



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

HEURÍSTICA BASADA EN PREDICCIÓN DE DEMANDA Y GENERACIÓN DE
COLUMNAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE RUTEO DINÁMICO DE
VEHÍCULOS CON VENTANAS DE TIEMPO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

PAULINA ANDREA BRICEÑO AGUIRRE

PROFESOR GUÍA:
CRISTIÁN CORTÉS CARILLO

PROFESOR CO-GUÍA:
ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FERNANDO ORDOÑEZ PIZARRO
MICHEL GENDREAU

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Conicyt

SANTIAGO DE CHILE

2014

Resumen

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
POR: PAULINA BRICEÑO AGUIRRE
FECHA: 10/12/14
PROF. GUÍA: CRISTIÁN CORTÉS CARILLO

En el mundo actual la mayoría de los problemas logísticos son dinámicos; sin embargo, la investigación desarrollada hasta hoy se concentra principalmente en enfoques basados en adaptaciones de algoritmos estáticos. El vertiginoso avance de la tecnología ha incrementado significativamente las posibilidades de diseñar modelos de ruteo dinámico, lo que debe ser explotado para mejorar la eficiencia en problemas reales.

En esta tesis se aborda el problema que enfrenta el Servicio Técnico de Xerox en Santiago, el cual es una aplicación real del Problema Dinámico de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo. El objetivo es atender a los clientes con el menor retraso posible dentro de los límites factibles, minimizando a la vez los costos de transporte. La complejidad de este problema radica principalmente en su naturaleza dinámica, ya que la información de las llamadas se conoce una vez que son recibidas durante el día, por lo que las rutas diseñadas deben ser modificadas para incorporar la nueva información cuando entran al sistema nuevos clientes.

Para resolver este problema se desarrolló un algoritmo que utiliza la información histórica de las llamadas para definir Idle Points o puntos de espera, a los cuales acuden los vehículos desocupados para anticipar la demanda futura y minimizar los tiempos de respuesta. Además, se considera un sistema de puntuación según la intensidad de la demanda con el cual se premia la cobertura de las zonas con mayor intensidad de demanda y un esquema de Generación Dinámica de Columnas, en el se utilizan las rutas generadas anteriormente para diseñar nuevas columnas cada vez que surge una nueva solicitud de un cliente.

El modelo fue implementado computacionalmente en C++ utilizando Ilog Cplex como motor de optimización, con el fin de realizar simulaciones con datos disponibles de la operación real y evaluar su desempeño en comparación a una versión dinámica de un algoritmo *Greedy*. Respecto a este *benchmark* se obtienen mejoras de 26 % en los costos totales evaluando instancias que corresponden a 120 días de operación real de todos los meses del año. Además, se compara el modelo con dos versiones simplificadas para medir el impacto de incluir la información histórica y el covering en el modelamiento. Se observa que ambas componentes del modelo permiten disminuir los tiempos de espera de los clientes. Finalmente se comparan los resultados obtenidos con la operación manual de Xerox, obteniendo mejoras significativas en el nivel de servicio y una reducción de un 23 % en el tamaño de flota requerido para la atención. Se concluye que el enfoque propuesto se adapta de manera satisfactoria a problemas dinámicos cuya prioridad es el nivel de servicio ofrecido a los clientes.

Agradecimientos

A mis papás, por su apoyo y amor incondicional durante todos estos años. Por las innumerables enseñanzas de ciencia, vida y cultura que forjaron mi formación.

A mis hermanos y amigos, por su compañía, motivación y buenos momentos durante esta importante etapa de mi vida.

A mis profesores guía, que no sólo son destacados académicos, sino también grandes personas; por darme los lineamientos que llevaron a la construcción de esta tesis.

A los profesores y amigos que me recibieron durante mi estadía en Montreal, por hacerme más fácil el camino para completar esta tarea.

Y a Felipe, por su importante apoyo en este camino.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	iv
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
1. Introducción	1
1.1. Objetivos del trabajo de tesis	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcances del estudio	3
1.2.1. Fuentes de incertidumbre	3
1.2.2. Supuestos	3
1.2.3. Zona de estudio	4
1.3. Estructura del trabajo	4
2. Revisión bibliográfica	6
2.1. Problema de Ruteo de Vehículos	6
2.1.1. Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo	7
2.1.2. Dinamismo en problemas de ruteo	9
2.2. Trabajo previo	12
3. Descripción del caso de estudio	13
3.1. Descripción del problema	13
3.2. Zona de estudio	14
3.3. Análisis de la demanda	15
3.3.1. Tiempos de llamadas	16
3.3.2. Tiempos de atención	18
4. Heurística propuesta	20
4.1. Descripción general	20
4.2. Definición de períodos	21

4.3.	Definición de zonas	21
4.4.	Definición de Covering	25
4.5.	Modelo de programación lineal entero	27
4.5.1.	Formulación general del problema	27
4.5.2.	Descomposición para generación de columnas	30
4.6.	Algoritmo de solución	32
4.6.1.	Ruteo estático	32
4.6.2.	Ruteo dinámico	33
5.	Resultados Computacionales	37
5.1.	Implementación	37
5.2.	Política de Creación de Instancias	38
5.2.1.	Tiempos de Servicio	38
5.2.2.	Ventanas de Tiempo	39
5.3.	Calibración del Modelo	40
5.3.1.	Idle Points	40
5.3.2.	Parámetros de Covering	43
5.3.3.	Número de Técnicos	45
5.4.	Heurísticas de comparación	47
5.5.	Resultados Finales	48
5.5.1.	Tiempo de Espera y Atraso	50
5.5.2.	Distancia Recorrida	51
5.5.3.	Postergación de Llamadas	52
5.5.4.	Análisis de Sensibilidad de Función Objetivo	53
6.	Conclusiones	55
6.1.	Conclusiones Generales	55
6.2.	Trabajo Futuro	56
	Bibliografía	58
A.	Análisis Demanda	63
A.1.	Demanda mensual por zonas	64
A.2.	Demanda horaria por zonas	65
B.	Base de datos	67
B.1.	Ejemplo de información disponible	67
C.	Pseudocódigos de Algoritmos	69
C.1.	Definiciones	69
C.2.	Pseudocódigos de rutinas de la heurística propuesta	70
C.3.	Pseudocódigos de la heurística de comparación	72
D.	Resultados	73

D.1. Tiempos según nivel de demanda	73
D.2. Tiempos según prioridad de clientes	74
D.3. Distancia recorrida según nivel de demanda	74
D.4. Postergación de llamadas	75

Índice de tablas

3.1. Información geográfica y demográfica de las comunas de Santiago Sur-Oriente	16
3.2. Tiempos de atención	19
4.1. Demanda Mensual por Zona	23
5.1. Tiempos de atención	39
5.2. Ventanas de tiempo por tipo de cliente	40
5.3. Costos de cada conjunto de <i>Idle Points</i>	42
5.4. Costos por umbral de traslado a <i>Idle Point</i>	42
5.5. Análisis de sensibilidad de parámetros de covering	44
5.6. Temporadas según intensidad de demanda	45
5.7. Tiempo de atraso según tamaño de flota, temporada 1	45
5.8. Tiempo de atraso según tamaño de flota, temporada 2	46
5.9. Tiempo de atraso según tamaño de flota, temporada 3	46
5.10. Resumen resultados finales	48
5.11. Comparación de los modelos respecto al ruteo manual de Xerox	49
5.12. Análisis de sensibilidad de la Función Objetivo	54
A.1. Número de llamadas registradas al mes en cada zona	64
A.2. Número de llamadas registradas al mes en cada zona	65
A.3. Número de llamadas registradas por hora en cada zona	65
A.4. Número de llamadas registradas por hora en cada zona	66
B.1. Ejemplo de información de Xerox (1/2)	67
B.2. Ejemplo de información de Xerox (2/2)	68
D.1. Resumen tiempos promedio de espera y atraso según temporada	73
D.2. Resumen tiempos promedio de espera y atraso según prioridad de tipo de cliente	74
D.3. Resumen de distancia recorrida según temporada	74
D.4. Número total de llamadas postergadas en cada modelo	75

Índice de figuras

3.1. Zona Sur-Oriente de Santiago	15
3.2. Número de solicitudes diarias promedio según mes	17
3.3. Número de solicitudes según día de la semana	17
3.4. Número de solicitudes diarias promedio según horario	18
4.1. División en Zonas	22
4.2. Idle Points	24
4.3. Covering de zonas adyacentes	26
4.4. Valor de λ y δ si el técnico llega en la ventana de tiempo	28
4.5. Valor de λ y δ si el técnico llega después de la ventana de tiempo	29
4.6. Algoritmo de Ruteo	33
4.7. Ejemplo de aparición de una nueva llamada	34
4.8. Ejemplo de actualización de rutas	35
4.9. Ejemplo de inserción de llamada	35
4.10. Ejemplo de mejoramiento de rutas	36
5.1. Distribución geográfica de <i>Idle Points</i>	41
5.2. Número de técnicos de la heurística versus Xerox	46
5.3. Comparación de resultados entre modelos	49
5.4. Tiempos por cliente según temporada	50
5.5. Tiempos según prioridad del segmento de clientes	51
5.6. Distancia total recorrida según temporada	52
5.7. Número de llamadas atendidas el mismo día	53

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad existen múltiples compañías en las que atender al cliente en su propia ubicación es una de sus principales funciones. Entre estas empresas se encuentran las que prestan servicios de despacho, de mantención o reparación de sus productos. En estas industrias, asegurar el éxito depende de la capacidad de desarrollar metodologías que les garanticen no sólo ser eficientes en cuanto a los costos operacionales, sino también ofrecer ciertos estándares de calidad de servicio a los clientes, lo que sin duda cobra mayor importancia en un mundo cuyos mercados son cada vez más interdependientes y competitivos.

Por otro lado, el rápido desarrollo de tecnologías para la información y comunicación, tales como GPS y EDI ¹, y el aumento generalizado de la capacidad computacional, proveen la oportunidad de incorporar información en tiempo real e incluir herramientas potentes de optimización para mejorar las políticas existentes de diseño de rutas eficientes que seguirán los vehículos que dan servicio al cliente, concepto que es conocido como enrutamiento o ruteo.

Dado este contexto de mayor competitividad y avances tecnológicos, el interés en la administración de flotas de vehículos en tiempo real ha ido en aumento, sobre todo en el enfoque dinámico que es capaz de incorporar nueva información en línea para el desarrollo de metodologías de ruteo más eficientes. Este es un problema complejo, ya que su carácter dinámico obliga a que los tiempos para la confección de nuevas soluciones deban ser reducidos. Es entonces rol de la Investigación de Operaciones el proveer de herramientas analíticas que permitan tomar las mejores decisiones utilizando algoritmos de optimización capaces de generar y mejorar rutas en un tiempo acotado.

En esta tesis se aborda una aplicación del problema de ruteo dinámico a un caso real, el Servicio Técnico de Xerox Chile. Esta empresa multinacional ofrece una serie de productos de oficina, tales como impresoras y copiadoras, y algunos servicios como gestión de documentos y reparación de fallas. La satisfacción del cliente es fundamental en la estrategia de Xerox, lo que se traduce en productos de calidad y atención oportuna.

¹Electronic Data Interchange: Sistema estructurado de transmisión de información por medios electrónicos

El problema abordado en esta tesis consiste en el ruteo de los vehículos para atender la demanda por servicios de reparación que aparece dinámicamente a lo largo del día, con el fin de disminuir los tiempos de espera de los clientes y los costos operacionales. La metodología planteada para resolverlo busca aprovechar la disponibilidad de información histórica sobre la operación para poder tener estimaciones respecto a la intensidad y ubicación de la demanda y así tener una mejor capacidad de respuesta ante la incertidumbre. Esto es revisado en mayor detalle en el capítulo 4.

Esta tesis se enmarca en una serie de investigaciones previas realizadas en este ámbito. Entre estos estudios se encuentra un enfoque de optimización robusta realizado por Souyris et al. [2013] para el problema estático de despacho de técnicos con tiempos de servicio estocásticos y una metodología de *Branch-and-price* con *Constraint Programming* en Cortés et al. [2014], para el mismo problema sin incertidumbre en los tiempos de atención. Además, se desarrolló un modelo de diseño de tamaño de flota basado en simulaciones en Cortés et al. [2010a] y una tesis previa de ruteo dinámico de vehículos con un modelo de covering espacial usando generación de columnas y *Constraint Programming* en Rojas [2012]. Estos trabajos son vistos en mayor detalle en el capítulo siguiente, el cual corresponde a la revisión bibliográfica 2.

1.1. Objetivos del trabajo de tesis

1.1.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar una metodología que permita resolver de forma eficiente el problema de ruteo dinámico de vehículos del Servicio Técnico de Xerox, tanto desde el punto de vista de la calidad de servicio como de los costos operacionales de la empresa. Para esto, se diseñará un modelo de ruteo que genere y modifique rutas dinámicamente, y que incorpore la información histórica disponible para predecir la demanda futura y obtener mejores tiempos de respuesta, mediante la implementación de puntos de espera para los vehículos desocupados en zonas de alta demanda.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Estudiar qué métodos actuales existen para resolver el problema de Ruteo de Vehículos, en especial los que tengan un enfoque dinámico.
2. Desarrollar un modelo de ruteo que incorpore la información histórica del problema de Xerox para predecir llamadas futuras.
3. Implementar computacionalmente el modelo de despacho dinámico desarrollado.

4. Estudiar el impacto de incluir información histórica en la modelación, comparando con otros enfoques que no la consideren.
5. Comparar los resultados obtenidos con el ruteo manual utilizado por Xerox y desarrollar un algoritmo que sirva como cota para la solución y permita medir la eficiencia del modelo.

1.2. Alcances del estudio

Los modelos son representaciones de la realidad que nos permiten que nos permiten describirla, explicarla y simularla, por lo que son útiles sistemas antes de implementarlos. Sin embargo, los modelos poseen limitaciones, ya que es muy complejo considerar todas las variables que influyen en la realidad. A continuación se muestran los alcances de este trabajo, en términos del nivel de complejidad que ha sido incorporada en el modelamiento y los supuestos realizados.

1.2.1. Fuentes de incertidumbre

Existen múltiples fuentes de incertidumbre en el proceso de atención de llamadas de clientes, las que van desde conocer el momento en que se realizará una llamada y la demora de la atención en el lugar del cliente, hasta la disponibilidad efectiva de técnicos y repuestos de máquinas para satisfacer la demanda.

En este caso particular se consideran únicamente los tiempos en que se llevan a cabo cada llamada y su localización como fuentes de incertidumbre. Tanto los tiempo de servicio como los de traslado son determinísticos para este modelo, obteniendo estimaciones lo más realistas posible para ambos casos. Estas aproximaciones no incluyen cambios durante el día para los tiempos de traslado, como se observa en la realidad en los horarios punta.

Tampoco se incluye en el modelo variaciones en la disponibilidad de la flota de técnicos a causa de accidentes, falla de los vehículos, licencia de los técnicos, etc., ni tampoco atrasos en atender a clientes debido a la escasez de repuestos para las máquinas u otros acontecimientos.

1.2.2. Supuestos

En cuanto a los supuestos incluidos en la modelación, en primer lugar se considera que la empresa otorga mayor prioridad a aquellos clientes que realizan solicitudes al Servicio Técnico con mayor frecuencia, supuesto que es aplicado al momento de determinar la extensión de las ventanas de tiempo por tipo de cliente. No se cuenta con información de la facturación de cada cliente, por lo que parece razonable incluir el número de llamadas como una aproximación

del nivel de productos y servicios contratados por cada cliente. Esto se revisará en mayor detalle en el capítulo 4.

Por otro lado, en la operación analizada de Xerox se tiene que la mayor parte de la demanda no puede ser satisfecha el mismo día, por lo que existe un porcentaje de las solicitudes que queda pendiente para el día siguiente. Para poder abarcar esta interdependencia entre la calidad de servicio de un día y del siguiente, se diseñan instancias de una semana para evaluar el desempeño de la metodología propuesta. Para esto, se tomó como supuesto que la demanda debe terminar de ser satisfecha el último día de la semana, lo que es bastante realista dado que el día viernes exhibe una baja en la intensidad de las llamadas en comparación al resto de la semana, y se dispone de la flota necesaria para cerrar la demanda sin clientes pendientes,

1.2.3. Zona de estudio

Otra de las limitaciones de este trabajo está dada por las cotas geográficas que se imponen a la zona de estudio. Se seleccionó la zona Sur-Oriente de Santiago para este estudio, debido a que presenta una demanda heterogénea y que se extiende con una densidad espacial relativamente baja, lo que hace que el ruteo de los vehículos sea más interesante.

Este tema es abordado con mayor profundidad en el capítulo 3, en el cual se revisa detalladamente el caso de estudio analizado en esta tesis.

1.3. Estructura del trabajo

Este tesis está estructurada de la siguiente forma. En primer lugar, en el capítulo 2, se llevará a cabo una revisión de la literatura sobre el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRP-TW) y otros avances realizados en temas similares al método presentado en este informe. Se puso énfasis especialmente en aquellas publicaciones que abordan problemas dinámicos y que aplican herramientas similares al enfoque utilizado en esta tesis.

En el capítulo 3 se detalla el problema a resolver. En primer lugar se realiza una descripción general de la situación que enfrenta el Servicio Técnico de Xerox y la forma en que la empresa lo resuelve. Luego, se describe la zona abarcada en este estudio, incluyendo estadísticos descriptivos sobre la demanda correspondiente y una ilustración de sus límites. Finalmente, se muestra un análisis cualitativo y cuantitativo de la demanda de las comunas que forman parte de esta zona.

En el capítulo 4 se presenta el método dinámico de generación de rutas propuesto para resolver el problema planteado, partiendo con una descripción general para luego revisar en detalle cada una de las etapas contempladas en la elaboración del modelo.

Posteriormente, en el capítulo 5, se muestra una descripción de las instancias que fueron diseñadas para evaluar el modelo, los resultados obtenidos y el análisis posterior realizado respecto a la validez y eficacia del modelo en comparación a un algoritmo dinámico *Greedy* y al ruteo manual llevado a cabo por Xerox.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir del trabajo realizado y el trabajo futuro propuesto para extender este modelo y sus aplicaciones.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

El caso de estudio abordado en esta tesis corresponde a una aplicación real del Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo, uno de los más estudiados en la literatura por sus distintas aplicaciones, tales como problemas de entrega de correo, despacho de productos, reparaciones, traslado de pasajeros, etc. En este capítulo se revisa el estado del arte de los distintos enfoques existentes para la resolución de este problema, en especial de aquellos llamados dinámicos que incorporan información de la demanda durante la resolución del problema.

La primera sección introduce de forma general el Problema de Ruteo de Vehículos, para luego enfocarse en una variante que incluye ventanas de tiempo. A continuación, se revisa la literatura que corresponde a la versión dinámica del problema, profundizando en enfoques que consideran información de la demanda futura al optimizar las rutas.

2.1. Problema de Ruteo de Vehículos

El Problema de Ruteo de Vehículos, VRP desde ahora en adelante, ha sido ampliamente estudiado por décadas, desde que fue planteado por primera vez en 1959 por Dantzig and Ramser [1959]. El objetivo de este problema es diseñar un conjunto de rutas de mínimo costo que debe utilizar una flota de vehículos para abastecer a sus clientes, cada uno con una demanda determinada.

Generalmente la red de arcos que conecta a cada uno de los clientes es descrita como un grafo, el cual la mayoría de las veces es dirigido. El peso de cada arco representa el costo o tiempo de viaje. Cada nodo que representa a un cliente posee un tiempo de servicio asociado, y además existe un nodo que corresponde al depósito de los vehículos, desde el cual todos deben partir.

Dependiendo de las características específicas, se pueden distinguir variantes al problema original, entre las cuales se encuentran principalmente las que se revisan a continuación. Esto se puede encontrar en mayor detalle en Toth and Vigo [2001].

- **Problema de Ruteo de Vehículos con Carga y Descarga (VRPB):** En esta variante del VRP existen dos conjuntos de clientes, los primeros son quienes deben despachar productos, y el segundo conjunto corresponde a vendedores cuyos productos deben ser transportados de vuelta al centro de distribución. En cada ruta todas las entregas deben ser realizadas antes de que cualquier producto pueda ser recogido, para evitar hacer arreglos en las cargas de los vehículos. En la literatura se pueden encontrar distintos enfoques para resolver este problema, como el algoritmo genético revisado en Potvin et al. [1996] y una heurística de *tabu search* estudiada en Duhamel et al. [1997].
- **Problema de Ruteo de Recoger y Dejar Pasajeros (PDP):** En este problema, conocido en inglés como *Pick up and Delivery Problem*, cada cliente tiene asociado un nodo de origen, en el cual debe ser recogido, y uno de destino, en el cual termina su viaje. Tanto si se trata de una carga como de un pasajero, el requerimiento debe ser transportado en un sólo vehículo desde su origen a su destino, sin transbordos. En Savelsbergh and Sol [1995] se muestra una formulación entera mixta de este problema. Algunas de las soluciones propuestas para este problema incluyen un esquema de *branch and price* desarrollado por Ropke and Cordeau [2009], una heurística basada en generación de columnas de Xu et al. [2003] y una descomposición de Benders planteada por Cortés et al. [2010b].
- **Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW):** En esta variante del problema los clientes deben ser atendidos dentro de un intervalo de tiempo específico o "ventana de tiempo". El caso de estudio abordado en esta tesis corresponde a un aplicación real de esta variante del problema, por lo que a continuación se revisará en la literatura de este problema en mayor detalle.

2.1.1. Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo

En este problema se debe construir un conjunto de rutas que permita atender a cada uno de los clientes que han realizado solicitudes. Existe una flota de vehículos determinada, la cual puede ser heterogénea u homogénea en el caso de que los vehículos no tengan distinta capacidad. Los vehículos pueden llegar a cada nodo antes de la apertura de la ventana de tiempo, pero no se les permite llegar después de su cierre. Sin embargo, esta restricción puede ser relajada, incurriendo en un costo proporcional al tiempo de atraso en el caso de llegar al cliente fuera del horario establecido.

En Cordeau et al. [2002] se formula el VRPTW como un problema de programación entera mixta, como se revisa a continuación.

Variable	Descripción
N	Conjunto de nodos
K	Conjunto de técnicos disponibles
A	Conjunto de arcos factibles
E	Tiempo de inicio de la jornada
L	Tiempo de término de la jornada
C	Capacidad de los vehículos
c_{ij}	Costo de moverse del nodo i al nodo j
x_{ijk}	Variable binaria que indica si el vehículo k se mueve de i a j
w_{ik}	Instante en que el técnico k comienza a atender a i
a_i	Cota inferior de la ventana de tiempo asociada al cliente i
b_i	Cota superior de la ventana de tiempo asociada al cliente i
s_i	Tiempo de servicio asociado al cliente i
$t_{i,j}$	Tiempo de viaje entre el cliente i y el j
d_i	Demanda del cliente i

$$\min_x \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \quad (2.1)$$

$$s.a. \sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.2)$$

$$\sum_{(0,j) \in A} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.3)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} - \sum_{j: (j,l) \in A} x_{jlk} = 0 \quad \forall k \in K, j \in N \quad (2.4)$$

$$\sum_{i: (i,n+1) \in A} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.5)$$

$$x_{ijk}(w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (2.6)$$

$$a_i \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} \leq 0 \leq b_i \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} \quad \forall k \in K, j \in N \quad (2.7)$$

$$E \leq w_{ik} \leq L \quad \forall k \in K, i \in 0, n+1 \quad (2.8)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} \leq C \quad \forall k \in K \quad (2.9)$$

$$x_{ijk} \in 0, 1 \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (2.10)$$

La función objetivo (2.1) representa el costo total, mientras que los nodos representan a los clientes y el depósito. La restricción (2.2) asegura que cada cliente es asignado exactamente a un vehículo. Luego, las restricciones (2.3)-(2.5) caracterizan el flujo del recorrido del vehículo k . Adicionalmente, las restricciones (2.6)-(2.8) y (2.9) garantizan la factibilidad del recorrido respecto a las consideraciones de tiempo y capacidad. Finalmente, la restricción (2.10) imponen la condición binaria a las variables de flujo.

Dada la complejidad de este problema, Savelsbergh [1992] lo clasifica como NP completo. Por esta razón, existen dos metodologías principales para abordar este problema: métodos exactos de optimización que requieren normalmente excesiva capacidad computacional, y aproximaciones o heurísticas que permiten obtener soluciones de buena calidad en un tiempo más reducido.

Entre las metodologías de optimización exacta aplicadas al VRPTW se encuentra *Branch-and-Cut*, introducido por Padberg and Rinaldi [1989] y *Branch-and-Price*, aplicada en Gutiérrez-Jarpa et al. [2010], en Barnhart et al. [1998] y en Cortés et al. [2014]. Otra herramienta que contribuye en la resolución de problemas grandes y complejos es el paralelismo. En Lau et al. [1997] se describen las principales estrategias existentes para paralelizar métodos de solución del VRP.

Por otra parte, entre las heurísticas desarrolladas para resolver el VRPTW se encuentra la Relajación Lagrangeana, la cual consiste en eliminar las restricciones de mayor complejidad e incluirlas en la función objetivo como un costo en medida que se incumple la restricción. Una aplicación de tal metodología es propuesta en Fisher [2004]. En este ámbito también destaca la generación de columnas, en la cual se considera un número reducido de variables y se introducen más en cada iteración en la medida que estas generen mejoras en la solución. Esta técnica puede ser revisada en Desaulniers et al. [2005].

También destacan las heurísticas de construcción como en Bräysy and Gendreau [2005], y las de búsqueda local, como las revisadas en Groër et al. [2010]. En este último trabajo se presenta una librería de estas heurísticas implementadas computacionalmente y sus aplicaciones. Por otro lado, en Bräysy and Gendreau [2002] se revisan aplicaciones de heurísticas de *tabu search*, técnica introducida por Glover [1986]. Detalles sobre *tabu search* también pueden ser encontrados en Glover [1989].

2.1.2. Dinamismo en problemas de ruteo

Una distinción que es importante realizar entre los distintos planteamientos del VRPTW es el dinamismo del problema. En su forma estática, el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo cuenta con un conjunto de requerimientos conocidos al comienzo del

período, los cuales deben ser atendidos por la flota de vehículos de la que se dispone dentro de las ventanas de tiempo que cada cliente solicita. En la versión dinámica del VRPTW, los requerimientos de nuevos clientes son revelados a lo largo del horizonte de tiempo, por lo que la nueva información debe ser incorporada en el modelo y las decisiones deben ser tomadas en tiempo real, a diferencia del primer caso en que las decisiones iniciales no son alteradas en el tiempo.

La mayor parte de la investigación realizada hasta hoy se concentra en la búsqueda de soluciones exactas de la versión estática. No obstante, en muchos de los problemas de la vida real la información se va revelando conforme avanza el tiempo transcurrido. Utilizar enfoques estáticos en estas circunstancias puede llevar a soluciones poco eficientes e incluso infactibles de aplicar en tiempo real. Además, en muchos casos el tiempo acotado disponible para reoptimizar, hace imposible la utilización de estos enfoques en casos con mucho dinamismo.

Todo lo anterior, en conjunto con el creciente desarrollo de capacidad computacional y tecnologías de información, hacen atractivo el uso de enfoques dinámicos para enfrentar problemas de ruteo y despacho en la actualidad sin anticipación de demanda. De este enfoque se desprenden dos vertientes importantes de investigación: la primera consiste en utilizar únicamente la información disponible en el momento para reoptimizar el problema, mientras la segunda busca incorporar información sobre la demanda futura en el modelo, principalmente en forma de distribuciones de probabilidad.

Dentro del primer grupo se encuentra el trabajo de Gendreau et al. [2006], en el cual se utilizan distintas heurísticas de búsqueda local para optimizar las rutas existentes, con el fin de resolver una versión dinámica del PDP. Además se incorpora un esquema de paralelización, usando un número creciente de procesadores. En Bräysy [2003] se utiliza un esquema de cuatro fases, en las que se parte con heurísticas de construcción para la solución inicial, eliminación de rutas para mejorar la solución, mejoramiento de las rutas usando *Variable Neighborhood Search* (VNS) y finalmente la modificación de la función objetivo para salir de óptimos locales. La metaheurística VNS fue originalmente propuesta en Mladenović and Hansen [1997] y consiste en cambiar sistemáticamente el vecindario en una búsqueda local.

En Gendreau et al. [1999] se adaptan heurísticas de *tabu search*, inicialmente desarrolladas para la versión estática, con el fin de resolver distintos problemas de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo blandas, aprovechando la capacidad computacional en una plataforma paralela. Métodos de *tabu search* más sofisticados se revisan en Toth and Vigo [2003] donde se introduce *granular tabu search*, en Tarantilis [2005] que resuelve el VRP con memoria adaptativa y en Attanasio et al. [2007].

En Chen and Xu [2006] se propone un enfoque basado en Generación Dinámica de Columnas que divide el horizonte de tiempo en *epochs* y se resuelve un problema estático de *set-partitioning* con las columnas disponibles en cada momento. En cada epoch nuevo se generan columnas utilizando las creadas hasta ese momento, insertando las nuevas solicitudes recibidas.

Una aplicación real del problema de ruteo dinámico de vehículos se estudia en Savelsbergh and Sol [1998], usando como base un algoritmo de *Branch-and-Price* con técnicas de aproximación y optimización incompleta.

Entre los trabajos realizados en la segunda línea de investigación se encuentra Ichoua et al. [2006], el cual presenta un modelo de programación dinámica que genera rutas con una heurística de *tabu search*, el cual incluye una política de espera de los vehículos tomando en cuenta la información probabilística de la demanda futura. Se definen clientes ficticios al principio de las rutas para obligar a los vehículos a esperar cuando terminan de atender una solicitud; de esta forma el cliente ficticio puede ser reemplazado por un nuevo cliente que aparezca en la cercanía. Existe un tiempo máximo de espera en este punto, y esta espera sólo se lleva a cabo en el caso de que la probabilidad de que aparezca una solicitud en la vecindad supere cierto umbral. Otras estrategias de espera y relocalización de vehículos es estudiada en Bent and Van Hentenryck [2007].

Otro enfoque para incluir información sobre la demanda futura es el de Control Predictivo Híbrido Adaptativo utilizado en Cortés et al. [2009] para un problema dinámico de *pick up and delivery*. También es aplicado incluyendo congestión vehicular en Cortés et al. [2008] y junto algoritmos genéticos en Sáez et al. [2008].

En algunos de los trabajos de esta línea de investigación la información sobre llamados futuros se manifiesta en forma de *Idle Points*, puntos de espera para los vehículos ubicados donde se espera tener alta demanda. En Larsen et al. [2004] se aborda una versión dinámica del Problema del Vendedor Viajero con Ventanas de Tiempo para varios grados de dinamismo, proponiendo distintos métodos para reposicionar a los vehículos ociosos hacia *Idle Points* considerando la distribución de probabilidad de la demanda. Para resolver el problema se utiliza una adaptación de procedimiento 3-opt, propuesto por Lin [1965].

La generación de *Idle Points* fue incluida en el modelo planteado en esta tesis aprovechando que, a diferencia de los trabajos anteriores, se cuenta con información histórica del caso de estudio, la cual puede ser utilizada para la construcción de los puntos de espera.

Otra forma de anticipación a la demanda futura se muestra en Schmid and Doerner [2010], el cual aborda el problema de localización de ambulancias con tiempos de viaje variables. Se plantea una versión multiperíodo del *Double Standard Model* (DSM), introducido por Gendreau et al. [1997], en el cual existe una cobertura de la demanda durante todo el horizonte de planificación y todas las reubicaciones de los vehículos se consideran simultáneamente. Este problema es resuelto mediante una adaptación del VNS mencionada arriba.

Más detalle sobre problemas dinámicos de ruteo de vehículos se puede encontrar en Ichoua et al. [2007], donde se revisa y clasifica el trabajo realizado en este campo, desde enfoques miopes hasta aquellos que consideran anticipación de la demanda. A su vez, en Psaraftis [1995] se examinan los principales asuntos relevantes de este tipo de problemas, incluyendo el impacto de las tecnologías de información y las distinciones de estos enfoques respecto a sus contrapartes estáticas.

Una aplicación real del VRPTW dinámico se estudia en Weintraub et al. [1999], donde se aborda el problema de despacho de vehículos de reparaciones de emergencias eléctricas, el cual se resuelve usando atenuación exponencial para pronosticar la ocurrencia de fallas. En este trabajo, al igual que en Larsen et al. [2004], se utiliza una función multiobjetivo que pondera la calidad de servicio y otros costos.

2.2. Trabajo previo

Esta tesis se enmarca en el contexto de una serie de trabajos desarrollados en la misma línea de investigación. Entre estos estudios se encuentra un enfoque diferente para resolver una versión estática del problema de ruteo diario del Servicio Técnico de Xerox que utiliza *Branch-and-Price* junto con *Constraint Programming* dentro de la Generación de Columnas estudiado en Cortés et al. [2014]. Otro estudio que resuelve el mismo problema estático, pero esta vez incluyendo tiempos de servicios estocásticos se aborda en Souyris et al. [2013], que se tratan mediante optimización robusta.

Por otro lado, en Cortés et al. [2010a] se desarrolló una metodología para el diseño de flota del mismo problema con demanda estocástica, que se aborda mediante un enfoque de simulaciones que utiliza la información real del problema. Finalmente, se dispone de una tesis previa del ruteo dinámico del problema de Xerox, resuelto mediante Generación de Columnas con *Constraint Programming* en Rojas [2012].

Capítulo 3

Descripción del caso de estudio

3.1. Descripción del problema

El modelo desarrollado en este trabajo se enfoca en resolver un problema real de ruteo de vehículos, el cual corresponde al Servicio Técnico de la empresa Xerox en la ciudad de Santiago de Chile.

Xerox es una empresa con presencia en más de 160 países, que ofrece una serie de servicios tales como administración de documentos, desarrollo de aplicaciones y consultoría de tecnologías de información; así como también una variedad de productos para oficina, rubro por el que suele ser conocida. Con un valor comercial de casi US\$23 mil millones en el mundo, Xerox se ubica como empresa líder internacional para la administración de documentos y procesos comerciales.

Dado el actual prestigio de la empresa y su objetivo de continuar posicionándose como líder de mercado, se hace fundamental mantener una buena imagen ante los clientes. Por lo tanto, se prioriza desarrollar productos y ofrecer servicios de calidad, lo que en el caso del Servicio de Reparación de Fallas equivale a responder las necesidades del cliente en el menor tiempo posible. Este tiempo de respuesta depende a su vez de la prioridad comercial que se le conceda a cada cliente, ya que sobre todo se debe cuidar la permanencia de aquellos que son preferenciales. Sin embargo, como para cualquier otra compañía, controlar adecuadamente los costos operacionales es también una prioridad para Xerox en términos de eficiencia y nivel de servicio. Por esta razón, es importante utilizar de forma eficiente los recursos que se tienen disponibles, los que en este caso corresponden a un número limitado de vehículos y técnicos, cuya disponibilidad varía según su asignación de tareas, sus vacaciones, licencias, etc.

En el caso estudiado este problema es resuelto de forma manual por parte de los Planificadores, quienes en base a su experiencia determinan la ruta a seguir diariamente por cada vehículo y técnico asignado. Para simplificar este trabajo, el equipo de planificación dividió

Santiago en 111 territorios según criterios de frecuencia de llamadas y condiciones geográficas. A cada una de estas zonas se le asigna un número fijo de técnicos y le corresponde un problema de ruteo independiente de las demás, por lo que cada vez que surge una nueva llamada, ésta pasa a la lista de espera de la zona a la que pertenece, hasta que es asignada a uno de los vehículos de su área por parte del equipo de despacho. La decisión sobre la asignación de un nuevo llamado es compleja, ya que no solo se debe tener en cuenta la ubicación los técnicos en cada momento en conjunto con el tiempo de espera de los llamados, sino también la prioridad comercial del cliente que realizó la llamada.

Los tiempos de atención son un factor importante a considerar en este problema, ya que en promedio alcanzan 85 minutos por cliente, con lo que superan ampliamente en la mayoría de los casos a los tiempos de traslado. Esto es una característica fundamental del problema y determina la forma en que se diseñan las rutas para ofrecer menores tiempos de respuesta. Por otro lado, se tiene que los tiempos entre llamadas bordean en promedio los 5 minutos, por lo que existe una frecuencia relativamente elevada y que determina el carácter dinámico de este problema.

3.2. Zona de estudio

La división de la ciudad en zonas permite resolver problemas independientes, y así reducir la complejidad para los planificadores; no obstante, también empeora la calidad de las soluciones al descartar un gran conjunto de posibilidades. Para obtener una mejor solución, se debe contar con una visión global del problema que se resuelve y por esta razón el modelo propuesto abarca un gran porcentaje del territorio de Santiago.

De las más de 150.000 llamadas que recibe Xerox anualmente en Santiago, un 34 % se concentra en las comunas de Santiago Centro y Providencia, las cuales representan un escaso 3 %¹ del área total de la ciudad. Además, esta parte de la ciudad esta servida por 3 líneas de metro, cuenta con múltiples recorridos de buses y con escasos y costosos estacionamientos, por lo que la utilización de transporte público es más recomendable en este sector para los técnicos. Debido a estas razones, el ruteo de los vehículos se torna menos interesante por el escaso desplazamiento y se descartan estas comunas de la implementación del algoritmo.

En cambio, la zona Sur-Oriente de Santiago posee un área de 988 km^2 , equivalente a un 69 % de la ciudad y abarca cerca de 22 % de las llamadas de Santiago. Debido a su menor densidad y alta heterogeneidad entre las comunas que la conforman, la zona Sur-Oriente constituye un área interesante a ser estudiada y es seleccionada para la implementación del modelo.

¹Información obtenida del Instituto Nacional de Estadísticas de Chile (INE)

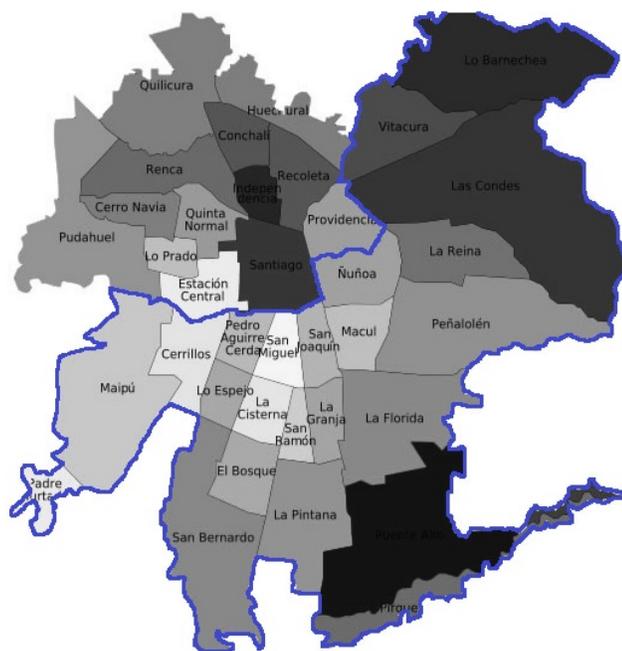


Figura 3.1: Zona Sur-Oriente de Santiago

3.3. Análisis de la demanda

La zona elegida para el estudio del problema está compuesta por comunas muy heterogéneas en cuanto a la distribución e intensidad de la demanda, ya que entre ellas se encuentran tanto sectores casi puramente residenciales, como otros fuertemente comerciales. También existe una amplia heterogeneidad respecto de la extensión de las comunas estudiadas. Por esta razón, se calcula el ratio entre el número de llamadas y el área de cada zona, con lo que se obtiene un indicador para la intensidad de la demanda.

En la tabla 3.1 se sintetiza la información demográfica, geográfica y el número llamadas anual de las 23 comunas que pertenecen a la zona estudiada.

Es posible notar que la mayor concentración de llamados se produce en las comunas más centrales y del sector oriente, como lo son Ñuñoa, Las Condes, San Joaquín, Macul, San Miguel y Vitacura, ya que en éstas hay un mayor número de oficinas. En cambio, en las zonas más periféricas como Pirque, Padre Hurtado o La Pintana la demanda es considerablemente menor.

Además, se puede observar que existe una muy baja correlación entre la densidad de la demanda y la densidad demográfica, lo que se explica, por la existencia de zonas más comerciales y otras más residenciales, tal como se mencionó antes. Esta característica no quita la posibilidad de que se encuentren comunas mixtas, como por ejemplo Ñuñoa, Macul o San Joaquín.

Comuna	Población [hab]	Superficie [km ²]	Densidad demográfica [hab/km ²]	Demanda [llam]	Intensidad demanda [llam/km ²]
Cerrillos	71.906	21,0	3.424,1	1243	59,2
El Bosque	175.594	14,0	12.542,4	384	27,4
La Cisterna	85.118	10,0	8.511,8	297	29,7
La Florida	365.563	71,0	5.148,8	1578	22,2
La Granja	132.520	10,0	13.252,0	108	10,8
La Pintana	190.085	31,0	6.131,8	157	5,1
La Reina	96.762	23,0	4.207,0	870	37,8
Las Condes	249.893	99,0	2.524,2	1.1683	118,0
Lo Barnechea	72.278	54,0	1.338,5	591	10,9
Lo Espejo	112.800	7,0	16.114,3	173	24,7
Macul	112.535	13,0	8.656,5	1.480	113,8
Maipú	463.103	133,0	3.482,0	1.577	11,9
Ñuñoa	163.511	17,0	9.618,3	3.815	224,4
Padre Hurtado	34.257	80,8	424,0	295	3,7
P. Aguirre Cerda	114.560	10,0	11.456,0	140	14,0
Peñalolén	216.060	54,0	4.001,1	391	7,2
Pirque	16.855	42,0	401,3	79	1,9
Puente Alto	492.603	88,2	5.585,1	1.003	11,4
San Bernardo	237.708	155,0	1.533,6	1.552	10,0
San Joaquín	97.625	10,0	9.762,5	1.854	185,4
San Miguel	78.872	10,0	7.887,2	1.138	113,8
San Ramón	94.906	7,0	13.558,0	119	17,0
Vitacura	81.499	28,0	2.910,7	2.911	104,0

Tabla 3.1: Información geográfica y demográfica de las comunas de Santiago Sur-Oriente

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas (INE)

Por otro lado, en la ilustración de las comunas se puede ver que algunas están muy alejadas del centro de la ciudad. Sin embargo, la presencia de autopistas provoca que los tiempos de viaje no sean necesariamente elevados. Esto, sumado a la existencia de calles de sentido único y ciertos accidentes geográficos, determina la importancia de obtener una buena aproximación para los tiempos de viajes, lo que será abordado en el próximo capítulo de esta tesis.

3.3.1. Tiempos de llamadas

Previo a desarrollar una política de ruteo adecuada para la zona recién señalada, es indispensable conocer más profundamente el comportamiento de la demanda. A continuación, se muestra el análisis propuesto para determinar si existe estacionalidad de algún tipo en las llamadas de los clientes. En la figura 3.2 se muestra la cantidad de llamados para cada uno de los meses del año que se encuentran en la base de datos; es decir, desde Mayo de 2002 hasta

Abril de 2003. Como cada mes tiene distinto número de días hábiles, se divide por este factor para calcular el número de llamadas diarias promedio de cada mes de forma más precisa.

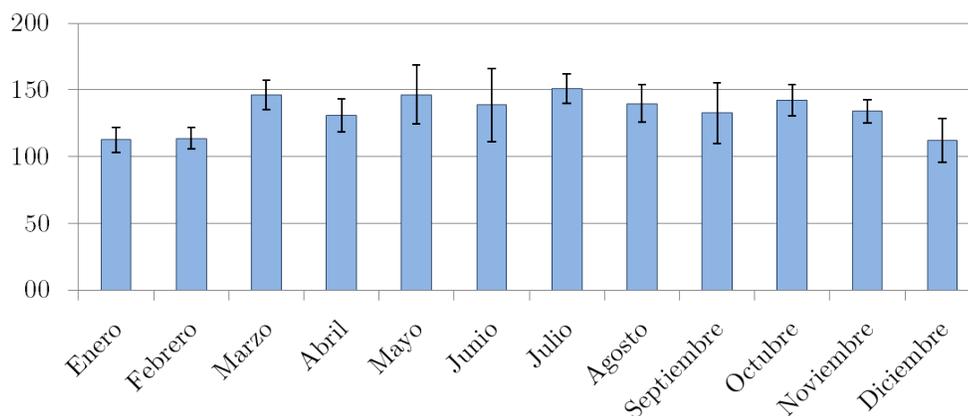


Figura 3.2: Número de solicitudes diarias promedio según mes

Se puede apreciar que en los meses de verano la demanda disminuye, aunque no significativamente. Este fenómeno puede ser explicado debido a que la mayoría de las empresas concede vacaciones a un mayor número de sus trabajadores en estas fechas, por lo que habría un menor uso de las máquinas, con una consecuente menor probabilidad de falla. Otra posible explicación es que se postergue la mantención para otros meses. Además, se puede ver que existe una variabilidad significativamente mayor en los meses de mayo, junio y septiembre, lo que se atribuye a la mayor presencia de días festivos.

Respecto de la variación de la demanda dentro de la semana, se puede observar que existe un peak el día lunes y que, por el contrario, el día viernes es aquel con menor demanda. El resto de los días de la semana tiene un comportamiento similar. Esto se atribuye a que la jornada laboral de algunas empresas termina más temprano el día viernes y por lo tanto deciden postergar las reparaciones o mantenciones para el lunes. Se puede ver que existe escasa diferencia entre la varianza de la demanda entre los días de la semana.

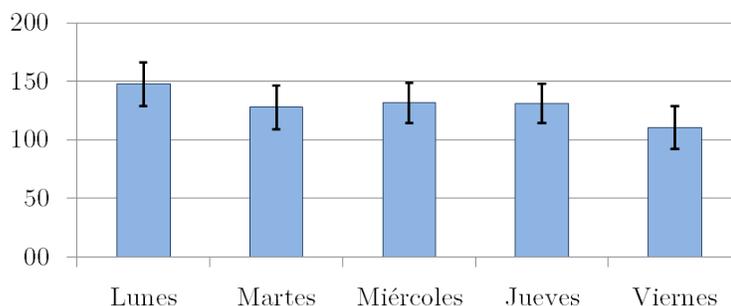


Figura 3.3: Número de solicitudes según día de la semana

Finalmente, se analiza la estacionalidad dentro del día para descubrir si existen horarios peak. Según la información contenida en la base de datos, las llamadas han sido registradas entre las 7:00 y 20:00 horas, por lo que solo se incluye este intervalo del día en el análisis. En

la figura 3.4 se muestra el número promedio de llamadas recibidas en cada uno de los bloques horarios definidos.

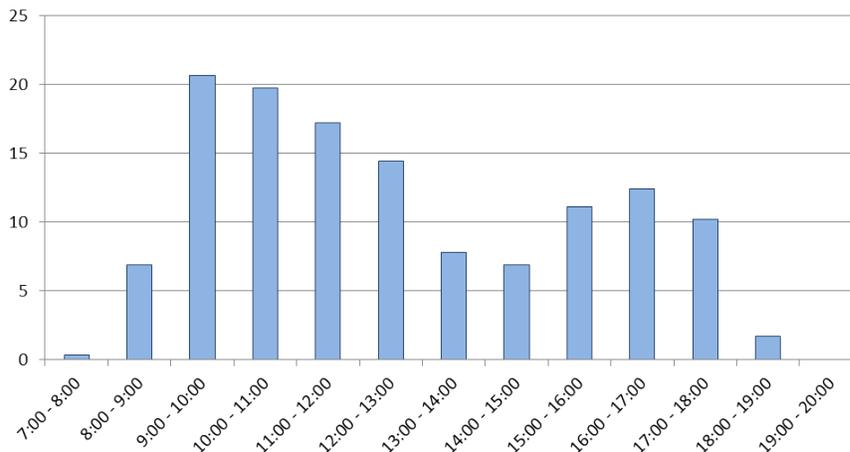


Figura 3.4: Número de solicitudes diarias promedio según horario

En este caso sí es posible observar una fuerte estacionalidad de la demanda, marcada en primer lugar por las diferencias entre la mañana y la tarde, ya que en las primeras horas del día se percibe una intensidad mucho mayor. También se puede ver que existe una notoria disminución en el horario del almuerzo, comprendido entre las 13:00 y 15:00 horas, y al final de la jornada laboral.

Esta marcada estacionalidad durante el día origina la idea de estudiar más detalladamente la demanda en términos temporales y así poder desarrollar un algoritmo que sea capaz de incorporar esta característica en la resolución del problema.

3.3.2. Tiempos de atención

Además de la variabilidad que se observa respecto a la llegada de las llamadas, también existe una notable heterogeneidad en los tiempos que tarda una máquina en ser atendida. El promedio del tiempo de servicio obtenido de los registros es de 85,8 minutos por atención y su desviación estándar de 53,5 minutos, es decir, casi una hora.

Existen 210 productos distintos entre impresoras, multifuncionales y copadoras, los que se reparten entre 18 familias de máquinas. En la tabla 3.2 se muestra el tiempo de atención promedio, la desviación estándar y el número de llamadas registradas en un año para cada uno de estos grupos. Es posible observar que el 80 % de la demanda se concentra en 6 familias y que en todos los casos se obtiene una gran variabilidad, con una desviación estándar que en algunos casos supera el 70 % del tiempo promedio. Por otro lado, las observaciones obtenidas no se ajustan a ninguna distribución, por lo que se tiene que, dada la información disponible, los tiempos de servicio son altamente impredecibles.

Familia	Tiempo [min]	σ [min]	σ [%]	N Llamadas	% Llamadas
CGS	69,44	54,6	78,6 %	9	0 %
CH-COP. PERSO.	67,67	49,0	72,4 %	466	1 %
CH-FAX	41,79	24,2	57,9 %	591	2 %
CH-INKJET	38,43	22,4	58,4 %	509	2 %
CH-LASER	54,04	35,4	65,5 %	3.455	10 %
CH-LASER COLOR	68,75	44,9	65,3 %	255	1 %
CH-MULTIF.	46,01	30,0	65,2 %	1.134	3 %
DPS	126,79	74,0	58,3 %	327	1 %
ODP-CNV DIG	81,3	46,5	57,3 %	3.678	11 %
ODP-CNV L&L	84,86	47,2	55,6 %	12.454	37 %
ODP-COLOR	128,47	69,5	54,1 %	931	3 %
ODP-DCS DPTL	110,88	55,6	50,1 %	377	1 %
ODP-DCS WG	88,11	45,8	52,0 %	2.895	9 %
ODP-DTL	122,25	63,8	52,2 %	1.018	3 %
ODP-PRO	53,15	32,8	61,6 %	391	1 %
ODP-WG	106,35	54,3	51,0 %	3.233	10 %
PS	149,41	66,9	44,8 %	912	3 %
XES	125,92	67,6	53,7 %	724	2 %

Tabla 3.2: Tiempos de atención

Capítulo 4

Heurística propuesta

En el presente capítulo se describe en detalle cada una de las componentes de la heurística propuesta en esta tesis para resolver el problema del Servicio Técnico de Xerox en la ciudad de Santiago, el cual fue revisado en el capítulo anterior.

4.1. Descripción general

La idea principal de este algoritmo consiste en utilizar la información histórica para determinar cuáles son las zonas en que la probabilidad de que aparezca un nuevo cliente es más alta y así poder posicionar a los vehículos de manera en que se obtenga una mejor capacidad de respuesta ante la demanda que presenta incertidumbre dada la componente dinámica del problema a resolver. Estas zonas serán llamadas *Idle Points* o puntos de espera, y los vehículos acudirán a ellos una vez desocupados. Al final de cada ruta se incluirá el *Idle Point* más cercano a la última llamada atendida; sin embargo, la decisión de trasladarse dependerá de que la demanda promedio, en dicha zona y bloque horario, supere un umbral determinado. De esta forma, no se realizarán traslados infructuosos. Además, se implementó un sistema de puntuación de covering, el cual tiene como objetivo asegurar una distribución espacio-temporal de los vehículos acorde con la intensidad de la demanda. En otras palabras, mientras mayor sea la demanda que se espera en una zona en cierto período, mayor es el premio que se otorga al vehículo por estar ahí, en términos de la función objetivo del problema que se resuelve. Para evitar aglomeraciones de los técnicos en las zonas de mayor demanda, se restringe el valor máximo de la variable de covering asociada a la presencia de vehículos en cada uno de estos bloques.

El ruteo propuesto en esta tesis se realiza por medio de la optimización de un problema de programación lineal entero, resuelto a través de Generación de Columnas. Esta metodología es utilizada para resolver tanto el ruteo estático como el dinámico. El ruteo estático corresponde a la generación, a través de heurísticas de inserción, de rutas iniciales compuestas por los

clientes que quedaron pendientes el día anterior. Además, se crean rutas con *Idle Points* que serán usadas por aquellos vehículos que no tengan clientes asignados. Las rutas generadas son seleccionadas mediante el Problema Maestro para dar como resultado una solución que es puesta en operación hasta que se recibe la primera llamada del día. En este momento comienza el ruteo dinámico, proceso en el cual se deben actualizar las columnas generadas anteriormente e incluir en ellas la nueva solicitud, para luego decidir nuevamente cuales son las nuevas rutas que deberán ser utilizadas.

Para generar nuevas rutas que incorporen la información de la nueva llamada, el primer paso es seleccionar las rutas a las que se les agregará este cliente. Esto se realiza eligiendo las rutas de menores costos reducidos que posean a algún cliente en la proximidad de la zona en la que se ubica la nueva llamada. El siguiente paso consiste en incluir al cliente en la posición de menor costo y luego realizar una búsqueda local que mejore la solución encontrada. El proceso de utilizar columnas generadas anteriormente para insertar nuevas llamadas, se conoce como Generación Dinámica de Columnas y fue propuesto por Chen and Xu [2006]. En esta tesis se utiliza una adaptación de este algoritmo para enfrentar un problema de ruteo real, considerando la demanda histórica para obtener mejoras en la calidad de servicio ofrecida a los clientes, como se analizará en mayor detalle a continuación.

4.2. Definición de períodos

Al desarrollar un modelo basado en una componente temporal, una de las primeras decisiones que se deben tomar corresponde a la discretización del tiempo. Existe un trade-off entre la complejidad computacional y la precisión del modelo que depende de la elección del largo de los períodos de tiempo. Intervalos más cortos tendrían como consecuencia un mayor número de períodos, lo que sumaría más variables y restricciones al algoritmo, haciendo más lenta su resolución. Sin embargo, la elección de intervalos más amplios también puede causar una pérdida en la distribución espacio-temporal de los vehículos. Considerando que el tiempo de servicio promedio es de 85 minutos, en conjunto con el trade-off entre precisión y la complejidad ya discutida, se decide un largo de 90 minutos como apropiado, ya que de esta forma se tienen 9 períodos que abarcan todas las llamadas registradas en la base de datos y, dada la magnitud de los tiempos de atención, tampoco existe una pérdida significativa de precisión respecto a la distribución de los vehículos.

4.3. Definición de zonas

Uno de los puntos claves de la Heurística propuesta es la definición de los Idle Points. Para lograr este objetivo, en primer lugar se procede con una partición en áreas de superficie similar del sector de Santiago seleccionado. Esta medida tiene dos objetivos, en primer lugar determinar cuáles son las zonas de mayor demanda y, por otro lado, obtener una aproximación para las distancias entre cada par de clientes. En esta división fueron descartadas aquellas

áreas inhabitadas, tales como la zona de la cordillera de la comuna de Las Condes, La Reina, Peñalolén y Lo Barnechea. El resultado de este proceso llevado a cabo utilizando Google Earth, es una partición en 70 zonas, las cuales se muestran en la figura 4.1.

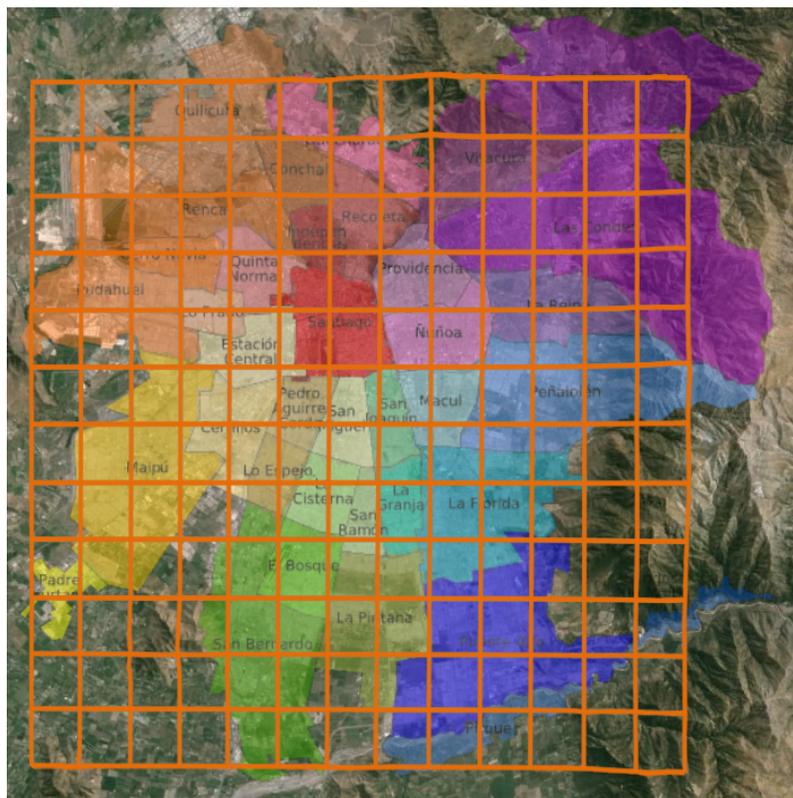


Figura 4.1: División en Zonas

El siguiente paso para lograr los objetivos planteados consiste en determinar las distancias entre cada par de zonas. Se consideró que las distancias euclidianas eran una aproximación pobre para los tiempos de viaje, dado que Santiago es una ciudad con múltiples calles de sentido único, autopistas y accidentes geográficos. Por esta razón se ejecutó una macro desarrollada en Autohotkey sobre Google Maps, herramienta que permite obtener estimaciones más realistas de tales tiempos. Por otro lado, para las distancias entre dos puntos de una misma zona, se considera trabajar con la mitad del tiempo promedio de viaje hacia las zonas adyacentes.

Una vez definidas las zonas y las distancias entre ellas, se debe seleccionar cuáles de ellas presentan mayor demanda, para ser elegidas como Idle Points. Para cuantificar la intensidad de la demanda, cada una de las 33.357 llamadas registradas en la base de datos es asignada a la zona que se encuentre a menor distancia eucladiana. En la tabla 4.1 se presenta la demanda mensual promedio para cada una de las zonas definidas anteriormente.

Es posible notar la alta variabilidad en la demanda de cada zona, la que se debe en gran medida a la estacionalidad mensual que fue revisada en el capítulo anterior. Por otro lado, es importante advertir las amplias diferencias entre la cantidad de llamadas de cada zona, lo que demuestra la importancia de priorizar la cobertura de algunos sectores por sobre otros.

N°	Zona	Media Mensual	Desv. Estándar	N°	Zona	Media Mensual	Desv. Estándar
1	Lo Barnechea - Norte	3,5	2,3	36	La Florida - Norte	73,1	15,8
2	Lo Barnechea - Norte	0,2	0,6	37	La Florida - Norte	6,9	2,5
3	Lo Barnechea - Sur	3,3	2,7	38	La Florida - Norte	4,4	3,1
4	Lo Barnechea - Sur	18,3	7,1	39	Maipú - Centro	16,6	4,5
5	Lo Barnechea - Sur	2,0	1,6	40	Maipú - Centro	14,7	4,5
6	Vitacura - Centro	20,7	4,5	41	San Bernardo - Norte	45,2	9,5
7	Vitacura - Centro	56,9	11,9	42	La Cisterna	23,8	4,3
8	Vitacura - Oeste	48,8	13,5	43	San Ramón	14,5	5,6
9	Las Condes - Norte	39,5	10,2	44	La Granja	5,8	3,4
10	Las Condes - Este	598,6	74,4	45	La Florida - Centro	19,6	6,2
11	Las Condes - Este	287,5	25,1	46	La Florida - Centro	12,2	4,4
12	Las Condes - Centro	75,9	19,7	47	Padre Hurtado	24,4	6,4
13	Las Condes - Oeste	11,4	4,2	48	Maipú - Sur	0,4	0,7
14	La Reina - Norte	44,6	6,0	49	San Bernardo - Norte	23,8	7,1
15	La Reina - Norte	16,7	7,3	50	El Bosque	42,3	12,1
16	Ñuñoa	171,9	23,3	51	La Pintana - Norte	2,0	1,7
17	Ñuñoa	113,7	22,1	52	La Pintana - Norte	2,4	1,8
18	La Reina - Sur	23,8	5,9	53	La Florida - Sur	8,6	4,6
19	La Reina - Sur	16,3	4,6	54	Puente Alto - Norte	10,7	4,1
20	Maipú - Norte	31,5	7,9	55	San Bernardo - Centro	27,7	2,6
21	Cerillos - Norte	30,8	9,7	56	San Bernardo - Centro	5,9	2,8
22	Cerillos - Norte	57,1	12,3	57	La Pintana - Centro	1,3	1,2
23	Pedro Aguirre Cerda	9,5	2,2	58	La Pintana - Centro	4,5	3,4
24	San Miguel - Norte	138,5	13,3	59	Puente Alto - Centro	6,8	3,6
25	San Joaquín - Norte	142,6	27,6	60	Puente Alto - Centro	5,9	3,3
26	Macul	87,8	14,3	61	San Bernardo - Sur	0,5	0,8
27	Peñalolén - Centro	4,1	1,6	62	San Bernardo - Sur	4,0	2,2
28	Peñalolén - Centro	4,0	1,9	63	Puente Alto - Sur	4,8	3,6
29	Maipú - Centro	8,8	3,2	64	Puente Alto - Sur	12,3	3,5
30	Maipú - Centro	49,2	13,4	65	Puente Alto - Sur	37,3	7,3
31	Maipú - Oeste	38,5	9,2	66	Puente Alto - Sur	17,8	5,3
32	Cerillos - Sur	10,4	3,4	67	San Bernardo - Sur	9,5	4,3
33	Lo Espejo	6,5	2,8	68	San Bernardo - Sur	0,0	0,0
34	San Miguel - Sur	64,3	14,7	69	Pirque	0,0	0,0
35	San Joaquín - Sur	91,2	24,0	70	Pirque	0,3	0,6

Tabla 4.1: Demanda Mensual por Zona

Por ejemplo, en zonas ubicadas en la periferia, como la 2 o la 48, se recibe en promedio menos de una llamada mensual, en contraste con otras zonas más centrales que dan origen al menos a 5 llamadas diarias.

Idle Points

Como el modelo propuesto contempla una componente de covering espacio-temporal, la elección de los *Idle Points* se realiza en base a los promedios de la demanda para cada bloque horario. Una zona es elegida como punto de espera si su demanda promedio en al menos uno de los bloques de tiempo supera un umbral determinado. El número final de *Idle Points* y su

distribución se define en el siguiente capítulo, en el cuál se prueban dos conjuntos distintos para decidir cuál es el mejor, los cuales se diferencian en el nivel de demanda mínimo para que una zona califique como *Idle Point*. En el Anexo A se incluye una tabla con la demanda de cada zona por bloque horario, donde se puede apreciar cuáles son aquellas de mayor demanda y cómo cambia el número de llamadas a lo largo del día.

En la figura 4.2 se presentan los centros geográficos de las 70 zonas definidas en la partición. Los círculos de color amarillo y rojo representan el centroide de las zonas que han sido elegidas para desempeñar el rol de *Idle Points*, de las cuales aquellas marcadas con rojo corresponden a las de más alta demanda, mientras que las de amarillo son las de intensidad media.

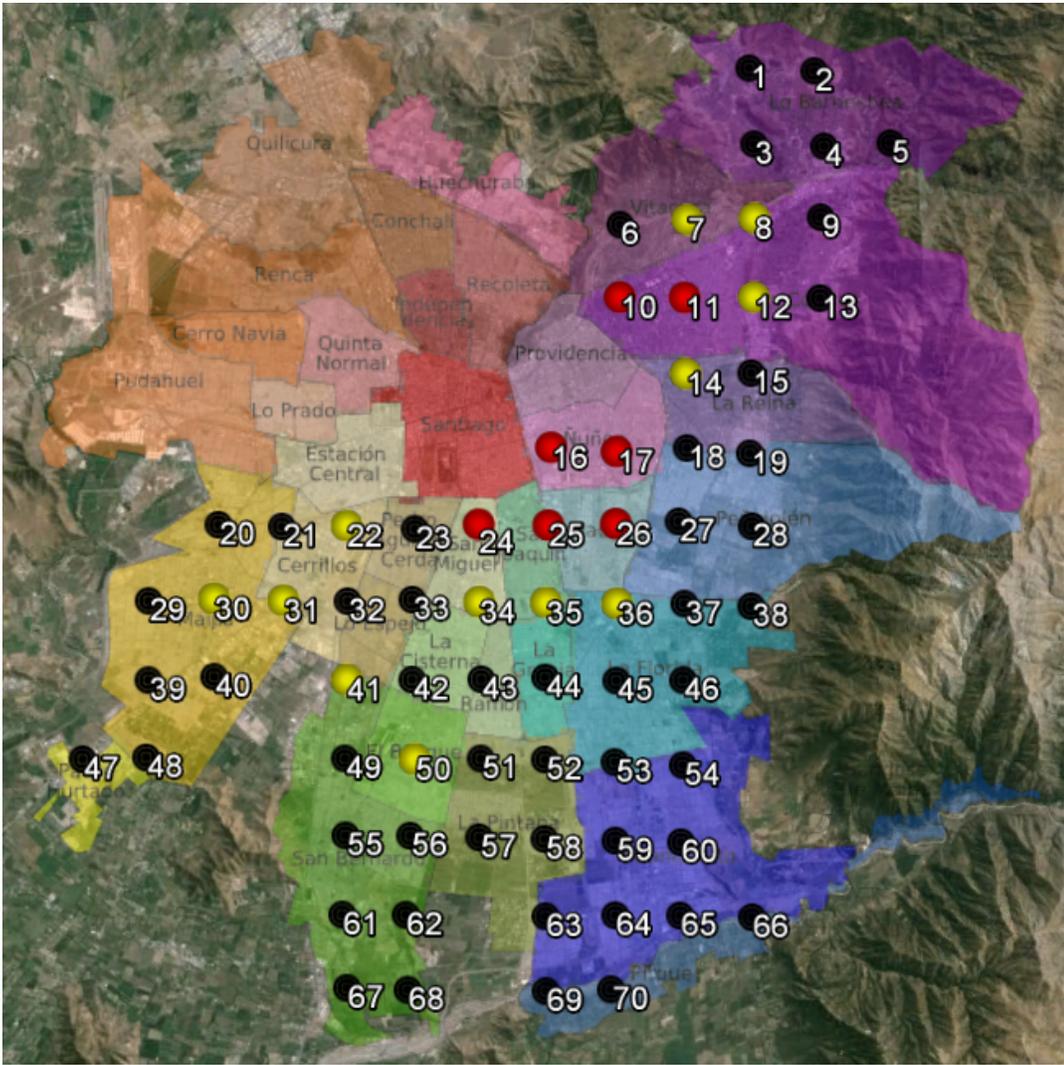


Figura 4.2: Idle Points

Como se mencionó anteriormente, a cada ruta se le asigna el *Idle Point* más cercano, el cual es incluido al final de la ruta como si fuera una llamada ficticia. De esta forma, una vez que un vehículo ha terminado de atender al último cliente, éste tiene la opción de trasladarse a una zona de mayor demanda. El criterio de elección del *Idle Point* más cercano se basa

en no descuidar los costos de transporte. Por otro lado, la intensidad de la demanda de los puntos de espera no es constante a lo largo del día, existen horarios en que la baja demanda no justifica el desplazamiento a otro lugar para esperar una nueva solicitud. Para evitar reposicionamientos innecesarios que puedan aumentar los costos de transporte, se determina que un vehículo debe trasladarse solo en el caso que la demanda esperada en dicho período supere un umbral predefinido. El valor de este parámetro será presentado en el siguiente capítulo. En muchos casos ocurrirá que el *Idle Point* asignado a una ruta corresponda a la misma zona en que se ubica la última llamada atendida, con lo que no se tendrá ningún desplazamiento.

En el caso de que se asigne una llamada a un vehículo que va en dirección a un nodo ficticio, se realiza una estimación de la posición en que se encuentra utilizando información de las coordenadas geográficas de las zonas de origen y destino, y los tiempos de traslado. Con esto, no se sobrestima el tiempo de desplazamiento a los *Idle Points*.

4.4. Definición de Covering

Para entender en mayor profundidad el modelo, es necesario empezar por definir cuándo se considera que una zona se encuentra cubierta. Respecto de la dimensión temporal, el covering definido abarca desde el período en que llega el vehículo a atender al cliente, hasta el período en que el servicio fue terminado. Esto significa que no importa en que momento del período llegue o se retire el vehículo, este se considerará como cubierto si es que el técnico estuvo presente una fracción de tal período en esa zona.

En términos espaciales, evidentemente una zona se considera cubierta cuando el vehículo está en ella; no obstante, también se incluye la cobertura parcial de las zonas colindantes. Se definen dos grados de adyacencia: el primero se refiere a las zonas que están inmediatamente en la proximidad y el segundo a las que se encuentran a una zona de distancia. Naturalmente, una zona está menos cubierta mientras más alejada esté de la zona en que se posiciona el vehículo. En la figura 4.3 se aprecia un ejemplo que muestra lo descrito.

En este caso existe un único técnico, el cual se encuentra en la zona 37, señalada con rojo. Las zonas limítrofes marcadas con naranja, están a una distancia corta de la zona 37, por lo que una vez que se desocupe el técnico rápidamente podría atender una llamada ubicada en una de ellas. Las zonas amarillas también se encuentran en la proximidad de la zona 37, pero a una distancia mayor y, además, existe un mayor número de zonas de este tipo, por lo que es menos probable que cuando el vehículo esté desocupado pueda acudir a servir las. Por lo tanto, estas zonas también se incluyen en el covering parcial, pero con una menor puntuación que las descritas arriba.

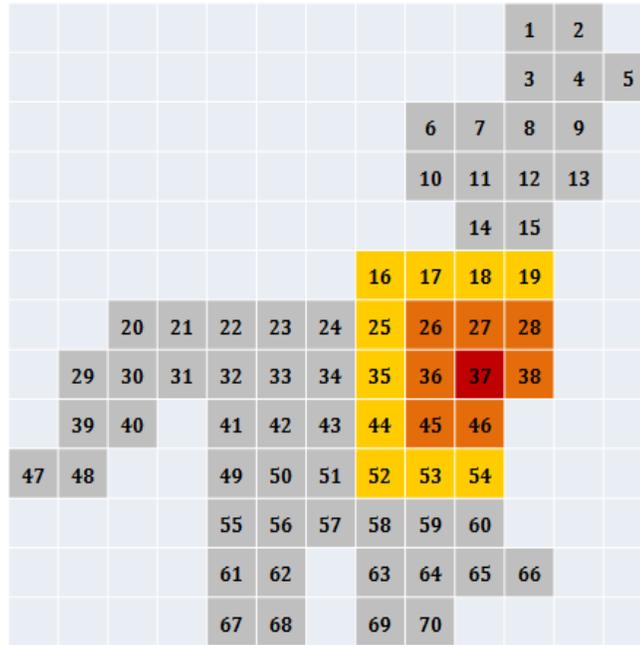


Figura 4.3: Covering de zonas adyacentes

Los valores atribuidos al covering parcial se definen como un factor que depende del grado de adyacencia, el cual será inversamente proporcional al número de zonas que cumplen la condición. Por ejemplo, en el caso de que existan 8 zonas colindantes, el parámetro de covering será de $1/8$.

Multiplicadores de demanda

Como el objetivo de este estudio es utilizar la información histórica para lograr desarrollar una mejor capacidad de anteponerse a la demanda futura, es necesario incorporar la intensidad de la demanda en el proceso de toma de decisiones. Tal como se pudo apreciar en el análisis de demanda por zonas presentado en la sección 4.3, existe gran variabilidad en la cantidad de llamadas recibidas por zonas y período de tiempo. Es por esto que se decide incluir una puntuación equivalente a la demanda promedio de cada zona por bloque horario como coeficiente de las variables de covering en la función objetivo. De esta forma se favorece que los vehículos se posicionen en las zonas en que es más probable que surja una nueva llamada. El peso de esta componente en la función objetivo respecto a los costos de distancia y espera será controlado mediante la constante asociada al covering.

Covering máximo

Al incluir una puntuación favoreciendo a las zonas de mayor demanda, se corre el riesgo de que los vehículos se aglomeren, dejando desatendidos los sectores con menor intensidad de llamadas. Para evitar este problema, se genera una restricción de covering máximo por zona y por período. Este conjunto de parámetros es calculado en función de la demanda promedio por bloque horario, como se discute en el siguiente capítulo al revisar las corridas preliminares.

4.5. Modelo de programación lineal entero

Al inicio del día, así como cada vez que una nueva llamada es recibida, la elección de las rutas que minimizan los costos del problema se realiza en base a la solución de un problema de optimización. En esta sección se presenta el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo, el cual fue adaptado según las características del modelo planteado. Posteriormente, se exhibe su representación en Generación de Columnas, lo que da origen al Problema Maestro que será utilizado para seleccionar las columnas utilizadas en cada iteración.

4.5.1. Formulación general del problema

La formulación mostrada a continuación está basada en el Problema de Ruteo de Vehículos, ya ampliamente estudiado en la literatura, pero que a la vez incluye distintas componentes propias de este modelo. Por un lado se tiene la función objetivo múltiple basada en el trabajo de Weintraub et al. [1999], la cual permite tomar en consideración no solo los costos de transporte, sino también los de espera y la puntuación de covering. Además, se destaca la existencia de los *Idle Points*, los cuales son representados por el conjunto I_0 , y de las variables y restricciones asociadas al covering.

Parámetros del modelo

I_0 : Conjunto de *Idle Points*

I_1 : Conjunto de llamadas pendientes

I_2 : Conjunto de llamadas a ser ruteadas dentro del día

Z : Conjunto de zonas

K : Conjunto de técnicos disponibles

A : Conjunto de arcos factibles

P : Conjunto de períodos

l_i : Instante en que se recibe la llamada i

b_i : Cota superior de la ventana de tiempo asociada a la llamada i

s_i : Tiempo de servicio asociado a la llamada i

t_{ij} : Tiempo de viaje entre la llamada i y la j

d_{zp} : Multiplicador de demanda de la zona z durante el período p

Cov_{iz} : Covering que ofrece el nodo i a la zona z

$MaxCov_{zp}$: Máximo covering permitido a la zona z durante el período p

BT : Largo de un período

Variables de decisión

w_i^k : Instante en que el técnico k comienza a atender a i

λ_i^k : Demora en atender al cliente i dentro de la ventana de tiempo

δ_i^k : Atraso en atender al cliente i fuera de la ventana de tiempo

f_{zp} : Cobertura de la zona z en el período p

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{si el técnico k atiende al cliente j inmediatamente después del cliente i} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$y_{ip}^k = \begin{cases} 1 & \text{si } w_i^k \leq BTp \leq w_i^k + s_i, \text{ i.e. si el técnico k está en el cliente i en el período p} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

A continuación se muestra una representación gráfica de las variables temporales del problema:

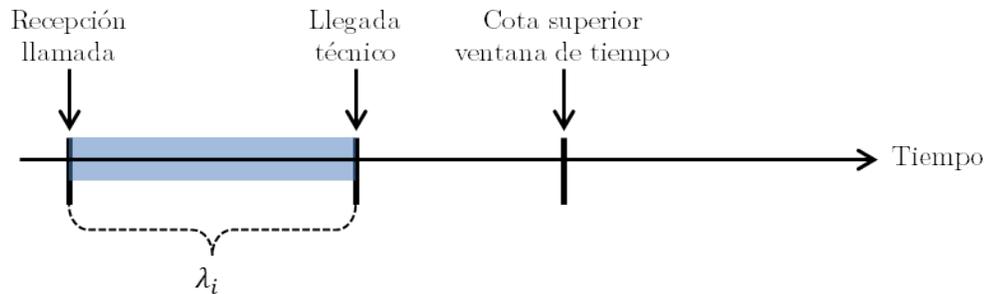


Figura 4.4: Valor de λ y δ si el técnico llega en la ventana de tiempo

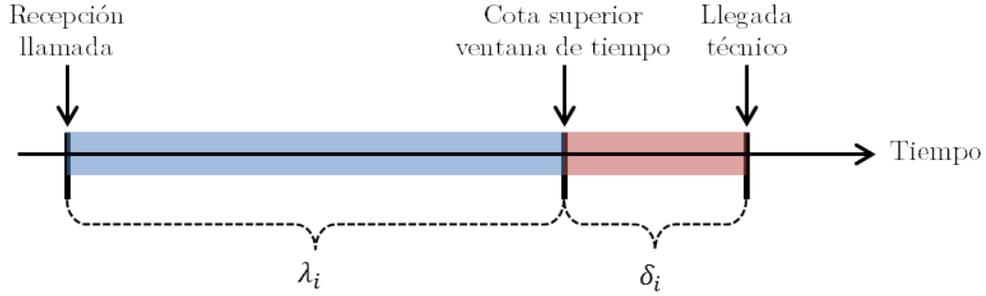


Figura 4.5: Valor de λ y δ si el técnico llega después de la ventana de tiempo

Cabe destacar, que la última variable presentada, y_{ip}^k , es de carácter no lineal, lo que implica que el problema general será del mismo tipo. Esto provoca que la resolución computacional sea considerablemente más difícil.

Funcion objetivo:

La función objetivo está compuesta por cuatro factores: los costos de viaje, tiempos de espera, tiempos de atraso y puntuación por covering. Los tres primeros se encuentran en las mismas unidades temporales (minutos), lo que permite hacer una comparación directa. Para atribuir la importancia correspondiente a cada parte de la función objetivo, se utilizan los multiplicadores que denotamos α , β y γ .

Dado que el foco de esta tesis se encuentra en la mejora de la calidad de servicio, la mayor importancia es atribuida a los costos de atraso, lo que se manifiesta asignándole un valor de 1 al coeficiente que acompaña a las variables δ_i^k . En cuanto a los valores atribuidos a los costos de viaje y tiempos de espera, se consideran los valores de 0,5 y 0,25 respectivamente. Esto se debe a que, si bien la variable más relevante es la calidad de servicio, los costos de traslado no deben ser descuidados por la empresa. Por otro lado, las esperas dentro de la ventana de tiempo son razonables para el cliente y no deben tener una importancia mayor. Finalmente, el coeficiente atribuido a la puntuación de covering será revisado en el siguiente capítulo, ya que fue obtenido realizando simulaciones con el modelo.

$$\min_{x,w,\delta,f} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I_1 \cup I_2} \delta_i^k + \alpha \sum_{k \in K} \sum_{i \in I_1 \cup I_2} \lambda_i^k - \beta \sum_{z \in Z} \sum_{p \in P} d_{zp} f_{zp} + \gamma \sum_{k \in K} \sum_{(ij) \in A} t_{ij} x_{ij}^k \quad (4.1)$$

Restricciones:

$$s.a. \sum_{k \in K} \sum_{j: (ij) \in A} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (4.2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A, j \in I_0} x_{ij}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.3)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{j: (j,l) \in A} x_{jl}^k = 0 \quad \forall k \in K, j \in I_1 \cup I_2 \quad (4.4)$$

$$w_i^k - \delta_i^k \leq b_i \quad \forall k \in K, i \in I_1 \cup I_2 \quad (4.5)$$

$$w_i^k + s_i + t_{ij} - w_j^k \leq (1 - x_{ij}^k)M \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (4.6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I_0 \cup I_1 \cup I_2} y_{ip}^k Cov_{iz} \geq f_{zp} \quad \forall z \in Z, p \in P \quad (4.7)$$

$$f_{zp} \leq MaxCov_{zp} \quad \forall z \in Z, p \in P \quad (4.8)$$

La restricción (4.2) viene de la formulación general del Problema de Ruteo de Vehículos y exige que cada cliente sea visitado sólo una vez, lo que aplica tanto para las llamadas pendientes de I_1 como para las que aparecen durante el día de I_2 . La restricción (4.3) se asegura de que las rutas incluyan exactamente un *Idle Point*, mientras que la (4.4) garantiza la conservación de flujo dentro de las rutas.

En la restricción (4.5) se encuentra la definición de las variables δ_i^k , las cuales equivalen a cuánto ha tardado el técnico k en atender al cliente i fuera de la ventana de tiempo estipulada, mientras que en la restricción (4.6) se asegura la consistencia temporal de las rutas, donde $M \gg 1$.

Finalmente, se discuten las restricciones asociadas al covering del modelo. La primera de ellas define el valor que pueden tomar las variables de covering en función de cuán cubierta está cada zona en cada período de tiempo. La restricción (4.8) corresponde al covering máximo descrito anteriormente, en que se impide la aglomeración de técnicos en las zonas de mayor demanda.

4.5.2. Descomposición para generación de columnas

La Generación de Columnas consiste en generar progresivamente las rutas posibles del problema, lo que permite simplificar considerablemente la complejidad del problema de optimización y llegar a soluciones en tiempo reducido. Esta propiedad la convierte en un método muy apto para los problemas de ruteo, incluyendo el caso dinámico donde las decisiones se toman en tiempo real.

El Problema Maestro es una versión similar y reducida del problema general, que se obtiene al descomponer la formulación general presentada en la sección anterior, y que considera un subconjunto de las rutas factibles. En el algoritmo propuesto en esta tesis no se utiliza el Subproblema para generar nuevas columnas, sino que heurísticas de inserción y mejora.

Problema maestro

El Problema Maestro corresponde a la selección de las rutas que ya han sido generadas, razón por la cual se definen únicamente dos tipos de variables. Se mantiene la parte de covering del modelo original, pero las variables asociadas a la secuencia de clientes son reemplazadas por binarias que determinan qué rutas serán utilizadas por los vehículos disponibles. Lo mismo ocurre con las variables que determinan si un técnico atiende a un cliente en cierto período, las cuales son parámetros en ese problema, lo que elimina la no linealidad. El Problema Maestro es resuelto tanto al principio del día, como cada vez que una nueva llamada es recibida.

Parámetros del modelo

R : Conjunto de Rutas Generadas

K : Número de técnicos disponibles

C_r : Costo de utilizar la ruta r

H_{ir} : 1 si el nodo i se encuentra en la ruta r , 0 si no

cov_{zp}^r : 1 si la ruta r está en la zona z en el período p , 0 si no

$CovMat_{z'z}$: Covering que ofrece la zona z' a la zona z

$MaxCov_{zp}$: Máximo covering permitido a la zona z en el período p

Variables de decisión

f_{zp} : covering sobre la zona z en el período p

$$\theta_r = \begin{cases} 1 & \text{si se usa la ruta } r \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

Función Objetivo

$$\min_{\theta} f \sum_{r \in R} C_r \theta_r - \beta \sum_{z \in Z} \sum_{p \in P} d_{zp} f_{zp} \quad (4.9)$$

Restricciones

$$s.a. \sum_{r \in R} \theta_r H_{ir} = 1 \quad \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (4.10)$$

$$\sum_{r \in R} \theta_r \leq K \quad (4.11)$$

$$\sum_{r \in R} \theta_r \sum_{z' \in Z} cov_{z'p}^r CovMat_{z'z} \geq f_{zp} \quad \forall z \in Z, p \in P \quad (4.12)$$

$$f_{zp} \leq MaxCov_{zp} \quad \forall z \in Z, p \in P \quad (4.13)$$

La función objetivo contempla los costos de transporte y esperas de clientes, ponderados según los mismos parámetros y sumados para generar C_r , más el segundo término que corresponde a la puntuación por el covering espacio-temporal. Las restricciones (4.10) y (4.11) son equivalentes a las (4.2) y (4.3) de la formulación general, mientras que las restricciones (4.12) y (4.13) corresponden a las (4.7) y (4.8) respectivamente.

4.6. Algoritmo de solución

Una vez que se han discutido todas las componentes del algoritmo de ruteo propuesto, se procede a reportar la forma de combinarlas para lograr el objetivo planteado. En la figura 4.6 se muestra un esquema de las etapas del algoritmo de solución, las cuales serán descritos con mayor detalle a continuación.

4.6.1. Ruteo estático

Se entiende por Ruteo Estático aquel en el que se cuenta desde un principio con toda la información de demanda requerida y en el cual una vez que la solución está decidida, esta no es alterada. El problema presentado en este caso de estudio es esencialmente dinámico; sin embargo, la asignación de las solicitudes pendientes desde días previos cumple con la condición estática.

Generación de rutas iniciales

Existen dos tipos de rutas generadas al principio del día, dependiendo de si el número de solicitudes pendientes supera al número de técnicos disponibles para el día o no. En el caso

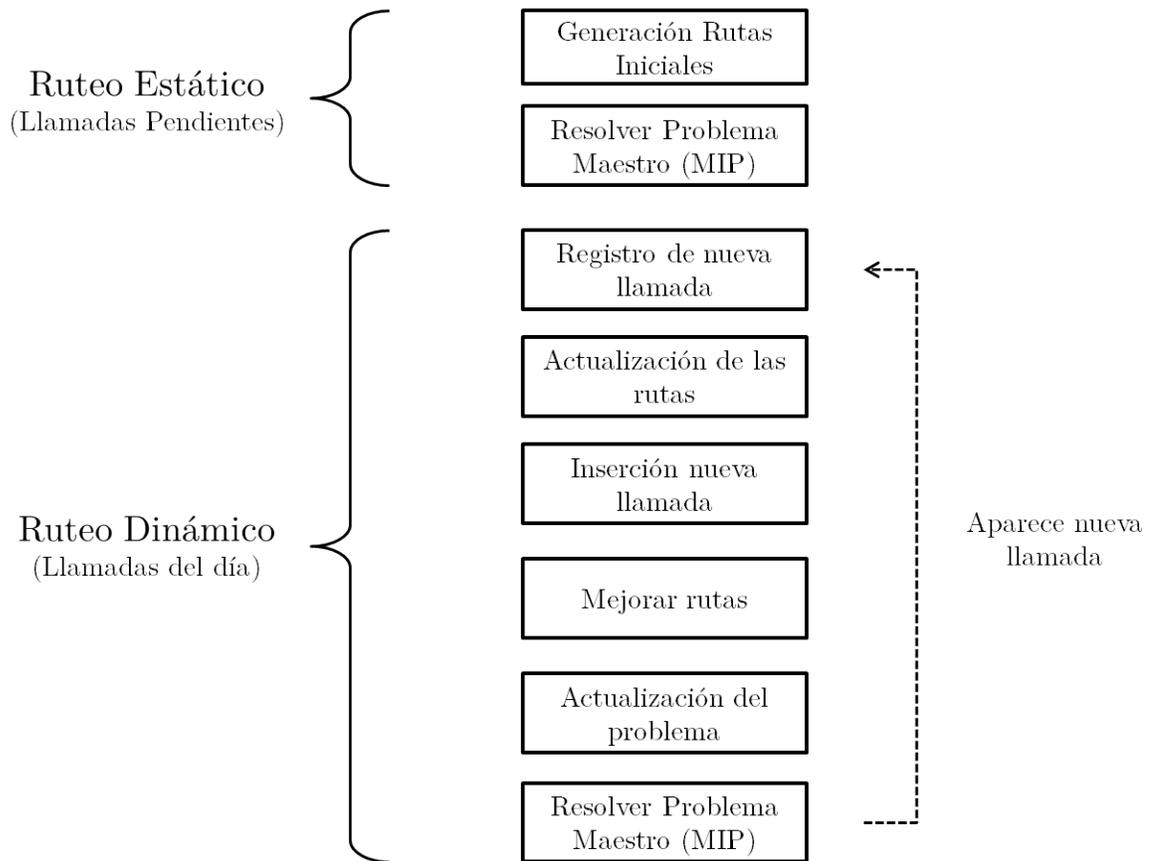


Figura 4.6: Algoritmo de Ruteo

de que existan vehículos sin clientes asignados, estos tienen la opción de trasladarse desde el depósito donde empiezan estacionados hasta uno de los *Idle Points*, con el fin de anteponerse a la demanda futura. La elección del nodo ficticio está dada por la solución de la primera iteración del problema optimización, la cual contempla el covering antes descrito.

- **Llamadas pendientes:** La asignación de estas llamadas a los vehículos disponibles se realiza mediante una heurística de inserción que considera los costos ponderados de la función objetivo. El pseudo código correspondiente se encuentra en el Anexo C.
- **Vehículos ociosos:** Por cada vehículo sin llamadas pendientes se generan rutas a cada uno de los *Idle Points* existentes.

4.6.2. Ruteo dinámico

Para poder enfrentar la naturaleza dinámica del problema abordado en este estudio, se recurre a la Generación Dinámica de Columnas, introducida por Chen and Xu [2006]. Este procedimiento se basa en la creación de nuevas columnas que incorporan información de los nuevos clientes, a partir de la aplicación de heurísticas sobre las columnas generadas anteriormente. Esta reutilización permite la creación de un amplio número de variables en

poco tiempo, lo que se adapta perfectamente a problemas dinámicos, en que existen intervalos acotados para encontrar nuevas soluciones cada vez que se recibe una nueva llamada. Las principales diferencias con la metodología propuesta por Chen son la forma de inserción de las nuevas llamadas en las columnas existentes, la anticipación a la demanda futura mediante los *Idle Points* y la segmentación de clientes según prioridad de atención.

A continuación se revisa en detalle cada uno de los pasos que componen el Ruteo Dinámico, en los cuales se actualiza la información de las columnas generadas, se incorpora la llamadas en un subconjunto de rutas y se realizan mejoras a las columnas disponibles antes de ejecutar una nueva iteración del Problema Maestro. Los pseudocódigos asociados a cada uno de estos procedimientos se reportan en el Anexo C.

1. **Aparición de una nueva llamada:** La solución encontrada anteriormente es utilizada hasta el momento en que surge una nueva solicitud. Se registra información sobre la dirección, tipo de máquina y razón social del cliente, para así poder determinar la estimación del tiempo de viaje, tiempo de atención y extensión de la ventana de tiempo.

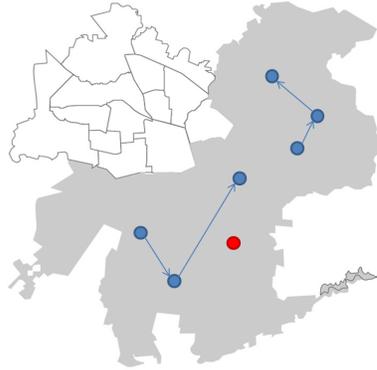


Figura 4.7: Ejemplo de aparición de una nueva llamada

2. **Actualización de las rutas:** En este paso se revisan las rutas utilizadas en la última iteración del Problema Maestro, con el fin de determinar cuáles nodos han sido visitados al momento de recibir la nueva llamada, y los clientes que están siendo atendidos por los técnicos actualmente, con el propósito de asegurar la consistencia en las posiciones de los vehículos durante la siguiente iteración. Luego de registrar la información de los clientes atendidos, estos son eliminados de todas las rutas junto con aquellos clientes que están siendo atendidos en dicho momento y que no se encuentren en la posición inicial de cierta ruta. Con el fin de reducir la complejidad computacional de la heurística, se procede a eliminar todas aquellas rutas duplicadas o que no empiecen con un cliente atendido en dicho momento, ya que ninguna de estas columnas puede aportar en la optimización.

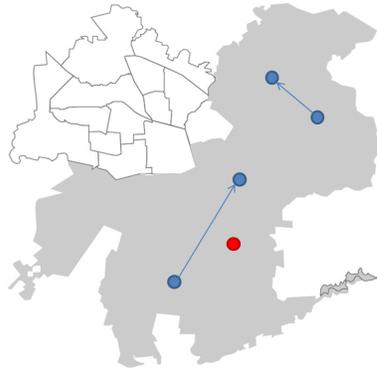


Figura 4.8: Ejemplo de actualización de rutas

3. **Inserción de la nueva llamada:** La asignación que se realizará a las rutas actualizadas dependerá de si existen vehículos desocupados o no, como se detalla en los siguientes casos.

- (a) **Existe al menos un vehículo desocupado:** En este escenario se asigna la nueva llamada al técnico desocupado más cercano.
- (b) **Todos los vehículos se encuentran ocupados:** En este caso es necesario asignar la nueva llamada al subconjunto de rutas en que se estime a priori que el incremento de los costos de agregarla sea menor. Para lograr esto, se selecciona un número determinado de las columnas con menores costos reducidos y luego se aplica un criterio de proximidad; esto quiere decir que se seleccionan aquellas que contengan al menos un cliente en la misma zona o en una zona adyacente a la que pertenece la nueva llamada. Este conjunto de rutas constituirá la vecindad de la nueva llamada. Luego se agrega la nueva solicitud en cada una de las columnas de la vecindad, creando una nueva ruta para cada una que incluya la solicitud en la posición de menor costo.

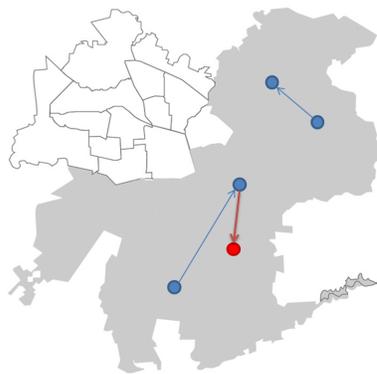


Figura 4.9: Ejemplo de inserción de llamada

4. **Mejorar rutas:** Después de haber eliminado los nodos atendidos de todas las rutas e incorporar la nueva llamada en su vecindad, se espera encontrar mejoras sobre rutas resultantes. Por esta razón, se ejecuta un operador de Local Search sobre las columnas actualizadas, la cual es una búsqueda local de tipo *Two Point Move* entre cada par de

clientes de cada ruta del stack. No se incluye el primer nodo para asegurar la factibilidad, ni tampoco el último que es el *Idle Point* asociado a la ruta.

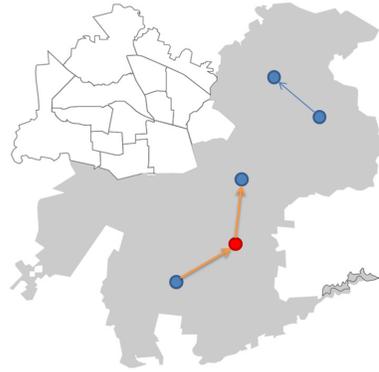


Figura 4.10: Ejemplo de mejoramiento de rutas

5. **Actualización del problema:** El penúltimo de los pasos corresponde a la actualización del Problema Maestro, lo que se realiza incorporando el nuevo nodo a las restricciones correspondientes y a los contadores que permiten cuantificar los costos del problema.
6. **Resolver Problema Maestro:** Una vez que todo el problema ya está actualizado e incorpora la nueva solicitud, se procede a ejecutar una nueva iteración del problema para determinar cuál es la solución óptima del problema reducido y así obtener las instrucciones que se deben dar a los técnicos sobre las atenciones que deberán realizar cuando terminen su servicio en el cliente actual.

Capítulo 5

Resultados Computacionales

En este capítulo se dará a conocer la implementación del modelo descrito en el Capítulo 4, presentando en primer lugar la elección del software utilizado. Posteriormente se exhibe la política de construcción de instancias, para luego detallar los resultados obtenidos en las corridas preliminares, realizadas para calibrar los valores de los parámetros del modelo y decidir criterios sobre la política de ruteo. Finalmente, en la Sección 5.4, se dan a conocer los resultados finales de las ejecuciones, los cuales son comparados con una heurística dinámica *Greedy* desarrollada como *benchmark* y con los costos de la operación manual reportados por la empresa.

5.1. Implementación

El primer paso para implementar un modelo computacional es decidir el lenguaje de programación. Se consideró que el lenguaje más adecuado para la metodología utilizada en esta tesis correspondía C++, decisión basada principalmente en la flexibilidad y documentación que existe sobre este lenguaje.

Otro de los beneficios del uso de C++ es su acoplamiento con Ilog Cplex. Este motor de optimización permite una implementación eficiente de generación de columnas, razón por la cual es utilizado frecuentemente en problemas de este tipo. Además, este software constituye uno de los motores más completos de optimización. En el desarrollo de esta tesis se utilizó la versión 1.5 de Ilog Cplex Studio, la cual fue ejecutada en un computador con un procesador de Intel (R) core (TM) i7-3770 CPU @ 3.40 GHZ y 32 Gigas de RAM.

5.2. Política de Creación de Instancias

Se dispone de una base de datos del problema real, la cual incluye información de la atenciones efectuadas durante un año. La base de datos contiene toda la información relevante de cada una de las llamadas atendidas en dicho período, tales como la hora en que fue recibido el requerimiento, el tiempo de atención, la dirección del cliente, el técnico designado, tipo de máquina, etc. Un ejemplo de estos datos se encuentra en el Anexo B.

Esta información tuvo dos funciones importantes en el trabajo de investigación realizado. En primer lugar, los datos sobre las ubicaciones y la hora en que las llamadas fueron realizadas son aprovechadas para poder determinar cuáles eran las zonas de mayor demanda y cómo esta demanda se distribuye a lo largo del día. En segundo lugar, esta base de datos pudo ser utilizada para la creación de instancias realistas sobre las cuales se pudo medir la efectividad del modelo propuesto.

Dada la estacionalidad de la demanda entre Lunes y Viernes, se decide confeccionar instancias de una semana para evaluar el efecto de las llamadas pendientes en los días posteriores. Cada instancia está compuesta por archivos independientes con información sobre las llamadas de cada día, las cuales son recibidas entre las 7 am y las 8 pm. La jornada laboral que se observa en los datos es muy variable, conteniendo incluso atenciones que comienzan después de las 8 pm. El criterio utilizado para definir el término de la jornada laboral es que un vehículo sólo puede atender a un cliente si es que es capaz de llegar a su destino antes de las 5 pm. Dado que el promedio de los tiempos de servicio es de 85 min, se espera que los vehículos deberían quedar desocupados antes de las 6:30 pm.

Además de la información relativa a cada una de las llamadas de los días de la instancia, se incluyen los parámetros del modelo en el archivo del primer día. Los valores de estos parámetros y la forma en que fueron obtenidos se muestra en las siguientes secciones de este capítulo.

5.2.1. Tiempos de Servicio

En la realidad no es posible conocer cuánto será el tiempo que un técnico tardará reparando una máquina. Los tiempos de servicio son una variable aleatoria cuyo valor solo es revelado en el momento en que el técnico está atendiendo al cliente. Existen modelos estocásticos que contemplan las distribuciones de probabilidad para obtener resultados más certeros, como la optimización robusta para un problema estático de ruteo de vehículos, desarrollado por Souyris et al. [2013] dentro del mismo marco de investigación de esta tesis. Sin embargo, esta fuente de incertidumbre no está incluida dentro de los alcances del modelo propuesto, el cual contempla tiempos de servicio deterministas.

No obstante, la variabilidad de estos tiempos debe ser incluida en algún grado en el modelo, ya que tiene gran relevancia en los resultados. Para determinar cuál es el mejor estimador para los tiempos de atención se lleva a cabo un breve análisis de la información contenida en la base de datos. La única información registrada en relación a los tiempos de atención

corresponde al modelo de cada máquina, la familia a la que este modelo pertenece y el técnico que realizó la atención. Los tiempos de servicio no se ajustan a ninguna distribución de probabilidad conocida y, dada la imposibilidad de llevar a cabo una mejor estimación con los datos disponibles, se opta por elegir los tiempos promedio por cada familia de máquinas. En la tabla 5.1 se muestran las medias asociadas a cada familia, sus desviación estándar y frecuencia.

Familia	Tiempo [min]	σ [min]	σ [%]	N Llamadas	% Llamadas
CGS	69,44	54,6	78,6 %	9	0 %
CH-COP. PERSO.	67,67	49,0	72,4 %	466	1 %
CH-FAX	41,79	24,2	57,9 %	591	2 %
CH-INKJET	38,43	22,4	58,4 %	509	2 %
CH-LASER	54,04	35,4	65,5 %	3.455	10 %
CH-LASER COLOR	68,75	44,9	65,3 %	255	1 %
CH-MULTIF.	46,01	30,0	65,2 %	1.134	3 %
DPS	126,79	74,0	58,3 %	327	1 %
ODP-CNV DIG	81,3	46,5	57,3 %	3.678	11 %
ODP-CNV L&L	84,86	47,2	55,6 %	12.454	37 %
ODP-COLOR	128,47	69,5	54,1 %	931	3 %
ODP-DCS DPTL	110,88	55,6	50,1 %	377	1 %
ODP-DCS WG	88,11	45,8	52,0 %	2.895	9 %
ODP-DTL	122,25	63,8	52,2 %	1.018	3 %
ODP-PRO	53,15	32,8	61,6 %	391	1 %
ODP-WG	106,35	54,3	51,0 %	3.233	10 %
PS	149,41	66,9	44,8 %	912	3 %
XES	125,92	67,6	53,7 %	724	2 %

Tabla 5.1: Tiempos de atención

5.2.2. Ventanas de Tiempo

Para determinar la dimensión de las ventanas de tiempo, se decide tomar como supuesto que su extensión depende de la prioridad comercial de cada cliente, ya que parece razonable que una empresa prefiera asegurar la permanencia de aquellos clientes que le generan mayores ingresos. Debido a que no se posee información sobre la facturación de cada cliente o sus contratos, en este trabajo se utiliza la frecuencia de las llamadas como un indicador de la prioridad comercial.

Basándose en el Principio de Pareto ¹ se determinan tres tipos de clientes: frecuentes, habituales y ocasionales. El primer grupo corresponde a aquellos que realizan más de 50

¹El Principio de Pareto, también conocido como regla del 80-20, se refiere a que empíricamente las distribuciones suelen ser entre "pocos de muchos" "muchos de poco", en una proporción aproximada de 80:20. En logística este concepto es conocido como Distribución A-B-C.

llamadas al año, los habituales poseen una frecuencia dentro del rango de 13 a 50, mientras que los ocasionales hasta 12 llamadas anuales. El grupo de mayor demanda registra en promedio más de dos llamadas a la semana, el segundo 2 llamadas al mes y el tercero cerca de 3 solicitudes al año.

Existen casi 3.000 entidades diferentes que registran atenciones en la base de datos, entre las cuales se encuentran personas naturales, empresas, colegios, instituciones estatales, etc. De ellas, el 4% pertenece al grupo de los frecuentes, un 13.6% de la base de datos al de habituales y 82,2% pertenece al grupo de baja demanda. En la tabla 5.2 se muestra un resumen de las características de cada grupo.

Tipo de clientes	Rango [anual]	Ventana [min]	Frecuencia [núm]	% Demanda
Ocasionales	0 - 12	240	2407	82,2 %
Habituales	13 - 50	120	399	13,6 %
Frecuentes	50 o más	60	121	4,1 %

Tabla 5.2: Ventanas de tiempo por tipo de cliente

En la implementación de la heurística, cada vez que se reciba una nueva llamada se debería comprobar si el cliente aparece en los registros de clientes frecuentes o intermedios para asignarle el tiempo de respuesta correspondiente. En caso contrario, se debería otorgar la prioridad mínima, aquella que poseen los clientes ocasionales.

5.3. Calibración del Modelo

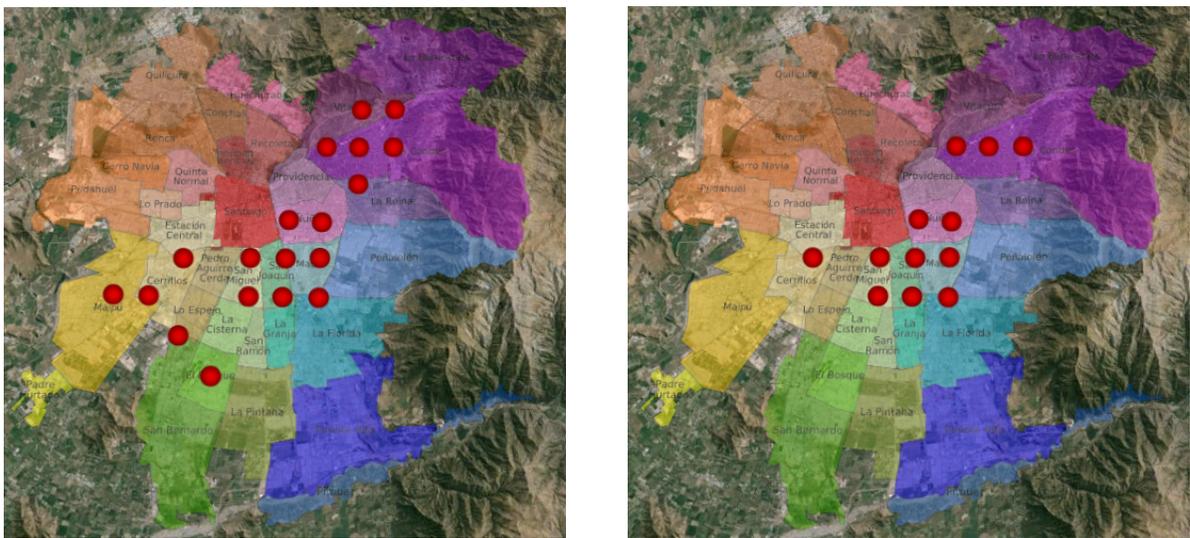
Durante el desarrollo del modelo surgen diversas disyuntivas sobre qué valores asignados a cada uno de los parámetros, tales como el número de técnicos, los *Idle Points* definidos y las constantes de *Covering*. Para tomar estas decisiones de manera objetiva y obtener la mejor solución para el problema, se ejecuta una serie de simulaciones iniciales con 9 instancias, lo que corresponde a 45 días de operación. Estas instancias se eligieron considerando 3 instancias, o semanas, de intensidad alta, media y baja de la demanda.

5.3.1. Idle Points

Tal como se ha descrito anteriormente, el modelo propuesto en esta tesis incorpora una anticipación a la demanda futura mediante el traslado de los vehículos desocupados a los puntos de espera. La calidad de esta predicción depende entonces del conjunto de *Idle Points* seleccionado.

Para determinar el número de *Idle Points* que lleva a mejores resultados se decide parametrizar según la demanda promedio mínima por bloque horario. Es decir, se eligen todas aquellas zonas que superen cierto umbral de demanda promedio en alguno de los períodos del día. De esta forma, al aumentar el umbral exigido, disminuye el número de nodos ficticios, escogiendo aquellos que en promedio observan mayor demanda. Dado que los vehículos desocupados acuden al nodo ficticio más cercano, un menor número de *Idle Points* implicará mayores desplazamientos de los vehículos, pero a la vez vehículos accediendo a zonas en que la demanda esperada sea mayor.

Se probaron dos conjuntos distintos de *Idle Points*, variando el umbral entre 0,5 y 0,7 llamadas promedio por bloque, con lo que se obtuvieron 12 y 19 nodos ficticios respectivamente. Mientras menor sea el número de *Idle Points*, más concentrados se encuentran en el centro de la ciudad, como se muestra en la figura 5.1.



(a) Conjunto de 19 *Idle Points*

(b) Conjunto de 12 *Idle Points*

Figura 5.1: Distribución geográfica de *Idle Points*

En la tabla 5.3 se exhiben los resultados obtenidos al ejecutar las 9 instancias de prueba con cada conjunto de IP. Se puede observar que efectivamente al disminuir el número de nodos ficticios aumentan las distancias que los vehículos recorren, aunque esta diferencia no es significativa. Las escasas diferencias entre ambos casos se atribuyen a la existencia del criterio que impide que un vehículo se traslade a una zona donde la demanda esperada no es suficientemente alta. Los puntos de espera en que difieren ambos conjuntos son precisamente aquellos de menor demanda, por lo que es comprensible que las diferencias no sean importantes. Además, se puede ver que un mayor número de puntos de espera aumenta levemente la complejidad de la ejecución del modelo, lo que se traduce en un mayor tiempo de ejecución.

El conjunto que entrega menores costos para las corridas preliminares es el de 19 *Idle Points*, y por lo tanto es el utilizado en las corridas finales. En el Anexo A.2 se incluye una tabla con la demanda de cada zona por bloque horario, donde se destacan aquellas que han sido seleccionadas como puntos de espera.

Variable	Cojuntos de IP		
	IP12	IP19	Delta
Costo de Transporte	10.108,4	10.064,8	0,4 %
Costo de Espera	44.724,1	4.4484,1	0,5 %
Costo de Atraso	10.086,8	10.016,2	0,7 %
Costo Total	26.322,0	26.169,6	0,6 %
Tiempo de Ejecución [s]	92,86	102,47	-10,3 %

Tabla 5.3: Costos de cada conjunto de *Idle Points*

Umbral de Traslado a los Idle Points

Además de determinar el número de *Idle Points* que contempla el modelo, es necesario definir el valor del umbral que determina si un vehículo desocupado se traslada hacia ellos o no. Existe el mismo *trade-off* que en el caso anterior; al aumentar el umbral para reposicionarse se reducen los costos de distancia, pero es menos probable anteponerse a la demanda futura.

En la tabla 5.4 se muestra el análisis de sensibilidad realizado respecto a este parámetro. El valor que entrega mejores resultados es 0,8, punto de equilibrio entre incrementar los costos de desplazamiento y mejorar la calidad de servicio. Sin embargo, nuevamente estas diferencias no son significativas. Esto podría ser explicado por la estacionalidad que presenta la demanda durante el día, como se revisó en la figura 3.4, donde se aprecia que el mayor número de llamadas son recibidas en las primeras horas del día, lo que podría provocar que los vehículos tengan una lista de clientes pendientes más larga y se encuentren desocupados con menor frecuencia.

Variable	Valor Umbral Idle Point				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Costo de Transporte	10.115,6	10.062,4	10.064,8	10.070,4	9.999,1
Costo de Espera	44.771,4	44.659,1	44.484,1	44.485,0	44.782,4
Costo de Atraso	10.372,4	10.340,4	10.016,2	10.298,2	9.990,3
Costo Total	26.623,1	26.536,4	26.169,6	26.454,7	26.185,5
Tiempo de Ejecución [s]	102,9	102,1	102,5	102,9	101,3

Tabla 5.4: Costos por umbral de traslado a *Idle Point*

5.3.2. Parámetros de Covering

Existen tres conjuntos de parámetros que determinan el modelo de *covering* propuesto: el multiplicador de demanda según zona y período en la función objetivo $d_{z,p}$, el valor máximo que puede tomar la variable de *covering* $MaxCov_{z,p}$ y la constante de *covering* β .

El primero de estos parámetros corresponde a la bonificación según densidad de demanda que se le otorga a las variables de *covering* en la función objetivo y su valor se calcula como el promedio histórico de llamadas recibidas por bloque horario y zona. De esta forma, el beneficio por cubrir una zona con mayor demanda será más elevado y la capacidad de respuesta mejor. Este parámetro multiplica directamente a la constante de *covering* en la función objetivo, por lo que el valor de esta constante determinará la importancia de estas variables respecto a las componentes de distancia y tiempo de espera.

Por otro lado, la constante de *covering* en la función objetivo y los valores de *covering* máximo de esta restricción son parámetros que deben ser ajustados de manera conjunta. En el caso de otorgar una alta valoración al puntaje por *covering*, podría ocurrir que los vehículos se aglomeren en las zonas de mayor demanda dejando desatendidas las otras comunas de la ciudad. Para que esto no suceda, deben asignarse valores de *covering* máximo que mantengan un equilibrio en este escenario.

Los parámetros de *covering* máximo fueron calculados como una función $x_{zp}/a + b$, donde a y b son constantes y x_{zp} es el número de llamadas promedio recibidas en la zona z en el período p . Lógicamente, al aumentar b crece el valor máximo que pueden tomar las variables de *covering*. A la vez, al aumentar a disminuyen las diferencias entre las zonas de mayor y menor demanda, lo que evita las aglomeraciones. Para evitar restringir a zonas de baja demanda, el valor de esta función es remplazada por un número mucho mayor en el caso de que la demanda promedio en ese bloque es menor a 0,5.

Las corridas finales para calibrar estos parámetros se muestran en la tabla 5.5. Es posible apreciar que mientras más acotados están los valores de *covering* máximo, mejores son los resultados en cuanto a costos totales. Además, se observa una tendencia similar en el caso de la estabilidad de los resultados al variar la constante de *covering*: mientras más acotados están los valores de *covering* máximo, menores son las diferencias en los resultados al variar β .

En base a estos resultados se determina que los valores más adecuados serán el Conjunto A con un valor de β igual a -2, con los cuales se obtienen los menores costos totales para las 9 instancias de prueba.

Conjunto A: $a=2$, $b=3$				
Variable	Valor β			
	-1	-2	-3	-4
Costo de Transporte	10.688	10.902	11.216	11.324
Costo de Espera	23.357	22.131	22054	22.152
Costo de Atraso	2.537,7	2.428,4	2.481,9	2.433,9
Costo Total	13.721	13.412	13.603	13.634

Conjunto B: $a=2$, $b=4$				
Variable	Valor β			
	-0,5	-1	-2	-3
Costo de Transporte	10.782	10.767	11.291	11.484
Costo de Espera	25.877	22.471	22.154	22.098
Costo de Atraso	2.686,9	2.479,9	2.360,1	2.433,4
Costo Total	14.547	13.481	13.544	13.700

Conjunto A: $a=1$, $b=5$				
Variable	Valor β			
	-0,5	-1	-2	-3
Costo de Transporte	10.894	11.068	11.597	11.860
Costo de Espera	24.678	22.890	23.029	23.077
Costo de Atraso	2.652,8	2.600,3	2.618,7	2.587,1
Costo Total	14.269	13.857	14.175	14.287

Tabla 5.5: Análisis de sensibilidad de parámetros de covering

5.3.3. Número de Técnicos

Basándose en Cortés et al. [2010a] respecto a la decisión óptima de flota del Servicio Técnico de Xerox, se determinaron tres grupos de meses según la intensidad de su demanda. El área de Santiago abarcada en esta tesis difiere de la anterior, por lo cual es necesario realizar una nueva segmentación de los meses. Debido al impacto que la variabilidad de la demanda puede tener en la calidad de servicio, se considera tanto el promedio como la desviación estándar para agrupar los meses en temporadas. De esta forma, en un mes con una elevada varianza no se corre el riesgo de que el número de vehículos sea insuficiente para satisfacer las solicitudes de un día de alta demanda.

Los grupos de meses definidos se muestran en la tabla 5.6, en la cual la temporada 1 representa a los meses de mayor demanda y variabilidad, el grupo dos al de demanda media y el grupo tres contiene los meses de menor intensidad de llamadas.

Temporada	Meses	Dda. Diaria [llam./día]	Desv. Estándar
1	Enero, Febrero, Diciembre	112,7	11,2
2	Marzo, Abril, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre	137,8	4,5
3	Mayo, Junio	141,2	24,7

Tabla 5.6: Temporadas según intensidad de demanda

Debido a que el foco de esta tesis es la calidad de servicio ofrecida al cliente, el criterio para determinar el número de vehículos para cada una de las temporadas se basa en respetar un nivel de servicio que no supere 20 min. de atraso promedio para los clientes de mayor prioridad en ninguna de las instancias de prueba. Existen 3 instancias de prueba por temporada, por lo que se elegirá el tamaño de flota que no supere los 20 min. de atraso para la instancia de mayor demanda de cada temporada.

Tipo de clientes	Número de Técnicos					
	20	21	22	23	24	25
Frecuentes	28,98	19,40	16,20	14,36	14,10	13,17
Habituales	32,52	19,13	13,43	12,12	10,35	10,57
Ocasionales	18,69	8,28	5,18	4,37	4,13	4,13

Tabla 5.7: Tiempo de atraso según tamaño de flota, temporada 1

Tipo de clientes	Número de Técnicos					
	27	28	29	30	31	32
Frecuentes	46,19	33,32	23,22	20,82	20,53	19,52
Habituales	45,54	26,10	18,96	17,77	16,90	16,90
Ocasionales	24,89	12,07	6,48	5,16	5,18	4,91

Tabla 5.8: Tiempo de atraso según tamaño de flota, temporada 2

Tipo de clientes	Número de Técnicos					
	44	45	46	47	48	49
Frecuentes	38,82	32,15	30,51	24,55	21,40	17,58
Habituales	40,07	30,52	24,32	19,38	19,24	16,75
Ocasionales	31,06	21	17,21	7,62	5,63	4,91

Tabla 5.9: Tiempo de atraso según tamaño de flota, temporada 3

Estos resultados son comparados en la figura 5.2 con la cantidad de vehículos promedio por mes utilizada en el ruteo realizado por Xerox, según la información contenida en la base de datos.

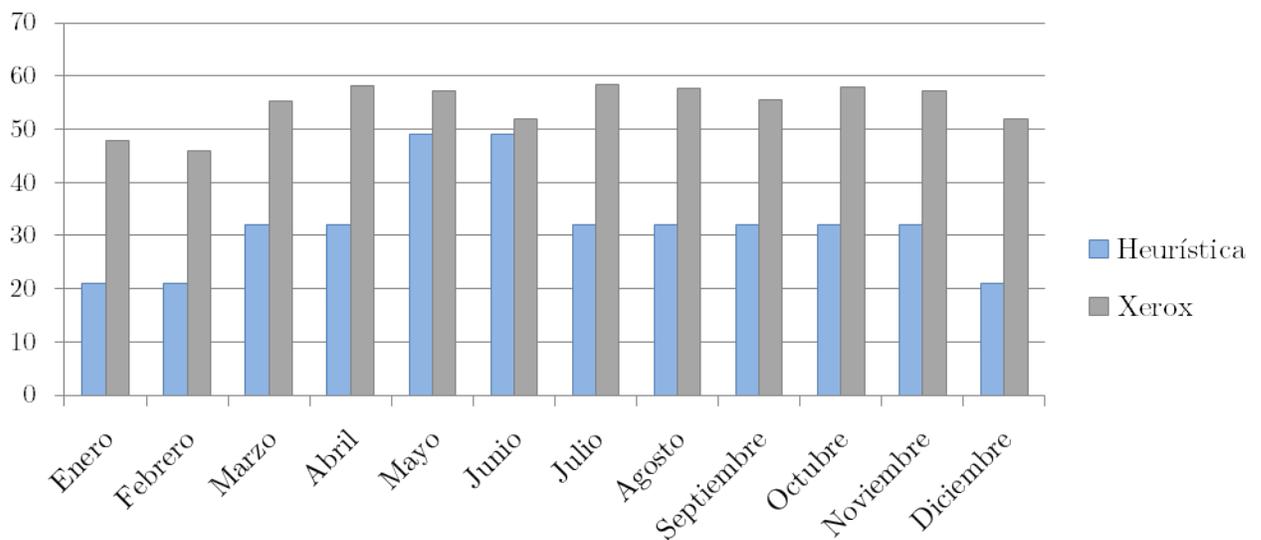


Figura 5.2: Número de técnicos de la heurística versus Xerox

Se observan amplias diferencias entre ambos tamaños de flota, las que en el caso de tener una flota fija durante todo el año alcanzan el 22,9 %. Sin embargo, se estima que sería posible tener un número de vehículos fijos menor y subcontratar los que sean necesarios en los meses de mayor necesidad, que son únicamente Mayo y Junio.

Las diferencias se explican en parte por la capacidad de la heurística de abordar el problema de manera más global y por la eficiencia del algoritmo. Como se mencionó en el segundo capítulo de esta tesis, en el ruteo llevado a cabo por Xerox la ciudad es dividida en zonas a las cuales les corresponde un ruteo independiente, lo que provoca un uso menos eficiente de los recursos. En el caso del ruteo propuesto en esta tesis se tiene que el promedio de llamadas atendidas por vehículo es de 4,6 y en el caso de el ruteo realizado por Xerox es de 2,3.

Sin embargo, es necesario recordar que estas diferencias también se explican en parte por aquellas consideraciones de aleatoriedad no incluidas en el modelo propuesto, como por ejemplo la estocasticidad en los tiempos de viaje y de servicio, y eventos fortuitos como la falta de un repuesto o ausencias de los técnicos.

5.4. Heurísticas de comparación

Para poder evaluar la efectividad de la metodología propuesta, es necesario desarrollar otros métodos de resolución con los cuales se puedan comparar los resultados. Estos métodos alternativos también deben ser de naturaleza dinámica, ya que al comparar con un modelo estático es incierto si las diferencias provienen de la eficiencia de la metodología o de la ventaja de contar por adelantado con información sobre la demanda. En este caso se utiliza una heurística *Greedy* como *benchmark* para el algoritmo propuesto. El pseudocódigo de esta rutina se encuentra en el Anexo C.3.

También se incluyen dos versiones distintas del modelo que permitirán evaluar la contribución de incluir *Idle Points* y *covering* en la resolución, y una aproximación al ruteo manual realizado por Xerox.

- **Greedy:** Corresponde a la versión dinámica más intuitiva, ya que cada nueva solicitud es agregada al final de la ruta en la que suponga el menor costo. Para asegurar el cumplimiento del carácter dinámico del problema, es necesario agregar como restricción que un técnico no puede llegar a atender a un cliente en un instante anterior al que fue recibida la llamada, más el tiempo de traslado desde el cliente anterior.
- **TTP:** Es la versión más simplificada de la heurística propuesta (TTP-CEP), ya que no incluye *Idle Points* ni *covering*. En vez de acudir a un nodo ficticio, un técnico ocioso permanece en el mismo lugar hasta que aparece una nueva llamada.
- **TTP-IP:** En esta variante del modelo se incluyen *Idle Points*, pero no existe *covering*, por lo que tanto las restricciones y variables asociadas no están presentes.
- **RM Xerox:** Estimación de los costos del ruteo manual realizado por Xerox, calculada a partir de la información sobre la asignación de las solicitudes a técnicos y de la matriz de tiempos de viajes entre las distintas zonas de Santiago.

5.5. Resultados Finales

A continuación se detallan los resultados de las corridas definitivas, los cuales fueron obtenidos a partir de simulaciones realizadas con 24 instancias. Se consideran 2 instancias por cada mes contenido en la base de datos, lo que equivale a 24 semanas o 120 días de operación. En la tabla 5.10 se muestra un resumen de los resultados de la heurística propuesta (TTP-CEP) en comparación a los otros modelos evaluados, en términos de costos y de tiempo de ejecución, y las diferencias porcentuales respecto a *Greedy*.

Variable	Modelos				Delta Greedy
	TTP-CEP	TTP-IP	TTP	Greedy	
Distancia	12.146,86	13.192,36	10.883,64	11.847,23	-3 %
Tiempo de Espera	31.411,27	33.385,36	35.113,41	41.516,23	24 %
Tiempo de Atraso	9.320,91	10.151,86	10.431,68	15.008,05	38 %
Costo Total	23.247,16	25.094,40	24.651,85	31.310,74	26 %
Tiempo de Ejecución	199,57	77,63	82,10	13,43	-1.386 %

Tabla 5.10: Resumen resultados finales

Es posible notar que la diferencia entre el modelo propuesto y el *benchmark* usado alcanza un 26 % del costo total. En cuanto al tiempo de espera y al tiempo de atrasos, estos se ven reducidos en un 24 % y 38 % respectivamente. Por otro lado, la diferencia respecto a los costos de distancia es de un -3 %, lo que se explica por el *trade-off* de desplazarse a los *Idle Points* para anticipar la demanda futura.

Las diferencias entre el modelo propuesto y sus variaciones son menos significativas que respecto al modelo *Greedy*, pero revelan el beneficio de incluir *Idle Points* y *covering* Espacio-Temporal: una mejora de un 6 % en los costos totales. En cuanto a las mejoras en tiempos de espera y atraso, estas equivalen a un 11 % de diferencia entre el modelo TTP-CEP y TTP; mientras que los costos de transporte se diferencian en un -12 %. El modelo TTP-IP posee en promedio peores resultados que ambos modelos. Se encuentran mejoras en los tiempos de espera respecto al modelo TTP, pero estas se ven neutralizadas por el aumento de los costos de distancia.

En cuanto a los tiempos de ejecución, existe una diferencia significativa entre el modelo propuesto y el *benchmark*, el cual es 13 veces menor. También se puede observar una amplia brecha entre los tiempos de ejecución de TTP-CEP y TTP debido a la mayor complejidad del primero. No obstante, los tiempos permanecen en rangos que aseguran la posibilidad de ser aplicados a problemas dinámicos reales.

En la figura 5.3 se muestra una representación gráfica de los promedios de los costos y sus desviaciones estándar para cada uno de los modelos evaluados. TTP-CEP presenta la menor

variabilidad en los resultados de los cuatro modelos, mientras *Greedy*, por el contrario, posee una alta varianza en el tiempo de atraso y los costos finales.

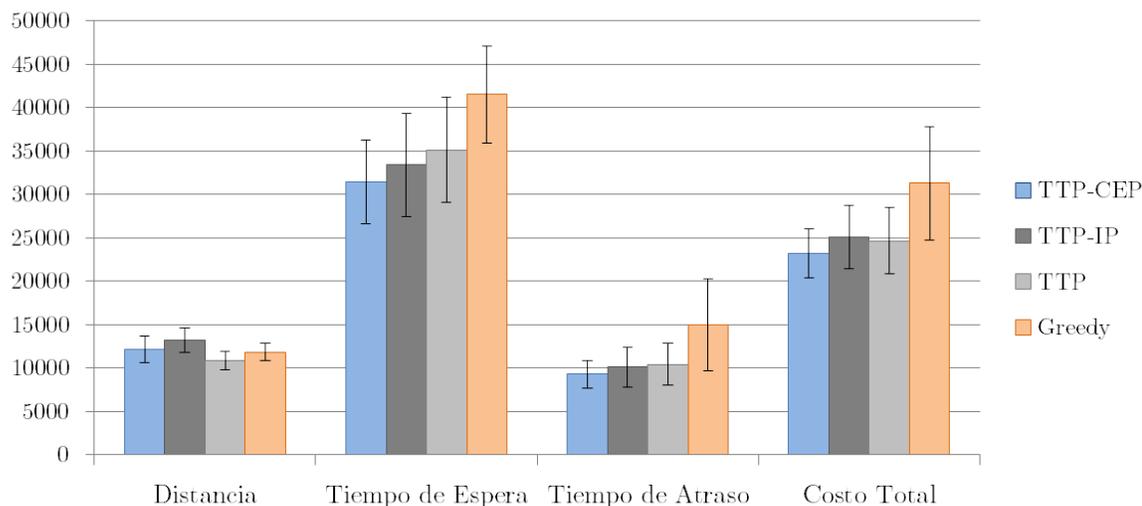


Figura 5.3: Comparación de resultados entre modelos

Por otro lado, en la tabla 5.11 se muestran los resultados de los modelos antes revisados en comparación al ruteo manual de Xerox, presentados en términos de costos promedio por cliente atendido. Debido a que la separación en tiempos de espera y de atraso se propone en esta metodología, al hacer exponer estos resultados se muestra sólo el tiempo total de espera, que considera ambas variables.

La comparación revela amplias diferencias en cuanto al tiempo de espera total de los clientes. La mejora en cuanto a la calidad de servicio alcanza un 83 % para el caso de TTP-CEP y un 76 % para el algoritmo *Greedy*. Respecto a la distancia recorrida en promedio por cliente, se observa que el ruteo de Xerox supera a TTP-CEP en un 3%. Esto puede ser explicado porque el objetivo del ruteo manual se enfocó en los costos de transporte y no en la calidad de servicio a los clientes.

Variable	Modelos					Delta RM Xerox
	RM Xerox	TTP-CEP	TTP-IP	TTP	Greedy	
Distancia	20.82	21.54	23.49	19.40	21.60	-3.43 %
Tiempo de Espera Total	430.88	72.21	77.52	81.19	103.06	83.24 %

Tabla 5.11: Comparación de los modelos respecto al ruteo manual de Xerox

5.5.1. Tiempo de Espera y Atraso

Tal como fue mencionado anteriormente, el principal foco de esta tesis se encuentra en la calidad de servicio ofrecida al cliente, la cual se mide en términos del tiempo que tarda un cliente en ser atendido. A continuación se muestran los resultados relativos a las variables de tiempos de espera y atraso bajo distintos enfoques de análisis.

Tiempos Según Temporada

En las figuras 5.4a y 5.4b se muestran las diferencias según temporada de los tiempos de espera y atraso por cliente. Tal como fue expuesto en la sección 5.3.3, las temporadas están definidas en base a un criterio de promedio y desviación estándar de la demanda, en el cual la tercera temporada es aquella de mayor intensidad y variabilidad.

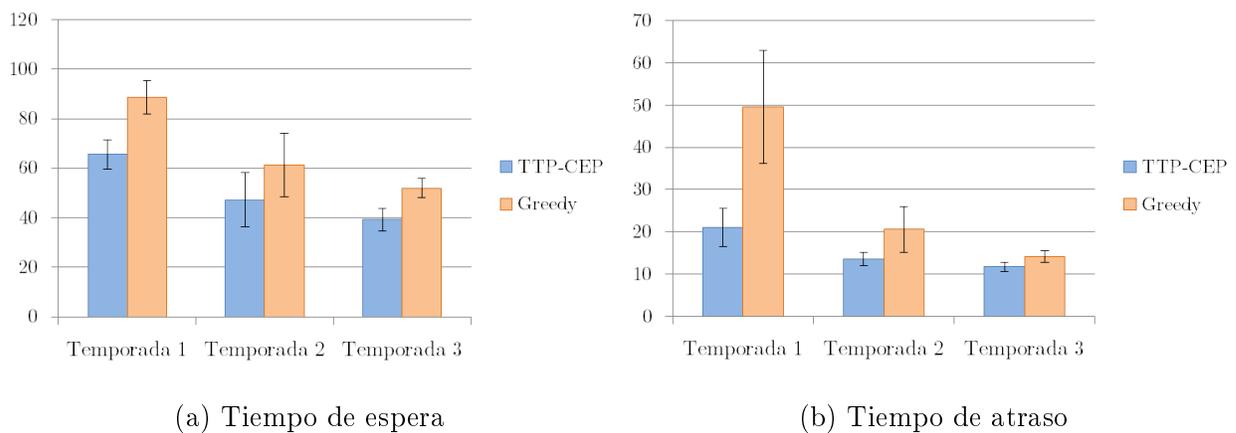


Figura 5.4: Tiempos por cliente según temporada

En ambas figuras se observa una tendencia decreciente en los tiempos a medida que aumenta la intensidad de la demanda. Esta reducción se puede explicar por la mayor disponibilidad de técnicos en cada escenario, lo que genera rutas más cortas en cuanto a distancias recorridas. Además, se aprecia que la brecha entre TTP-CEP y *Greedy* se incrementa a medida que la intensidad disminuye. Este comportamiento se atribuye a una mayor efectividad de la anticipación de la demanda cuando los vehículos están ociosos con mayor frecuencia.

Tiempos Según Prioridad

Una de las aristas de la calidad de servicio de este modelo se basa en el tiempo de respuesta según la prioridad de cada cliente. En las figuras 5.4a y 5.5b se muestran los tiempos de espera para cada segmento de clientes, de los cuales el primero es el de mayor prioridad.

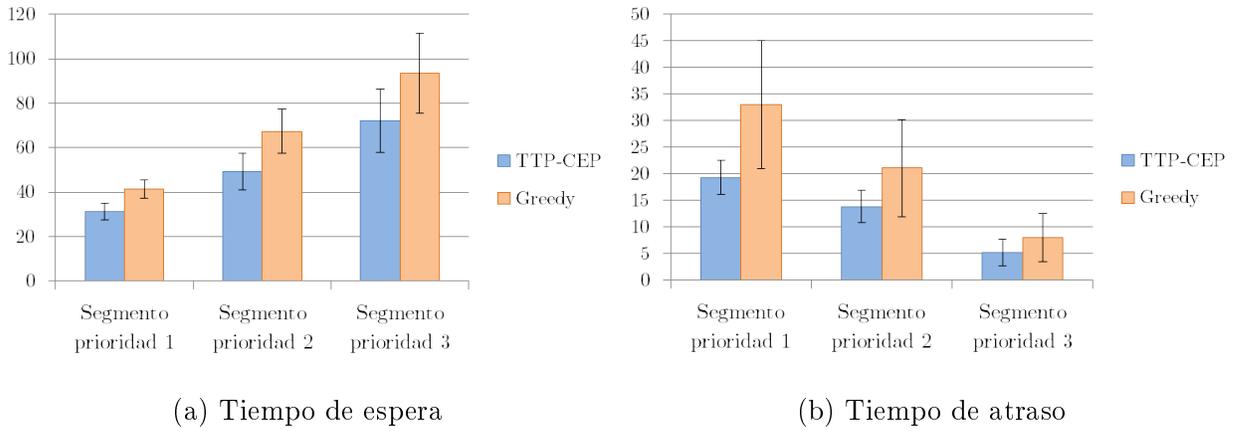


Figura 5.5: Tiempos según prioridad del segmento de clientes

De la figura 5.4a se desprende que efectivamente existe un mejor tiempo de respuesta para los clientes de mayor prioridad (los frecuentes). El tiempo promedio de espera de los clientes del primer segmento es de 31,18 minutos, mientras que para el grupo de menor prioridad es de 72,19. La brecha entre TTP-CEP y *Greedy* se mantiene estable para los tres grupos, llegando a un 25% para el primer segmento.

Por otro lado, en la figura 5.4b se aprecia que los tiempos de atraso son mayores para los clientes de mayor prioridad, lo que se explica por sus ventana de tiempo más apretadas. Además, se observa que la diferencia entre TTP-CEP y *Greedy* es mayor mientras más alta es la prioridad del segmento de clientes, llegando a un 41% en el primer grupo. Finalmente, se observar que la variabilidad en los resultados de *Greedy* son muy elevados en cuanto a los tiempos de atraso.

5.5.2. Distancia Recorrida

Si bien el objetivo principal de estudio es el nivel de servicio, es importante evaluar las distancias recorridas por los vehículos para poder cuantificar los costos directos de la operación. A continuación, se muestra el análisis de las distancias totales recorridas para cada una de las temporadas definidas.

Distancia Según Temporada

En la figura 5.6 se muestra la distancia total recorrida, medida en tiempo de viaje, para cada uno de los modelos evaluados en las tres temporadas definidas.

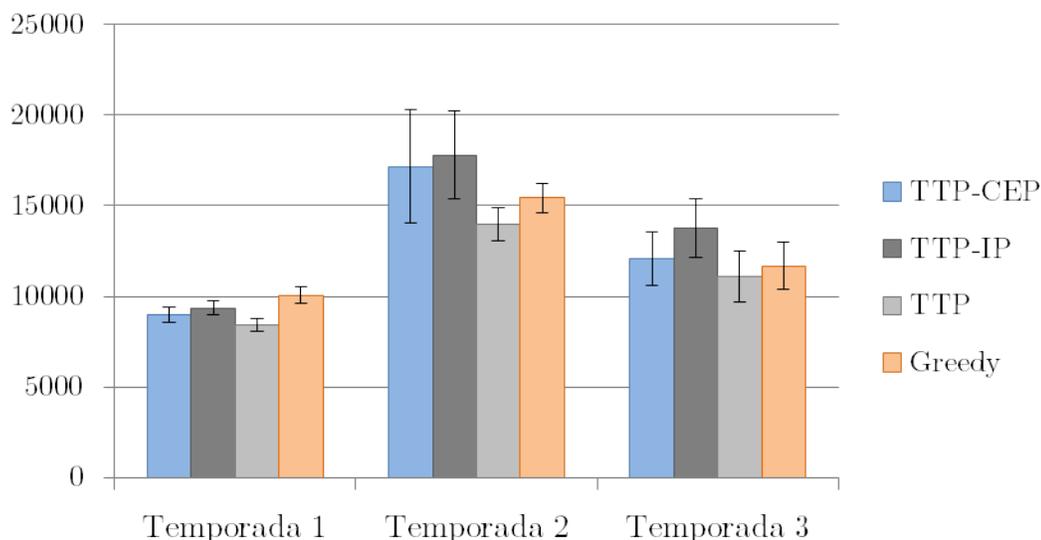


Figura 5.6: Distancia total recorrida según temporada

En primer lugar, es posible apreciar que la brecha entre TTP-CEP y *Greedy* difiere para las tres temporadas. En el caso de la temporada 1, la cual corresponde a los meses de verano, existen menores costos de transporte para la heurística propuesta. Sin embargo, para las temporadas 2 y 3 esta diferencia se invierte, llegando a ser de -11 % y -4 % respectivamente. Además, al hacer la comparación entre TTP-CEP y su versión más simple, TTP, se observa que las distancias siempre son menores para el último modelo, lo que es de esperar ya que no incluye los desplazamientos a *Idle Points* para anticipar la demanda.

Por otro lado, se tiene que las distancias aumentan entre la temporada 1 y 2, lo que se explica por el incremento de la demanda. Sin embargo, no existe una tendencia, ya que este aumento no se manifiesta entre la temporada 2 y 3. Esto puede ser explicado debido a que no existe una diferencia significativa en la demanda promedio debido a la alta variabilidad de la tercera temporada, de hecho, el número de llamadas diarias promedio de la segunda temporada para las instancias corridas es de 771, mientras que para la temporada tres es de 693,9. Además, existe un número de vehículos mayor asignado a la temporada 3, con lo que se esperan rutas más cortas en cuanto a ambos número de clientes y distancias recorridas entre comunas. En el caso del número promedio de clientes atendidas por técnico, se tiene que es de 4,8 para la segunda temporada y 2,8 para la tercera.

5.5.3. Postergación de Llamadas

Una forma de analizar la calidad de servicio ofrecida al cliente corresponde a la capacidad de minimizar el número de solicitudes cuya atención queda pendiente para días posteriores. En la figura 5.7 se muestra el porcentaje de llamadas atendidas el mismo día que fueron recibidas para los cuatro modelos evaluados.

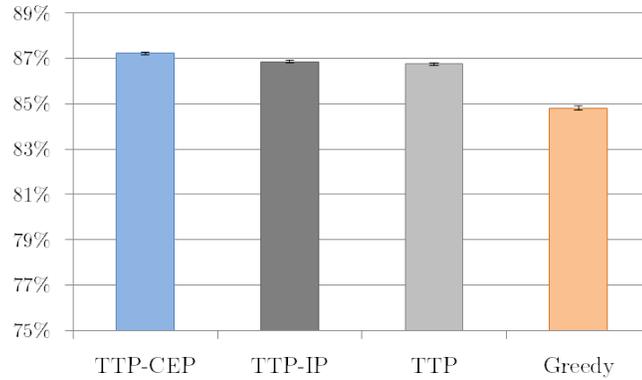


Figura 5.7: Número de llamadas atendidas el mismo día

Es posible notar que no existen grandes diferencias entre los modelos, llegando a una brecha de 2,4 % entre TTP-CEP y *Greedy*, lo que equivaldría a 360 clientes para las 24 semanas de operación evaluadas. También se observa una tendencia creciente entre la versión más simple del modelo propuesto y su versión más completa.

Comparación con el ruteo manual de Xerox

En el caso de la operación manual de Xerox, el porcentaje de llamadas atendidas el mismo día que fueron recibidas alcanza únicamente un 54 %, mientras que para la heurística propuesta en esta tesis se logra un 87,2 % y el algoritmo *Greedy* un 84,8 %. En cuanto a las llamadas pendientes, en el ruteo realizado por Xerox el 86 % es atendida el día hábil posterior y en la heurística propuesta y en *Greedy* se trata de un 99 %.

5.5.4. Análisis de Sensibilidad de Función Objetivo

Tal como se revisó en el capítulo de descripción de la heurística propuesta, en la sección 4.5.1, la función objetivo está compuesta por cuatro variables de costos a los que se les atribuye distintas importancias: tiempo de atraso (δ_i^k), tiempo de espera (λ_i^k), *covering* espacio-temporal ($f_{z,p}$) y distancia recorrida ($t_{ij}x_{ij}$). En la ecuación 5.1 se muestra esta formulación, donde el nivel de importancia de la distancia en los costos totales va determinado por el parámetro γ .

$$\min_{x,w,\delta,f} \sum_k \sum_i \delta_i^k + \alpha \sum_k \sum_i \lambda_i^k - \beta \sum_z \sum_p d_{z,p} f_{z,p} + \gamma \sum_k \sum_{(i,j)} t_{i,j} x_{i,j}^k \quad (5.1)$$

En esta sección se presenta un análisis de sensibilidad respecto a la importancia relativa del costo de transporte versus el de calidad de servicio, lo que se obtiene al variar el valor del parámetro γ , como se muestra en la tabla 5.12.

Variable	Valor de γ		
	0,25	0,5	0,75
Distancia	11.161,11	10.960,89	10.856,00
Tiempo de Espera	29.537,00	29.677,11	30.384,44
Tiempo de Atraso	8.434,77	8.416,00	8.441,00

Tabla 5.12: Análisis de sensibilidad de la Función Objetivo

Como es de esperar, se puede observar que mientras mayor es la importancia relativa de los costos de distancia en la función objetivo, menores son estos costos y mayores los de tiempo de espera y atraso. Sin embargo, se puede ver que estas diferencias no son significativas, lo que se explica por la estructura de rutas del algoritmo. La decisión de trasladarse a un *Idle Point* no depende de los costos, sino sólo de la demanda esperada en el bloque y zona horarios determinados. Esto favorece el desempeño del modelo a medida que aumenta la importancia relativa de la calidad de servicio en el problema; no obstante, concede menor flexibilidad para un enfoque en que los costos de transporte adquieran mayor prioridad.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones Generales

En este trabajo de tesis se aborda el problema logístico del Servicio Técnico de Xerox en Santiago de Chile, una empresa multinacional que vende productos de oficina como fotocopiadoras y multifuncionales, pero que además ofrece el servicio de reparación en caso de ser necesario. El foco principal de este trabajo está en la calidad de servicio ofrecida a los clientes, minimizando sus tiempos de espera. Las solicitudes son recibidas a lo largo del día y se establecen ventanas de tiempo blandas en la cota superior según la prioridad de los clientes, con lo cual el problema corresponde a la versión dinámica del *Travelling Technician Problem with Time Windows* (TTP-TW).

Para resolver este problema se desarrolla un algoritmo de ruteo dinámico que considera la información histórica del problema (TTP-CEP), cumpliendo con los objetivos iniciales planteados:

1. Se estudian métodos actuales de resolución del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP por su sigla en inglés), adaptando heurísticas de Generación Dinámica de Columnas Chen and Xu [2006] y algoritmos de *Local Search* para su uso eficiente en el modelo TTP-CEP.
2. Se utiliza información histórica disponible del problema para generar *Idle Points* o puntos de espera, a los cuales acuden los vehículos desocupados para anticipar la demanda futura y reducir tiempos de espera de los clientes. Además, se incorpora una componente de *Covering* Espacio-Temporal, la cual favorece la distribución de los vehículos acorde a la intensidad de la demanda por zonas y períodos del día.
3. Se implementa computacionalmente el modelo, lo cual permite realizar simulaciones con datos disponibles de la operación real y así poder calibrar el modelo y evaluar su

desempeño. Al llevar a cabo la calibración se observa que cambios en los parámetros no afectan significativamente los resultados del modelo. Sin embargo, se podría esperar que al variar el tamaño de las zonas la heurística fuera más sensible a los parámetros usados.

Al comparar el modelo con una versión dinámica de un algoritmo *Greedy* de ruteo, utilizada como *benchmark*, se obtienen mejoras de 26 % en los costos totales evaluando instancias que corresponden a 120 días de operación real de todos los meses del año. La mayor diferencia se encuentra en los tiempos de atraso, cuya brecha respecto al benchmark equivale a un 38 %. Por otro lado, se tiene una diferencias de -3 % respecto a los costos de transporte debido a los desplazamientos para anticipar la demanda.

4. Se compara el modelo TTP-CEP con dos versiones simplificadas para medir el impacto de incluir la información histórica en la modelación. Respecto a la versión sin *Idle Points* ni *Covering* (TTP), se observa una mejora de 6 % en los costos totales, lo cual se atribuye a un 11 % de mejora en los tiempos de espera y de atraso, y una diferencia de -12 % en el costo de distancia. La versión que tiene *Idle Points* pero no *Covering* (TTP-IP) no posee mejoras respecto a TTP, salvo para la temporada de menor intensidad de demanda, en la cual se alcanza una mejora de 4,9 %.
5. Se realiza una comparación ilustrativa con la operación manual de Xerox, obteniendo mejoras significativas en los niveles de servicio. También se observa una reducción de la flota de vehículos de un 23 %, lo que representa una importante disminución de los costos fijos por el valor de los activos y su mantención. Las amplias diferencias observadas se atribuyen en gran medida a la capacidad del algoritmo de abarcar el problema de manera global, a diferencia de la operación manual que resuelve problemas independientes para cada zona previamente definida. Sin embargo, es necesario tener en consideración que el modelo aun posee limitaciones respecto a características aleatorias del problema, tales como tiempos de desplazamiento y disponibilidad de repuestos.

Se concluye que la Generación Dinámica de Columnas y los algoritmos de Local Search utilizados permiten una rápida inserción de nuevas solicitudes en las rutas existentes, mientras que la incorporación de *Idle Points* y *Covering* logran reducir los tiempos de espera al mejorar la capacidad de respuesta de los técnicos. Este enfoque se adapta de manera satisfactoria a problemas dinámicos cuya prioridad es el nivel de servicio ofrecido a los clientes, por lo que se esperaría buenos resultados en la aplicación de esta metodología en problemas de atención a pacientes u otros servicios similares.

6.2. Trabajo Futuro

Como investigación futura se proponen los siguientes puntos para continuar el desarrollo del modelo propuesto:

- Incorporar variabilidad en los tiempos de atención del modelo a través de un enfoque de optimización robusta similar a lo desarrollado por Souyris et al. [2013].

- Incluir variaciones en los tiempos de viaje a lo largo del día, debido al aumento que se producen en los traslados durante los horarios punta. Esto tendría un menor impacto que la variabilidad en los tiempos de atención, los cuales los superan en extensión.
- Estudiar distintas configuraciones de *Idle Points* por temporada y verificar si existen mejoras en la anticipación de la demanda al disminuir el grado de agregación de las zonas.
- Profundizar el análisis de la influencia del tamaño de las ventanas de tiempo en la calidad de servicio de los clientes. Evaluar su impacto en problemas donde el nivel de servicio tiene una importancia significativa como en los servicios de urgencia, o el incluir diferencias tarifarias según el nivel de servicio en problemas comerciales.
- Comparar el modelo estático contra una versión estática con información estocástica de la demanda, ajustando la solución a medida que se conoce la realización. Con esto se podría analizar las diferencias en las estructuras de las rutas y si el problema estático estocástico podría servir como punto de partida para el dinámico.

Bibliografía

- Andrea Attanasio, Jay Bregman, Gianpaolo Ghiani, and Emanuele Manni. Real-time fleet management at ecourier ltd. In *Dynamic Fleet Management*, pages 219–238. Springer, 2007.
- Cynthia Barnhart, Ellis L Johnson, George L Nemhauser, Martin WP Savelsbergh, and Pamela H Vance. Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs. *Operations research*, 46(3):316–329, 1998.
- Russell Bent and Pascal Van Hentenryck. Waiting and relocation strategies in online stochastic vehicle routing. In *IJCAI*, pages 1816–1821, 2007.
- Olli Bräysy. A reactive variable neighborhood search for the vehicle-routing problem with time windows. *INFORMS Journal on Computing*, 15(4):347–368, 2003.
- Olli Bräysy and Michel Gendreau. Tabu search heuristics for the vehicle routing problem with time windows. *Top*, 10(2):211–237, 2002.
- Olli Bräysy and Michel Gendreau. Vehicle routing problem with time windows, part i: Route construction and local search algorithms. *Transportation science*, 39(1):104–118, 2005.
- Zhi-Long Chen and Hang Xu. Dynamic column generation for dynamic vehicle routing with time windows. *Transportation Science*, 40(1):74–88, 2006.
- Jean-Francois Cordeau, Guy Desaulniers, Jacques Desrosiers, Marius M Solomon, and François Soumis. Vrp with time windows. *The vehicle routing problem*, 9:157–193, 2002.
- Cristián E Cortés, Alfredo Núñez, and Doris Sáez. Hybrid adaptive predictive control for a dynamic pickup and delivery problem including traffic congestion. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 22(2):103–123, 2008.
- Cristián E Cortés, Doris Sáez, Alfredo Núñez, and Diego Muñoz-Carpintero. Hybrid adaptive predictive control for a dynamic pickup and delivery problem. *Transportation Science*, 43(1):27–42, 2009.
- Cristián E Cortés, Michel Gendreau, Daniel Leng, and Andrés Weintraub. A simulation-based approach for fleet design in a technician dispatch problem with stochastic demand. *Journal of the Operational Research Society*, 62(8):1510–1523, 2010a.

- Cristián E Cortés, Martín Matamala, and Claudio Contardo. The pickup and delivery problem with transfers: Formulation and a branch-and-cut solution method. *European Journal of Operational Research*, 200(3):711–724, 2010b.
- Cristián E Cortés, Michel Gendreau, Louis Martin Rousseau, Sebastián Souyris, and Andrés Weintraub. Branch-and-price and constraint programming for solving a real-life technician dispatching problem. *European Journal of Operational Research*, 238(1):300–312, 2014.
- George B Dantzig and John H Ramser. The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1):80–91, 1959.
- Guy Desaulniers, Jacques Desrosiers, and Marius M Solomon. *Column generation*, volume 5. Springer, 2005.
- Christophe Duhamel, Jean-Yves Potvin, and Jean-Marc Rousseau. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with backhauls and time windows. *Transportation Science*, 31(1):49–59, 1997.
- Marshall L Fisher. The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. *Management science*, 50(12_supplement):1861–1871, 2004.
- Michel Gendreau, Gilbert Laporte, and Frédéric Semet. Solving an ambulance location model by tabu search. *Location science*, 5(2):75–88, 1997.
- Michel Gendreau, Francois Guertin, Jean-Yves Potvin, and Eric Taillard. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. *Transportation science*, 33(4):381–390, 1999.
- Michel Gendreau, Francois Guertin, Jean-Yves Potvin, and René Séguin. Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(3):157–174, 2006.
- Fred Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5):533–549, 1986.
- Fred Glover. Tabu search-part i. *ORSA Journal on computing*, 1(3):190–206, 1989.
- Chris Groër, Bruce Golden, and Edward Wasil. A library of local search heuristics for the vehicle routing problem. *Mathematical Programming Computation*, 2(2):79–101, 2010.
- Gabriel Gutiérrez-Jarpa, Guy Desaulniers, Gilbert Laporte, and Vladimir Marianov. A branch-and-price algorithm for the vehicle routing problem with deliveries, selective pickups and time windows. *European Journal of Operational Research*, 206(2):341–349, 2010.
- Soumia Ichoua, Michel Gendreau, and Jean-Yves Potvin. Exploiting knowledge about future demands for real-time vehicle dispatching. *Transportation Science*, 40(2):211–225, 2006.
- Soumia Ichoua, Michel Gendreau, and Jean-Yves Potvin. Planned route optimization for real-time vehicle routing. In *Dynamic Fleet Management*, pages 1–18. Springer, 2007.

- Allan Larsen, Oli BG Madsen, and Marius M Solomon. The a priori dynamic traveling salesman problem with time windows. *Transportation Science*, 38(4):459–472, 2004.
- Kai Kwong Lau, Mohan Kumar, and Nirmala Achuthan. Parallel implementation of branch and bound algorithm for solving vehicle routing problem on nows. In *Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, 1997.(I-SPAN'97) Proceedings., Third International Symposium on*, pages 247–253. IEEE, 1997.
- Shen Lin. Computer solutions of the traveling salesman problem. *Bell System Technical Journal*, The, 44(10):2245–2269, 1965.
- Nenad Mladenović and Pierre Hansen. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, 24(11):1097–1100, 1997.
- Manfred Padberg and Giovanni Rinaldi. A branch-and-cut approach to a traveling salesman problem with side constraints. *Management Science*, 35(11):1393–1412, 1989.
- Jean-Yves Potvin, Christophe Duhamel, and François Guertin. A genetic algorithm for vehicle routing with backhauling. *Applied Intelligence*, 6(4):345–355, 1996.
- Harilaos N Psaraftis. Dynamic vehicle routing: Status and prospects. *Annals of Operations Research*, 61(1):143–164, 1995.
- José Rojas. Heurística basada en covering y generación de columnas dinámico para el problema de ruteo dinámico de vehículos con ventanas de tiempo. Master’s thesis, Universidad de Chile, 2012.
- Stefan Ropke and Jean-François Cordeau. Branch and cut and price for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 43(3):267–286, 2009.
- Doris Sáez, Cristián E Cortés, and Alfredo Núñez. Hybrid adaptive predictive control for the multi-vehicle dynamic pick-up and delivery problem based on genetic algorithms and fuzzy clustering. *Computers & Operations Research*, 35(11):3412–3438, 2008.
- Martin Savelsbergh and Marc Sol. Drive: Dynamic routing of independent vehicles. *Operations Research*, 46(4):474–490, 1998.
- Martin WP Savelsbergh. The vehicle routing problem with time windows: Minimizing route duration. *ORSA journal on computing*, 4(2):146–154, 1992.
- Martin WP Savelsbergh and Marc Sol. The general pickup and delivery problem. *Transportation science*, 29(1):17–29, 1995.
- Verena Schmid and Karl F Doerner. Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times. *European journal of operational research*, 207(3):1293–1303, 2010.
- Sebastián Souyris, Cristián E Cortés, Fernando Ordóñez, and Andrés Weintraub. A robust optimization approach to dispatching technicians under stochastic service times. *Optimization Letters*, 7(7):1549–1568, 2013.

- Christos D Tarantilis. Solving the vehicle routing problem with adaptive memory programming methodology. *Computers & Operations Research*, 32(9):2309–2327, 2005.
- Paolo Toth and Daniele Vigo. *The vehicle routing problem*. Siam, 2001.
- Paolo Toth and Daniele Vigo. The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 15(4):333–346, 2003.
- Andres Weintraub, Julio Aboud, C Fernandez, Gilbert Laporte, and E Ramirez. An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in chile. *Journal of the Operational Research Society*, pages 690–696, 1999.
- Hang Xu, Zhi-Long Chen, Srinivas Rajagopal, and Sundar Arunapuram. Solving a practical pickup and delivery problem. *Transportation science*, 37(3):347–364, 2003.

Anexos

Anexo A

Análisis Demanda

A.1. Demanda mensual por zonas

<i>N</i> ^o	jun-02	jul-02	ago-02	sep-02	oct-02	nov-02	dic-02	ene-03	feb-03	mar-03	abr-03	may-03
1	2	2	6	4	5	0	4	2	6	7	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
3	2	0	8	1	5	3	3	8	1	1	4	2
4	10	9	19	28	21	19	25	23	13	27	7	19
5	0	0	2	4	4	4	2	2	0	2	2	0
6	20	24	23	16	22	27	20	26	14	21	15	14
7	42	33	78	58	57	61	67	61	51	56	62	46
8	30	22	58	47	57	70	64	42	49	50	48	42
9	40	15	37	44	47	32	46	57	40	43	33	38
10	527	478	597	611	665	595	752	561	590	632	577	494
11	293	251	299	306	278	267	306	316	239	303	304	263
12	45	43	77	65	82	97	78	108	74	90	76	55
13	7	5	13	13	11	18	18	10	7	14	9	15
14	39	41	46	48	42	55	52	39	38	52	39	42
15	4	6	27	21	15	13	25	23	15	22	13	20
16	139	175	192	160	186	173	203	195	156	180	132	144
17	89	69	126	122	147	121	129	121	97	125	105	88
18	21	16	26	35	28	26	20	26	26	21	17	14
19	9	10	18	22	22	19	14	16	12	21	16	12
20	33	33	34	24	28	33	49	24	21	33	35	20
21	30	36	19	20	37	32	46	40	16	37	26	20
22	30	54	56	47	69	61	74	55	51	68	63	43
23	12	10	12	8	10	9	7	12	5	11	8	10
24	130	116	145	144	145	126	162	141	120	151	143	141
25	117	113	140	165	154	137	157	148	113	200	125	103
26	65	68	86	101	102	67	96	104	93	100	84	86
27	3	6	4	5	1	4	5	5	4	3	5	1
28	2	5	5	2	6	7	2	5	2	4	4	1
29	12	3	9	7	13	11	8	5	7	9	13	6
30	56	28	38	39	55	54	50	54	46	73	48	24
31	35	34	34	39	50	47	44	37	23	30	50	24
32	8	5	11	6	9	11	16	16	12	11	9	9
33	10	9	2	3	5	9	8	5	8	9	3	7
34	80	88	80	57	58	59	72	52	39	70	52	51
35	97	31	89	71	91	96	103	117	86	125	97	107

Tabla A.1: Número de llamadas registradas al mes en cada zona

<i>N</i> ^o	jun-02	jul-02	ago-02	sep-02	oct-02	nov-02	dic-02	ene-03	feb-03	mar-03	abr-03	may-03
36	76	61	64	75	93	58	75	72	52	109	69	62
37	2	7	10	8	8	7	10	8	6	7	3	4
38	5	10	5	5	4	2	4	4	2	5	2	12
39	24	12	18	19	13	10	16	14	19	16	22	10
40	17	16	18	10	14	10	25	8	13	17	14	13
41	47	42	44	48	49	32	65	38	34	55	43	34
42	29	30	25	28	21	22	22	25	23	19	18	17
43	7	12	17	24	11	15	15	14	17	21	7	6
44	0	2	8	4	9	5	12	6	4	9	5	3
45	19	23	15	17	37	15	21	15	18	22	14	18
46	14	16	14	13	16	16	13	7	10	3	12	5
47	17	14	31	35	24	22	25	20	31	30	19	26
48	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0
49	14	15	25	24	38	24	31	29	18	23	21	16
50	41	25	59	42	37	30	70	36	38	45	42	37
51	0	0	1	2	1	2	2	5	2	5	2	0
52	0	0	3	1	3	3	5	5	3	0	3	1
53	7	6	6	10	19	4	16	8	8	8	3	10
54	14	2	11	11	11	15	13	14	7	13	7	5
55	29	26	29	26	26	26	30	26	31	24	32	25
56	3	7	3	4	8	8	5	11	9	4	3	9
57	2	0	1	1	1	1	4	0	0	3	1	1
58	2	0	10	9	4	1	7	2	8	4	3	1
59	0	6	8	5	12	7	14	7	4	5	7	9
60	4	6	5	12	7	4	10	3	10	2	2	5
61	0	0	2	0	0	0	2	0	0	1	1	0
62	2	8	1	2	5	5	5	7	1	4	4	3
63	2	14	3	8	6	2	1	7	3	3	4	3
64	9	5	14	8	13	15	15	12	15	17	12	11
65	27	48	37	48	39	33	31	42	41	34	30	27
66	19	17	18	16	16	11	19	22	14	13	31	13
67	8	10	5	18	5	7	11	10	6	7	17	9
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0

Tabla A.2: Número de llamadas registradas al mes en cada zona

A.2. Demanda horaria por zonas

<i>N</i> ^o	Mañana				Tarde				
	7:00 - 8:30	8:30 - 10:00	10:00 - 11:30	11:30 - 13:00	13:00 - 14:30	14:30 - 16:00	16:00 - 17:30	17:30 - 19:00	19:00 - 20:30
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0	0
7	0	0.6	0.6	0.5	0.2	0.3	0.4	0.1	0
8	0	0.4	0.5	0.4	0.2	0.3	0.4	0.1	0
9	0	0.4	0.4	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1	0
10	0.1	5.4	6.3	5.2	2.3	3.1	4.2	1.6	0
11	0	2.7	3	2.3	1.3	1.6	1.9	0.8	0
12	0	0.8	0.9	0.5	0.2	0.4	0.6	0.1	0
13	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0
14	0	0.4	0.5	0.3	0.2	0.3	0.4	0.1	0
15	0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0

Tabla A.3: Número de llamadas registradas por hora en cada zona

Nº	Mañana				Tarde				
	7:00 - 8:30	8:30 - 10:00	10:00 - 11:30	11:30 - 13:00	13:00 - 14:30	14:30 - 16:00	16:00 - 17:30	17:30 - 19:00	19:00 - 20:30
<u>16</u>	0	1.9	1.9	1.4	0.6	0.9	1	0.4	0
<u>17</u>	0	1.1	1.1	0.8	0.4	0.7	0.8	0.3	0
<u>18</u>	0	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0
<u>19</u>	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0
<u>20</u>	0	0.3	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1	0
<u>21</u>	0	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0
<u>22</u>	0	0.6	0.7	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	0
<u>23</u>	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0
<u>24</u>	0	1.4	1.6	1.1	0.7	0.6	0.9	0.3	0
<u>25</u>	0	1.4	1.4	1.2	0.6	0.8	0.9	0.3	0
<u>26</u>	0.3	1.1	0.8	0.7	0.3	0.4	0.5	0.2	0
<u>27</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>28</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>29</u>	0	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0	0
<u>30</u>	0	0.4	0.5	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0
<u>31</u>	0	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0
<u>32</u>	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0	0
<u>33</u>	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0
<u>34</u>	0	0.7	0.6	0.6	0.3	0.3	0.4	0.1	0
<u>35</u>	0	0.7	0.9	0.8	0.5	0.6	0.7	0.2	0
<u>36</u>	0	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.5	0.2	0
<u>37</u>	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0
<u>38</u>	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0	0
<u>39</u>	0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0
<u>40</u>	0	0.2	0.2	0.1	0	0.1	0.1	0	0
<u>41</u>	0	0.5	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.1	0
<u>42</u>	0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0
<u>43</u>	0	0.2	0.1	0.1	0	0	0.1	0	0
<u>44</u>	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0
<u>45</u>	0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0
<u>46</u>	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0
<u>47</u>	0	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0
<u>48</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>49</u>	0	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0	0
<u>50</u>	0	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0
<u>51</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>52</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>53</u>	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0
<u>54</u>	0	0	0.1	0.2	0	0	0.1	0	0
<u>55</u>	0	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0
<u>56</u>	0	0	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0
<u>57</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>58</u>	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0
<u>59</u>	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0	0
<u>60</u>	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0
<u>61</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>62</u>	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0
<u>63</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>64</u>	0	0.1	0.2	0.1	0	0.1	0.1	0	0
<u>65</u>	0	0.3	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.1	0
<u>66</u>	0	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0	0
<u>67</u>	0	0	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0	0
<u>68</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>69</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>70</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla A.4: Número de llamadas registradas por hora en cada zona

Anexo B

Base de datos

B.1. Ejemplo de información disponible

A continuación se muestra un ejemplo de la información contenida en la base de datos que registra la operación manual de Xerox, la cual se encuentra dividida en dos tablas.

Comuna	Direccion	Tecnico	Grupo	Territorio	Modelo	Familia	Zona
Macul	Av. Quilín 1618	103	141	67	LASER 4135	PS	281
Macul	Av. Quilín 1618	103	141	67	DP180	PS	281
Macul	Av. Quilín 1618	103	141	67	DP-96	PS	281
La Cisterna	Gran Avenida 6603	163	150	16	7241A	CH-FAX	300
La Reina	Prín. de Gales 7121	702	116	16	DWC490CX	CH-MULTIF.	210
San Joaquin	Vicuña Mackenna 4860	280	131	31	5100	ODP-DTL	270
Las Condes	Reyes Lavalle 3340	806	124	20	DC220ST	ODP-DCS WG	130
Vitacura	Av. Vitacura 8400	967	122	22	5855	ODP-WG	102
La Florida	Av. Vespucio6325	981	110	104	5824	ODP-CNV L&L	331
Las Condes	Av. Apoquindo 5900	163	150	16	DFC160	CH-FAX	133
Maipu	Tristán Valdés 195	863	150	15	C4	CH-INKJET	221
La Florida	Santa Amalia 1763	981	110	104	5826	ODP-CNV L&L	334
San Joaquin	Vicuña Mackenna 2600	749	115	18	N17	CH-LASER	271

Tabla B.1: Ejemplo de información de Xerox (1/2)

Comuna	Razón Social	Fecha recibida	Fecha despacho	Fecha llegada	Fecha término
28	Banco Santander	01-05-2002 11:00	01-05-2002 11:30	01-05-2002 11:40	01-05-2002 12:40
28	Banco Santander	01-05-2002 12:48	01-05-2002 12:49	01-05-2002 12:50	01-05-2002 14:50
28	Banco Santander	01-05-2002 13:00	01-05-2002 13:00	01-05-2002 13:00	01-05-2002 15:00
30	Admin. Mahtei Ltda.	02-05-2002 8:30	02-05-2002 8:30	02-05-2002 8:30	02-05-2002 9:30
21	Banco Santander	02-05-2002 8:32	02-05-2002 14:30	02-05-2002 15:00	02-05-2002 15:50
27	PUC	02-05-2002 8:39	03-05-2002 11:50	03-05-2002 12:00	03-05-2002 14:30
13	Foodcorp SA	02-05-2002 8:46	02-05-2002 11:50	02-05-2002 12:15	02-05-2002 14:45
10	M. Eugenia López	02-05-2002 8:54	02-05-2002 11:20	02-05-2002 11:40	02-05-2002 13:30
33	Departamental Ltda.	02-05-2002 8:55	02-05-2002 13:00	02-05-2002 13:30	02-05-2002 16:30
13	Colmena SA	02-05-2002 9:00	02-05-2002 9:00	02-05-2002 9:00	02-05-2002 9:45
22	Paulo Caviglia	02-05-2002 9:00	02-05-2002 9:01	02-05-2002 9:01	02-05-2002 10:01
33	Sta. Amalia Ltda	02-05-2002 9:00	02-05-2002 11:35	02-05-2002 11:45	02-05-2002 13:45
27	Lucchetti SA	02-05-2002 9:01	02-05-2002 15:00	02-05-2002 15:30	02-05-2002 15:30

Tabla B.2: Ejemplo de información de Xerox (2/2)

Anexo C

Pseudocódigos de Algoritmos

C.1. Definiciones

- **NTechs:** Número de técnicos
- **NRoutes:** Número de rutas generadas hasta el momento
- **Routes[]:** Stack de rutas disponibles
- **Routes[i]:** Ruta en la posición i del stack
- **Length(route):** Devuelve el número de nodos de la ruta *route*
- **Neighbor(route,call):** Devuelve *true* si hay un nodo de la ruta *route* que esté en una zona adyacente a la llamada *call*
- **Base(route):** Devuelve *true* si la ruta *route* está en la base
- **SartCurrent(route):** Devuelve *true* si la ruta *route* comienza con un nodo que está siendo visitado actualmente
- **TwoPointMove(route,pos):** Aplica el operador de *local search Two Point Move* a la ruta *route*, moviendo el nodo de la posición *pos* a otras posiciones de la ruta y generando una ruta nueva si encuentra mejoras
- **NewRoute(route,call,pos):** Genera una nueva ruta insertando la llamada *call* en la posición *pos* de la ruta *route*

C.2. Pseudocódigos de rutinas de la heurística propuesta

Call Neighborhood

Esta función permite encontrar el conjunto de rutas a las cuáles les será agregada una llamada recibida recientemente. La vecindad de esta nueva llamada esta compuesta por columnas de bajos costos reducidos que contengan clientes en la misma zona o en una zona adyacente y las variables de la base para asegurar factibilidad.

En primer lugar se resuelve una versión fija LP del problema maestro para encontrar los costos reducidos de las variables. Estos costos reducidos son incluidos en una pila (*reducedcosts*[]) que luego es ordenada de menor a mayor en conjunto con los índices correspondientes de las variables. Se revisan las primeras *nIndex* variables de menores costos reducidos, y en el caso de empezar con un nodo visitado actualmente, para asegurar factibilidad, y de encontrarse en una zona adyacente a la nueva llamada, son agregadas a la vecindad. Posteriormente, se agregan todas las columnas de la base que no se encuentren ya en la vecindad.

Algorithm 1 *Call Neighborhood*

Require: Call *newcall*, int *nIndex*, Route[] *Routes*[]

Ensure:

```
1: int[] index[], indices[]
2: double[] reducedcosts[]  $\leftarrow$  ReducedCost(LP)
3: Sortmin(reducedcosts[], index[])
4: for i=0 ; i  $\leq$  nIndex ; i++ do
5:   if SartCurrent(r)  $\wedge$  Neighbor(r, newcall) then
6:     indices[]  $\leftarrow$  index[i]
7:   end if
8: end for
9: for r=0 ; r  $\leq$  NRoutes ; r++ do
10:  if Base(r)  $\wedge$   $\sim$  indices.contains(r) then
11:    indices[]  $\leftarrow$  r
12:  end if
13: end for
14: return indices[]
```

Columns Local Search

Esta función se utiliza para insertar la nueva llamada en las rutas de menores costos. Primero se ejecuta *CallNeighborhood()* para determinar la vecindad de la nueva llamada. A continuación se mejoran las rutas con *TwoPointMove* y se crea dos rutas auxiliares, *newroute* y *bestroute* que son utilizadas mientras se recorren las rutas de la vecindad, evaluando con *CostIoannou* los costos de insertar la nueva llamada en cada posición, excepto la primera para no cambiar el nodo visitado en ese momento. Finalmente se genera una nueva ruta con la nueva llamada en la posición de mínimo costo por cada columna en la vecindad.

Algorithm 2 *ColumnsLS*

Require: Call *newcall*

Ensure:

```
1: int[] Neighborhood[] ← CallNeighborhood(newcall)
2: for r=0 ; r ≤ NRoutes ; r++ do
3:   for pos=1 ; pos ≤ Length(Routes[r]) ; pos++ do
4:     TwoPointMove(Routes[r], pos)
5:   end for
6: end for
7: double MinCost
8: Route newroute
9: Route bestroute
10: for i=0 ; i ≤ Length(Neighborhood[] ; i++ do
11:   MinCost ← 1.000.000
12:   for pos=1 ; pos ≤ Length(Routes[Neighborhood[i]]) ; pos++ do
13:     newroute ← NewRoute(Routes[Neighborhood[i]], newcall, pos)
14:     if Cost(newroute) ≤ MinCost then
15:       MinCost ← Cost(newroute)
16:       bestroute ← newroute
17:     end if
18:   end for
19:   Routes[] ← bestroute
20: end for
```

C.3. Pseudocódigos de la heurística de comparación

Greedy

Este algoritmo inserta cada llamada recibida al final de la ruta en la que el incremento de los costos sea menor.

Algorithm 3 *Greedy*

Require: Call *newcall*, Route[] *Routes*[]

Ensure:

```
1: if NRoutes  $\leq$  NTechs then
2:   Route newroute  $\leftarrow$  newcall
3:   Routes[]  $\leftarrow$  newroute
4: else
5:   MinCost  $\leftarrow$  100.000
6:   Route bestroute
7:   int rbest
8:   while  $r \leq \text{Length}(\text{Routes}[])$  do
9:     Route newroute  $\leftarrow$  Cost Ioannou(Routes[r], new call,  $\text{Length}(\text{Routes}[r])$ )
10:    if MinCost  $\leq$  Cost(newroute) then
11:      MinCost  $\leftarrow$  Cost(newroute)
12:      bestroute  $\leftarrow$  newroute
13:      rbest  $\leftarrow$  r
14:    end if
15:  end while
16:  Routes[rbest]  $\leftarrow$  newroute
17: end if
18: return indices
```

Anexo D

Resultados

D.1. Tiempos según nivel de demanda

Tiempo	Temporada	Modelos				Delta Greedy
		TTP-CEP	TTP-IP	TTP	Greedy	
Espera	1	37.055,4	37.956,6	4.0182,6	50.038,8	26 %
	2	36.459,5	41.492,5	42.719	47.304,5	23 %
	3	27.279,5	28.680,1	30.245,3	36.096,3	24 %
Atraso	1	11.837	12.610	13.916	28.004,8	58 %
	2	10.473,5	13.148,5	12.908,5	15.863	34 %
	3	8.098,7	8.364,2	8.369,0	9.759,9	17 %

Tabla D.1: Resumen tiempos promedio de espera y atraso según temporada

D.2. Tiempos según prioridad de clientes

Tiempo	Tipo clientes	Modelos				Delta Greedy
		TTP-CEP	TTP-IP	TTP	Greedy	
Espera	Frecuentes	31.18	32.57	34.20	41.40	25 %
	Habituales	49.34	52.10	54.11	67.38	27 %
	Ocasionales	72.19	77.00	82.08	93.36	23 %
Atraso	Frecuentes	19.33	20.77	21.11	33.01	41 %
	Habituales	13.85	14.80	15.45	21.10	34 %
	Ocasionales	5.21	6.04	6.68	7.98	35 %

Tabla D.2: Resumen tiempos promedio de espera y atraso según prioridad de tipo de cliente

D.3. Distancia recorrida según nivel de demanda

Variable	Temporada	Modelos				Delta Greedy
		TTP-CEP	TTP-IP	TTP	Greedy	
Distancia	1	9.004	9.363,4	8.421,6	10.070,4	11 %
	2	17.171,5	17.794,5	13.989,5	15.438,2	-11 %
	3	12.095,1	13.760,1	11.094,5	11.683,1	-4 %

Tabla D.3: Resumen de distancia recorrida según temporada

D.4. Postergación de llamadas

Variable	Modelos				
	TTP-CEP	TTP-IP	TTP	Greedy	Delta Greedy
Total llamadas	14874	14874	14874	14875	-
Postergadas	1901	1956	1971	2261	16 %
Postergadas 1 día	1648	1703	1721	1965	16 %
Postergadas 2 días	1	1	0	0	-
Postergadas 3 o más días	4	3	1	0	-

Tabla D.4: Número total de llamadas postergadas en cada modelo