realidad está compuesto por varios elementos que pueden tener una segunda vida. En este estudio se entiende por residuo al conjunto de las siguientes tres categorías:

- Material recicitable: es todo aquello que generamos pero que, aunque ya lo hayamos utilizado, todavía puede ser reutilizado o reciclado. Ejemplos de materiales reciclables son el vidrio, el papel, el aluminio, el plástico recicitable, etc.
- Material orgánico: todo desecho de origen biológico que alguna vez estuvo vivo o ha sido parte de un ser vivo.
- Basura: es todo aquello que ya no tiene utilidad y tampoco puede reutilizarse ni reciclarse.

Cada vez que se tira material orgánico en la basura, este termina en el vertedero municipal, ocupando espacio y sufriendo una descomposición poco eficiente. Mediante la gestión mecanizada y controlada de ABITO, ellos logran transformar este material orgánico en compost (sustrato orgánico) que sirve como nutriente para las plantas.

Basados en los números publicados por ABITO, la cantidad de residuos que terminan en los vertederos municipales puede ser reducida hasta en un 70% con la correcta gestión de los mismos. Los efectos positivos de estas acciones son cuantiosos. El cambio cultural empieza por la educación y una buena comunicación.

Vistas las imposiciones de la nueva normativa respecto de la gestión integral de los residuos generados, las empresas tienen diferentes opciones para encararla. Una es disponer de los residuos de la forma más económica posible, sin mayores contratiempos. Otra, es aprovechar esta oportunidad para ser impulsores del cambio, involucrar y concientizar al personal y sumarse a la gestión responsable de los residuos. ABITO opera en esta última modalidad.

Dadas las características anteriores, las empresas que son más favorables a gestionar los residuos (ya sea en las oficinas o en los eventos especiales) de forma sustentable suelen ser las multinacionales, los organismos estatales y paraestatales, empresas locales con conciencia ambiental y las instituciones educativas. Por eventos especiales se entiende aquellos eventos puntuales que realizan las empresas, ya sea fiestas de fin de año, eventos corporativos, eventos y stands de marketing, campañas publicitarias en espacios públicos. Todos ellos suelen generar gran cantidad de residuos, y el gestionarlos adecuadamente ayuda a posicionar a la marca/empresa como amigable con el medio ambiente.

---

<sup>6</sup> Sacado de <https://www.elpais.com.uy/economia-y-mercado/pandemia-impacto-conciencia-ambiental.html> el 12/5/20

La Ley 19.829 fue aprobada en el senado a mediados del 2019. Esto significa que son cientos y tal vez miles, las empresas que van a querer cambiar la forma de gestionar los recursos y así aprovechar para dejar su marca en la reducción del *footprint* ambiental. El director de ABITO considera que la empresa tiene el mercado potencial para duplicar la recolección cada 6 meses por los próximos 4 años.

Para poder lograr el potencial de crecimiento previsto, la empresa tiene que resolver la manera de escalar eficientemente en el área logística. Crecer en capacidad logística es intensivo en capital, ya que los camiones son herramientas caras que requieren de un importante costo operativo y de mantenimiento.

Antes de encarar esta problemática, es necesario saber que existen modelos de optimización y técnicas de resolución que pueden ser utilizados para determinar rutas entre clientes, idealmente al menor costo, distancia, o tiempo.

Una definición escrita en lenguaje cotidiano para la familia de Problemas de Ruteo de Vehículos [1] (VRP por sus siglas en inglés) es la siguiente:

Dado un conjunto de órdenes a transportar y una flota de vehículos, se busca determinar el subconjunto de vehículos que puede transportar todas (o algunas) de las órdenes al menor costo posible. En particular, se requiere identificar qué vehículo cumple con qué orden de transporte y en qué secuencia de tal modo que todas las rutas sean factibles.

Utilizando softwares de optimización para el ruteo de vehículos en aplicaciones de la vida real se han alcanzado mejoras en la automatización y estandarización en el proceso de planeamiento logístico. Además, los resultados obtenidos logran ahorros sustanciales en términos de costos operacionales. Un conocido caso de éxito fue el uso de un software desarrollado *in-house* por UPS (ORION) para la asignación de las rutas para sus camiones de entregas de paquetes. Luego de 10 años de desarrollo, con un costo estimado de US\$295 millones se espera que ORION genere ahorros de entre 300 y 400 millones de dólares americanos [2].

Dentro de la familia de VRPs se pueden destacar varios modelos para resolver problemas con diferentes restricciones y objetivos. Entre los más destacados se encuentra el ruteo de vehículos con capacidades (CVRP), por sus siglas en inglés. En estos modelos los vehículos y los clientes (nodos) cuentan con una capacidad. Para el caso de los clientes la capacidad que demandan (o ofertan) puede ser constante, variable o estocástica. Por otra parte, está el ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW). En este modelo los clientes tienen restricciones de tiempos en los cuales pueden ser servidos. El período en el cual los clientes pueden recibir al camión se denomina ventana de tiempo (Time Windows por sus siglas en inglés).

Además de estos dos modelos genéricos existe un gran número de variantes según el problema en cuestión. Una de estas variaciones puede ser la forma en que se presenta la información. En los ruteos dinámicos (también conocidos como *online*), la información sobre las condiciones del sistema se conoce durante la operativa. Por otro lado, tenemos los ruteos estocásticos, donde los eventos suceden según una distribución de probabilidad. Respecto a las órdenes a transportarse estas pueden ser de entrega, levantada o mixta. Las cantidades a ser transportadas pueden ser determinísticas o estocásticas. La distribución puede ser de

un único depósito a varios clientes (*one-to-many*). En problemas de distribución puerta a puerta pueden ser de varios clientes a varios otros clientes (*many-to-many*). Respecto de las visitas, estas pueden ser únicas, a cada cliente se debe pasar una y solo una vez, o bien pueden ser visitas múltiples mirando un horizonte de tiempo mayor. Por ejemplo, dado un conjunto de clientes, algunos deben ser visitados 2 veces por semana y otros 3. Se debe buscar la mejor combinación de clientes asignados a cada día para que se cumplan las restricciones de visitas por semana. [3]

Una versión de los modelos mencionados es el Problema del Viajante de Comercio (TSP). Este es un caso particular del clásico VRP donde la cantidad de vehículos es igual a 1 (uno). Aun así, estos son problemas difíciles, para los cuales no hay buenos algoritmos exactos para el caso general.

Para resolver problemas difíciles pueden utilizarse heurísticas, con el objetivo de mantener los tiempos de resolución en valores aceptables a la vez que se intenta llegar a la mejor solución. Con el uso de las heurísticas no se puede garantizar que la solución es óptima. La definición de heurística según la RAE es, “técnica de la investigación y el descubrimiento”. Por tal motivo, es buena práctica probar distintos métodos de resolución para ver cuál algoritmo, búsqueda de una primera solución y heurística de optimización, da la mejor solución para un problema dado. En este estudio se usaron unas librerías que contaban con heurísticas constructivas, operadores de búsqueda local y metaheurísticas. El detalle de estas se menciona más adelante.<sup>7</sup>

En el presente estudio se encara el problema desde diferentes puntos de vista. Para cada problema planteado se usa el modelo que lo representa mejor. Los modelos usados son; TSP, TSPTW y una versión del TSP con múltiples ventanas de tiempos y una heurística de preprocesamiento (agrupamiento) de datos ad-hoc.

---

<sup>7</sup> Sacado de [https://developers.google.com/optimization/routing/routing\\_options](https://developers.google.com/optimization/routing/routing_options) el 13/5/20.

## II - Descripción del problema

### Introducción al problema

Como la mayoría de las empresas nuevas que están creciendo, ABITO padece de una serie de contratiempos a la hora de dimensionar sus operaciones. Cuenta con un equipo sólido de ventas y marketing, un equipo de diseño industrial y un equipo de logística.

Tanto el equipo de diseño industrial como el de marketing suelen trabajar en conjunto con los clientes para definir el diseño personalizado de los recipientes y la cartelería necesaria para la correcta disposición de los residuos. El equipo de marketing, además de la creación de contenido para las redes sociales propias, trabaja en conjunto con los clientes que hacen eventos especiales para potenciar la llegada al público. Un ejemplo de esta sinergia se puede apreciar en la exitosa campaña de verano del Banco Santander convocando a la limpieza de una de las más reconocidas playas de Montevideo.



Ilustración 1: Campaña publicitaria conjunta

Respecto al equipo de logística, nos enfocaremos en una de las actividades que realiza: el planeamiento de las rutas del recorrido diario del camión.

Considerando que semana a semana nuevos clientes se suman a la innovadora propuesta de ABITO, las tareas de coordinación y gestión de los recorridos del camión se fueron complejizando. Esto, además de demandar más horas del personal a esta tarea, lleva a que el camión trabaje más exigido e incrementa la comunicación necesaria para coordinar con los clientes. Además, fallar en el cronograma tiene un impacto negativo en la satisfacción de los clientes porque los retiros se realizan fuera de las horas pautadas.

Durante el primer año de gestión, la capacidad del camión recolector era lo suficientemente grande (tenía mayor capacidad que demanda) como para no oficiar de restricción activa al momento de definir los recorridos. Además, contaban con holgura en el tiempo, ya que podían realizar todo el recorrido en media jornada laboral.

A medida que el número de clientes fue aumentando, así como también los eventos puntuales que requieren de los servicios del camión, las tareas de coordinación de los recorridos se fueron volviendo más complicadas:

- La utilización diaria del camión es cada vez mayor.
- Los costos logísticos de la operativa aumentan mes a mes.
- El armado del cronograma requiere de varias horas hombre. Incluir los nuevos clientes y los eventos especiales, hacen que esta tarea tenga que ser repetida semanalmente.
- Mismos clientes tienen diferentes horarios de recolección los distintos días.

Considerando el ritmo de crecimiento, es conservador suponer que para fines del 2020 estarían necesitando un segundo camión. Esto implicaría una considerable inyección de capital y un incremento en la complejidad del armado de las rutas.

Frente a esta disyuntiva es que se plantea analizar el impacto que podría tener un sistema de optimización de ruteo adaptado a las necesidades puntuales de ABITO.

El presente trabajo busca:

- plantear eventuales mejoras al servicio brindado desde el punto de vista del cliente así como también de la empresa.
- cuantificar el potencial de mejora de la operativa actual.
- proveer de enfoques alternativos para el armado de los recorridos diarios del camión,
- introducir herramientas de optimización que sirvan como prueba de concepto para poner en producción y luego escalar.

Dentro de las preguntas a responder se encuentran las siguientes:

- ¿Cuántos clientes pueden gestionar sin la necesidad de un segundo camión?
- ¿Cuál es el potencial de mejora de los recorridos actuales?
- ¿Cuál sería el ahorro potencial en caso de modificar las restricciones horarias de ciertos clientes?
- ¿Se podrá dilatar la necesidad de un segundo camión con una mejora en la gestión de los recorridos?
- ¿Cuál es el impacto de agregar un nuevo servicio sobre los rangos horarios previstos de los clientes en un recorrido existente?
- ¿Qué impacto tiene reducir el tiempo de servicio de cada cliente en 1 minuto?
- ¿Puede una herramienta de optimización contribuir a la operativa actual?

## Desarrollo del problema

Como fue mencionado en la sección de motivación, la familia de problemas del VRP busca minimizar una función objetivo, cumpliendo con todas las restricciones impuestas. En el caso particular de ABITO se busca contestar la pregunta; “¿cuál es el recorrido más eficiente para pasar a recoger los residuos de todos y cada uno de los clientes del conjunto sin violar ninguna de las ventanas de tiempo?”

Para entrar en contexto, debemos primero definir las partes del problema. Se cuenta con un depósito, con un camión y clientes con ciertas características intrínsecas a cada uno basados

en un horizonte temporal de una semana. Los clientes tienen una ubicación geográfica, una frecuencia semanal de servicios, ventanas de tiempo en los cuales se los puede visitar, un tiempo de servicio y además generan un volumen dado de cada una de las 3 categorías de residuos. El camión cuenta con tres compartimentos (uno para cada categoría de residuos) cada uno con una capacidad máxima de carga, una autonomía de viaje, un tiempo máximo de recorrido (impuesto por el horario laboral del chofer). Las restricciones de carga son mencionadas, pero no se consideran en la formulación de los problemas.

## Depósito

Ubicación: el depósito tiene una ubicación geográfica. En los modelos analizados hay un único depósito activo a la vez. Durante el relevamiento de la operativa, ABITO mudó sus operaciones a un nuevo local que oficia como depósito y oficinas. Por esta razón es que los modelos se comparan contra dos líneas base diferentes. Estas difieren cronológicamente (cantidad de clientes activos) y por la ubicación del depósito.

Inicio y fin de ruta: el depósito oficia como punto de partida y de regreso del recorrido.

Almacenamiento: el depósito actual como almacenamiento temporal de los residuos diarios. Todos los días los residuos recolectados por el camión son descargados en el depósito. Estos luego son enviados a las plantas de reciclaje, disposición final o a compostaje según corresponda.

## Clientes

Ubicación: cada uno de los clientes tiene una ubicación geográfica

Frecuencia semanal de servicios: la frecuencia semanal a contratarse puede ir de 1 a 6 días a la semana. En la medida que se pueda, se busca hacer que los servicios se realicen lo más homogéneamente posible en la semana. Por ejemplo, si se contratan 3 servicios semanales se prefiere que sean los lunes-miércoles-viernes en lugar de lunes-martes-miércoles.

Días permitidos: no todos los clientes pueden recibir al camión recolector todos los días. Los días permitidos, por llamarlos de una manera, son los días para los cuales se puede pasar por el cliente a recolectar. Por ejemplo, varios restaurantes cierran los lunes, por ende, el camión no puede pasar los lunes.

Ventanas de tiempo: las ventanas de tiempo son un input del problema. El cliente define el horario en que puede ser visitado. Estas restricciones son *hard*, no pueden violarse. Las ventanas pueden ser continuas o discontinuas. Por un tema de operativa, la empresa requiere que estas no sean menores a 2 horas. Un ejemplo de las ventanas continuas puede ser de 9:00 a 15:00, o de 9:00 a 18:00. El caso de las ventanas discontinuas se conoce como múltiples ventanas de tiempo. Un ejemplo puede ser de 9 a 12:30 y de 15:30 a 18 horas. Llamaremos ventana prohibida al horario en el que no se puede visitar al cliente comprendido entre las dos ventanas de tiempo. En el ejemplo, la ventana prohibida sería de 12:30 a 15:30. Las ventanas prohibidas suelen ser frecuentes en los clientes que se dedican a la gastronomía, que prefieren que el camión de recolección no pase mientras que los comensales están en el almuerzo. Otro rubro que suele imponer ventanas prohibidas son las

instituciones educativas, para evitar empeorar el congestionamiento en las calles a la hora de ingreso/egreso de los estudiantes.

Tiempo de servicio: el tiempo de servicio está definido por el tiempo que se tarda en realizar la recolección por lo del cliente. La recolección incluye las tareas de estacionar, pesar y documentar la cantidad de cada residuo a ser cargado, así como también la carga sobre el camión. Algunos clientes tienen los tachos/recipientes a mano y prontos a la hora que pasa el camión. Hay otros en los que se tarda más.

Volumen de residuos generados: Cada cliente contrata las categorías de residuos con las que opera. La gran mayoría gestiona las tres categorías, mientras que otros solo contratan los servicios por lo orgánico o reciclable. El volumen generado semanalmente es más o menos estable. A efectos del estudio, no se consideran las capacidades del camión y por consiguiente tampoco los volúmenes generados. La razón detrás de esta decisión fue a posteriori de haber realizado el modelo TSPTW, donde se observó que el tiempo actuaba como limitante antes que la capacidad (asumiendo que el camión tiene capacidad para recolectar 20-25 clientes) en todos los casos estudiados, que son en base a datos reales y con *backtesting*.

No se presentan restricciones de secuencia ni condicionales. Un ejemplo de estas restricciones es de la forma: si recoges al cliente X no puedes recoger al cliente Y.

### Camión

Capacidad: el camión tiene una capacidad máxima de carga (ya sea peso o volumen). El furgón está compartimentado en 3, una sección para cada categoría de residuo. Como fue mencionado anteriormente, la capacidad no se considera como restricción activa en ninguno de los modelos analizados (TSP, TSPTW, TSPTWs).

Autonomía: el camión se asume que tiene autonomía infinita. Esto se justifica por el hecho que el camión parte con el tanque lleno todas las mañanas. La autonomía del camión es de aproximadamente 450 km. Los recorridos diarios actuales se encuentran en el orden de los 50 km. Bajo estas condiciones, se puede omitir la restricción de la autonomía sin pérdida de generalidad.

Tiempo máximo de recorrido: el tiempo máximo de recorrido está definido por el horario laboral del chofer. En este estudio se considera fijo de 9:00 a 18:00 horas.

Parada del mediodía: al momento del relevamiento el camión podía ejecutar todo el recorrido diario en media jornada laboral, ya que los clientes por día no eran más de 15. Sin embargo, previendo a futuro, la operativa contempla que el camión haga un recorrido por la mañana y vuelva al depósito al mediodía. En ese momento, el chofer hace el descanso para el almuerzo y el camión es descargado. Finalizado el horario de almuerzo, el camión sigue con el recorrido de la tarde. Esta es otra razón por la cual la capacidad no es considerada como restricción en los modelos.

Tiempo 'idle': el tiempo 'idle' del camión hace referencia al tiempo que el camión debe esperar adrede, antes de visitar al próximo cliente. Ejemplo, el cliente A es visitado a las 14:30, con un tiempo de servicio de 5 minutos. Esto significa que a las 14:35 el camión ya puede seguir

el recorrido. Sin embargo, el cliente B que se ubica a 15 minutos del cliente A tiene una ventana de tiempo de 15:00 a 18:00 horas. Esto implica que el camión debe esperar 10 minutos, previo a ser atendido por el cliente B.

## Enfoque del problema

Una vez definidos los elementos del problema se puede pasar a discutir del enfoque; día a día o multi-período. El problema en cuestión mira un horizonte de tiempo semanal. El objetivo es optimizar los recorridos diarios, cumpliendo con las frecuencias de visita semanales de los clientes. Se decidió dividir al problema en dos; por un lado, la asignación de los clientes a los días de la semana (cumpliendo con las frecuencias semanales) y por otro la optimización del recorrido (cumpliendo con las ventanas de tiempo). Yendo un paso más allá, se podría optimizar el recorrido de tal forma que el rango de tiempos de visita de cada cliente en los diferentes días de la semana sea regular. El concepto de regularidad en logística es relativamente nuevo. Los beneficios de la regularidad se manifiestan sobre todo en la satisfacción del cliente, elemento clave para las empresas de servicio como ABITO. Si bien el ruteo con ventanas de tiempo consistentes aún no está instalado en las aplicaciones del día a día, la literatura indica que ayuda a simplificar la operativa y reduce la necesidad de coordinación con los clientes.

### Multi-período

Mirando al problema con un horizonte temporal semanal, se observa que primero se debe saber qué cliente se asigna en cuál o cuáles días. Esto corresponde a un problema de asignación, donde cada cliente debe ser asignado a tantos días en la semana (respetando las restricciones de los días permitidos) como el número de frecuencia semanal contratada.

Dentro del horizonte semanal, se pueden definir métricas de regularidad de servicio. Por regularidad de servicio entendemos los rangos de tiempo de en los que el cliente es visitado tomando en cuenta los distintos días. Por ejemplo, si el cliente A es visitado el lunes entre las 10 y las 11am, y los jueves entre las 12 y las 13 horas, el ‘rango de visita semanal’ es de 10 a 13 horas. Cuanto menor sea este valor, mayor regularidad de servicio va a percibir el cliente A. Este rango de visita semanal es distinto al de las ventanas de tiempo. Las ventanas de tiempo son un *input* del problema, mientras que los rangos de visita surgen de analizar los resultados de los recorridos diarios de cada día de la semana. En otras palabras, son un *output* del problema.

El problema multi-período permite iterar entre el problema de asignación y el de resolución del problema de ruteo diario, para cada día de la semana, de tal forma de minimizar el recorrido total o bien minimizar el rango de visita semanal. Por medio de un análisis holístico enfocado en el período semanal, se puede lograr captar el verdadero impacto (de los rangos de visita y los tiempos de recorrido) de agregar un nuevo cliente en las rutas existentes.

### Día a día

Una vez asignados los clientes en los diferentes días de la semana, resta resolver el problema diario de ruteo. Recapitulando, se cuenta con un número dado de clientes, cada uno con sus

características, un camión, un depósito y se busca minimizar la función objetivo (ya sea distancia, tiempo o rango de visita según la definición del problema en cuestión).

Dentro de las métricas a mirar en el enfoque diario se pueden destacar: la distancia total del recorrido, el tiempo total de recorrido, el tiempo del camión en 'idle' y el rango de visita diario.

La desventaja de optimizar los recorridos por día, sin tener presente el horizonte temporal de la semana, es que los rangos de visita semanales pueden quedar muy amplios.

En este estudio, se usarán los clientes asignados a cada día de la semana, respetando las líneas base creadas por la empresa.

### III - Contexto actual

En esta sección se detalla la descripción *as-is* de la operación logística relevada, desde el armado manual del cronograma hasta la operativa del camión.

#### Armado del cronograma

Al momento del relevamiento, el proceso del armado del cronograma es manual.

Se cuenta con una planilla con varias pestañas que oficia como bitácora. En la primera pestaña figuran todos y cada uno de los clientes, con su dirección, la frecuencia semana, los horarios de recolección, la cantidad de *bins* para cada categoría de residuos, entre otros.

LUNES					
CIRCUITO LUNES					
ORDEN	CLIENTE	DIRECCION	COMPOSTABLE	RECICLABLE	BASURA
1	Cliente1	Direccion1	3 tarrinas de 30lts	si	-
2	Cliente2	Direccion2	1 de 88lts y 3 de 30lts	si	-
3	Cliente3	Direccion3	1 wheelie de 120	si	-
4	Cliente4	Direccion4	Bolsas con compostable	si	-
5	Cliente5	Direccion5	3 tarrinas 30lts y 1 de 60lts	si	-
6	Cliente6	Direccion6	1 TARRINA	SI	entre 16:40 y 18:30
7	Cliente7	Direccion7	1 de 60lts	si	-
8	Cliente8	Direccion8	1 tarrina de 60lts	si	-
9	Cliente9	Direccion9	1 wheelie de 120	si	-
10	Cliente10	Direccion10	1 wheelie de 120	si	-
11	Cliente11	Direccion11	1 wheelie de 120	si	-
12	Cliente12	Direccion12	1 wheelie de 120	si	-

Ilustración 2: Planilla utilizada para el armado de los cronogramas

Luego, hay otras 6 pestañas cada una para un día de la semana (por el momento no trabajan los domingos). En ellas figuran los clientes en el orden del recorrido y la bitácora de actividades a realizarse. Cada una de estas planillas era completada con los clientes según la frecuencia semanal de servicios contratados. Un cliente puede contratar de uno a seis servicios de recolección semanal. En función del número de servicios, es que se agrupan en los diferentes días de la semana. Se debe tratar de que los días de servicio queden repartidos uniformemente durante la semana. Por ejemplo, los clientes que tienen tres servicios semanales se asignan a los lunes, miércoles y viernes. Además, se debe evitar que los días de servicio caigan los días que el cliente no trabaja.

Una vez asignados todos los clientes a los días de la semana, se procede a ubicar para cada día de la semana, a cada uno de los clientes del día en cuestión en una versión editable de Google Maps. De ahí, se van uniendo los puntos, intentando minimizar la distancia recorrida. Se consideran aquellos clientes que tienen restricciones horarias para el armado del circuito, siguiendo una suerte de la heurística de *Nearest Neighbour*. Una vez encontrado el recorrido en el mapa, se copia el orden de los clientes del recorrido en la planilla. Este procedimiento se repite para cada día de la semana.



Ilustración 3: Imagen de un recorrido diario cargado en Google Maps.

A partir de la ilustración 3 se pueden apreciar 2 limitaciones de este método. 1) La herramienta de edición de Google Maps permite recorridos de hasta 10 lugares por capa. Por esta razón, los puntos (A-B-C) se repiten, ya que tuvieron que usar dos capas para representar el recorrido. 2) Al estar limitado el número de lugares por capa, omiten incluir el depósito. Por esta razón es que el circuito no está cerrado.

A partir del listado cronológico de los clientes se arma la ruta de viaje en la aplicación Maps del dispositivo móvil del chofer. De ahí en más, este debe seguir las instrucciones paso a paso del recorrido que le va indicando el GPS.

Una vez completada la planilla semanal, se les comunica a los clientes la franja horaria de recolección que le fue asignada para cada día. Para evitar contratiempos se suelen comunicar franjas horarias de entre 1 y 2 horas.

Este procedimiento se realiza desde cero una vez por mes. Semanalmente, se van agregando los nuevos clientes al recorrido, buscando minimizar la distancia. Esto puede resultar en cambios en los rangos horarios de visita de los clientes a lo largo de los meses.

Por normativa, todo vehículo registrado para el transporte de residuos debe estar equipado con una unidad de GPS integrada. El organismo de control tiene acceso a los datos del recorrido, lo que les permite corroborar que los residuos no sean dispuestos en vertederos ilegales, entre otras cosas. Además, el GPS le permite al encargado de logística ubicar al camión en todo instante. Los datos del GPS (ubicación, hora, velocidad, tiempo en reposo) pueden ser descargados desde la web del proveedor del servicio. Al momento estos son

usados únicamente en caso extraordinarios (inconvenientes o reclamo de clientes, demoras excesivas en el recorrido previsto).

## Operativa del camión

Durante el relevamiento se observa que la operativa del camión no está estandarizada. Las tareas definidas para el camión se pueden clasificar en tres grupos:

- recorrido diario de recolección de residuos
- recolección de residuos de eventos especiales
- disposición final de residuos
  - vertedero municipal
  - plantas de reciclaje

### Recorrido diario de recolección de residuos

Si bien apuntan a empezar todos los recorridos a las 9am, como aún tienen capacidad ociosa (tiempo), termina ocurriendo que el camión sale una o dos horas más tarde de lo previsto.

Durante el primer relevamiento, se observó que al camión le alcanzaba el tiempo de completar el recorrido en medio día, sin necesidad de tener que vaciar el contenido para seguir el recorrido.

Se estima que el camión tiene capacidad para 25 clientes aproximadamente, por eso prevén la necesidad de partir el recorrido en 2 partes. Un recorrido en la mañana, el camión va al depósito, donde se descarga el contenido para su posterior clasificación o disposición según corresponda, y luego el camión sigue con el recorrido en la tarde.

Recordar que el camión está compartimentado, contando con tres divisiones físicas: reciclables, orgánicos y residuos. No todos los clientes producen las tres categorías de basura. Estos compartimentos cuentan con cierta flexibilidad a la hora de cargarlos. En ocasiones especiales les ha pasado que una de las divisiones se les completa y terminan colocando los bolsones cerrados en alguno de los otros compartimentos. En caso de



Ilustración 4: compartimentos del camión recolector

considerarse la capacidad en el modelo, estos compartimentos se deberían modelar como restricciones soft.

Se observa que el problema de ruteo de vehículos en cuestión es multi-período, con una frecuencia semanal. Además, se advierte que la técnica de resolución no garantiza (ni toma en cuenta) que haya consistencia entre los horarios de recolección de un mismo cliente para diferentes días de la semana.

Por medio de la utilización de una herramienta de optimización se podría automatizar el proceso de armado de las rutas, reduciendo tiempo del personal, así como también logrando mejores resultados. La herramienta podría resolver instancias futuras con más clientes. Al momento del relevamiento la operativa manual es viable por la relativamente poca cantidad de servicios que deben cumplir. Si pensamos en una operativa con el doble o triple de clientes, la metodología manual no escala.

### Eventos especiales

Es común que contraten los servicios de ABITO para gestionar los residuos de eventos puntuales (fiestas, ferias, stands publicitarios, etc.). Estos eventos especiales se alinean con la política de conciencia ambiental que promueve ABITO. La generación de residuos en estos eventos suele ser cuantiosa ya que muchos de los insumos son descartables. Conscientes de ello, las empresas confían en ABITO para que los gestione correctamente.

La realización de los eventos especiales suele conocerse con una semana de anterioridad. Al ser eventos puntuales, suelen tener ventanas de tiempos más acotadas y estrictas que los clientes regulares.

Incluir estos eventos dentro del recorrido diario previamente asignado termina alterando el orden y las horas del recorrido.

## Disposición final

La disposición final de la basura (aquella parte de los residuos que no puede ser compostada, reciclada, reutilizada) debe hacerse en el vertedero municipal habilitado. El mismo se encuentra en la periferia de la ciudad. Para poder ingresar al predio, el camión debe estar registrado y habilitado para el transporte de residuos. La hora para la disposición debe ser agendada previamente. Para simplificar la coordinación con el vertedero, ABITO va todos los lunes a primera hora. El tiempo de servicio suele ser de 20 minutos. Respecto a la operativa, en la entrada el camión pasa por una balanza, la cual toma el peso total del camión. Asociado a la matrícula, se sabe la tara del camión, por consiguiente, se conoce el peso de la carga que lleva. Sobre este último es que se factura, independientemente de que se descargue.

Diariamente, el camión descarga los residuos en el depósito de ABITO. En este depósito se separa y acumula provisoriamente lo que es basura, recicitable, compostable.

Los que son residuos, se almacenan en una volqueta que se llevan semanalmente con el camión propio al vertedero final. Por la operativa del vertedero, de camino al mismo no conviene pasar por lo de clientes y hacer la recolección de residuos. De regreso del vertedero al depósito, si se puede recolectar.

Los compostables, se almacenan provisoriamente en otra volqueta, cerrada herméticamente, y se llevan 2 veces por semana a compostar. Este traslado se realiza con un camión tercerizado.

Los reciclables, se almacenan en bolsones y son llevados una vez por semana a las plantas clasificadoras y de reciclaje. Estas plantas también suelen estar en las afueras de la ciudad. El traslado hasta las plantas se realiza con el camión propio.

La operativa de traslado de la basura al vertedero final y de los reciclables las plantas de clasificación no fueron incluidos en el alcance del proyecto.

## IV - Análisis de datos de operaciones

### Líneas base

Para poder comparar el potencial de mejora es necesario contar con un punto de partida (*benchmark* o línea base).

Con tal finalidad, la empresa suministró un recorrido semanal realizado a mano (línea base 1, LB1). En el mismo figuran los clientes por día de la semana, las restricciones correspondientes y el orden en el cual realizaron el recorrido. Este recorrido corresponde al periodo de fin de octubre del 2019.

En ese entonces, al carecer de un depósito propio, dejaban el camión estacionado en un *parking* de una estación de combustible. Esta oficiaba como punto de partida y llegada del recorrido.

En el primer trimestre del 2020, alquilaron un amplio local que oficia como depósito y oficinas. Este local pasó a ser el nuevo punto de origen y fin del recorrido. En marzo de 2020 se les solicita nuevamente la planilla de los recorridos para contemplar la nueva línea base (línea base 2, LB2).

A continuación, se grafican las ubicaciones de los clientes existentes y el depósito correspondiente en el período de cada una de las líneas base.

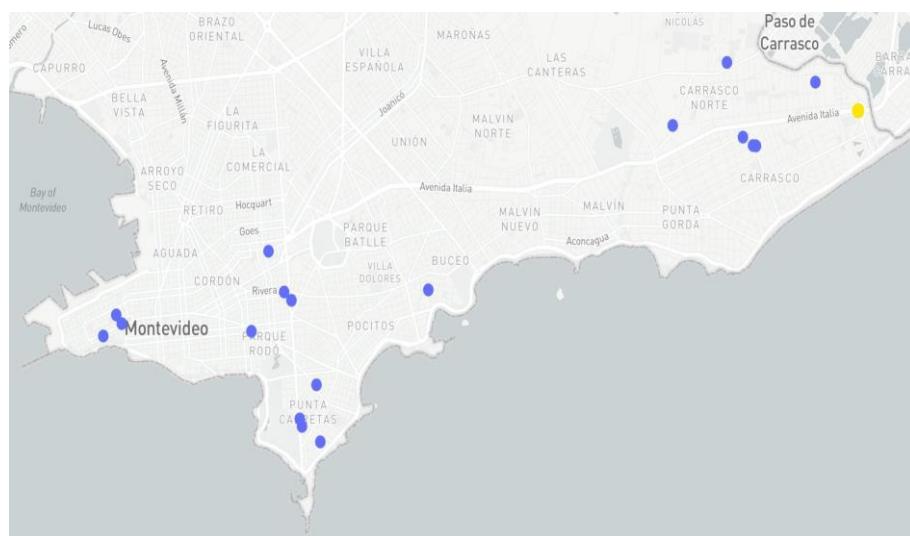


Ilustración 5: Mapa con los clientes existentes en octubre 2019 (LB1). El 'depósito' figura en amarillo.

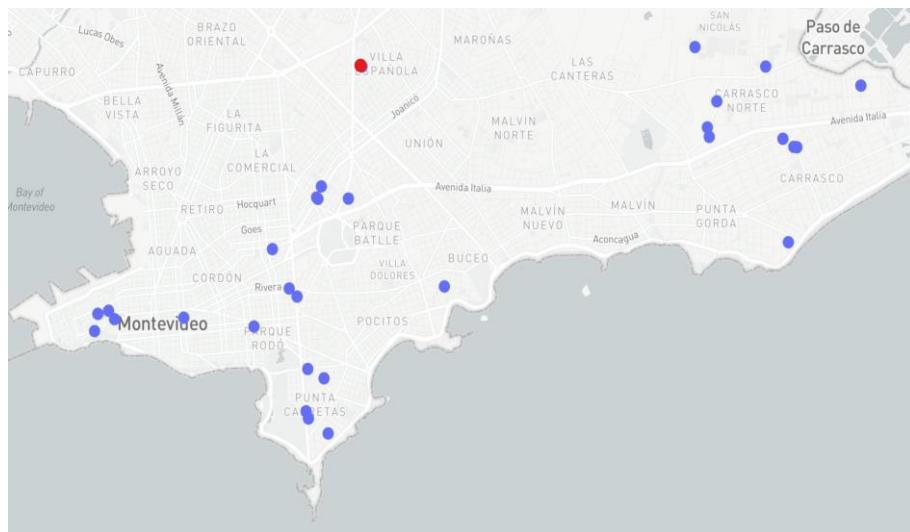


Ilustración 6: Mapa con los clientes existentes en marzo 2020 (LB2). El depósito figura en rojo.

Comparando las dos líneas base, se puede observar el aumento en el número de clientes activos, así como también el favorable cambio de ubicación del depósito.

## Análisis de las líneas base

La LB1 cuenta con 17 clientes y el depósito en un extremo de la distribución geográfica, mientras que la LB2 cuenta con 29 clientes y el depósito en una posición central, desplazada hacia el norte.

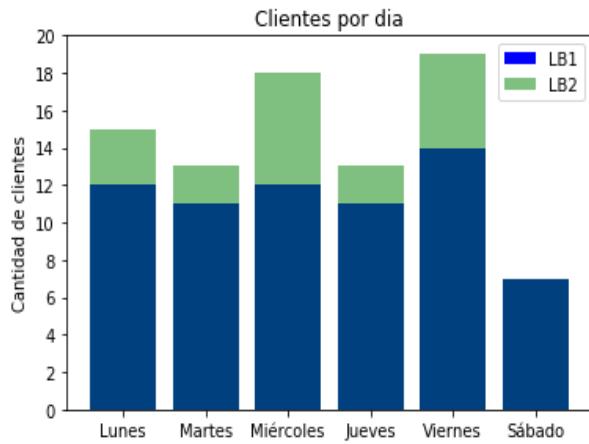
La tabla 1 compara las características de los clientes en ambas líneas base.

Característica de los clientes	Línea Base 1	Línea Base 2
Cantidad de clientes	17	29
Clientes con restricciones horarias	10	21
Distancia promedio desde el depósito	11,6 km	6,9 km
Distancia máxima desde el depósito	19,4 km	10,5 km
Distancia mínima desde el depósito	2,1 km	2,6 km
Distancia promedio al depósito	10,9 km	6,9 km
Distancia máxima al depósito	18,9 km	11,7 km
Distancia mínima al depósito	2,3 km	2,4 km

Tabla 1: Comparativa entre las características de las líneas base.

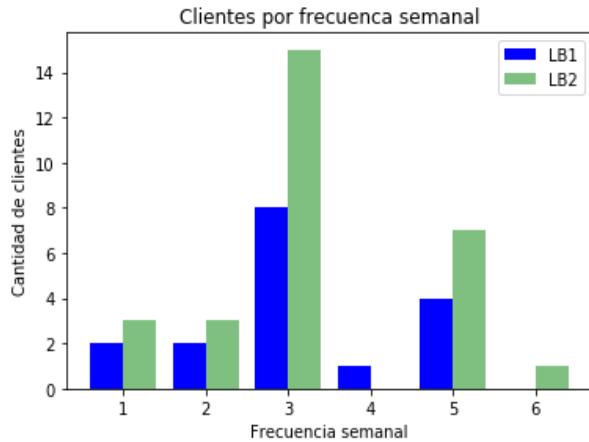
Luego de analizadas las cuatro matrices (tiempo y distancia de cada línea base) se concluye que un cálculo aproximado para pasar de distancia (kilómetros) a tiempo (minutos) es multiplicando por el factor 2,4. Ejemplo: El tiempo promedio desde el depósito a los clientes de la LB2 es de 16,6 minutos.

El gráfico 7 compara la cantidad de clientes en los recorridos de cada día de la semana de las dos líneas base.



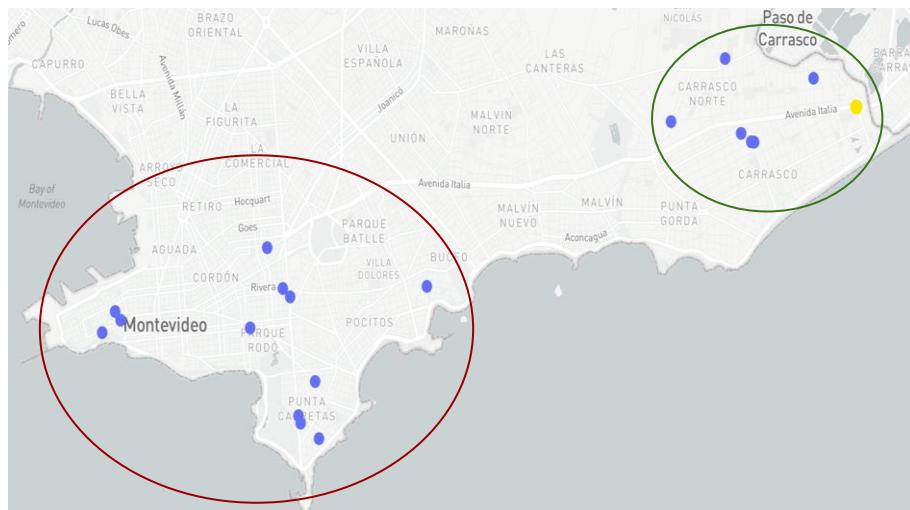
*Ilustración 7: Gráfico de cantidad de clientes por día de la semana.*

El gráfico 8 muestra la cantidad de clientes que contrataron cada frecuencia semanal. Se comparan los valores para las dos líneas base.



*Ilustración 8: Clientes por frecuencia semanal*

Se observa que la cantidad de servicios promedio por cliente según la LB2 es de 3,3. Este valor nos ayudará a determinar el potencial de mejora.



*Ilustración 9: Clúster de los clientes de la LB1.*

Aplicando K-medias como método de agrupamiento a la distribución geográfica de todos los clientes de la LB1, se pueden distinguir dos claros clústeres. El clúster verde, ubicado próximo al ‘depósito’ mientras que el clúster bordo se encuentra más alejado. Vale aclarar que todos los días hay clientes de ambos clústeres.

Una posible técnica de preprocesamiento de datos ad-hoc que se puede implementar a la hora de pensar en particionar el recorrido en mañana y tarde, es una heurística por clúster. Una primera aproximación a esta forma de abordar el problema se detalla en [Modelo de VRPTW con heurística en dos fases](#).

Cuando se analiza la LB2, se puede apreciar que la distribución en dos clústeres se sigue manteniendo. Si bien el número de clientes es mayor que en la LB1, la distribución geográfica se mantiene.

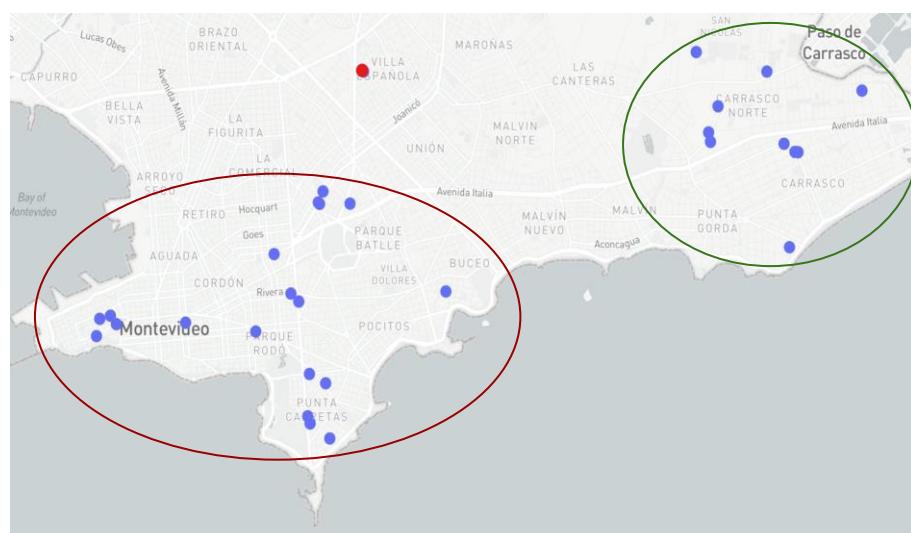


Ilustración 10: Clúster de los clientes de la LB2.

## Análisis de los recorridos de las líneas base

Para poder comparar cuantitativamente es necesario contar con las distancias diarias recorridas para cada una de las líneas base. Para evitar ambigüedades, las distancias entre clientes deben ser medidas bajo el mismo trayecto A-B, razón por la cual se calcularon tomando los datos de misma matriz de distancias utilizada para correr los modelos de ruteo. En el anexo ver matriz de distancia.

En base al orden de los clientes en el recorrido, se calcularon las distancias del recorrido para cada uno de los días de ambas líneas base.

Los resultados en metros son los siguientes:

Línea Base	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Promedio	Desvío
LB1	51.807	40.196	51.807	41.889	49.717	35.855	45.212	6.798
LB2	48.478	48.102	49.654	46.473	51.259	37.251	46.870	4.976

Tabla 2: Distancias de los recorridos diarios en cada una de las líneas base.

La ilustración 11 muestra un diagrama de cajas que deja en evidencia cómo el cambio favorable en la ubicación del depósito puede contribuir con la uniformidad de los recorridos.

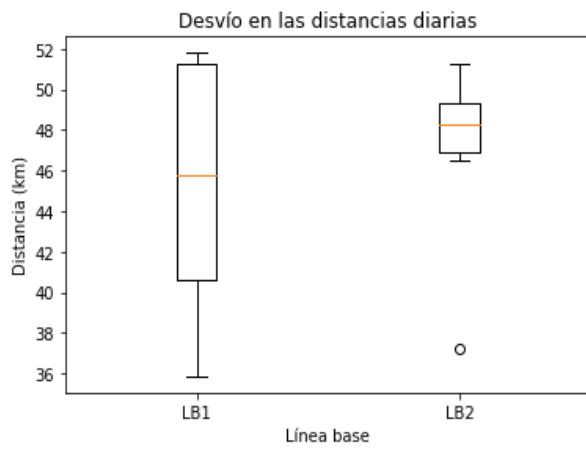


Ilustración 11: Comparativa entre las distancias diarias de las LB.

Cabe destacar que los promedios de los recorridos son muy parecidos, menos de un 4% de diferencia, por más que la LB2 contempla un 70% más de clientes. Esto se puede explicar debido a que existe una suerte de economía de escala. Los nuevos clientes quedan en las cercanías de los ya existentes. Esto hace que incluir un nuevo cliente al recorrido aumente poco la distancia total. Este beneficio de economía de escala es válido siempre y cuando haya tiempo ocioso para poder viajar hasta y atender al nuevo cliente.

Además, la nueva ubicación del depósito es en un lugar céntrico de la ciudad lo que se traduce en un menor recorrido. Esto se puede observar tanto en la dispersión de los valores reflejados en el diagrama de cajas, como en los días lunes y miércoles, donde la LB2 tiene más clientes y un recorrido con una menor distancia que la LB1.

## V - Modelado y técnica de resolución

### Modelado

Para cada problema planteado, se describe la formulación matemática del modelo. Los problemas fueron encarados de manera incremental, agregando restricciones en cada etapa para llegar a una versión que modela de buena manera la operativa diaria de ABITO.

Para determinar con qué heurística (técnica de primera solución y técnica de optimización local) resolver el problema, se realizó un análisis de técnica de optimización de hiper parámetros comparando distintas instancias contra las distintas heurísticas. Aquella configuración que dió el mejor resultado es con la que se resuelve cada día de la semana.

Respecto al método de optimización, para las heurísticas se usaron las técnicas de; 'Savings' - 'Local Cheapest Insertion' - 'Local Cheapest Arc'. Las heurísticas de búsqueda local y metaheurísticas local fueron: 'Guided Local Search' - 'Simulated Annealing' - 'Tabu Search'.<sup>8</sup>

Recordar que los problemas resueltos tienen enfoque diario. La asignación de los clientes a cada día de la semana es considera un *input* del problema.

El problema se resuelve tomando los datos de cada dia de la semana de forma independiente para cada una de las líneas base (LB1 y LB2).

### Técnica de resolución

La herramienta utilizada para la resolución del problema fue la suite de optimización de Google: OR-Tools. Esta es una plataforma de software libre que permite escribir sobre Python, C++, C# y Java. Además, permite conectarse con solvers comerciales, como ser Cplex o Gurobi, o bien con solvers de código abierto como SCIP o Google GLOP.

En este trabajo se utilizó el lenguaje de Python y se usaron las heurísticas de la librería especializada para ruteo de vehículos que viene incluida en OR-Tools. Los datos de los clientes son cargados mediante un archivo estandarizado CSV. Las matrices de tiempo y distancias son calculadas a través de la API de Google Maps ingresando las coordenadas de cada uno de los clientes. Estas matrices no son simétricas, ya que el trayecto A-B no necesariamente es igual al trayecto B-A.

La solución de ruteo encontrada no necesariamente es la óptima. Las librerías usan heurísticas para encontrar buenas soluciones factibilidad, no necesariamente logrando encontrar la óptima.

El presente estudio tiene como objetivo realizar un *discovery* de los datos, presentar una herramienta que permita analizar la operativa actual y futura. Sin embargo, no se pretende ni es el foco desarrollar una herramienta que busque optimalidad.

Se muestra a continuación un diagrama conceptual de los componentes de técnica de resolución utilizada para cada uno de los problemas abordados:

---

<sup>8</sup> Sacado de [https://developers.google.com/optimization/routing/routing\\_options](https://developers.google.com/optimization/routing/routing_options) el 2/4/20.

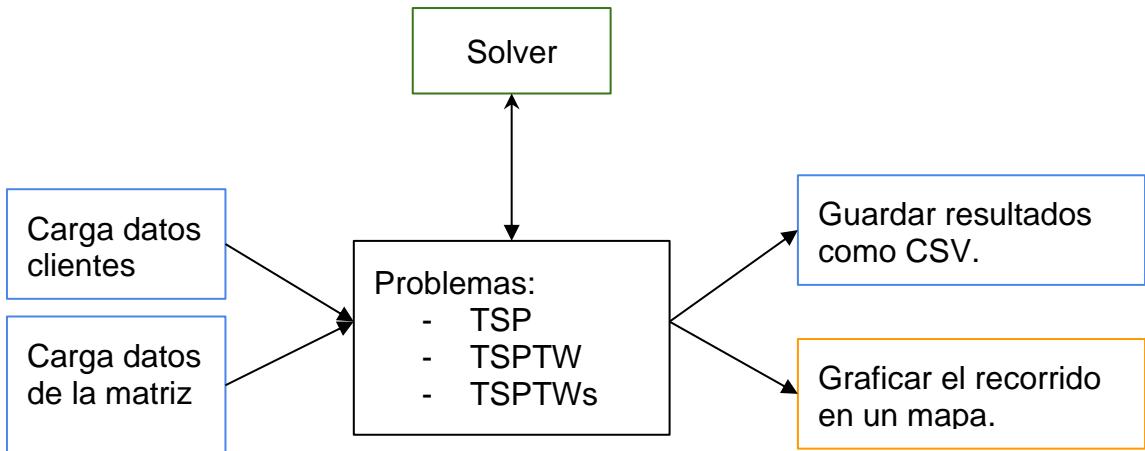


Ilustración 12: Diagrama conceptual de la herramienta.

En recuadro azul se detallan los módulos que almacenan o leen datos. En verde, se muestra el *solver* necesario para resolver el modelo. En naranja se encuentra el módulo que grafica de resultados en un mapa. En negro, el módulo central que une todas las partes. El análisis de los datos se hace en módulos *stand-alone*.

## VI - Modelo clásico de TSP

### Problema

El problema más básico que se plantea es aquel que tiene un período diario, que no considera las capacidades del camión ni de los clientes, que no considera las ventanas de tiempo de los clientes ni el tiempo máximo en servicio del camión.

Este enfoque se centra únicamente en minimizar las distancias, es decir, encontrar el menor recorrido posible para los clientes de un día dado. Usando un método exacto se puede llegar (en la medida que exista tal algoritmo y la instancia lo permita) al menor valor posible, el óptimo. Sin embargo, la herramienta de optimización utilizada se basa en heurísticas por lo que el óptimo no está garantizado.

La razón por la cual se plantea este primer problema es que permite cuantificar de forma directa el sobrecosto resultante de las restricciones horarias impuestas por los clientes. Este valor se puede obtener al comparar los resultados, de la misma instancia, del TSP contra el TSPTW. Además, el resultado del TSP es (en caso de optimalidad) la cota inferior en cuanto a las distancias que se pueden lograr.

La primera aproximación para la resolución del problema fue mediante la formulación de un VRP (problema de ruteo de vehículos). El VRP fue resuelto con sólo un camión, un depósito, sin restricciones de horario ni de capacidad, lo que en esencia lo transforma en un clásico TSP (problema del viajante de comercio).

El resultado del problema se representa mediante un vector con la posición de cada cliente en el recorrido, un mapa con las ubicaciones y el sentido del recorrido. Cada marcador tiene la información del cliente (nombre y coordenadas), así como la posición que le toca en el recorrido.



Ilustración 13: Detalle del depósito de la LB1.

### Modelo matemático del TSP

Una formulación matemática [4] del problema del TSP se describe a continuación. Si bien existen modelos más eficientes y que escalan mejor que el presentando, éste sirve para esclarecer los conceptos. Recordemos que el TSP no considera las ventanas de tiempo.

Datos:

- Sea el conjunto  $C = \{1, 2, \dots, n\}$  de clientes que debemos visitar
- Sea el conjunto  $V = \{1\}$  de vehículos disponibles
- Sea el conjunto  $O = \{1\}$  de depósitos disponibles

- Sea la matriz de distancias  $D = (d_{ij}) \in R^{(n+1) \times (n+1)}$  entre los clientes y entre los clientes y el depósito. El depósito es el índice 0 de la matriz.
- Sea  $m$  el número máximo de clientes que puede visitar el camión. En este modelo el valor de  $m$  se define:  $m / m = n + 1$

Objetivo:

- Determinar la ruta de cada vehículo (en este caso 1) de tal forma que cada cliente sea visitado una vez y la distancia recorrida sea mínima.

Formulación:

- Definimos el conjunto  $C_0 = C \cup O$ , como el conjunto de clientes y el depósito.
- Definimos la variable binaria  $x_{ij}$  con  $i, j \in C_0, i \neq j$  como:
  - $x_{ij} = 1$ : si el camión viaja de  $i$  a  $j$
  - $x_{ij} = 0$ : caso contrario
- Definimos la variable entera  $y_i \in Z_+$  con  $i \in C$ , que especifica el orden del cliente  $i$  en la ruta.
- Sea  $d_{ij}$  con  $i, j \in C_0$  la distancia entre el cliente  $i$  y el cliente  $j$ .

Función objetivo:

$$\min \sum_{i \in C_0} \sum_{j \in C_0} d_{ij} * x_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in C} x_{ij} = \sum_{j \in C} x_{ji} = 1 \quad \forall i \in C \quad (1)$$

$$\sum_{i \in C} x_{0i} = 1 \quad (2)$$

$$y_i + 1 \leq y_j + m(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in C \quad (3)$$

$$1 \leq y_i \leq n \quad \forall i \in C \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in C_0 \text{ con } i \neq j \quad (5)$$

El modelo tiene como objetivo minimizar la distancia del recorrido sujeto a:

- 1) El camión debe visitar (entrar y salir) de todos y cada uno de los clientes una única vez
- 2) El camión debe salir del depósito 1 única vez del depósito.
- 3) Evitar sub-tours en el recorrido. Todos los clientes deben estar unidos por el mismo circuito.

- 4) La cantidad de clientes visitados no puede ser mayor a la capacidad máxima de clientes.
- 5) Las variables  $x_{ij}$  son binarias.

## Optimización de hiper-parámetros

Como fue mencionado anteriormente, la técnica de resolución del problema se basa en heurísticas. Con el fin de encontrar la mejor heurística aplicada a los datos del modelo, es que se realiza una comparación entre distintas configuraciones para las mismas instancias.

Si bien esto representa un testeo preliminar en un conjunto reducido de instancias, es buena práctica validar la herramienta, los hiper-parámetros y el modelo en cuestión previo a correr el modelo sobre el total de las instancias.

Al igual que para el resto de las optimizaciones de hiper-parámetros planteados en este estudio, las configuraciones de las heurísticas y metaheurísticas se testean en el rango de soluciones viables del problema en cuestión.

En la sección: escalabilidad de la propuesta, se encuentra un testeo preliminar con 99 clientes usado para evaluar el alcance de la herramienta.

Instancias:

- LB1 - viernes
- LB2 - martes
- LB2 - viernes

Heurísticas:

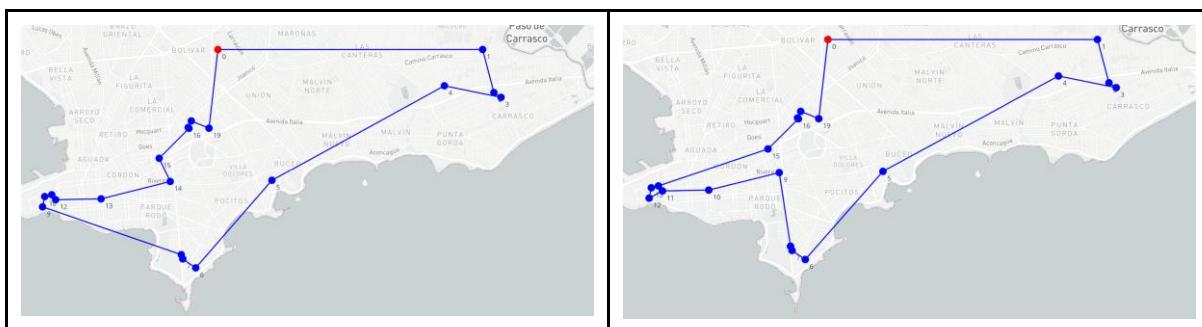
- Configuración 1: Local cheapest arc + Guided local search (LCA + GLS)
- Configuración 2: Local cheapest insertion - Tabu search (LCI + TS)
- Configuración 3: Savings + Simulated annealing (S + SA)

Los resultados de correr el solver limitado a 30 segundos fueron los siguientes:

Heurística \ Instancia	LB1 - viernes	LB2 - martes	LB2 - viernes
LCA + GLS	42.324m	38.097m	41.082m
LCI + TS	42.324m	38.097m	41.082m
S + SA	42.324m	38.097m	41.150m

Tabla 3: Resultados de la optimización de hiper-parámetros.

Gráficamente, las diferencias del viernes de la línea base 2 se muestran a continuación:



Config 1 y 2 - LB2 - Viernes	Config 3 - LB2 - Viernes
------------------------------	--------------------------

Ilustración 14: Comparativa de los resultados de las distintas configuraciones (TSP).

Se observa que la única configuración que dio un peor resultado fue la de “Savings + Simulated annealing”. Se opta por usar la configuración de “Local Cheapest Arc + Guided Local Search” para resolver cada día de la semana para ambas líneas base.

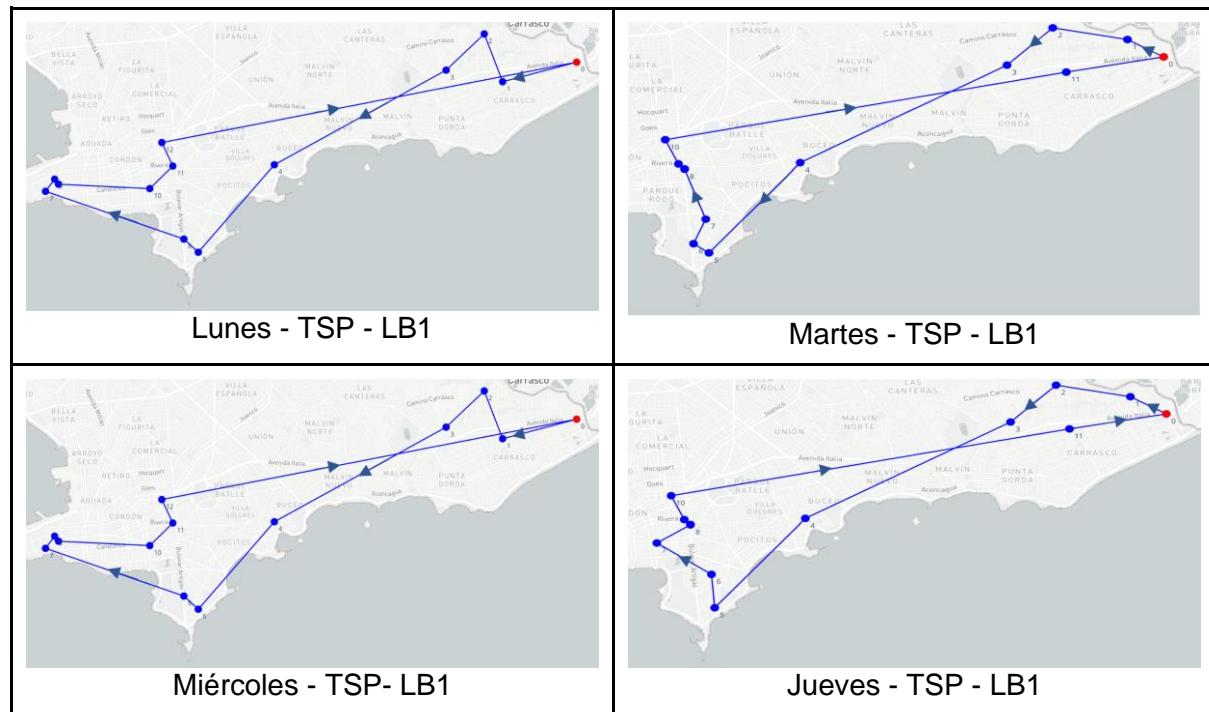
Si bien se realizó el análisis de los hiper parámetros con tiempos de solver limitados en 300 segundos, los resultados no fueron distintos a los de 30 segundos. Esto muestra una potencial limitación de la herramienta utilizada para resolver los problemas.

## Resultados obtenidos

TSP - LB1

Los recorridos optimizados de la LB1 para cada uno de los días de la semana se muestran a continuación. El depósito se muestra en rojo.

Por más que los cruces de algunos recorridos de los resultados parezcan contraintuitivos, esto ocurre porque las distancias entre clientes consideran la disposición y sentido real de las calles.



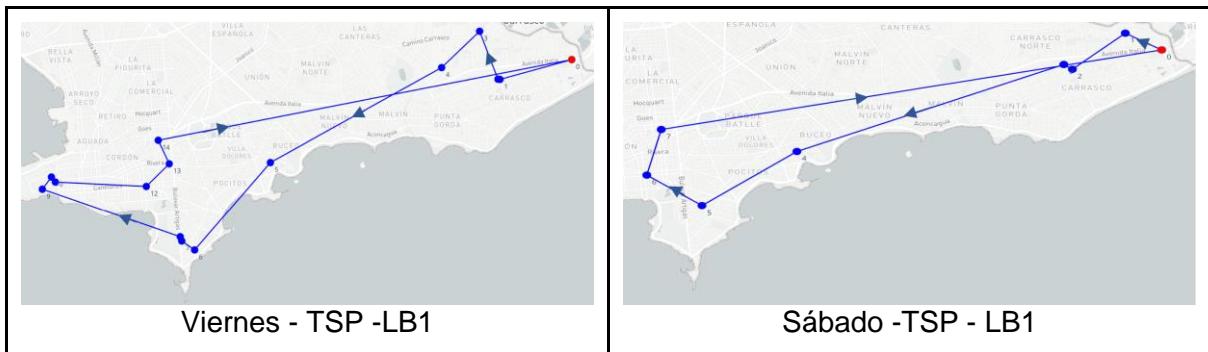


Ilustración 15: Resultados del TSP para la LB1.

En la tabla 4 se comparan las distancias obtenidas mediante el TSP contra las del *benchmark* de la LB1. El porcentaje de mejora se calcula sobre la LB1.

Distancia (m)	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Benchmark1	51.807	40.196	51.807	41.889	49.717	35.855
TSP	42.273	34.695	42.273	36.297	42.324	32.283
% mejora	18%	14%	18%	13%	15%	10%

Tabla 4: Comparativa de las distancias del TSP contra los del benchmark (LB1).

Asumiendo optimalidad, el potencial de mejora representa el sobrecosto por las restricciones en las ventanas de tiempo de los clientes y las posibles ineficiencias de la planificación manual. Si bien el valor monetario de esta mejora es bajo (15% del costo del camión en 45km), estos números sirven para mostrar que las ventanas de tiempo impuestas por los clientes llevan implícitamente un sobrecosto operativo. Esto puede servir como un parámetro a la hora de cotizar los servicios. La explicación detrás del argumento de que las ventanas de tiempo implican un sobrecosto se debe a lo siguiente: al optimizar estamos buscando la mejor solución dentro del universo de solución que satisfacen las restricciones impuestas. Si hacemos el problema más restrictivo (agregando ventanas de tiempo para los clientes) el universo de soluciones se reduce y por consiguiente la solución puede ser a lo sumo igual o peor que la de la instancia relajada.

A continuación, se muestra un gráfico que compara la solución del lunes del TSP (azul) contra la del *benchmark* LB1 (verde).

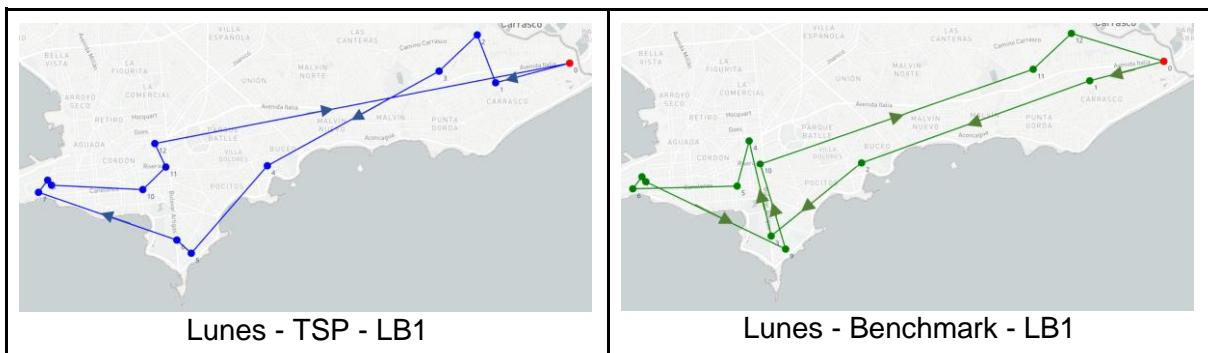


Ilustración 16: Recorrido del lunes para la LB1. TSP vs benchmark

## TSP - LB2

Los recorridos optimizados con un TSP de la LB2 para cada uno de los días de la semana se muestran a continuación. El depósito se muestra en rojo.

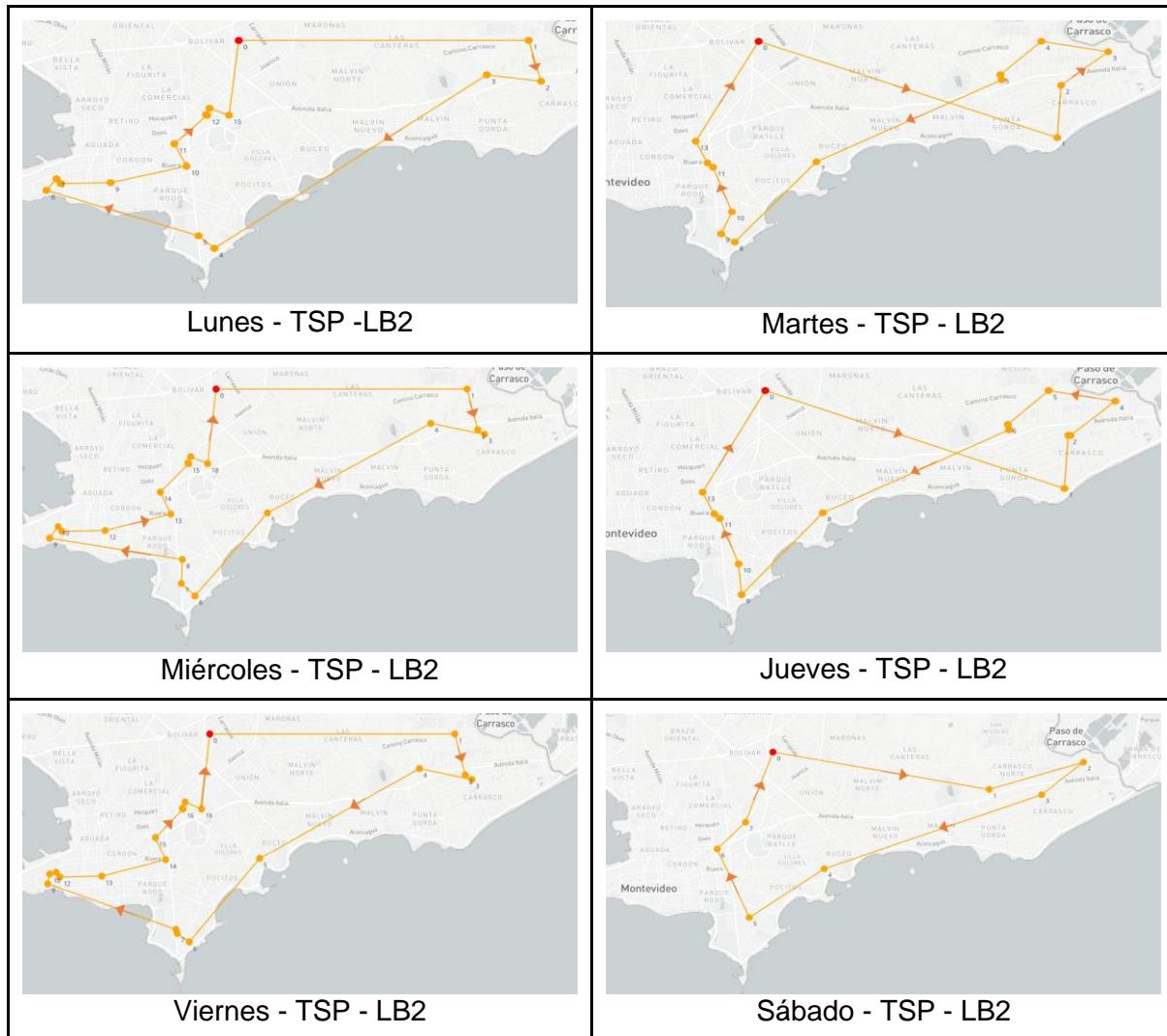


Ilustración 17: Resultados del TSP para la LB2.

En los martes y jueves de la LB2, se observa un cruce en el recorrido que parece ser mejorable. Considerando los puntos 0,6,1,7 del gráfico del jueves como un cuadrilátero ABCD se calculan las siguientes distancias utilizando la misma matriz de distancia que el solver. Se calcula la suma de las distancias del TSP (AC + BD) contra la solución alternativa (AB + CD). La primera suma dio 16.200 metros mientras que la segunda dio 15.720.



Ilustración 18: Validación del resultado: TSP LB2.

Sin embargo, visto que ese cambio altera el sentido del trayecto de los puntos 2-3-4-5 y la matriz de distancia no es simétrica, es necesario verificar la distancia total del recorrido. La distancia del recorrido alternativo es de 38.244m mientras que la del TSP es de 38.097m. Si se calcula la distancia en el sentido opuesto del trayecto alternativo mostrado en la imagen, esta da 41.703m.

Esto comprueba que el trayecto del TSP efectivamente es menor que el alternativo, por más que el cruce no sea intuitivo.

En la siguiente tabla se comparan las distancias obtenidas mediante el TSP contra los de la LB2. El porcentaje de mejora se calcula sobre la LB2.

Línea Base	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Benchmark2	48.478	48.102	49.654	46.473	51.259	37.251
TSP	40.567	38.097	41.386	37.876	41.082	32.470
% mejora	16%	21%	17%	18%	20%	13%

Tabla 5: Comparativa de las distancias del TSP contra los del benchmark (LB2).

El promedio de mejora del TSP respecto a la LB2 es del 17%. Como se mencionó anteriormente, este no es un dato para menospreciar. Si bien los ahorros monetarios por los costos operativos, a esta escala, son chicos, tener las rutas optimizadas atrasa la necesidad de adquirir un nuevo camión, reduciendo la demanda de capital, o bien retrasa la necesidad de implementar un turno doble de personal, simplificando la operativa. Debemos tener presente que la implementación de una metodología para optimizar las rutas en esta escala es de bajo costo.

## VII - Modelo de TSPTW

### Problema

Luego de haber analizado los resultados obtenidos a partir de modelar un TSP, resulta natural incluir las restricciones horarias impuestas por los clientes. Agregar estas restricciones conlleva a una ineficiencia.

Plantear este problema tiene sentido por varios motivos. Primero, permite comparar los resultados de la optimización propuesta en este estudio contra el *benchmark* realizado de manera manual por la empresa. En segundo lugar, como se mencionó en la sección del TSP, sirve para cuantificar el impacto que tienen las ventanas de tiempo sobre el recorrido. Por último, permite analizar el concepto de regularidad del servicio para cada cliente en el horizonte semanal.

El problema diario se modela mediante un TSPTW con un depósito, un camión, clientes con sus ubicaciones, múltiples ventanas de tiempo, los tiempos de servicio. Se permite que el camión esté en 'idle' un tiempo indefinido. Se limita el tiempo del recorrido a 540 minutos (9 horas). No se consideran la capacidad del camión y las capacidades de los clientes. No se incluye la parada para el almuerzo del chofer al medio día.

La salida del modelo TSPTW incluye, además del orden de los clientes, un rango horario de visita y el tiempo del camión en 'idle'. Definimos el rango horario de visita como el tiempo en el cual se puede visitar al cliente sin afectar la ruta. El tiempo en 'idle' del camión representa el tiempo que el camión debe esperar antes de poder ir a visitar al siguiente cliente.

Con respecto al rango horario de visita, nos interesa ver que tan disperso es si comparamos los distintos días de servicios a lo largo de la semana para un mismo cliente. Definimos este rango semanal como el rango de visita semanal. Cuanto más acotada sea el rango semanal significa que el servicio que el cliente percibe es más homogéneo, es decir hay mayor regularidad en el servicio.

Por otro lado, contar con rangos de visita diarios muy acotadas implica un tiempo reducido en el cual el camión puede pasar por lo del cliente sin alterar el cronograma establecido. Esto quita flexibilidad y aumenta la posibilidad de llegar fuera del horario establecido.

### Modelo matemático del TSPTW

A continuación, la formulación del modelo matemático del TSPTW [5].

Datos:

- Sea el conjunto  $C = \{1, 2, \dots, n\}$  de clientes que debemos visitar
- Sea el conjunto  $V = \{1\}$  de vehículos disponibles
- Sea el conjunto  $O = \{1\}$  de depósitos disponibles
- Sea la matriz de tiempos  $T = (c_{ij}) \in R^{(n+1) \times (n+1)}$ . Los costos  $c_{ij}$  incluyen el tiempo de viaje entre los clientes y entre los clientes y el depósito y el tiempo de servicio del cliente de origen. El depósito es el índice 0 de la matriz.

- Sea  $[a_i, b_i]$  la ventana de tiempo en cada cliente, donde  $a_i$  y  $b_i$  representan el tiempo de inicio y fin de la ventana de tiempo respectivamente.

Objetivo:

- Determinar la ruta que empieza y termina en el depósito, pasando por todos y cada uno de los clientes, respetando las ventanas de tiempo y minimice el tiempo de recorrido.

Formulación:

- Definimos el conjunto  $C_0 = C \cup O$ , como el conjunto de clientes y el depósito.
- Definimos la variable binaria  $x_{ij}$  con  $i, j \in C_0, i \neq j$  como:
  - $x_{ij} = 1$ : si el camión viaja de  $i$  a  $j$
  - $x_{ij} = 0$ : caso contrario
- Definimos la variable real positiva  $\beta_i \in R_+$  con  $i \in C$ , que especifica el tiempo en el que el cliente  $i$  es visitado.
- Sea  $c_{ij}$  con  $i, j \in C_0$  la suma del tiempo de trayecto entre el cliente  $i$  y el cliente  $j$  y el tiempo de servicio (se incluye el depósito  $O$ )
- Sea  $M$  una constante positiva muy grande.

Función objetivo:

$$\min \sum_{i \in C_0} \sum_{j \in C_0} c_{ij} * x_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in C_0, i \neq j} x_{ij} = \sum_{j \in C_0, j \neq i} x_{ji} = 1 \quad \forall i \in C_0 \quad (1)$$

$$\beta_j \geq \beta_i + c_{ij} - M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in C_0, \quad j \neq 0 \quad (2)$$

$$a_i \leq \beta_i \leq b_i \quad \forall i \in C_0 \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in C_0 \quad (4)$$

$$\beta_i \in R_+ \quad \forall i \in C_0 \quad (5)$$

El modelo tiene como objetivo minimizar el tiempo del recorrido sujeto a:

- 1) El camión debe visitar (entrar y salir) de todos y cada uno de los clientes una única vez
- 2) Asegura que el tiempo de llegada sea mayor al tiempo de visita del cliente inmediatamente anterior. Como los costos son positivos, esta condición evita *subtours*.
- 3) Restricción que hace que se cumplan las ventanas de tiempo.

- 4) Las variables  $x_{ij}$  son binarias.
- 5) Las variables  $\beta_i$  son reales positivas.

Es necesario aclarar que este modelo difiere del problema planteado ya que el problema permite múltiples ventanas de tiempo.

Para adaptarlo a múltiples ventanas de tiempo (en este caso a un máximo de 2 aunque pueden ser más) se deben realizar los siguientes cambios:

- sea  $[a_i, b_i]$  y  $[d_i, e_i]$  dos ventanas de tiempo en cada cliente, donde  $(a_i, d_i)$  y  $(b_i, e_i)$  representan el tiempo de inicio y fin de cada ventana de tiempo respectivamente. Se debe cumplir que  $d_i \geq b_i \forall i \in C_0$ .
- se define una nueva variable binaria  $w_i$  para cada cliente tal que:
  - $w_i = 1$  si el  $\beta_i$  cae dentro de la ventana de tiempo  $[a_i, b_i]$
  - $w_i = 0$  caso contrario
- se modifican las restricciones (3):

$$a_i \leq \beta_i \leq b_i + (1 - w_i)e_i \quad \forall i \in C_0 \quad (3)$$

- se agregan las restricciones (3\*):

$$d_i - d_i(w_i) \leq \beta_i \leq e_i \quad \forall i \in C_0 \quad (3^*)$$

- se agregan las restricciones (6):

$$w_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in C_0 \quad (6)$$

## Optimización de hiper-parámetros

Visto que el modelo ha cambiado respecto al TSP, es necesario volver a seleccionar la mejor heurística.

Instancias:

- LB2 - martes
- LB2 - viernes

Heurísticas:

- Local cheapest arc + Guided local search (LCA + GLS)
- Local cheapest insertion + Tabu search (LCI + TS)
- Savings + Tabu search (S + TS)

Los resultados obtenidos (tr: tiempo de recorrido, sin esperas del camión y tt: tiempo total de recorrido) con una búsqueda de parámetros limitada a 30 segundos fueron los siguientes:

Heurística \ Instancia	LB2 - martes	LB2 - viernes
LCA + GLS	tr: 172	tt: 383
LCI + TS	tr: 172	tt: 383
S + TS	tr: 172	tt: 383
	tr: 207	tt: 207
	tr: 210	tt: 210
	tr: 209	tt: 209

Tabla 6: Resultados de la optimización de hiper-parámetros del TSPTW.

Se observa que los mejores resultados se dan para la configuración: Local Cheapest Arc + Guided Local Search.

A continuación, se grafican los recorridos para el viernes de la LB2 para cada configuración. Se observan claras diferencias entre los tres.

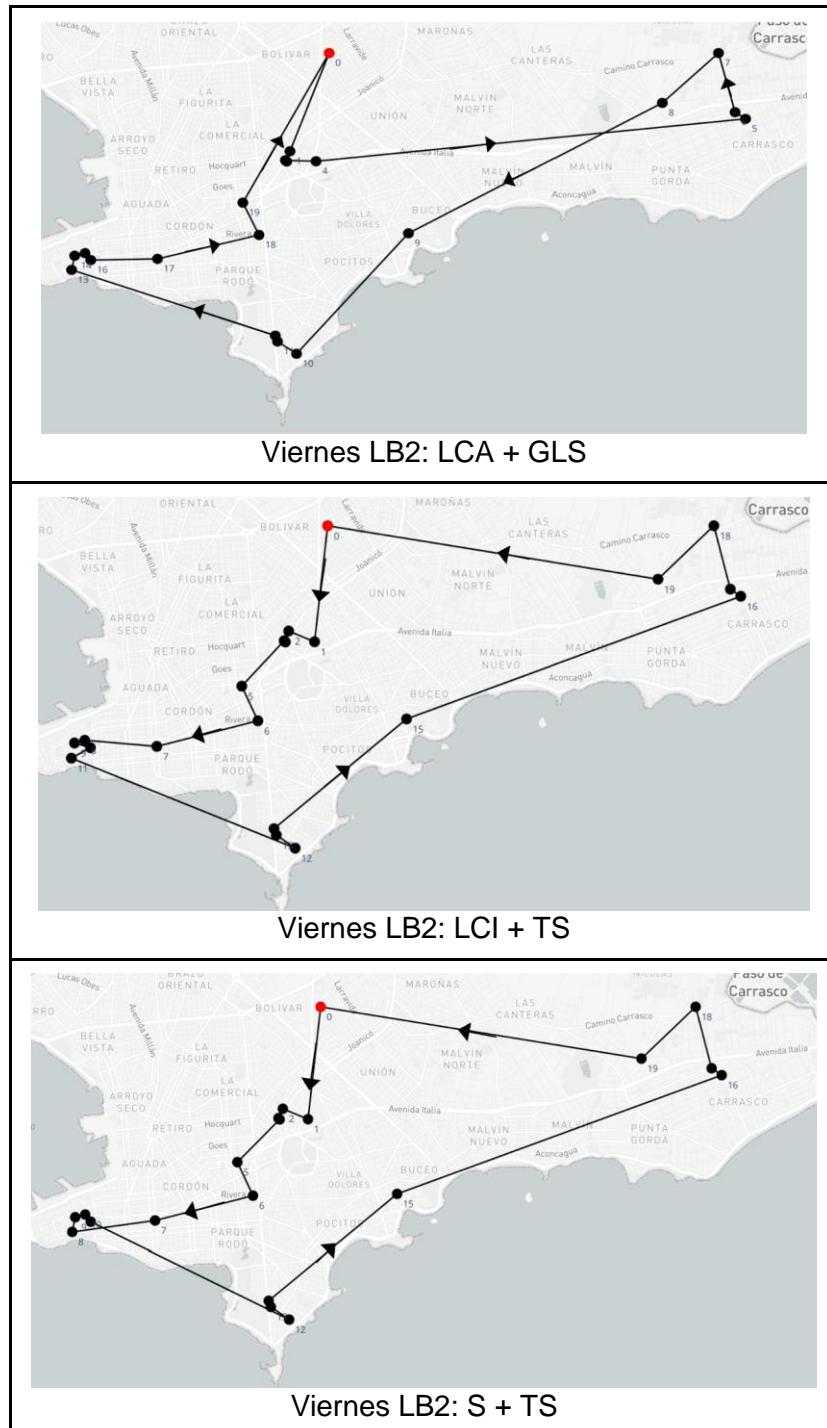


Ilustración 19: Comparativa de los resultados de las distintas configuraciones (TSPTW).

## Resultados obtenidos

### TSPTW - LB1

Los recorridos obtenidos luego de correr el TSPTW con la LB1 fueron los siguientes:

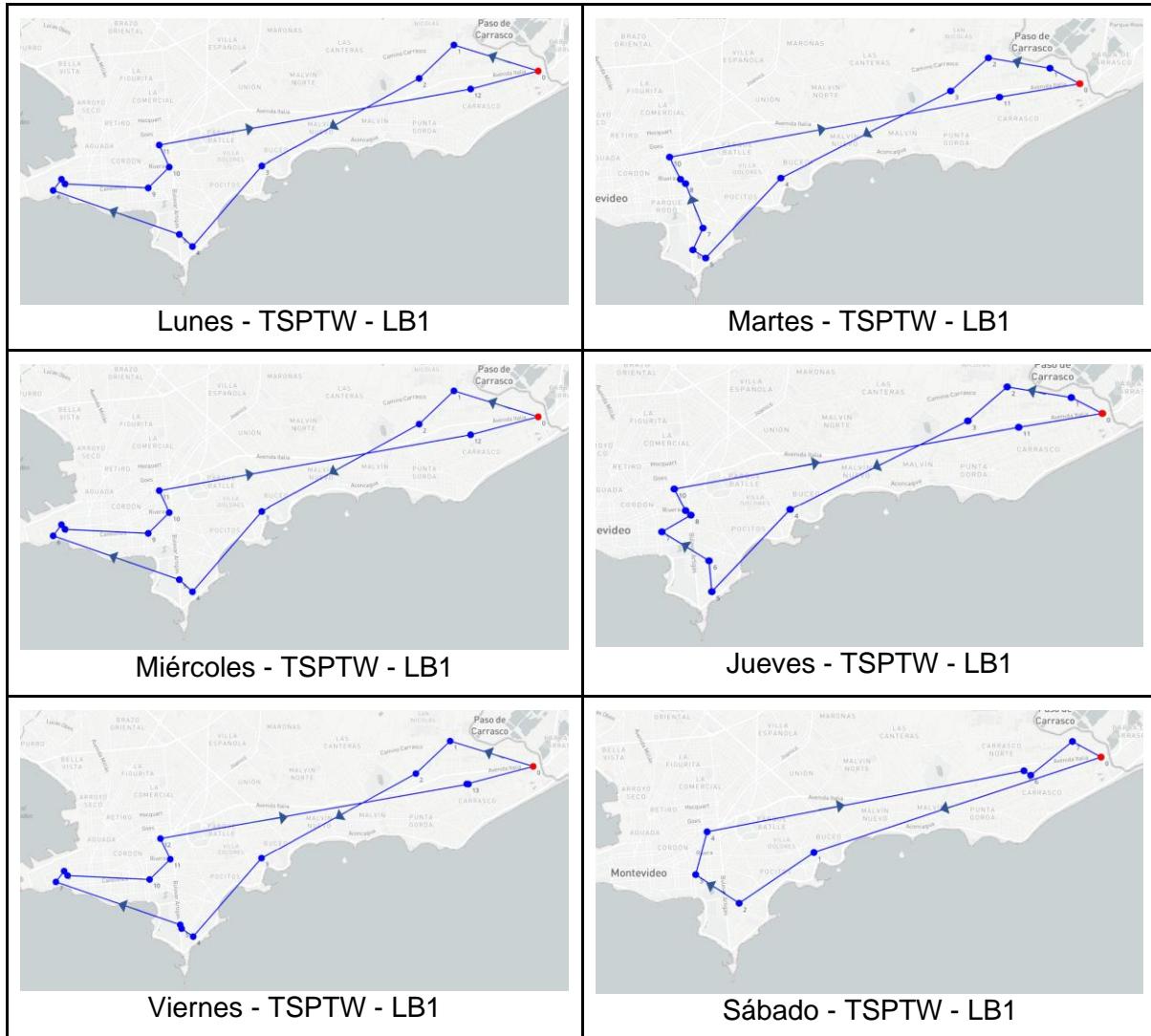


Ilustración 20: Resultados del TSPTW para la LB1.

Si se comparan los recorridos del TSP contra los del TSPTW, de la LB1, se pueden apreciar ciertas diferencias. En algunos casos el recorrido sufre pequeñas modificaciones, mientras que en otros además se invierte el sentido del recorrido.

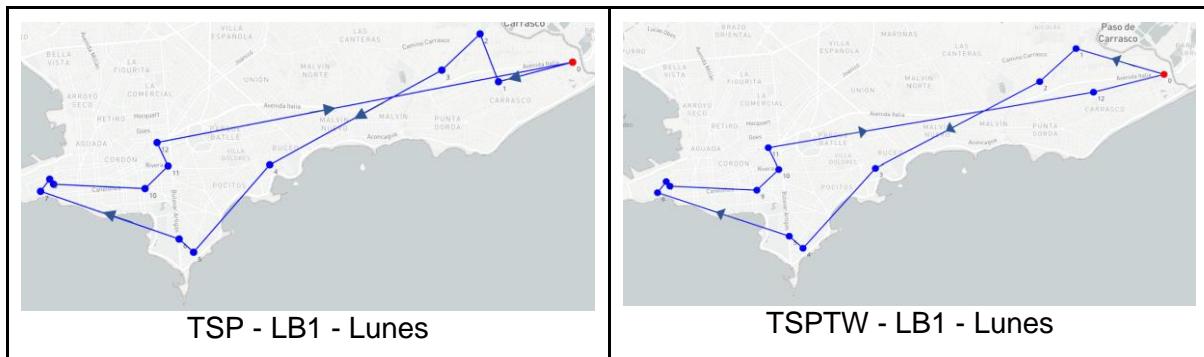


Ilustración 21: Comparativa entre un recorrido del TSP y el TSPTW de la LB1.

Se considera el tiempo del recorrido (tr) como métrica para comparar los resultados del TSPTW versus el LB1.

Los valores se presentan en la siguiente tabla:

Línea Base	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Benchmark1	190	169	190	167	201	124
TSPTW	162	144	162	147	172	117
Mejora %	15%	15%	15%	12%	14%	6%

Tabla 7: Comparativa de las distancias del TSPTW contra los del benchmark (LB1).

El tiempo (en minutos) en reposo del camión para cada día de la semana se muestra en la siguiente tabla. Como no se contaba con los valores para el *benchmark* estos fueron calculados con un script a partir del recorrido, los tiempos de trayecto y servicio y las ventanas de tiempo correspondientes.

Tiempo idle	Lunes	Martes	Miercoles	Jueves	Viernes	Sabado	Total
Benchmark1	19	8	19	31	14	31	122
TSPTW	12	11	12	11	12	29	87

Tabla 8: Tiempo idle del camión para la LB1.

La tabla 9 muestra los tiempos totales (minutos) de los recorridos diarios. Al igual que para el caso de los tiempos idle del camión, estos fueron calculados a partir de un script.

Tiempo activo	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Total
Benchmark2	209	177	209	198	215	155	1.163
TSPTW	174	155	174	158	184	146	991
% mejora	17%	12%	17%	20%	14%	6%	15%

Tabla 9: Tiempos totales del TSPTW para la LB2.

Para saber el efecto que tienen las ventanas de tiempo sobre el tiempo de recorrido, se debe comparar el tiempo total del recorrido del problema TSPTW contra los recorridos del TSP para el mismo día de la LB1.

Visto que el TSP acepta distancias como parámetro de entrada, se modificó el código para que aceptara los tiempos del recorrido (trayecto y servicio) para cada día y poder así compararlo representativamente contra el TSPTW.

Los resultados obtenidos (en minutos) para la LB1 fueron los siguientes:

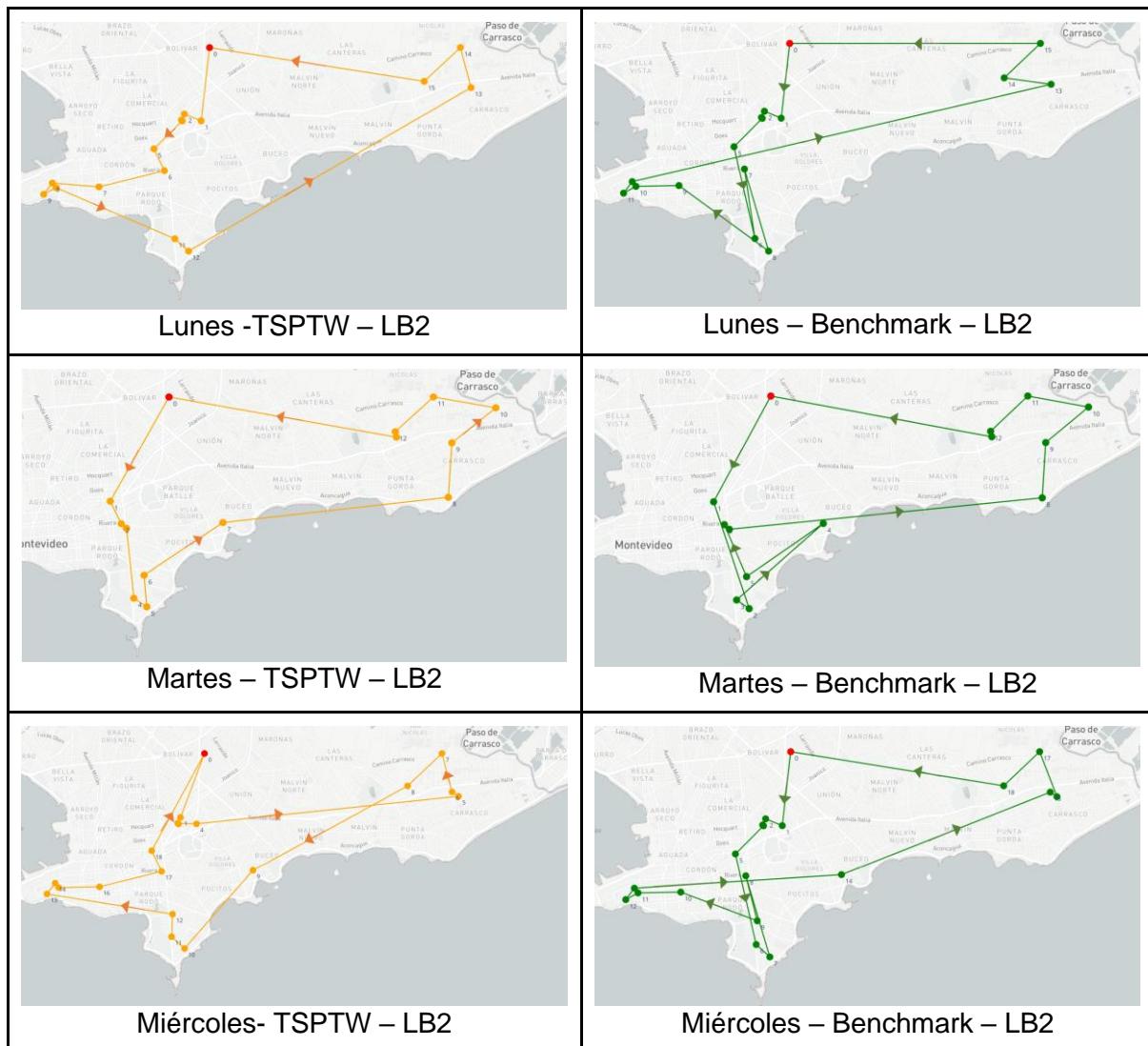
Instancia	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
TSP	162	144	162	147	172	117
TSPTW	174	155	174	158	184	146
Impacto TW	7%	7%	7%	7%	7%	20%

Tabla 10: Comparativa entre el TSP y el TSPTW para la LB1. (En minutos)

Se observa que el impacto de las ventanas de tiempo para los días de semana es del entorno de 7%. El sábado puntualmente es del 20%.

### TSPTW - LB2

Los recorridos del TSPTW con los clientes del LB2 se muestran a continuación, junto con los recorridos del benchmark LB2. En naranja el recorrido del modelo TSPTW y en verde el recorrido por la empresa (benchmark) para la LB2.



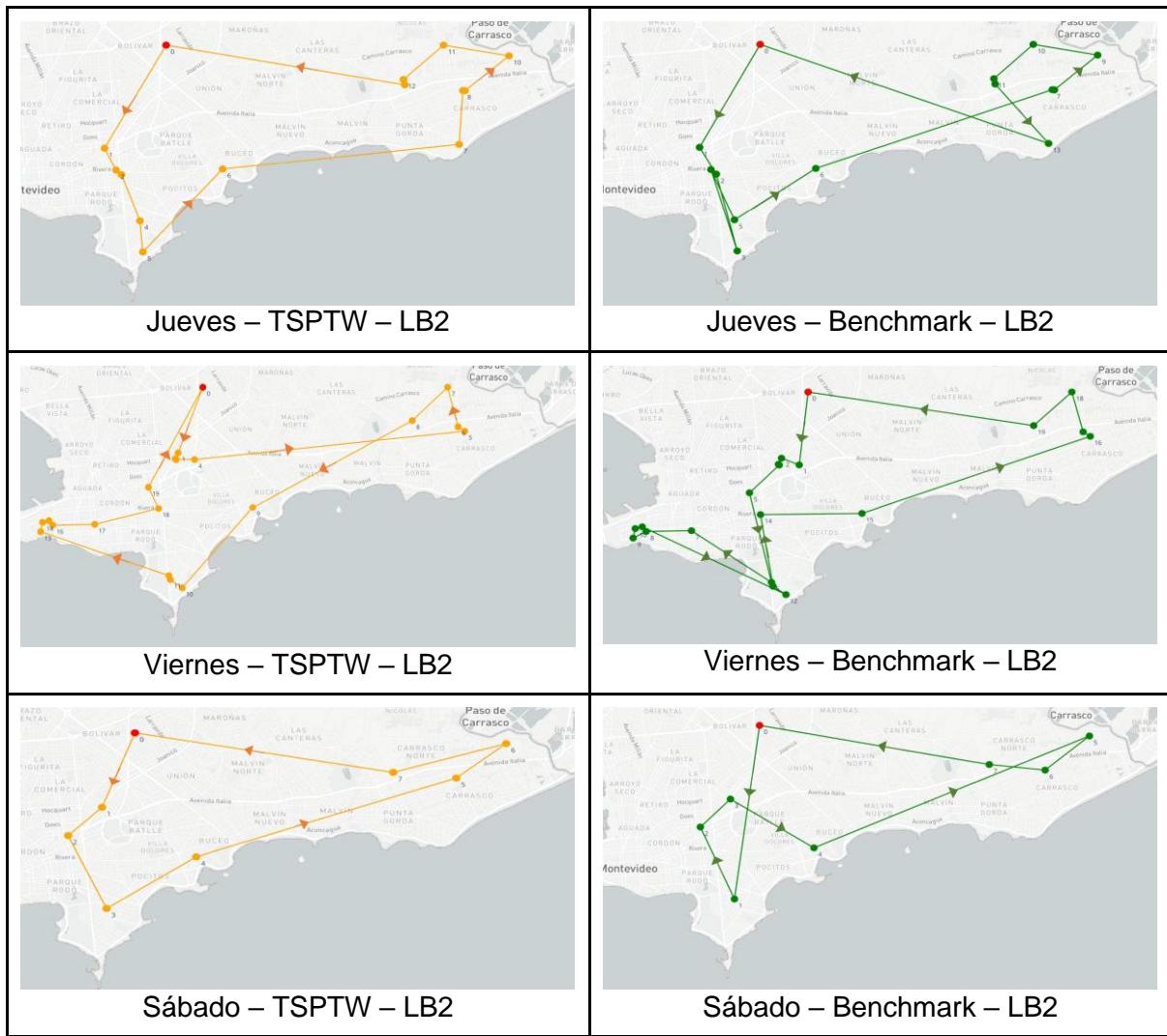


Ilustración 22: Comparativa entre los recorridos diarios del TSPTW y el benchmark para la LB2.

Al igual que con el LB1, se pueden observar diferencias con los recorridos respecto del TSP.

Los datos del tiempo de recorrido (sin el tiempo en reposo del camión) para el TSPTW y la LB2 se muestran en la siguiente tabla:

Línea Base	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Benchmark2	208	196	228	189	225	135
TSPTW	183	172	205	169	207	124
mejora %	12%	12%	10%	11%	8%	8%

Tabla 11: Tiempos de recorrido (en minutos) del TSPTW y el benchmark para la LB2.

Los valores de tiempo idle del camión y el tiempo total del recorrido para el *benchmark* fueron generados mediante un *script* a partir del recorrido, los tiempos de trayecto, servicio y las ventanas de tiempo permitidas.

El tiempo (en minutos) en reposo del camión para cada día de la semana se muestra en la siguiente tabla.

Tiempo <i>idle</i>	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Total
Benchmark2	0	66	0	89	0	127	282
TSPTW	0	90	0	93	0	138	321

Tabla 12: Tiempo *idle* del TSPTW y el benchmark para la LB2.

Se observa que para el TSPTW los martes, jueves y sábados el camión queda mucho tiempo en reposo. Esto se debe a las ventanas prohibidas del mediodía que tienen algunos clientes. Por otro lado, se observa que para esos mismos días, el TSPTW tiene un tiempo de *idle* mayor al *benchmark* pero un tiempo total menor. La herramienta parece usar mejor los recursos, minimizando el tiempo total de viaje.

La duración total de los trayectos del TSPTW (tiempo en movimiento, tiempo de servicio y tiempo en reposo) se muestran en la siguiente tabla. Se puede ver como los martes, jueves y sábados tienen una mayor duración debido a la parada obligatoria impuesta por los horarios no permitidos por los clientes.

Los tiempos totales para el *benchmark* fueron calculados con un *script* ya que no se contaba con los datos por parte de la empresa.

Tiempo totales	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Total
Benchmark2	208	262	228	278	225	262	1.463
TSPTW	183	262	205	262	207	262	1.381

Tabla 13: Tiempos totales (en minutos) del TSPTW y el benchmark para la LB2.

Si se comparan los tiempos totales del TSPTW contra los del TSP (generados a partir del TSP con matriz de tiempos totales: tiempo de trayecto más tiempo de servicio) se obtiene lo siguiente:

Instancia	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
TSP	181	165	200	163	202	124
TSPTW	183	262	205	262	207	262
Impacto TW	1%	36%	3%	37%	3%	53%

Tabla 14: Comparativa entre los tiempos totales (en minutos) del TSP contra el TSPTW. (LB2)

Los resultados muestran que, para la LB2, las ventanas de tiempo tienen un impacto considerable en algunos días y casi nulo para otros días. Esto se debe principalmente a las ventanas prohibidas de algunos clientes.

## VIII - Modelo de TSPTW con heurística en dos fases

### Problema

Hasta el momento hemos planteado problemas que tienen que ver con la operativa actual. Sin embargo, resulta interesante proyectar a futuro la operativa a medida que nuevos clientes se van sumando a la gestión responsable de sus residuos. Con tal motivo, se plantea la posibilidad de incluir la parada del mediodía.

Plantear este problema tiene sentido por varios motivos. En primer lugar, la parada permite modelar el tiempo de descanso y almuerzo del chofer. Por otro lado, durante esta parada en el depósito, el camión puede ser descargado volviendo a contar con la capacidad plena de carga. Además, la empresa se encuentra en esta etapa de transición, donde empieza a ser necesaria la parada del mediodía para continuar con la recolección. Por último, este modelo permite cuantificar el potencial de recolección máximo que tiene el camión en las condiciones definidas. Sirve para contestar a la pregunta, ¿cuántos servicios puede gestionar como máximo el camión en un turno diario?

Si bien en este problema la capacidad del camión y de los clientes no es considerada, el planteo sigue siendo representativo. Por lo visto en las simulaciones de la sección Respuestas, el tiempo actúa como limitante antes que las capacidades. Esto significa que al recorrer todos los clientes de la mañana o tarde, el camión se queda sin tiempo antes que, sin capacidad, por lo que omitir la capacidad en este problema no afectaría el resultado.

El problema diario se modela mediante un TSPTW con un depósito, un camión, clientes con sus ubicaciones, ventanas de tiempo, los tiempos de servicio. Se permite que el camión esté en 'idle' un tiempo indefinido. Se limita el tiempo del recorrido a 540 minutos. No se consideran la capacidad del camión y las capacidades de los clientes. Se incluye la parada para el almuerzo del chofer al medio día. La parada del mediodía se modela como un cliente más, con una ventana de tiempo de 12:00 a 14:00 horas y con un tiempo de servicio de 60 minutos.

Como el problema intenta modelar eventos futuros, se crean clientes ficticios. Las ubicaciones de los clientes se definen de manera aleatoria de tal forma que caigan sobre la ciudad de Montevideo. Las ventanas de tiempo se les asignan de manera aleatoria (50,25,25) según sean de todo el dia, de la mañana o de la tarde respectivamente. El tiempo de servicio se define de 5 minutos para todos.

En esta ocasión estamos buscando representar instancias futuras, por lo que las líneas base con las que veníamos haciendo el *benchmark* no son válidas. Las diferentes instancias diarias se crean a partir de una selección al azar de N clientes.

La salida del modelo TSPTW con heurística en dos fases incluye, además del orden de los clientes, el rango horario de visita.

La razón por la cual se opta por realizar un preprocesamiento de las ventanas de tiempo se debe al hecho de que el *solver* no era capaz de resolver el problema TSPTW con múltiples ventanas de tiempo y parada al mediodía. El preprocesamiento de las ventanas de tiempo deja únicamente una ventana activa por cliente, lo que simplifica la búsqueda de una solución factible.

## Heurística: preprocesamiento de datos

Para simplificar el espacio de soluciones se opta por implementar un preprocesamiento de datos *ad-hoc*. La heurística consiste en segmentar a los clientes en dos clases; clientes de la mañana y clientes de la tarde.

Para realizar dicha separación se consideran dos variables:

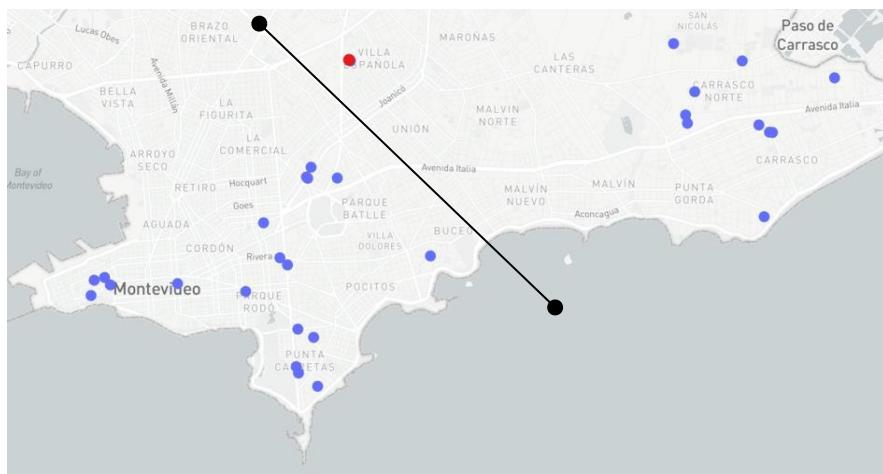
- ubicación de los clientes
  - ventanas de tiempo de los clientes

## Ubicaciones:

Se divide el espacio de soluciones en dos. Para esta primera instancia se opta por una partición geográfica definida por una avenida principal de Montevideo. Otras opciones para la agregación pueden ser por medio de técnicas de aprendizaje automático como K-medias o vecinos más cercanos. Estas últimas quedan planteada como una mejora a futuro.

Vale mencionar que todos los días de la semana se observan clientes en ambos clusters, por lo que este enfoque es representativo para el problema diario.

Un mapa con los clientes de la LB2 y la línea divisoria se muestra a continuación:



*Ilustración 23: Representación de la recta divisoria del plano para la agregación de clientes por zona.*

Para realizar la división, se considera la ecuación de la recta definida por la recta divisoria. Las coordenadas de referencia de la recta: (-34,876749; -56,151191) y (-34,899205; -56,122823). Aquellos puntos que al sustituir las coordenadas en la ecuación dan negativo corresponden a una clase y los que dan positiva a la otra.

## Ventanas de tiempo:

Se busca acotar el espacio de soluciones, reduciendo la ventana de tiempo del cliente de forma conveniente según en que clúster se ubique.

Para lograr esto, el preprocesamiento modifica las ventanas de tiempo de tal forma que:

- las nuevas ventanas de tiempo son un subconjunto de las ventanas de tiempo originales de los clientes.

- los clientes que estén a la izquierda de la línea divisoria tengan una ventana de tiempo en la mañana.
- los clientes que estén a la derecha de la línea divisoria tengan una ventana de tiempo a la tarde.
- aquellos clientes que caigan de un lado y la ventana no sean compatibles con la de la región, se mantendrá la propia. Esto lleva a ineficiencias en el recorrido, pero viabiliza la operativa.

En resumidas cuentas, se intenta partir el problema diario en 2 problemas de ruteo secuenciales; uno en la mañana y otro en la tarde.

Las ventanas de la mañana serán la resultante de la intersección de la ventana de tiempo del cliente y la ventana horaria de la mañana definida entre los valores  $[a_m, b_m]$ . Las ventanas de la tarde serán la resultante de la intersección de la ventana de tiempo del cliente y la ventana horaria de la tarde definida entre los valores  $[a_t, b_t]$ . En caso de intersección vacía, se mantendrá la ventana de tiempo original del cliente.

Como mejora a futuro se podría incluir la funcionalidad que verifique si la ventana resultante es mayor a 2 horas. Conociendo los datos de entrada, esta condición fue omitida porque no ocurría para ningún cliente.

Un ejemplo en forma esquemática es el siguiente.

A efectos del ejemplo se define:

- $[a_m, b_m] = [9:00, 13:00]$
- $[a_t, b_t] = [13:00, 18:00]$

Cliente 1: ubicado en el clúster de la mañana tiene una ventana de tiempo de 9:00 a 16:00. La ventana resultante es de 9:00 a 13:00.

Cliente 2: ubicado en el clúster de la tarde tiene una ventana de tiempo de 11:00 a 17:00. La ventana de tiempo resultante es de 13:00 a 17:00.

Cliente 3: ubicado en el clúster de la mañana tiene múltiples ventanas de tiempo: de 9:00 a 12:30 y de 14:00 a 17:00. La ventana resultante es de 9:00 a 12:30.

Cliente 4: ubicado en el clúster de la tarde tiene múltiples ventanas de tiempo: de 9:00 a 12:30 y de 14:00 a 17:00. La ventana resultante es de 14:00 a 17:00.

Cliente 5: ubicado en el clúster de la mañana tiene ventana de tiempo de 14:00 a 17:00. La ventana resultante es de 14:00 a 17:00.

## Optimización de hiper-parámetros

Visto que el modelo ha cambiado respecto al TSPTW, es necesario volver a seleccionar la heurística más conveniente.

Instancias:

- 35 clientes
- 40 clientes

- 45 clientes

Heurísticas:

- Local cheapest insertion + Tabu search (LCI + TS)
- Local cheapest insertion + Guided local search (LCI + GLS)
- Savings + Guided local search (S + GLS)

Se testean 10 instancias para cada configuración de N clientes, cada una con un *seed* (de 0 a 9) para seleccionar los N clientes (muestreo sin reposición) del total de clientes reales y ficticios disponibles. Tener el *seed* fijo nos permite recrear las mismas instancias para las distintas configuraciones de los parámetros.

El tiempo de optimización de la búsqueda local se limita en 100 segundos. Al camión se le permiten 540 minutos de operativa.

Los promedios de los tiempos totales de recorrido de los resultados de la optimización se muestran en la tabla 15. Se promedian únicamente las instancias con solución. En paréntesis se muestran la cantidad de instancias resuelta por configuración (del total de 10).

Heurística \ Instancia	35 clientes	40 clientes	45 clientes
LCI + TS	485 (6)	518 (2)	Sin solución
LCI + GLS	487 (6)	522 (2)	Sin solución
S + GLS	Sin solución	Sin solución	Sin solución

Tabla 15: Resultados de la optimización de hiper-parámetros del TSPTW con heurística en dos fases.

De las estrategias de primera solución probadas, la de *Local Cheapest Insertion* fue la única que logró encontrar una solución para los clientes seleccionados.

En una segunda etapa de experimentación, se prolonga el tiempo límite de optimización a 300 segundos. Se busca determinar si el tiempo total de recorrido se puede mejorar respecto de la solución de 100 segundos límite. En ninguno de los dos casos (LCI+TS, LCI+GLS), se encontró un mejor resultado para cada una de las instancias testeadas. Se resuelve correr el modelo con LCI+TS un límite de 100 segundos.

Se observa, que el tiempo de 540 minutos de actividad máxima del camión actúa como limitante. Para lograr 5 clientes más, únicamente el tiempo de servicio demanda 25 minutos, lo que supera el tiempo total permitido.

Los resultados de este modelo fueron utilizados para contestar algunas de las preguntas de la sección respuestas.

Un recorrido del TSPTW con heurística en dos fases y parada al mediodía se muestra a continuación junto con los rangos horarios de visita de cada cliente.

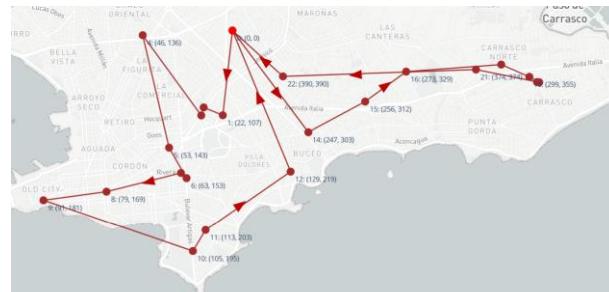


Ilustración 24: Gráfico de un recorrido testeado con TSPTW con heurística en dos fases y parada al mediodía.

## Escalabilidad del estado actual (1 camión)

Para poder cuantificar la escalabilidad del estado actual va a ser necesario considerar distintos escenarios. Estos escenarios cuentan con distintos clientes existentes y ficticios seleccionados al azar de un conjunto con un total de 70 clientes. Se usan los mismos clientes generados para el TSPTW con heurística.

Se plantea el siguiente problema diario: un TSPTW con un depósito, un camión, N clientes con sus ubicaciones, ventanas de tiempo y tiempos de servicio. Se permite que el camión esté en 'idle' un tiempo indefinido. Se limita el tiempo del recorrido a 540 minutos. No se consideran la capacidad del camión y las capacidades de los clientes. Se incluye la parada para el almuerzo del chofer al mediodía. La parada del mediodía se modela como un cliente más, con una ventana de tiempo de 12:00 a 14:00 horas y con un tiempo de servicio de 60 minutos.

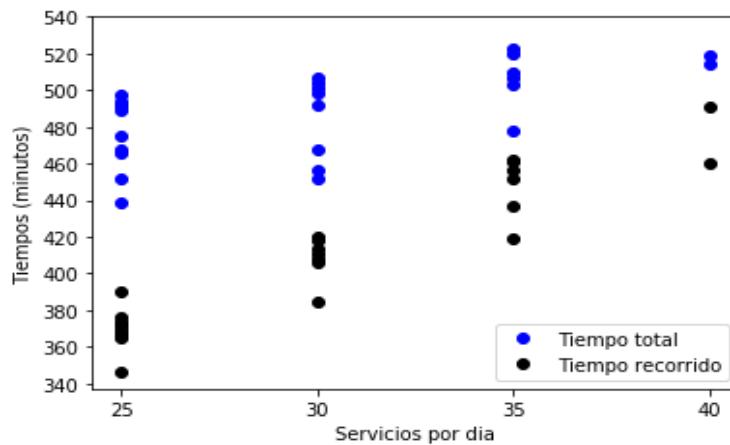
Como simplificación, no se considera a la capacidad como una restricción activa. Recordar que agregar la capacidad como restricción al problema de ruteo implica agregar un problema del tipo de la mochila lo que incrementa el costo computacional considerablemente. La justificación que sustenta esta simplificación se debe a que el camión tiene capacidad para unas 20-25 clientes, y por lo visto en el TSPTW con heurística el tiempo de actividad del camión límite al máximo es menor a 45. Como la carga del camión es vaciada al mediodía le es suficiente para esa cantidad de clientes.

Para cada escenario se correrá el modelo TSPTW con la heurística de preprocesamiento de ventanas de tiempo según la región del plano donde se ubique el cliente. Los N clientes serán seleccionados de forma aleatoria, sin reposición, de un conjunto de 70 posibles clientes. Los parámetros del modelo se alternan entre LCI + GLS y LCI + TS.

El objetivo es determinar la mayor cantidad de clientes por día que pueden ser gestionados por el camión. Si bien esto es una simulación, nos ayudará a comprender las limitantes de la operativa.

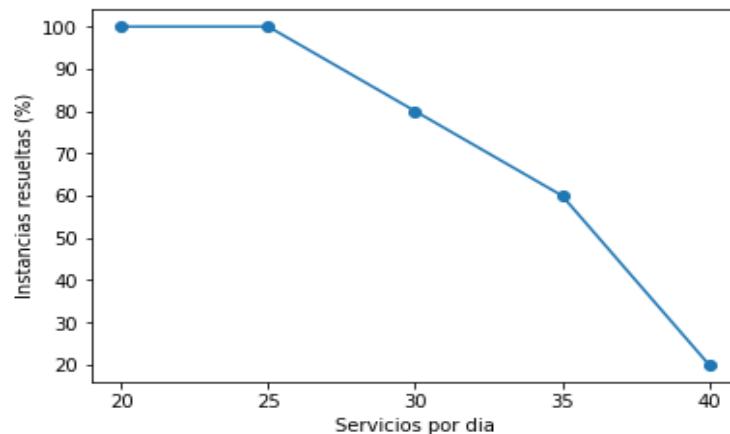
Los resultados del tiempo total de recorrido de las simulaciones obtenidas se detallan a continuación. Se muestran únicamente los intentos con solución. Se simulan 10 instancias para cada N, cada una con un tiempo límite del solver de 100 segundos. Se elige la configuración de los hiper-parámetros: LCI + TS

Los tiempos totales de recorrido de cada instancia resuelta se muestran en la siguiente gráfica. En azul los tiempos totales y en negro los tiempos de recorrido (no incluye idle del camión). Se observa cómo a medida que el número de servicios diario aumenta, los tiempos totales se aproximan al límite del tiempo activo del camión: 540 minutos.



*Ilustración 25: Gráfico con los resultados de las instancias simuladas.*

La siguiente gráfica muestra cómo varía la cantidad de instancias resueltas (en porcentaje) para cada escenario con N cantidad de clientes.



*Ilustración 26: Variación del porcentaje de instancias resueltas en función de la cantidad de servicios.*

Para poder descartar que el problema de la caída de cantidad de instancias resueltas es problema de la herramienta o de la instancia en sí, es que se corrieron las mismas instancias (mismo seed) pero sin límite en el tiempo activo del camión.

La gráfica muestra el porcentaje de las instancias testeadas que la herramienta fue capaz de resolver. La limitante parece deberse a las restricciones del problema y no a la herramienta en sí.

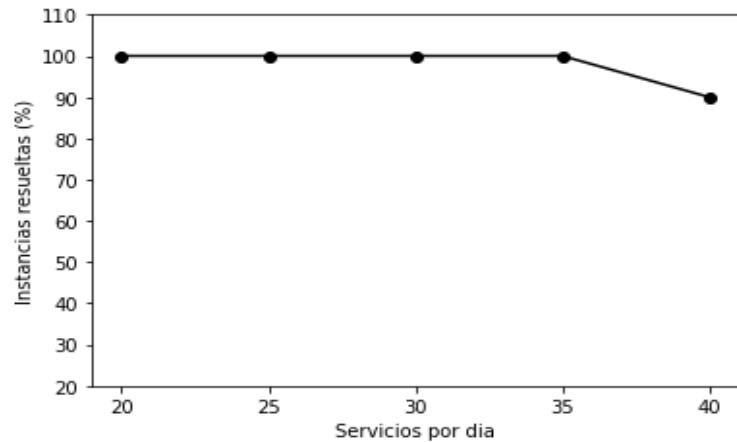


Ilustración 27: Variación del porcentaje de las instancias resueltas con infinito tiempo activo del camión.

Si consideramos el escenario donde el camión tiene tiempo limitado de actividad, para las instancias testeadas, podemos decir que la herramienta puede resolver el 100% de las instancias con 25 clientes. Para el caso de 35 clientes se resolvieron el 60% de las instancias testeadas.

## IX - Problema multi-período y consistencia en el servicio

### Problema

Hasta el momento el enfoque de los problemas planteados ha sido diario. El enfoque multi-período se plantea frente al problema de asignación de los clientes a los días de la semana, para luego resolver el problema de transporte diario.

En esta sección, haremos hincapié en el problema multi-período con consistencia de servicio. La literatura indica que mantener un rango horario de visita consistente en el período conlleva a una mejora en la satisfacción del cliente. Generalmente, cuando nos enfrentamos a problemas de optimización la función objetivo suele estar relacionada con reducir los costos o maximizar el beneficio. El problema consistente de servicio busca además de reducir los costos de transporte, aumentar la satisfacción del cliente.

El problema de transporte consistente (ConVRP) por siglas en inglés, considera la satisfacción del cliente al asignar un mismo chofer a los clientes en los diferentes días del período, así como también vela por mantener los rangos horarios del período de visita acotados. El problema generalizado del ConVRP (GenConVRP) quita la restricción de asignar a cada cliente el mismo chofer a lo largo del período, lo que genera grandes mejoras en la reducción de costos. Sin embargo, los estudios realizados muestran que servir al mismo cliente con el mismo chofer tiene un impacto positivo significativo en la satisfacción. Llegado el caso, habría que analizar el *trade-off* entre el sobrecosto por la logística versus el aumento de satisfacción.

La consistencia en el servicio queda definida por la diferencia, considerando el período entero, entre el tiempo máximo y mínimo de visita para cada cliente. Observemos que, no se permite que el camión esté en idle para ayudar a reducir la diferencia al aumentar el tiempo de llegada.

Al plantear un problema así se busca incluir el concepto de regularidad en el servicio. Este es un concepto relativamente nuevo en lo que respecta a las operaciones y problemas de ruteo. Para las empresas como ABITO que trabajan de cerca con los clientes, considerar este concepto a la hora de definir las rutas puede generar resultados positivos.

En el caso puntual de ABITO, el período a considerar es semanal con un sólo vehículo lo que se modela con un ConTSP.

No se realiza un modelo funcional de este problema. Se menciona para introducir el concepto de regularidad de servicio y satisfacción al cliente, así como también para presentar otra perspectiva sobre la cual se puede optimizar en un problema de ruteo. En cambio, se analiza la regularidad del servicio para los resultados del problema del TSPTW en ambas líneas base.

### Modelo matemático del GenConVRP

El siguiente modelo matemático para el problema de GenConVRP fue extraído del paper “*The Generalized Consistent Vehicle Routing Problem*” [6].

Datos:

- Sea  $G = (N, A)$  un grafo completo y dirigido.
- Sea el conjunto  $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$  del depósito  $\{0\}$  y clientes que debemos visitar
- Se define  $N^{am} \subseteq N \setminus \{0\}$  como el conjunto que contiene a los clientes que se visitan en la mañana
- Se define  $N^{pm} \subseteq N \setminus \{0\}$  como el conjunto que contiene a los clientes que se visitan en la tarde.
- $N^{am} \cap N^{pm} = \{\}$
- Sea  $A = \{(i, j) \mid i, j \in N, i \neq j\}$ . Los arcos de  $N^{am}$  a  $N^{pm}$  se pueden omitir.
- Sea el conjunto  $K = \{1, \dots, k\}$  de vehículos homogéneos disponibles no restrictivo  $|K| = |N \setminus \{0\}|$
- Cada vehículo  $k \in K$  tiene una capacidad  $Q$ . Para el GenConTSP  $K=1$
- Cada vehículo parte y retorna al depósito. El tiempo de salida es flexible pero el tiempo de regreso debe ser anterior a  $T$ .
- El período es de  $|D|$  días, donde  $d \in D$ .
- La demanda del cliente  $i$  el día  $d$  es  $q_{id}$
- El tiempo de servicio del cliente  $i$  el día  $d$  es  $s_{id}$ .
- El tiempo de trayecto del cliente  $i$  al  $j$  es  $t_{ij}$ .
- Cada cliente puede tener a lo sumo  $W$ :  $W \geq 1$  choferes diferentes en el período. Esto define la consistencia en cuanto a los choferes.

Objetivo:

- Minimizar la suma ponderada del tiempo de recorrido y el rango horario de visita máximo del período.

Formulación:

Se definen las siguientes variables:

- Sea  $x_{ijkd} = 1$  si el camión  $k$  va del cliente  $i$  al  $j$  en el día  $d$ . 0 caso contrario
- Sea  $y_{ikd} = 1$  si el cliente  $i$  es asignado al vehículo  $k$  el día  $d$ . 0 caso contrario.
- Sea  $z_{ik} = 1$  si el cliente  $i$  es asignado al vehículo  $k$ . 0 caso contrario.

Se definen además las siguientes variables auxiliares y parámetros:

- El parámetro auxiliar  $w_{id}$  es 1 si el cliente  $i$  requiere un servicio el día  $d$ . 0 caso contrario.
- Se define  $a_{id}$  como variable continua que indica el tiempo de llegada al cliente  $i$  en el día  $d$ .
- Se utiliza el parámetro  $\alpha$  como peso del tiempo total de recorrido para la función objetivo.
- Sea  $l_{max}$  el rango máximo de horario de visita del período. Queda a criterio de la empresa definir este valor. Debe considerarse el *trade-off* entre nivel de consistencia de servicio y sobrecosto operativo. Como referencia el valor puede surgir como un parámetro de calidad en función de la industria.

Función objetivo:

$$\text{minimizar} \left\{ \alpha \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} t_{ij} x_{ijkd} + (1 - \alpha) l_{max} \right\} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$y_{0kd} = 1 \quad \forall k \in K, d \in D \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ikd} = w_{id} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, d \in D \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{0\}} q_{id} y_{ikd} \leq Q \quad \forall k \in K, d \in D \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijkd} = \sum_{i \in N} x_{jikd} = y_{jkd} \quad \forall j \in N, k \in K, d \in D \quad (5)$$

$$z_{ik} \geq y_{ikd} \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, k \in K, d \in D \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} z_{ik} \leq W \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (7)$$

$$a_{id} + x_{ijkd}(s_{id} + t_{ij}) - (1 - x_{ijkd})T \leq a_{jd} \quad \forall i, j \in N \setminus \{0\}, k \in K, d \in D \quad (8)$$

$$a_{id} + x_{ijkd}(s_{id} + t_{ij}) + (1 - x_{ijkd})T \geq a_{jd} \quad \forall i, j \in N \setminus \{0\}, k \in K, d \in D \quad (9)$$

$$a_{id} + s_{id} + t_{i0} \leq T \quad \forall i \in N \setminus \{0\}, d \in D \quad (10)$$

$$(a_{i\gamma} - a_{i\delta})w_{i\gamma}w_{i\delta} \leq l_{max} \quad \forall i, j \in N \setminus \{0\}, \gamma, \delta \in D \quad (11)$$

$$a_{id} \leq \frac{T}{2} \quad \forall i \in N^{am}, d \in D \quad (12)$$

$$a_{id} \geq \frac{T}{2} \quad \forall i \in N^{pm}, d \in D \quad (13)$$

$$a_{id} \geq t_{0i} \quad \forall i \in N, d \in D \quad (14)$$

$$x_{ijkd} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N, k \in K, d \in D \quad (15)$$

$$y_{ikd} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, k \in K, d \in D \quad (16)$$

$$z_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, k \in K \quad (17)$$

Cada una de las restricciones se explican a continuación. (2) se define el depósito como inicio del recorrido. (3) garantiza que cada cliente es atendido en el día correspondiente. (4) la capacidad del vehículo no puede ser mayor a Q. (5) igualdades de flujo. (6) y (7) garantizan consistencia del chofer. (8) y (9) definen los tiempos de llegada de los clientes. (10) fuerza que el vehículo vuelva al depósito a tiempo. (11) asigna el rango horario de visita máximo. (12) y (13) garantizan factibilidad en el tiempo. (14) asigna el menor horario posible de cada cliente. (15), (16) y (17) las variables son binarias.

## Resultados obtenidos

En los problemas del TSP y TSPTW se ha analizado únicamente el período diario. Para poder introducir el concepto de regularidad en los servicios va a ser necesario considerar la semana (de lunes a sábado) como horizonte de tiempo.

Si tomamos los resultados de los rangos horarios del TSPTW para ambas líneas base podemos definir las siguientes métricas:

- El rango horario de visita mínima: de los horarios de visita de toda la semana que tiene el camión para pasar por un cliente dado, el menor.
- El rango horario de visita máximo: de los horarios de visita de toda la semana que tiene el camión para pasar por un cliente dado, el mayor.
- El rango de visita semanal: la resta entre el mayor y el menor horario de visita de la semana para un cliente dado.

Referirse al [Anexo](#) para consultar la tabla 23 con el detalle de las métricas para cada cliente de la LB1.

En la tabla 16 se detallan (en minutos) el promedio, el máximo y el mínimo rango de visita semanal.

Promedio	20
Máximo	107
Mínimo	3

*Tabla 16: Análisis de los rangos de visita (en minutos) para la LB1.*

Es importante destacar que ningún cliente resultó con un rango de visita semanal mayor a 2 horas, lo que muestra regularidad entre los recorridos diarios durante la semana. Con esta cantidad de servicios, la empresa estaba logrando consistencia en los servicios sin siquiera proponérselo como objetivo. Además, los rangos horarios están acotados por las ventanas de tiempo impuestas por los clientes lo que ayuda a que el rango de visita semanal sea corto.

Referirse al [Anexo](#) para consultar la tabla 24 con el detalle de las métricas para cada cliente de la LB2.

Los estadísticos básicos para los rangos horarios semanales (en minutos) de la LB2 se muestran en la tabla 17.

Promedio	84
Máximo	168
Mínimo	8

*Tabla 17: Análisis de los rangos de visita (en minutos) para la LB2.*

Comparado con los valores de la LB1, se observa que el promedio del rango de visita se cuadriplicó. Si bien no hubo rangos horarios semanales mayores a 3 horas, se hace evidente que a medida que la complejidad de la operativa aumenta la regularidad en los servicios implícita por el TSPTW se va perdiendo.

La regularidad en el servicio presenta varias ventajas en cuanto a la planificación de la operativa. Como fue mencionado anteriormente, mejora la satisfacción del cliente. Además, facilita la coordinación con los clientes, ya que estos disponen de un horario específico regular a lo largo de la semana, con rangos determinados en los que el camión puede pasar. Si no hubiese regularidad ese rango horario sería demasiado amplio y probablemente cada día le

toque horarios bien distintos. Contar con rangos de visita acotados y regulares puede permitir reducir los tiempos de servicios. Actualmente, la falta de coordinación entre el cliente y la empresa es la causa principal de demoras en la recolección de residuos lo que resulta en tiempos de servicios más largos de lo previsto. Reducir los tiempos de servicio implica un aumento en la capacidad de gestión de nuevos servicios contratados.

Considerar la regularidad en los servicios también permite estudiar qué tan robusta es la solución encontrada. Se podrían fijar distintas cotas máximas para el rango de visita semanal y analizar cómo varían los tiempos totales y las distancias del recorrido. A partir de este estudio se podría cuantificar el cambio marginal en el costo logístico en función del rango de visita semanal.

## X - Propuesta de solución

Los problemas planteados anteriormente buscan encontrar una mejor solución sobre la cual poder comparar los *benchmarks* de la empresa. La siguiente propuesta tiene como fin establecer un procedimiento que otorgue regularidad en el servicio en períodos de semanas consecutivas.

La propuesta resuelve dos situaciones de la operativa cotidiana del equipo de logística de ABITO que fueron detectadas durante el relevamiento de la 'situación actual':

- eventos especiales
- agregar un nuevo cliente al recorrido existente

Contextualizando, el equipo de logística arma las rutas diarias para la semana entrante. En el caso de haber un evento especial, este debe ser incluido en el recorrido, lo que puede afectar la ruta y los horarios pactados con los clientes.

De la misma forma, al agregar un nuevo cliente se debe tratar de que el cambio no altere sustancialmente la ruta ni los horarios (del día) en comparación con los recorridos anteriores para el mismo día.

A efectos explicativos consideraremos al evento especial y al nuevo cliente como un nuevo servicio. En la realidad, la principal diferencia operativa entre ambos radica en la cantidad de residuos generados. Los eventos especiales pueden generar hasta 5 veces la cantidad de residuos que un cliente normal. Si bien no se consideran las capacidades en este estudio, es pertinente remarcar la diferencia entre ambos servicios.

Lo propuesta permite analizar el impacto que tiene sobre los rangos horarios de visita el agregar un nuevo servicio en un recorrido dado. ¿Cómo funciona? Primero, se corre el problema TSPTW para los servicios existentes. Los valores resultantes de los horarios de visita son considerados el input de las ventanas de tiempo de los servicios existentes en el segundo problema TSPTW. En este segundo problema, los servicios existentes tienen una ventana de tiempo resultante de la resolución del problema anterior y una amplitud. Además, se agrega el nuevo servicio con su ventana de tiempo correspondiente. La amplitud de las ventanas de tiempo de los servicios existentes es un parámetro de entrada del segundo problema. Al variar la amplitud de la ventana de tiempo, se puede determinar que tanto afecta el recorrido la inclusión de un nuevo servicio.

El TSPTW se puede resolver con o sin heurística en dos fases. Recordemos que la heurística en dos fases para el preprocesamiento de datos servía para simplificar el espacio de soluciones (eliminando las múltiples ventanas de tiempo). Usar la heurística en dos fases por lo general permite encontrar soluciones factibles en instancias donde sin el preprocesamiento no se encuentran.

Referirse al Anexo para ver la captura de pantalla del *script* con los parámetros a ser modificados para definir el problema.

Formular la propuesta de esta forma es de utilidad porque permite analizar el impacto que tiene un nuevo servicio en el recorrido establecido. Este enfoque puede servir como metodología para ayudar al equipo de logística a asignar los clientes a los días. Se busca minimizar el cambio a los rangos horarios de visita para los servicios existentes.

La solución puede verse como otra medida de regularidad se servicio, que mira un período de tiempo de dos semanas consecutivas en el caso de incluir un nuevo cliente.

El problema, permite hacer una comparativa con dos parámetros; preprocesamiento de datos y nuevo servicio. Esto permite comparar recorridos en la condición actual (sin parada al mediodía) y en la condición futura (con parada al mediodía).

A continuación, se muestran los resultados de un recorrido dado, con las 4 posibles instancias del problema. El nuevo servicio se muestra en azul.

En los recorridos con parada al mediodía se detallan los rangos horarios de cada iteración. Se considera el inicio del rango horario como el centro de la ventana de tiempo.

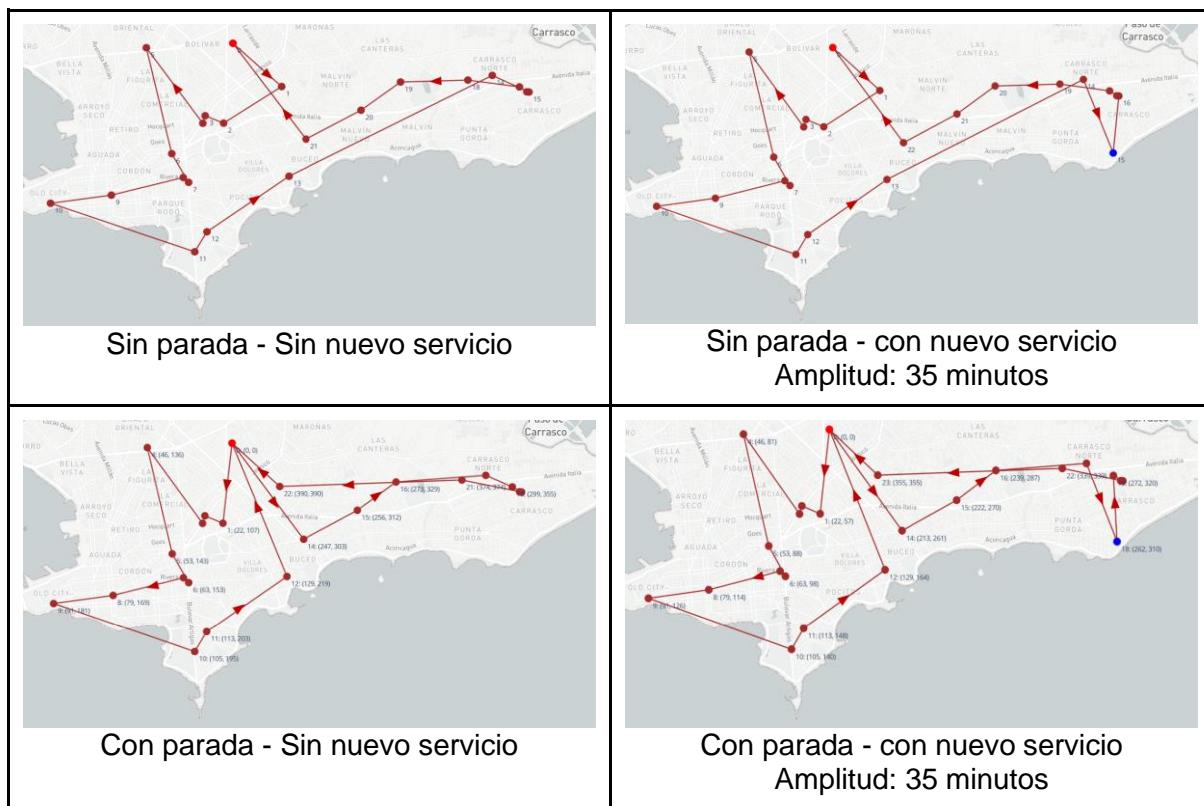
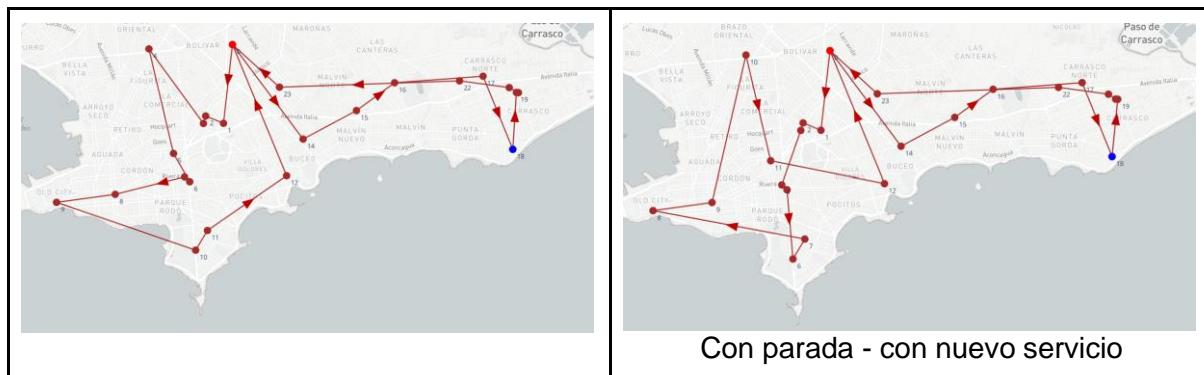


Ilustración 28: Gráficos con los resultados de las variantes permitidas por la propuesta.

Para analizar la sensibilidad respecto de la amplitud se consideraron otras dos instancias. Los recorridos se muestran en las siguientes gráficas. Se observa como el recorrido varía entre cada uno. La solución con 34 minutos o menos daba no factible.



Con parada - con nuevo servicio Amplitud: 45 minutos	Amplitud: 60 minutos
---------------------------------------------------------	----------------------

*Ilustración 29: Gráficos con los resultados de un 'nuevo servicio' con diferentes amplitudes.*

Además de los gráficos con los recorridos marcados se calcula el tiempo de recorrido sin idle del camión, y las distancias totales recorridas. Si se considera un nuevo servicio, también se calculan las diferencias entre el recorrido con y sin nuevo servicio. Esta última métrica puede ser utilizada para comparar el impacto que tiene agregar un nuevo cliente en cada día de la semana y poder así ubicar al nuevo cliente en el día que minimiza el tiempo sin afectar los horarios de visita actuales.

## Escalabilidad de la herramienta propuesta

Nos interesa determinar si la herramienta tiene potencial de escalar para acompañar la operativa de la empresa para el próximo año.

Con tal motivo, se incluyó en la propuesta una funcionalidad que permite resolver un VRPTW en su configuración más sencilla: hasta 4 camiones, 1 camión con parada al mediodía permite preprocesamiento de datos, pero no permite un nuevo servicio, ni admite capacidades de carga.

Si bien habría que hacerle ciertos ajustes para que esta propuesta de múltiples vehículos modele de buena manera la operativa futura de ABITO, sirve para mostrar que una implementación de este tipo permite escalar las operaciones de la empresa a niveles y dificultades que ‘a mano’ serían inviables.

Una solución a la prueba de concepto del problema de VRPTWs con 4 camiones (únicamente 3 activos), sin preprocesamiento de datos, con parada al mediodía y 68 clientes es la que se muestra a continuación. Cada color representa un camión distinto. Esto muestra que hay potencial en la generalización del uso de la herramienta a una escala mayor.

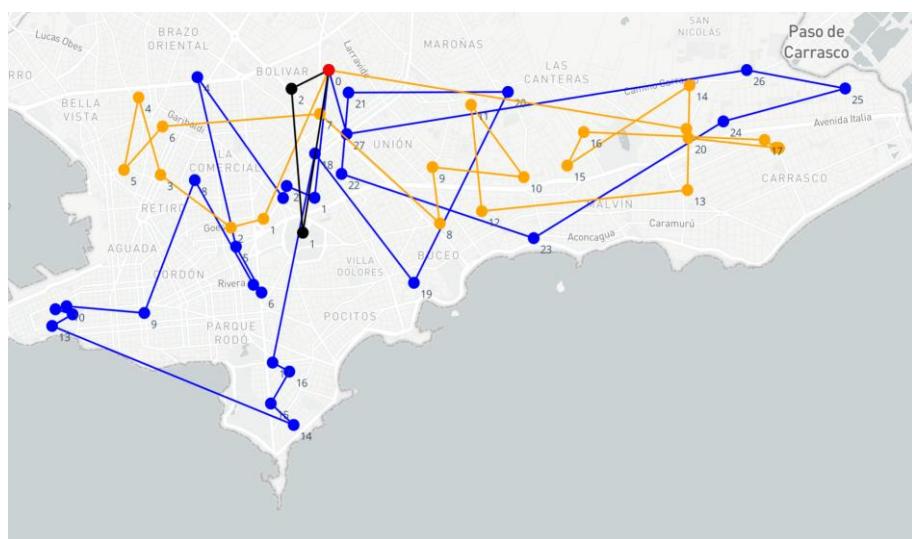


Ilustración 30: Gráfico con el resultado de un VRPTW con 3 camiones activos y 68 clientes.

Por otro lado, se corrió la herramienta propuesta con la máxima cantidad de clientes permitidos (99). Esta limitante se debe a la forma en que se realiza la consulta a la API para crear las matrices de tiempo y distancia, pero no es una limitante del solver en sí.

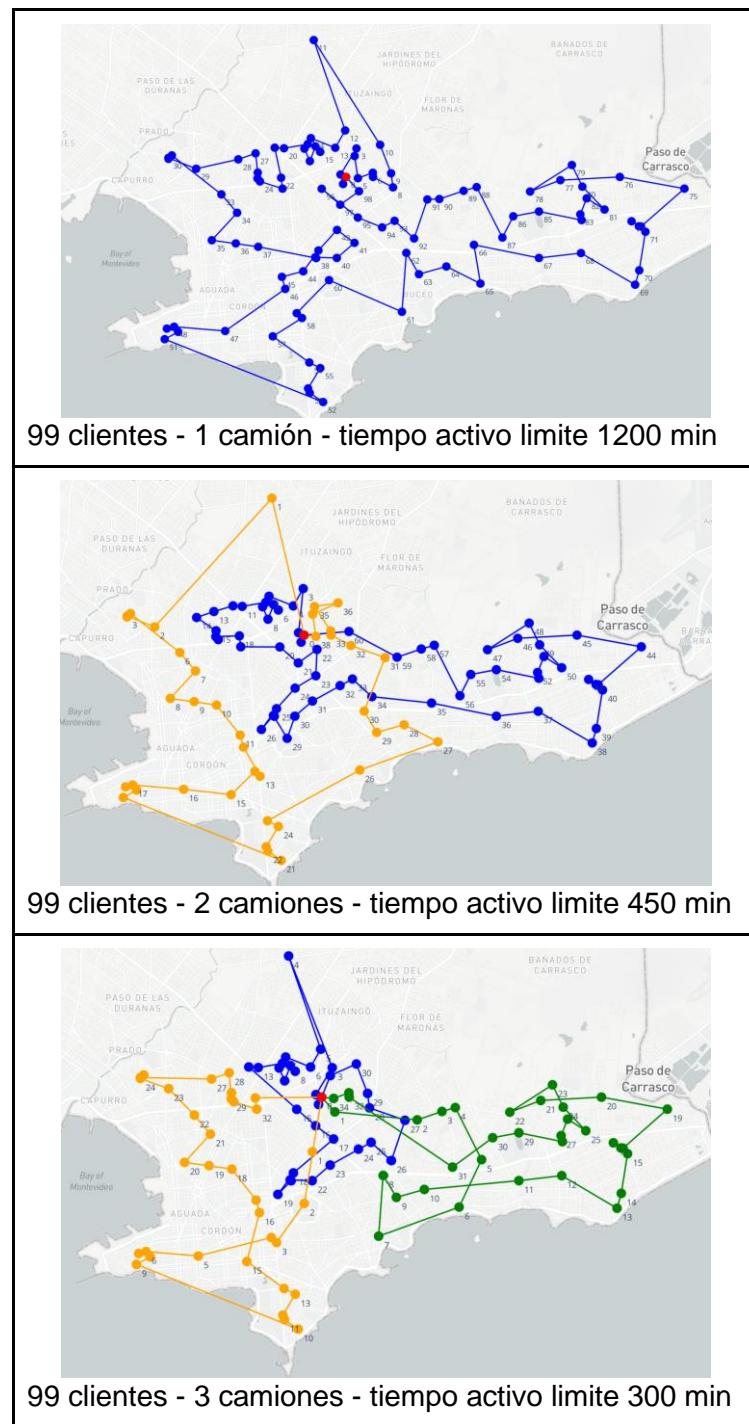


Ilustración 31: Gráficos para validar la escalabilidad de la propuesta.

Además, se aprovechó esta instancia para comparar la performance de los hiper parámetros de las heurísticas y metaheurísticas de búsqueda local. En la optimización del TSP y TSPTW no se obtuvieron mayores diferencias, en parte por el tamaño de las instancias.

Se eligen cuatro configuraciones de hiper-parámetros y se comparan contra el tiempo total del recorrido. Las instancias son siempre las mismas, 99 clientes, 3 camiones, tiempo máximo de actividad por camión 300 minutos. Para comparar la performance se varía tiempo límite permitido del solver.

Tiempo límite del solver			
Configuración	2 segundos	5 segundos	15 segundos
LCI + TS	830 min	830 min	830 min
LCI + GLS	830 min	823 min	810 min
S + TS	814 min	813 min	813 min
S + GLS	813 min	813 min	813 min

Tabla 18: Resultados de la optimización de hiper-parámetros de la propuesta.

Queda en evidencia que la herramienta cuenta con potencial suficiente para escalar la operativa para poder gestionar al menos 99 servicios diarios. Los tiempos de resolución son pequeños, viabilizando el uso de la herramienta.

Vale aclarar que no hubo mejoras en los resultados para las instancias testeadas con tiempos límite del solver mayores a 15 segundos. Faltaría poder comparar las soluciones encontradas contra las óptimas, que lamentablemente no se conocen.

## XI - Resultados

A partir de los problemas planteados se obtuvieron los modelos necesarios para poder analizar la operativa actual y futura de ABITO. Nos interesa saber qué potencial de mejora tiene la operativa actual, y también cuantificar algunas métricas operativas y relacionadas a los costos de operación.

Además, nos interesa plantear una herramienta, como prueba de concepto, que permita resolver de forma eficiente y en pocos minutos el tedioso problema de armado de las rutas para instancias futuras, ya que la metodología actual no es escalable.

A continuación se responderán las preguntas planteadas como objetivo en la sección “Introducción al problema”.

### Análisis de resultados

- ¿Cuántos clientes pueden gestionar sin la necesidad de un segundo camión?

Responder esta pregunta es de vital importancia porque de alguna manera condiciona el potencial de crecimiento que tiene la empresa. Si el número de clientes es proporcional a la cantidad de camiones, saber cuántos clientes diarios puede gestionar un camión es un dato relevante.

Basándonos en los datos presentados en la sección “Escalabilidad del estado actual (1 camión)” y suponiendo que la empresa puede renegociar con ciertos clientes las ventanas de tiempo, o alojar algunos clientes puntuales en otro día de la semana (sin violar otras restricciones) podemos suponer que pueden llegar a gestionar 40 servicios por día.

Con este nivel de servicio, el tiempo promedio de viaje entre clientes se puede estimar entre 7 y 8 minutos. Tomando en cuenta el factor para convertir de distancia a tiempo ( $x2,4$ ), se puede estimar que la distancia promedio entre los clientes fue de 3,1 km. Este indicador (distancias promedio entre clientes: DPC) es de relevancia porque da indicios de los costos operativos del camión por cliente visitado a máxima capacidad.

Haciendo referencia a las distancias recorridas (km) por el *benchmark* de la LB2 se puede calcular la DPC ponderada del *benchmark* para la LB2 en 3,4 km:

LB2	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
Recorrido (km)	48,5	48,1	49,7	46,5	51,3	37,3
Clientes	15	13	18	13	19	6
DPC (km)	3,2	3,7	2,8	3,6	2,7	6,2

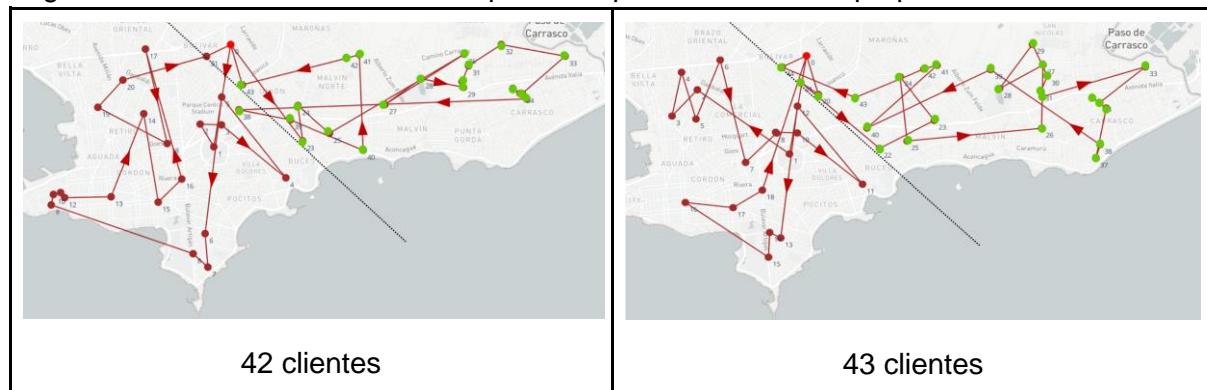
Tabla 19: Distancia promedio entre clientes para la LB2.

Si definimos que el número máximo de servicios por día es de 40 clientes, se puede determinar que la máxima cantidad de servicios semanales (asumiendo 5,5 jornadas de 9 horas diarias) es de entre 220. Redondeamos en 200 servicios semanales así tomamos en consideración el tiempo en ir al vertedero municipal y a las plantas de reciclaje.

En base a la LB2, cada cliente promedio contrata 3,3 servicios por semana. Esto implica que, en promedio, el camión puede cumplir con un total de 67 clientes (semanales).

Si consideramos que el costo de adquisición de un camión con las características similares<sup>9</sup> al utilizado por la empresa cuesta unos USD 40.000, el costo del camión amortizado por servicio realizado en un período de 5 años es de USD 0,78. Si consideramos que cada cliente tiene en promedio 3,3 servicios semanales, la amortización mensual por cliente es de aproximadamente USD 10. El costo de amortización mensual del camión es razonable.

El gráfico 32 muestra dos soluciones provistas por el TSPTW con preprocesamiento de datos.



*Ilustración 32: Solución con preprocesamiento de datos por región.*

Se representan en bordo los clientes de la mañana y en verde los clientes de la tarde. Se observa el efecto de la agrupación por región. La frontera divisoria se representa por la línea punteada en negro.

Viendo los gráficos de los recorridos obtenidos para 42 y 43 clientes es natural cuestionarse si esas soluciones se pueden mejorar, o si están limitadas por el solver.

¿Podremos mejorar el resultado de resolver la instancia completa al dividirla en partes menores?

Para responder a la pregunta, se optó por separar el problema diario en dos partes: período de la mañana (AM), período de la tarde (PM). De esta forma, se resuelven dos TSPTW con una menor cantidad de clientes.

Si bien el análisis no fue ni pretendió ser exhaustivo, los resultados obtenidos validan la idea de que efectivamente, para los casos estudiados, la distancia y el orden del recorrido de solución diaria es equivalente a la unión de ambos períodos de media jornada.

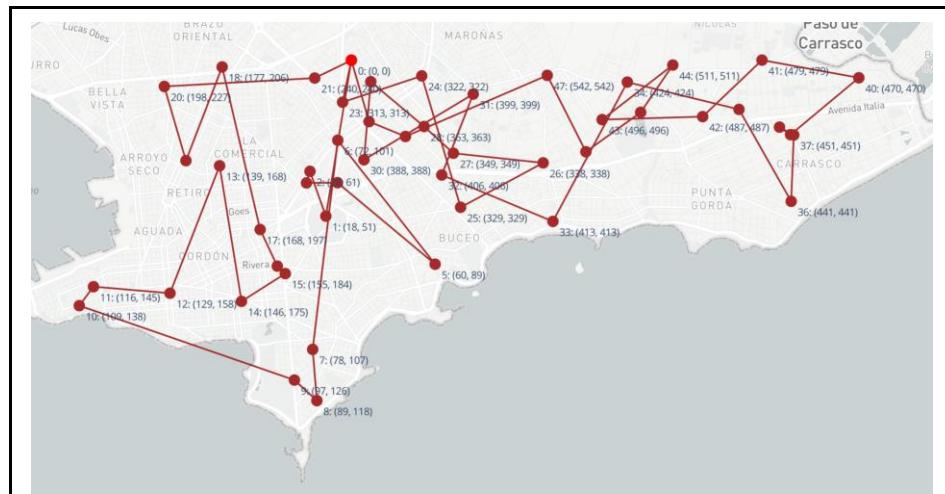
Instancia	Cantidad de clientes	Distancia diaria (m)	Distancia: AM+PM (m)
01	25	67.016	67.016
02	28	70.163	70.163
03	50	96.352	96.352

*Tabla 20: Validando la herramienta al dividir la instancia en partes menores.*

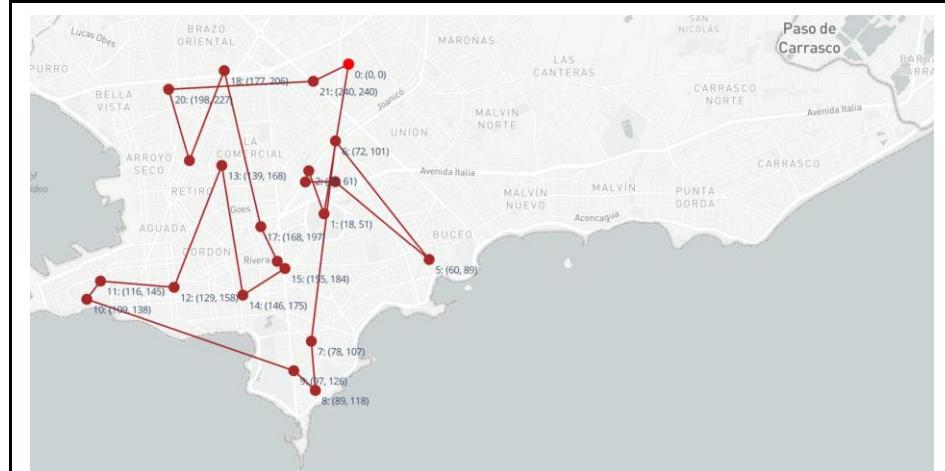
<sup>9</sup> Sacado de <https://www.hyundaiCamiones.com.uy/modelos/hd-65#design> el 26/5/20.

Si se considera el tiempo de recorrido para hacer la comparación, la unión de los dos períodos es de 15 minutos más que el tiempo del recorrido diario. Esto se debe exclusivamente a que se contabiliza dos veces el tiempo de servicio del depósito. Descontado el tiempo duplicado de servicio, los tiempos de recorrido fueron coincidentes para las instancias analizadas.

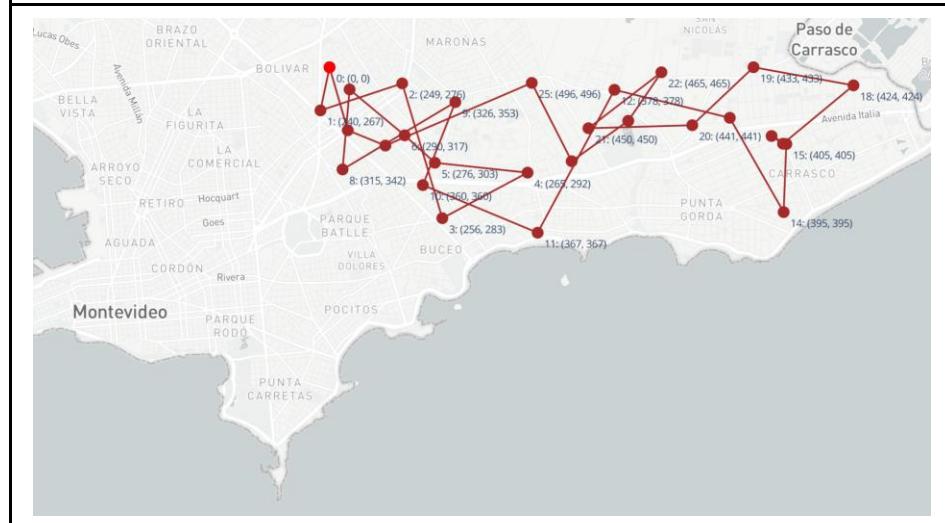
El gráfico del recorrido para la instancia 3 se muestra a continuación.



Instancia 3: 50 clientes - tiempo activo camión 800 min - 96.352m



Instancia 3 - Recorrido de la mañana - 21 clientes - 36.257m



### Instancia 3 - Recorrido de la tarde - 29 clientes - 60.095m

*Ilustración 33: Gráfico de los recorridos totales y parciales de la instancia 3.*

Si bien esto no es una condición suficiente para afirmar que el recorrido diario encontrado con la heurística de preprocesamiento de datos creado es la mejor solución, sirve para validar la capacidad resolutiva de la herramienta.

Queda en evidencia que el solver es capaz de resolver instancias de varios clientes (en este caso 50) con la misma precisión que instancias equivalentes menores. Sin embargo, no hay garantía de la calidad de la solución.

- ¿Cuál es el potencial de mejora de los recorridos actuales?

Para responder esta pregunta se debe considerar el TSPTW modelado sobre la LB2 como *benchmark*. Este problema considera a los clientes, sus tiempos de servicio y las restricciones horarias.

Los resultados obtenidos en la tabla 11 muestran que, en caso de basar el recorrido según el output del modelo, se podría lograr una mejora del  $10\% \pm 2\%$ .

Capitalizar esta mejora en los recorridos tiene el potencial de agregar 20 servicios de recolección semanales, representando en promedio unos 6 clientes (recordar que a partir de la LB2 se calculan 3,3 servicios por cliente promedio).

Visualmente, la diferencia entre los recorridos del TSPTW y los del benchmark LB2 se muestran en la ilustración 22.

Queda claramente visible como el recorrido en verde (*benchmark*), presenta algunas ineficiencias en el recorrido. Si bien las razones por la cual se eligieron así son desconocidas, pueden existir factores humanos como ser la decisión del chofer de tomar caminos por calles principales o alguna calle cerrada por estar temporalmente en obra.

- ¿Cuál sería el ahorro potencial en caso de modificar las restricciones horarias de los clientes?

En caso de modificar las restricciones horarias a conveniencia, el solver buscará minimizar las distancias a la vez que cumple con todos los clientes. Para responder la pregunta, es necesario comparar los resultados del problema del TSP contra los del benchmark de la LB2, detallados en la tabla 5. La mejora potencial cuantificada en base al LB2 fue de aproximadamente 17%.

En las siguientes gráficas se muestran los recorridos del TSP (en naranja y posición del índice en el vértice superior izquierdo del marcador) y del TSPTW (en azul y la posición del índice en el vértice inferior derecho del marcador).

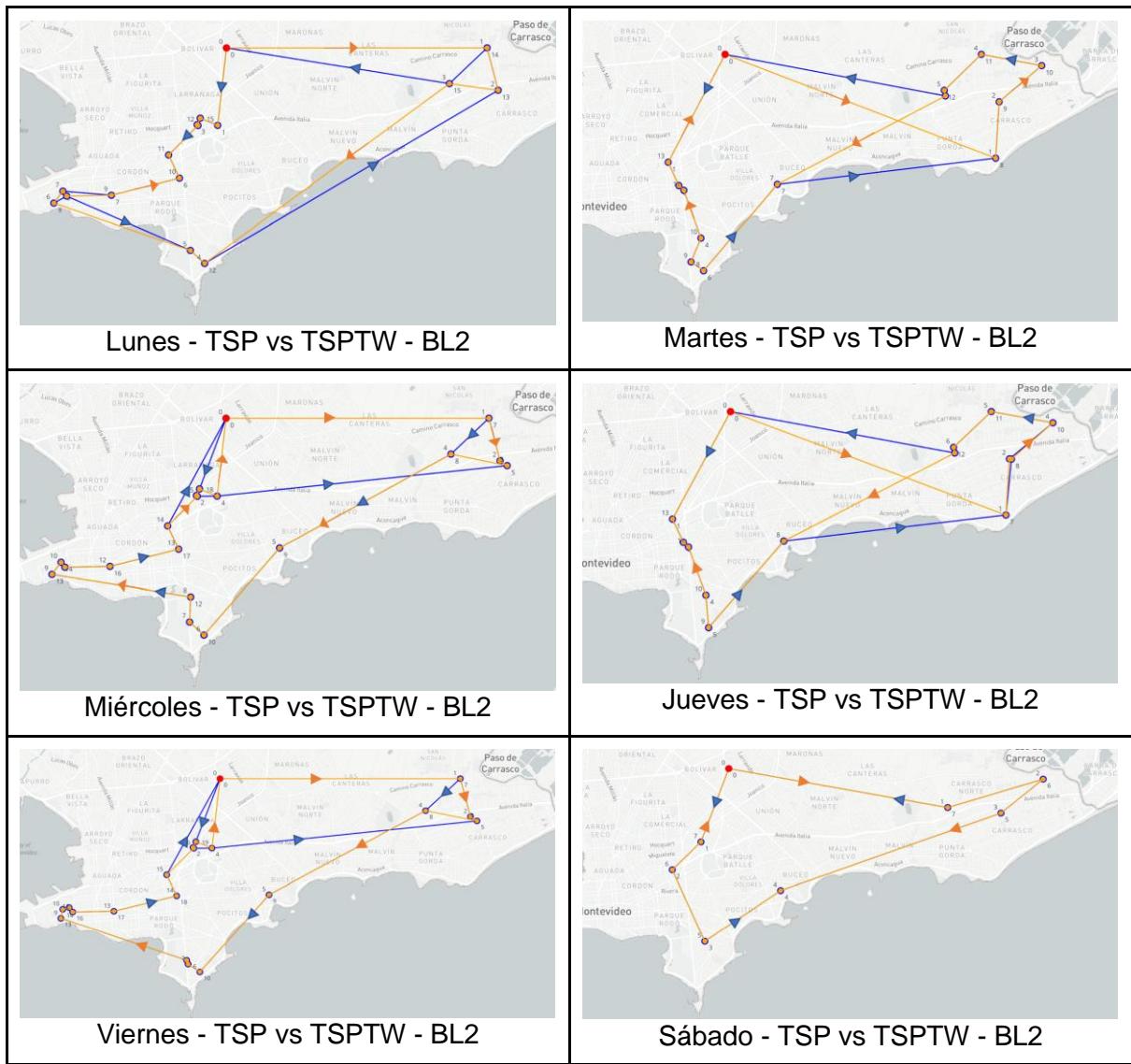


Ilustración 34: Comparativa entre los recorridos diarios del TSP y el benchmark para la LB2.

En estas gráficas queda en evidencia el efecto que tienen las ventanas de tiempo impuestas por los clientes en el recorrido. El martes y jueves, el recorrido en naranja parece más largo, pero los datos fueron verificados con la matriz de distancia y efectivamente el recorrido del TSP es más corto. Ver TSP para la justificación. El sábado, si bien el recorrido es el mismo, pero en sentido inverso. Recordando que la matriz de distancias no es simétrica se llega a que el sentido impuesto por el TSP es efectivamente el más corto.

Si por el contrario comparamos los resultados del TSP contra los del TSPTW para la misma línea base, se observa que las restricciones en las ventanas de tiempo imponen una reducción de 7 puntos porcentuales sobre la cantidad de servicios semanales totales. Esto se traduce en 14 servicios, o 4 clientes promedio, menos de recolección semanales.

- ¿Qué impacto tiene reducir el tiempo de servicio de cada cliente en 1 minuto?

Hasta el momento hemos analizado mejoras que están relacionadas exclusivamente con el recorrido del camión. Sin embargo, sabemos que el tiempo promedio de viaje entre clientes es de 7 a 8 minutos mientras que el tiempo promedio de servicio es de 5 minutos. ¿Qué pasaría si se pone foco en reducir el tiempo de servicio?

Para lograr menores tiempos de servicios es necesario analizar la operativa de cada cliente. Para profundizar en esta mejora sería necesario realizar un análisis SMED (*Single Minute Exchange of Die*), lo que escapa del alcance del presente estudio. Brevemente, el tiempo de servicio está compuesto por: el tiempo de estacionar, el tiempo de coordinar que abran y dejen los bolsones de residuos a disposición del chofer, el tiempo de pesar y documentar la carga y la carga los bolsones de residuos en el camión.

Según lo relevado, las demoras suelen ocurrir en la coordinación entre el cliente y el camión. No siempre se tienen los residuos prontos, a veces quien los recibe está atendiendo a alguien más. Como fue mencionado en la sección del modelo ConGenVRP, contar con un cronograma consistente y con un rango horario de visita acotado sin duda ayudaría a reducir el tiempo necesario para la coordinación de la recolección de los residuos.

Analizamos el impacto que tiene reducir en 1 minuto el tiempo de servicio. El impacto es medido en cantidad de nuevos servicios.

Para una primera aproximación numérica, si consideramos que el camión tiene un tiempo de actividad de 540 minutos, que el tiempo de viaje entre clientes es de 7,5 minutos (parada al mediodía incluida) y el tiempo de servicio es de 4 minutos se puede llegar a la conclusión que la cantidad de servicios posibles es de 47. Esto significa un aumento de 20 servicios por semana, un 10% más que si consideramos un tiempo de servicio de 5 minutos.

Los resultados de la simulación del TSPTW con preprocesamiento de datos y parada al mediodía dan soporte al cálculo rápido anterior. Se simularon 10 instancias para cada escenario con N clientes elegidos al azar. El tiempo de servicio se consideró de 4 minutos para todos los clientes.

La siguiente gráfica muestra la cantidad de instancias resueltas del total. Además, se comparan contra las mismas instancias corridas con tiempos de servicio de 5 minutos. Se puede ver como la mejora es considerable.

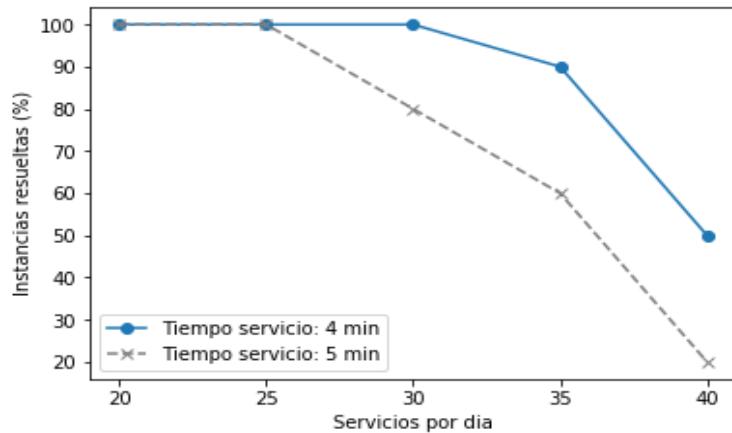


Ilustración 35: Comparativa entre el porcentaje de instancias resueltas con tiempos servicios de 4 y 5 minutos.

En un 50% de las instancias simuladas el solver logró factibilidad para valores de 40 servicios diarios.

La gráfica 37 muestra los resultados de un análisis en el entorno de los 42 y 48 servicios diarios. Se observa como en las instancias mayores a 43 clientes, la factibilidad para los casos testeados es del 20% o menor.

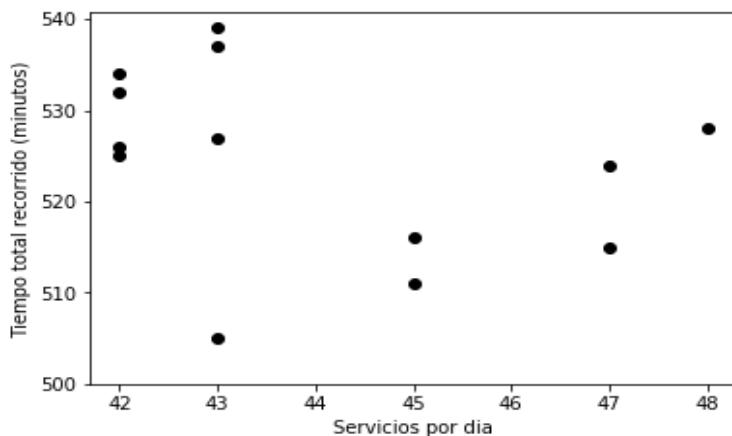


Ilustración 36: Tiempos totales de recorridos testeados entre 42 y 48 servicios.

- ¿Se podrá dilatar la necesidad de un segundo camión con una mejora en la gestión de los recorridos?

Por lo visto anteriormente, contar con un recorrido optimizado es fundamental para sacarle el mayor rédito al camión. Semanalmente el camión cuenta disponibilidad para 200 servicios.

Por otro lado, los resultados del TSPTW en base al LB2 obtuvieron una mejora del entorno del 10%. Capitalizar este tipo de mejoras sin duda ayudará a ABITO a lograr un mejor uso de sus recursos.

Una vez cubierta la capacidad de recolección del camión y del turno laboral será decisión de la empresa si les conviene poner un segundo turno (en caso de que los clientes puedan en esas horas) o bien ampliar la flota con un nuevo vehículo.

En base a los datos del LB2 (tabla frecuencia semanal en sección línea base) la empresa cuenta con 95 servicios semanales correspondientes a 29 clientes. Esto implica que a la fecha del LB2, ABITO tiene una capacidad ociosa del 53% respecto a la operativa del camión.

Llevar control de la métrica de “cantidad de servicios semanales” es de vital importancia para prever el planeamiento de las operativas logísticas. Además, esta métrica puede servir para definir una estrategia de *pricing* del servicio. A medida que los servicios disponibles escasean, frente a una demanda en exceso, se puede establecer un precio dinámico para poder sacar una mayor rentabilidad.

Para responder la pregunta, consideraremos el potencial mejora resultante de reducir en 1 minuto el tiempo de servicio y la mejora potencial por usar el recorrido en el TSPTW en vez de la solución manual. Sumadas, se podrían lograr 40 servicios más por semana lo que se traduce en unos 12 nuevos clientes promedio. En tal caso, habría que considerar la capacidad del camión para ver si efectivamente se puede cumplir. Si suponemos que ABITO mantiene una tasa de incorporación de clientes de 5 por mes, la implementación de las mejoras mencionadas anteriormente podría retrasar en 2 meses la necesidad de un nuevo camión.

## ¿Puede una herramienta de optimización contribuir a la operativa actual?

Una herramienta de optimización pensada a medida sin duda contribuye de gran manera en facilitar las tareas del equipo de logística. Pensemos en la herramienta prueba de concepto descrita en “Propuesta de Solución”.

Esta herramienta permite resolver las siguientes 4 tareas:

- resuelve un TSPTW de la operativa actual sin depósito al mediodía.
- resuelve un TSPTW de la operativa futura con depósito al mediodía.
- permite incluir un nuevo servicio dentro de un recorrido existente, sin alterar los rangos horarios de visita de los servicios existentes.
- permite determinar la amplitud del rango horario de visita para un nuevo servicio, a la vez que determina el aumento en la distancia del recorrido total.

El tiempo de resolución de cada instancia se puede estimar en 2 minutos. Si consideramos el tiempo total de incluir los datos del cliente en el CSV, generar y cargar la matriz de distancia o tiempos desde la consulta API y resolver el problema con el solver lleva no más de 6 minutos. Este tiempo varía poco si consideramos 3 o 50 clientes.

Por el contrario, armar un recorrido de 20 servicios desde cero bajo la metodología actual lleva no menos de 2 horas. Armar un recorrido de 50 servicios en el día resulta prácticamente imposible con el método manual.

Por otro lado, la herramienta permite incluir un nuevo servicio a un recorrido determinado con el fin de no afectar los rangos de visita establecidos con los clientes. Esto es una tarea repetitiva a la que se enfrenta el equipo de ABITO. Por medio de la herramienta se puede automatizar este proceso y reducir las horas hombre necesarias en un factor de 10.

Los resultados de incluir un nuevo servicio se pueden obtener en 3 minutos, permiten definir la amplitud como un parámetro variable, pudiendo iterar y buscar la menor amplitud que

permite no afectar el recorrido existente. Además, compara los dos recorridos, con y sin el nuevo servicio, y calcula la diferencia de tiempo y distancia. Esto sirve para ayudar al equipo a determinar en qué día incluir al nuevo cliente. Con el proceso de armado de cronogramas actual, incluir un nuevo servicio les lleva no menos de 30 minutos y carecen de la posibilidad de analizar la amplitud o el aumento de la distancia del recorrido.

Otra ventaja fundamental de la prueba de concepto desarrollada es que permite escalar la operativa a niveles que manualmente no sería viables. Se lograron correr instancias de hasta 48 servicios por día con un sólo camión (limitadas por el tiempo de actividad del camión) y se corrieron instancias de hasta 99 servicios diarios (cantidad de clientes existentes y ficticios creados) con 3 camiones. En este estudio no se realizaron pruebas para determinar el potencial de la herramienta. Se corrieron casos para validar la prueba de concepto con plazo de 1 año a futuro.

Por medio de una herramienta que permita escalar y automatizar los procesos necesarios para armar los cronogramas la empresa puede reducir los costos fijos de personal, o bien ampliar la capacidad de acción a otras tareas con el personal existente. Una herramienta de este estilo va a ser necesaria en el corto plazo ya que la metodología actual no permite escalar al ritmo con el que vienen creciendo.

## XII - Conclusiones y trabajo a futuro

Se analizaron diferentes problemas cada uno modelando un grado de complejidad y enfoque diferente. Los enfoques fueron por período diario y multiperíodo (semanal) lo que permitió incluir el concepto logístico de regularidad de servicio. Los problemas se compararon contra la operativa actual que fue usada como *benchmark*, lo que permitió cuantificar su potencial de mejora. Además, se consideró la posibilidad de reducir, por medio de un análisis SMED, los tiempos de servicio. Por último, se desarrolló una herramienta que sirve como prueba de concepto que simplifica las tareas realizadas por el equipo de logística, logrando reducciones en las horas hombre dedicadas al armado de los cronogramas y permite escalar la operativa a niveles que manualmente sería imposible.

Se analizó la operativa futura en la cual se incluye la parada al mediodía del camión. Esto permitió simular escenarios para determinar la cantidad máxima de servicios a ser cumplidos por un camión. Se llega a la conclusión de que un camión puede cumplir hasta con 200 servicios semanales.

A partir de este estudio se definieron las métricas de “cantidad de servicios semanales”, “tiempo promedio de viaje”, “costo promedio de amortización mensual del camión por cliente” que sirven para gestionar los recursos logísticos y comerciales. El camión está operando con un 53% de capacidad ociosa, y el costo mensual de amortización del camión por cliente en promedio es de USD 10. El tiempo promedio de viaje entre clientes es de entre 7 y 8 minutos. En distancia serían 3,1 km.

Además, se resolvió un problema que considera la posibilidad de incluir un nuevo servicio a un recorrido determinado con el fin de no afectar los rangos de visita establecidos con los clientes. Este problema también permite ubicar a los nuevos clientes de modo que tengan el menor impacto (horarios de visita y distancia) en las rutas diarias existentes. Al realizar esto, se busca mantener continuidad en la consistencia del servicio en diferentes semanas lo que vuelve aún más interesante el concepto de regularidad de servicio.

Contar con una herramienta que permita analizar el impacto de incluir un nuevo servicio en una ruta existente permite reducir la cantidad de horas hombre dedicadas a la tarea de armado de las rutas. Sumado a esto, la herramienta permite variar la amplitud de las ventanas de tiempo lo que permite encontrar las cotas mínimas de holgura.

Otra ventaja de la herramienta como prueba de concepto desarrollada es que permite operar a niveles que con la metodología actual no sería viables. Creo firmemente que incluir una herramienta de este tipo es de vital importancia para que ABITO pueda lograr una operativa capaz de alcanzar los niveles de crecimiento proyectados.

Reducir el tiempo de servicio de cada cliente es igual de importante que la optimización del recorrido. Por medio de una simulación se mostró que si se reduce el tiempo de servicio de 5 a 4 minutos es posible lograr un 10% de servicios semanales más. Esta mejora representaría 20 servicios semanales lo que se traduce en 6 clientes promedios más por camión.

El potencial de mejora resultante de la reducción de los tiempos de servicios y la optimización de las rutas por medio de una herramienta que modele un TSPTW se ubicó en el entorno del 20%, es decir unos 40 nuevos servicios semanales o 12 nuevos clientes promedio por camión.

Respecto a las mejoras a futuro, se podrían incluir las capacidades del camión como nueva restricción. En este estudio no se tuvieron en cuenta porque al analizar la cantidad máxima de servicios por día se observó que el tiempo del recorrido actuaba antes como limitación que la capacidad. Es decir, en ninguno de los escenarios simulados el camión pudo recoger más de 25 servicios en la mañana o en la tarde. Como la capacidad del camión se estima en 25 servicios esta pudo ser obviada del estudio. Sin embargo, se realizó una prueba de concepto de un CTSP con descarga al mediodía que modela correctamente la operativa de recogida y descarga en el depósito.

Otra alternativa válida para encarar la restricción de la capacidad es por medio de un VRPTW con *multi-trip*. En este tipo de problema, se permite que el camión vaya al depósito a descargar tantas veces como sea conveniente.

Los análisis realizados consideran que el tiempo del camión activo es inflexible. No considera la posibilidad de hacer horas extras. Esto podría ser considerado en versiones futuras, ya que les permite cierta flexibilidad en la planificación de las operaciones.

Otra potencial mejora a futuro tiene que ver con la asignación de los clientes a los días de las semanas. En este informe se considera como input la asignación de los clientes a cada día de la semana. Por medio de una optimización holística (asignación diaria y optimización de ruteo diario) se podría llegar a una solución semanal mejor.

En lo que respecta al preprocesamiento de los clientes según la región, este podría hacerse por día (y no sobre el total de clientes) y mediante un método de aprendizaje automático como k-medias o vecinos más cercanos. Estos son más dinámicos que la partición por región utilizada, ya que el centro del clúster varía según la distribución de los clientes en el espacio. Además, a futuro, cuando haya más de un camión, se puede configurar para que los clústeres sean más de 2.

Como conclusión, el equipo logístico de ABITO está realizando un buen trabajo con el nivel de servicio y con las herramientas disponibles. Sin embargo, si piensan escalar deberían migrar a un sistema más automatizado y fiable que les permita ahorrar tiempo y mejorar la gestión de las nuevas y más complejas rutas.

Este trabajo les acerca una prueba de concepto para que puedan conceptualizar y cuantificar los ahorros que la implementación de un programa de optimización a medida les pueda brindar. La herramienta propuesta se pone en funcionamiento en las computadoras del equipo logístico de ABITO la semana del 15 de junio del 2020.

Personalmente, incentivo a ABITO para que migren lo antes posible a una solución de este tipo para poder crecer y seguir contribuyendo en la noble tarea de concientizar a cada vez más ciudadanos en velar por el cuidado medioambiental. **Acciones Sustentables por el Bien de Todos.**

### XIII - Bibliografía

- [1] Toth, P., Vigo, D. (2002) The Vehicle Routing Problem. Monographs on Discrete Mathematics and its Applications, SIAM.
- [2] Holland, C., Levis, J., Nuggehalli R., Santilli, B., Winters, J. (2017) UPS Optimizes Delivery Routes.
- [3] Irnich S., Toth P., Vigo, D. (2014) Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications
- [4] Lawler, E. L. (1985). The Travelling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization (Repr. with corrections. ed.). John Wiley & sons. ISBN 978-0471904137
- [5] Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M., Soumis, F. (1995). Time Constrained Routing and Scheduling.
- [6] Kovacs, A., Golden, B., Hartl, R., Parragh, S. (2015) The Generalized Consistent Vehicle Routing Problem. *Transportation Science* 49(4):796-816.

## XIV - Anexo

### Metodología de trabajo

La metodología de trabajo con la que se realiza la tesis se basa en la agilidad; incremental e iterativo en ciclos cortos. El código sobre el cual se basa el proyecto es modular.

Los modelos se realizan de forma incremental empezando por modelar el problema con un TSP. Luego se agregan los tiempos de servicios, luego las ventanas de tiempo y así sucesivamente.

Esto permite crear iteraciones cortas del producto, a la vez que son validadas por el cliente.

Además, en cada nueva iteración se va modificando el csv para incluir los datos de entrada de la empresa, haciendo que el programa y la complejidad vaya escalando de forma controlada.

Diagrama de los módulos y el vínculo entre ellos.

- En verde, los módulos fijos (no son incrementales).
- En azul, los módulos que varían incrementalmente.

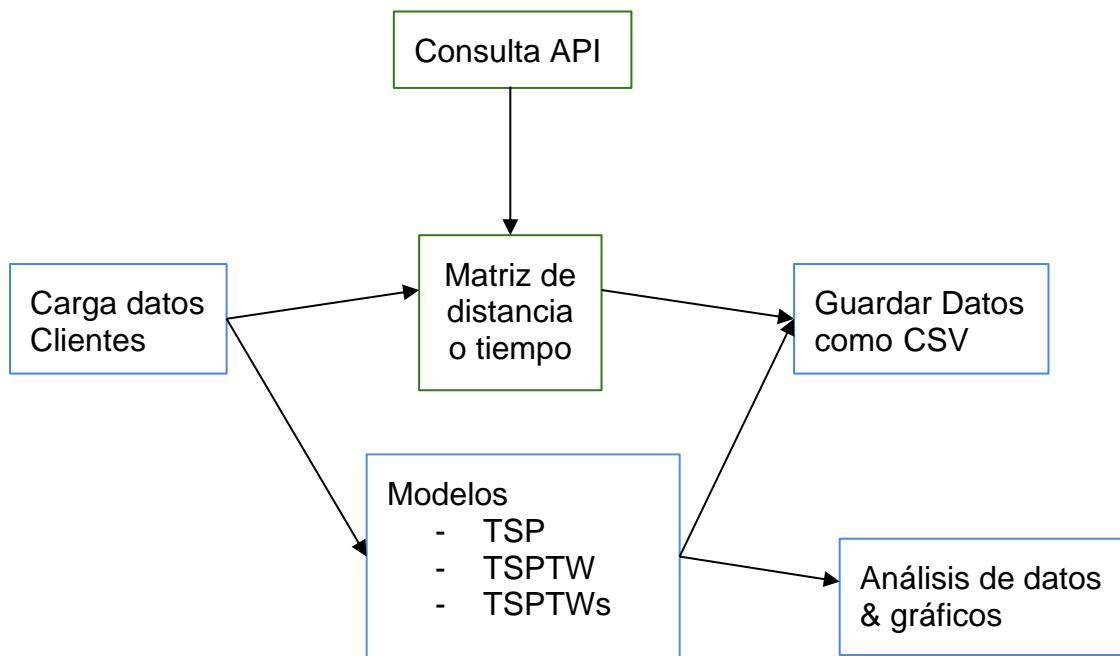


Ilustración 37: Diagrama de los módulos de la herramienta

### Ingesta de datos

La carga del Modelo tiene que ser práctica y a prueba de errores (*Poka-Joke*), para que sea fácil crear escenarios para el análisis.

- La carga de datos para el modelado se hará por medio de un csv, a partir de una planilla simple y estandarizada de Excel.

- La planilla se desarrolló junto con el cliente, de manera incremental. A medida que se iban creando modelos más completos se iban agregando las columnas necesarias al Excel. Esto permitió crecer de manera más controlada.

## Datos de los clientes

Los datos principales para modelar son los siguientes:

- Clientes:
  - Dirección del local
  - Horarios permitidos para la recolección.
  - Tiempo de servicio
  - Frecuencia de recolección semanal (1-2-3-4-5-6 días por semana) \*
  - Volumen estimado a recolectar (se asume constante en la semana) \*
- Camión:
  - Capacidad del camión \*
  - No tiene restricción de autonomía por combustible (parte con tanque lleno del depósito)
- Depósito:
  - Inicio y fin de los recorridos.
  - Lugar donde se descarga el camión.

\*\* Datos que corresponden al problema que por simplificación no son considerados en los modelos analizados.

## Matriz de distancias/tiempos

En un principio la matriz de distancia iba a ser proporcionada por la empresa. Sin embargo, luego de ver el dinamismo con el que dan de alta y baja a clientes, y el alto potencial de cometer errores al cargar los datos, se optó por automatizar este proceso.

La carga de datos se realiza a través de la API de Google Maps. Para esto fue necesario crear un usuario en Google Developer y activar una ‘key’ para la API “Distance Matrix”.

Por motivos de seguridad se debe evitar ‘hard-codear’ la key, razón por la cual esta se lee de un txt auxiliar.

Se desarrolló un módulo *stand-alone* (independiente al módulo donde se corren los modelos) que crea un cliente para realizar la consulta a la API (Client), realiza la consulta a la API de Distance Matrix y guarda los resultados (tiempo y distancia) en un csv para su uso posterior.

En vista de las restricciones de la API respecto de las ‘queries’ (máximo de 100 elementos por query), la matriz se crea línea por línea, recorriendo todos los clientes y el depósito. Esto significa que el algoritmo en cuestión puede a lo sumo cargar 99 clientes (asumiendo un único depósito). La otra observación, es que la matriz no es necesariamente simétrica, ya que las distancias se calculan de forma bidireccional en la API.

Es importante destacar que este módulo es independiente del módulo donde se corren los modelos.

## Línea base

Frecuencia semanal de servicios para los clientes de ambas líneas base.

Frecuencia de servicios	LB1	LB2
Frecuencia semanal: 1	2	3
Frecuencia semanal: 2	2	3
Frecuencia semanal: 3	8	15
Frecuencia semanal: 4	1	0
Frecuencia semanal: 5	4	7
Frecuencia semanal: 6	0	1

Tabla 21: Frecuencia semanal de servicios.

Las ventanas de tiempos para la LB1 se muestran a continuación. Las 9:00 am corresponde al valor cero (0) de referencia. También se detallan el inicio y el final de las ventanas prohibidas.

Cliente	Ventana inicial	Ventana final	Prohibida inicio	Prohibida final
1	60	540		
2	60	600		
3	0	570		
4	60	400		
5	0	600		
6	0	540	300	360
7	30	540	240	360
8	30	540	240	360
9	0	300		
10	0	600		
11	0	600		
12	30	540	240	360
13	30	540	240	360
14	0	600		
15	0	600	240	360
16	0	600	240	360
17	30	540	240	360
18	0	600		

Tabla 22: Detalle de las ventanas de tiempo de la LB1.

## Tablas de consistencia de servicio

Los horarios y rangos de visita, obtenidas según las definiciones anteriores, del TSPTW con los datos del LB1 son las siguientes:

ID	Ci	Clientes	Horario mínimo de visita	Horario máximo de visita	Rango de visita semanal (minutos)
0	Depósito		9:00	9:00	0
1	Cliente1		11:03	11:29	26
2	Cliente2		10:15	10:37	22
3	Cliente3		11:08	11:55	47
4	Cliente4		10:00	10:05	5
5	Cliente5		10:26	11:07	41
6	Cliente6		11:50	11:50	0
7	Cliente7		10:55	11:16	21
8	Cliente8		10:23	10:28	5
9	Cliente9		10:38	11:25	47
10	Cliente10		10:15	10:20	5
11	Cliente11		10:42	10:47	5
12	Cliente12		9:38	9:47	9
13	Cliente13		9:30	9:39	9
14	Cliente14		10:47	10:50	3
15	Cliente15		10:50	10:55	5
16	Cliente16		10:35	10:40	5
17	Cliente17		9:30	11:17	107
18	Cliente18		10:23	10:28	5

Tabla 23: Horario y rangos de visita de la LB1, obtenidos del TSPTW.

La tabla con los horarios y el rango de visita semanal del TSPTW para el LB2 se muestra a continuación.

ID	Ciencia	Horario mínimo de visita	Horario máximo de visita	Rango de visita semanal (minutos)
0	Depósito	9:00	9:00	0
1	Cliente1	10:07	11:25	78
2	Cliente2	10:00	12:14	134
3	Cliente3	10:02	12:50	168
4	Cliente4	10:16	12:30	134
5	Cliente5	10:55	12:28	93
6	Cliente6	9:35	12:02	147
7	Cliente7	10:49	11:10	21
8	Cliente8	9:26	12:11	165
9	Cliente9	10:11	11:49	98
10	Cliente10	10:21	11:33	72
11	Cliente11	10:24	12:59	155
12	Cliente12	10:16	12:51	155
13	Cliente13	9:43	11:21	98
14	Cliente14	10:36	11:41	65
15	Cliente15	10:30	11:24	54
16	Cliente16	10:45	12:59	134
17	Cliente17	10:11	11:41	90
18	Cliente18	11:12	11:12	0
19	Cliente19	10:09	11:51	102
20	Cliente20	11:28	11:28	0
21	Cliente21	15:01	15:01	0
22	Cliente22	9:21	11:00	99
23	Cliente23	9:22	9:40	18
24	Cliente24	9:21	9:29	8
25	Cliente25	9:27	9:35	8
26	Cliente26	10:45	12:23	98

Tabla 24: Horario y rangos de visita de la LB2, obtenidos del TSPTW.

## Simulaciones

Las simulaciones para determinar el número máximo de servicios (ya sea con un tiempo de servicio de 5 o 4 minutos) fue realizada de forma manual, se corrió cada instancia individualmente.

Se incluyó un fragmento de código que elige al azar los N clientes para hacer más fácil las iteraciones. Cada instancia se corrió con una *seed* diferente (de 0 a 9) para poder replicar los valores encontrados.

*""""Elegimos los N clientes""""*

```
id_clientes.pop(0) #sacamos el deposito
id_clientes.pop(32) # sacamos el deposito de Mediodia.
clientes_activos = [0,32]
np.random.seed(0) #fijamos un random para poder comparar modelos
clientes_activos.extend(np.random.choice(id_clientes, 47, replace=False))
```

Los resultados factibles para la simulación con un tiempo de servicio de 4 minutos con 47 y 48 clientes se muestran a continuación.

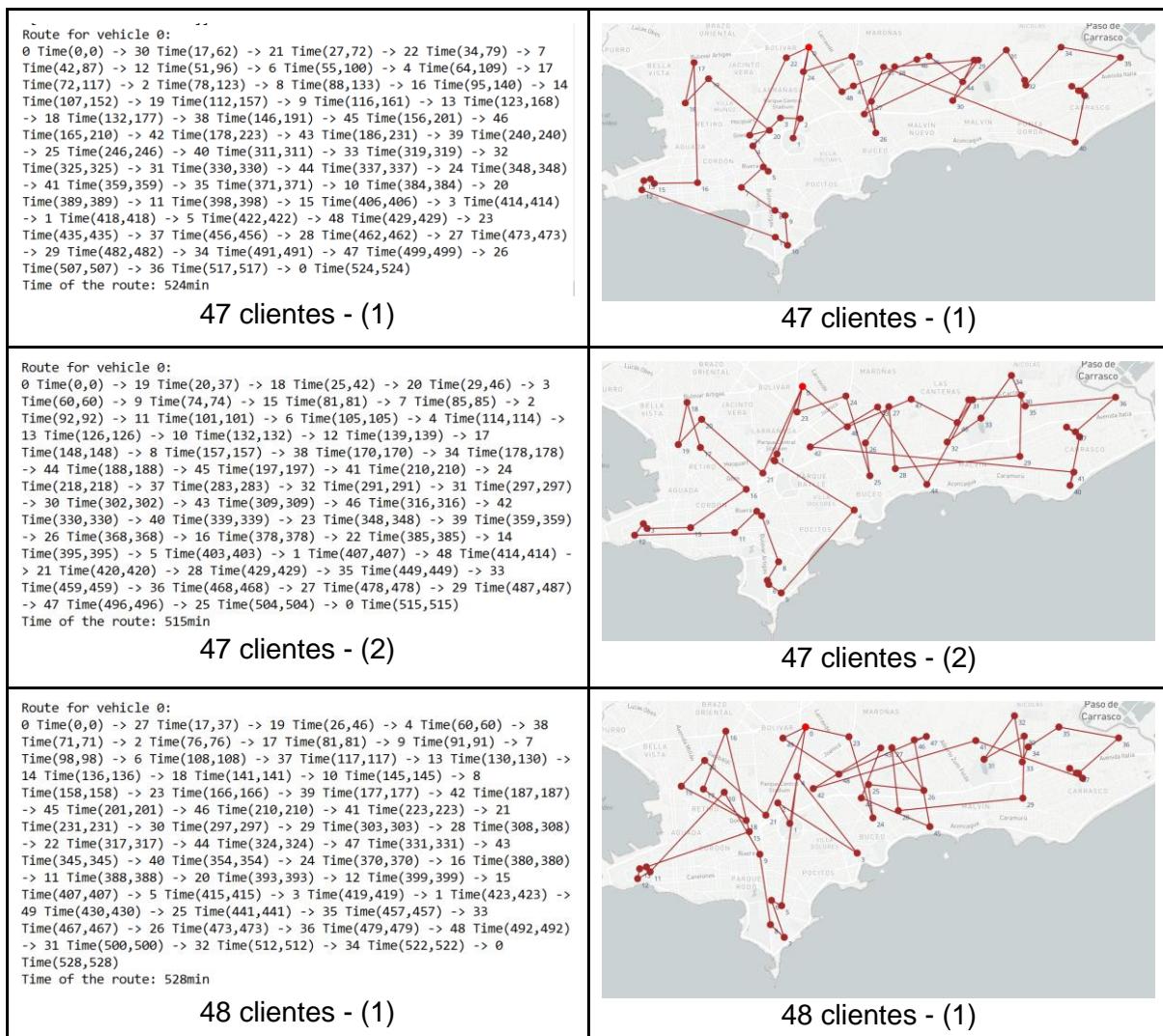


Ilustración 38: Ejemplos de unos de los recorridos simulados.

## La propuesta

A continuación, se muestra un recorte de la sección donde el usuario puede modificar los parámetros para definir el problema. Se muestra el del script: VRPTW.

```
"""Definimos la INSTANCIA: modelo, el dia, Baseline, Evento Especial.  
Definimos los clientes que participan del recorrido.  
Definimos los parámetros del solver: limite tiempo, tiempo idle, tiempo maximo camion.  
  
***Principio seccion modificar parametros:  
Estos son los Unicos parametros a ser manipulados en el codigo*****  
  
"Instancia:"  
modelo = "TSPTW_ejemplo"  
dia = "" #Opciones: Lunes // martes // miercoles // jueves // viernes // sabado  
dia_num = "" #Opciones: 00 // 01 // 02 // 03 // 04 // 05  
baseline = "ABITO_2020" #Opciones:  
  
"Parametros del recorrido:"  
camiones_global = 1 #Cantidad de camiones disponibles  
preprocesamiento_global = False # True // False || Aplicar La heuristicica de segmentación de clientes por region?  
parada_mediocia_global = True # True // False || Hay parada al mediodia?  
  
"Datos del Recorrido:"  
"No se debe incluir el ID del Evento Especial, ese se indica en la proxima seccion"  
"No se debe incluir el ID del Deposito por Parada de Mediodia"  
clientes_activos_global = [0,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28]  
dep_mediocia_global = 32 #Cual es el ID del cliente que simular ser La Parada de Mediodia?  
  
"Nuevo Servicio: evento especial o nuevo cliente:"  
evento_especial = False #Se quiere ver el impacto del evento especial? True // False  
id_nuevo_servicio_global = 29 #Cual es el ID del Nuevo Servicio en el CSV?  
amplitud_rango_global = 35 #Tiempo en minutos, en mas y menos, para armar La ventana de tiempo de Los clientes en La segu  
  
"Parámetros Solver:"  
tiempo_límite_solver = 30 #tiempo en Segundos, que durará la optimización  
tiempo_idle = 200 #tiempo en Minutos que el camión puede estar esperando en Lo de un cliente.  
tiempo_camion_max = 540 #tiempo en Minutos que el camión puede estar operativo. 9 horas = 540 // 10 horas (1hora extra) =  
  
****Fin seccion para modificar parametros***
```

Ilustración 39: Captura de pantalla: parámetros de la propuesta.

La semana del 15 de junio se configuran las pcs del equipo de logística de ABITO para que puedan usar la herramienta como prueba de concepto.

Se validó con la empresa el formato de cómo se muestran los datos de salida. Los datos se muestran por pantalla y además se guardan en un csv con el nombre: modelo+dia\_num+dia+baseline.

El formato para mostrar el resultado fue validado y aprobado por la empresa. El output es de la siguiente forma:

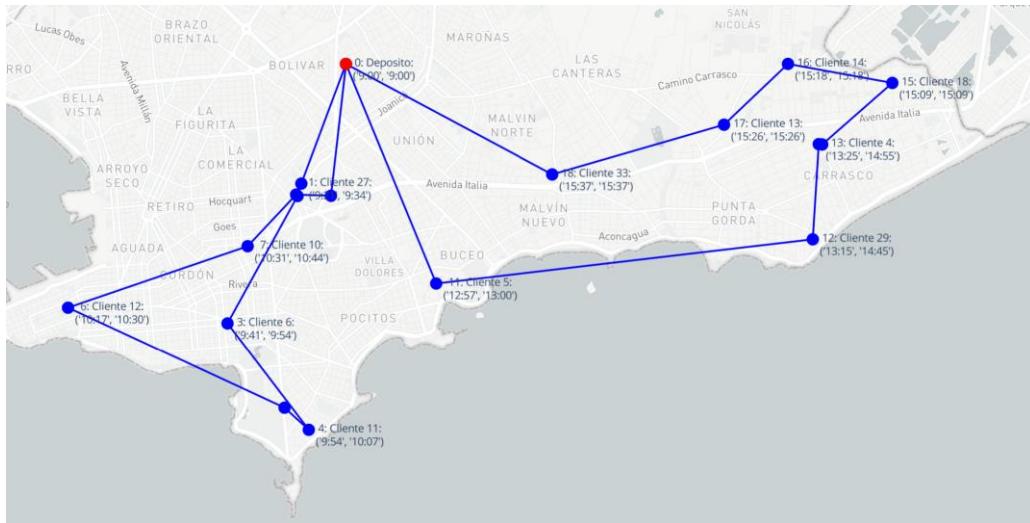
El tiempo total de todas las rutas fue de: 412min

	Cuentas	Rango_Horario
0	Deposito	(9:00, 9:00)
1	Cliente 27	(9:21, 9:34)
2	Cliente 25	(9:27, 9:40)
3	Cliente 6	(9:41, 9:54)
4	Cliente 11	(9:54, 10:07)
5	Cliente 9	(10:02, 10:15)
6	Cliente 12	(10:17, 10:30)
7	Cliente 10	(10:31, 10:44)
8	Cliente 28	(10:40, 10:53)
9	Cliente 26	(10:47, 11:00)
10	Cliente 32	(12:00, 12:03)
11	Cliente 5	(12:57, 13:00)
12	Cliente 29	(13:15, 14:45)
13	Cliente 4	(13:25, 14:55)
14	Cliente 7	(15:00, 15:00)
15	Cliente 18	(15:09, 15:09)
16	Cliente 14	(15:18, 15:18)
17	Cliente 13	(15:26, 15:26)
18	Cliente 33	(15:37, 15:37)
19	Deposito	(15:52, 15:52)

*Ilustración 40: Output de la propuesta.*

El rango horario mostrado, es el tiempo en el cual el camión puede pasar a recolectar los residuos sin afectar la ruta. De alguna forma muestra la holgura que tiene cada cliente en el recorrido.

El recorrido se grafica en un mapa dinámico. Se muestra la posición del cliente en el recorrido, el nombre y el horario estimado de visita.



*Ilustración 41: Ejemplo del resultado final del gráfico del recorrido.*

Al pasar el cursor por un cliente se abre el detalle. La versión final incluirá la dirección en vez de las coordenadas. El siguiente ejemplo es de un cliente ficticio.



*Ilustración 42: Detalle de un cliente en el mapa.*