

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Propuesta de Rediseño de las Rutas de Entrega AM
para DHL Express Quito**

Diego Flores Benítez

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniería Industrial

Quito, mayo 2009

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio Politécnico

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Propuesta de Rediseño de las Rutas de Entrega AM
para DHL Express Quito**

Diego Flores Benítez

Héctor Andrés Vergara, M.Sc.
Director de Tesis y
Miembro del Comité de Tesis

.....

Ximena Córdova, Ph.D.
Miembro del Comité de Tesis

.....

Patricio Cisneros, M.Sc.
Miembro del Comité de Tesis

.....

Fernando Romo, M.Sc.
Decano del Colegio Politécnico

.....

Quito, mayo 2009

© Derechos de autor
Diego Flores Benítez
2009

RESUMEN

El transporte es un costo significativo en varias empresas, por lo tanto, el potencial de ahorro es grande. El presente trabajo aborda la aplicación de una metodología de ruteo a una empresa courier. Para este propósito se han utilizado modelos matemáticos enfocados en la resolución de la clase de problemas VRP (Vehicle Routing Problem), los cuales, en sus instancias más simples, consisten en un conjunto de clientes que deben ser abastecidos por una flota de vehículos desde una localidad determinada. En primer lugar, se realiza un análisis de la situación actual de la Empresa, que incluye el método actual que utilizan para el diseño de rutas, los sistemas de información que poseen y el proceso de entregas. Como parte de la metodología, se desarrolló un software que, mediante la aplicación de modelos matemáticos, diseña las rutas en base al tiempo que existe entre visitas, considerando el tráfico y el tiempo de servicio a los clientes. Adicionalmente, se elabora un procedimiento para adaptar la metodología a la Empresa, considerando los costos y el personal involucrado. Finalmente, se mencionan los beneficios económicos de la propuesta y el potencial de la metodología para diferentes tipos de industrias.

ABSTRACT

Transportation is a substantial cost in many companies; therefore, the potential for savings is large. The present work deals with the application of a routing methodology in a courier company. For this purpose, several mathematical models that address the Vehicle-Routing-Problem, a class problem consisting of a set of customers to be served by a fleet of vehicles from a single depot, have been used. In first place, an analysis of the actual situation is presented, which includes the actual routing design methodology, the information systems that are used and the Inbound process performed by the company. As part of the proposed methodology, a software program was developed, which, by the application of mathematical models, designs the routes based on the time between visits, considering traffic and service time for the clients. Additionally, a process to adapt the methodology to the company is presented, considering the costs and people involved. Finally, a description of the possible economic benefits resulting from the proposed methodology are included as well as its potential use in different types of industries.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCION	1
1.1. Descripción de la Empresa	1
1.1.1. Estructura Organizacional.....	1
1.1.2. Segmento del Mercado Atendido.....	2
1.1.3. Cobertura.....	2
1.1.4. Procesos Relevantes	2
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Planteamiento del Problema.....	3
1.3.1. Formulación	3
1.3.2. Delimitación	3
1.4. Definición de Objetivos	4
1.4.1. Objetivo General	4
1.4.2. Objetivo Específicos	4
1.5. Organización del Documento.....	4
2. MARCO TEORICO	6
2.1. Problema de Asignación de Rutas.....	6
2.2. Modelos de Asignación de Rutas	6
2.2.1. VRP – Modelo General	6
2.2.2. CVRP – Límite de Capacidad	7
2.2.3. VRPTW – Ventanas de Tiempo.....	8
2.2.4. MDVRP – Utilización de Varios Almacenes.....	8
2.2.5. VRPPD – Entregas y Recolecciones	9
2.2.5.1. Factible en Entrega	10
2.2.5.2. Factible en Recolecciones (Pick-ups).....	10
2.2.5.3. Factible en Carga	11
2.2.6. Otros Modelos.....	11
2.2.6.1. SDVRP – Cliente Atendido por Diferentes Vehículos.....	11
2.2.6.2. SVRP – Existen Valores Desconocidos (Random).....	12
2.2.6.3. PVRP – Entregas Periódicas.....	12
2.2.6.4. VRPSF – Almacenes Móviles.....	12

TABLA DE CONTENIDO (CONTINUACIÓN)

	Pág.
2.3. Métodos de Resolución de los Modelos de Asignación de Rutas.....	12
2.3.1. Ant Colony System	13
2.3.2. Branch and Bound	13
2.3.3. Programación Basada en Restricciones	13
2.3.4. Ramificación y Acotamiento para el VRPSF	14
2.3.5. Algoritmo Genético Híbrido Basado en Programación Dinámica....	14
2.3.6. Recocido Simulado	15
2.3.7. Algoritmo Tabu Search	15
3. METODOLOGÍA ACTUAL PARA EL DISEÑO DE RUTAS	16
3.1. Levantamiento de Información.....	16
3.2. Sistemas de Información	17
3.2.1. Sistema SIS	17
3.2.2. Software MapInfo®	18
3.3. Procedimiento de Ajuste de las Rutas	20
3.4. Evaluación del Desempeño Actual en las Rutas	21
3.5. Descripción del Proceso Inbound	21
4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE RUTAS	23
4.1. Determinación de Modelos de Ruteo Aplicables	23
4.1.1. Algoritmos Clásicos	23
4.1.1.1. Algoritmo de Ahorros	23
4.1.1.2. Heurística de Barrido	24
4.1.2. Algoritmos Modernos	24
4.1.2.1. K-means	24
4.1.2.2. Dijkstra.....	25
4.1.3. Determinación de los Algoritmos a Utilizar	25
4.2. Método de Ruteo Propuesto	26
4.2.1. Componente Sistemático	26
4.2.2. Componente Empírico	26
4.2.3. Consideraciones Especiales del Método	27
4.3. Adaptación del Método a la Empresa	27

TABLA DE CONTENIDO (CONTINUACIÓN)

	Pág.
4.3.1. Estimación de Parámetros	27
4.3.1.1. Distancia Entre Clientes	28
4.3.1.2. Matriz de Pesos	29
4.3.1.3. Matriz de Tiempos	31
4.3.2. Herramientas Utilizadas	31
4.4. Aplicación del Método K-means	32
4.4.1. Procedimiento	32
4.4.2. Discusión y Análisis de los Resultados	33
4.4.2.1. Restricción de una Solución Inicial	36
4.4.2.2. Restricción del Número de Clusters	36
4.5. Elaboración de un Nuevo Algoritmo	36
4.5.1. Ideas Claves para el Desarrollo del Nuevo Algoritmo	37
4.5.2. Descripción del Nuevo Algoritmo	37
4.5.2.1. Establecimiento de la Zona	38
4.5.3. Aplicación del Nuevo Algoritmo	42
4.5.4. Discusión y Análisis de los Resultados	43
4.5.5. Interfaz Gráfica del Nuevo Algoritmo	47
5. PROPUESTA DE IMPLANTACIÓN	52
5.1. Consideraciones Previas	52
5.2. Procedimiento para la Implantación	52
5.2.1. Prueba Piloto	54
5.3. Plan de Acción para Implantar la Propuesta	54
5.4. Discusión de la Propuesta	55
5.5. Aplicaciones Reales del Método	56
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
6.1. Conclusiones	58
6.2. Recomendaciones	59
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
Anexo A. ORGRANIGRAMAS DE DHL EXPRESS	¡Error! Marcador no definido.

TABLA DE CONTENIDO (CONTINUACIÓN)

	Pág.
A.1. Organigrama a Nivel Gerencial.....	¡Error! Marcador no definido.
A.2. Organigrama del Área de Operaciones.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo B. PROCESO INBOUND DHL EXPRESS QUITO	¡Error! Marcador no definido.
B.1. FLUJOGRAMA DEL PROCESO INBOUND DHL EXPRESS QUITO....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo C. PLAN DE ACCIÓN PARA IMPLANTAR LA PROPUESTA EN DHL EXPRESS QUITO.....	¡Error! Marcador no definido.
C.1. Diagrama de Gantt	¡Error! Marcador no definido.
C.2. Asignación de Recursos	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1. Representación de Quito en MapInfo®.....	20
Figura 2. Dos Rutas Antes y Después de Ser Unidas	23
Figura 3. Construcción de la Zona Inicial.....	38
Figura 4. Componentes para la Zona	39
Figura 5. Determinación del Siguiete Cliente Más Cercano (Punto C)	41
Figura 6. Establecimiento de la Nueva Zona en Función del Punto C	41
Figura 7. Prueba de Igualdad de Varianzas para los Tiempos de Ruta de los Dos Algoritmos.....	45
Figura 8. Rutas Obtenidas al Aplicar el Algoritmo de Clarke y Wright	48
Figura 9. Rutas Obtenidas al Aplicar la Heurística de Barrido	49
Figura 10. Interfaz Gráfica de Desarrollo	50
Figura 11. Representación Gráfica para el Nuevo Algoritmo	51
Figura 12. Organigrama de DHL Express Quito a Nivel Gerencial	¡Error! Marcador no definido.
Figura 13. Organigrama del Área de Operaciones de DHL Express Quito ...	¡Error! Marcador no definido.
Figura 14. Flujograma del Proceso Inbound de DHL Express Quito.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Diagrama de Gantt del Plan de Implantación de la Propuesta	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 1. Parámetros de Tráfico en Base a Zonas.....	30
Tabla 2. Resultados Obtenidos para el Método k-means $K=16$	33
Tabla 3. Resultados Obtenidos para el Método k-means $K=23$	34
Tabla 4. Resultados Obtenidos para el Método k-means $K=30$	34
Tabla 5. Resumen Estadístico de los Resultados	35
Tabla 6. Resultados del Nuevo Algoritmo	43
Tabla 7. Resumen Estadístico de Resultados del Nuevo Algoritmo	44
Tabla 8. Resumen Comparativo de los Resultados de los Algoritmos.....	44
Tabla 9. Costo Estimado por Ruta	56
Tabla 10. Asignación de Recursos para la Implantación	¡Error! Marcador no definido.

PROPUESTA DE REDISEÑO DE LAS RUTAS DE ENTREGA AM PARA DHL EXPRESS QUITO

1. INTRODUCCION

1.1. Descripción de la Empresa

DHL Express fue fundada en 1969 por tres socios, cuyas iniciales conforman el nombre de la compañía; Adrian Dalsey, Larry Hillblom y Robert Lynn. La Empresa inició realizando envíos personales de documentos por avión desde San Francisco hasta Honolulu. Así nació esta nueva industria de envíos internacionales expresos. Entre 1976 y 1978, DHL se expande en Latino América y en 1979 la compañía extiende sus servicios a entrega de empaques, cuando en un principio solamente manejaban documentos. En el año 1990, DHL Express firma una alianza estratégica con Lufthansa, Aerolíneas Japonesas y Nissho Iwai y además se convierte en la primera empresa expresa internacional en retomar los envíos a Kuwait luego de la guerra del Golfo. A principios del 2002, Deutsche Post World Net tenía ya el 100% de las acciones de DHL. Hacia el 2003, Deutsche Post World Net consolidó todas sus actividades de correo expreso en el nombre comercial, DHL Express (DHL Express , Internet).

1.1.1. Estructura Organizacional

Por el momento, DHL Express tiene cerca de 285.000 empleados en aproximadamente 6.500 oficinas alrededor del mundo. En el Ecuador, DHL Express cuenta con 371 empleados y cuatro oficinas principales. En Quito, la capital (oficina matriz), trabajan 207 empleados. La estructura organizacional de DHL Express en Ecuador está conformada por la gerencia general que tiene a su cargo las siguientes áreas: finanzas, sistemas, Western Union, operaciones, recursos humanos, comercial y las operaciones de Guayaquil. Para el presente proyecto es importante enfocarse en las áreas relevantes del área de operaciones. La gerencia de operaciones tiene a cargo dos turnos con sus respectivos supervisores (para las entregas y para las recolecciones). Además

debe manejar un supervisor en el aeropuerto. Los organigramas completos se presentan en el Anexo A (DHL Express , Internet).

1.1.2. Segmento del Mercado Atendido

Actualmente, DHL Express es líder en el mercado internacional de envíos expresos, así como de transporte terrestre y envíos aéreos. Mundialmente, DHL Express es el número uno en envíos marítimos y en soluciones logísticas. Los servicios que ofrece DHL Express son muy diversos; DHL Express brinda desde soluciones personalizadas de envíos expresos de documentos y paquetes hasta soluciones logísticas y gestión de cadena de suministros (DHL Express, Internet).

1.1.3. Cobertura

DHL Express cubre alrededor del 63% del mercado nacional. Su competencia directa a nivel mundial es FEDEX y UPS. La compañía brinda su servicio expreso en más de 220 países alrededor del mundo. Con una flota de 420 aviones y 76.200 vehículos, DHL Express realiza más de 1.500 millones de envíos por año a 120.000 destinos alrededor del mundo (DHL Express , Internet).

DHL Express en Ecuador cuenta con cuatro estaciones principales: Quito (AVC), Guayaquil (GYE), Manta (MZD) y Cuenca (CUE) (DHL Express , Internet).

1.1.4. Procesos Relevantes

En todas las localidades de DHL Express existen dos procesos principales: Inbound y Outbound. El proceso Inbound comprende todas las actividades que se realizan para el ingreso de material a la estación. De manera análoga, el proceso Outbound comprende aquellas actividades que se realizan para la salida de material de la estación. Para el propósito de esta tesis es necesario realizar una diagramación de las operaciones del proceso Inbound en Quito como se muestra en el Anexo B (la explicación del proceso se realiza en la sección 3.5).

1.2. Antecedentes

De acuerdo al Gerente de Operaciones, el manejo de rutas en DHL Express es un factor crítico y sensible en las operaciones de la Empresa. En DHL Express

existe un manejo variable de rutas en función de los pedidos que se elaboran y la demanda, sin embargo, se pierde mucho tiempo en la asignación de rutas y cambio de las mismas de acuerdo a la fluctuación que tiene la demanda durante el día. Los beneficiarios directos del proyecto son la Empresa y los clientes a los que se les brinda el servicio. Dentro de las alternativas de solución se encuentra el diseño de rutas a partir de un modelo matemático que contemple la mayor cantidad de factores que entran en consideración (como se explicará en el marco teórico).

Se tiene como respaldo el apoyo del director regional de la Empresa y acceso a toda la información necesaria dentro de la Empresa. El proyecto cuenta con total apoyo debido a que se tomará este, si es exitoso, como un modelo para realizar diseños de rutas en las demás sedes a nivel regional.

En el Ecuador, DHL Express es la empresa que tiene mayor participación en el mercado (63%), comparándola con FEDEX, TNT, URBANO EXPRESS, entre otras; además de tener una tecnología avanzada comparado con las demás empresas ecuatorianas (Mallarines). Asimismo, no se desarrolla mucha investigación en empresas nacionales sobre el diseño de rutas o diseños óptimos para realizar entregas y recolecciones (Mallarines).

1.3. Planteamiento del Problema

A continuación se presenta cómo está formulado y delimitado el problema que se pretende atender en el presente trabajo:

1.3.1. Formulación

Desarrollar una metodología que soporte las actividades de gestión de las rutas operativas en DHL Express Quito.

1.3.2. Delimitación

Debido a que la gestión de rutas que existe actualmente en DHL Express contempla muchas variables, es importante que se limite el problema a los siguientes parámetros para el desarrollo y aplicación de la metodología que se va a proponer en la presente tesis:

- Sólo se tomarán en cuenta las rutas/entregas “AM” (9:00 – 13:00); se excluyen los “pick-ups” y entregas en la tarde.
- No se tomarán en cuenta las rutas prioridades (antes de las 9:00)
- Se tomarán en cuenta restricciones de capacidad; lo que significa el uso de motos, camionetas y camiones grandes.
- No se tomarán en cuenta entregas en ventanas de tiempo predeterminadas debido que no son un factor significativo dentro de las entregas del ciclo AM.
- No se tomará en cuenta la posible existencia de múltiples lugares de despacho o almacenamiento de órdenes.
- Se tomarán en cuenta todas las rutas del Distrito Metropolitano de Quito.
- Se tomarán en cuenta consideraciones de tráfico

1.4. Definición de Objetivos

El objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo se presentan a continuación:

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología para el modelamiento de las rutas de DHL Express Quito, mediante el uso de modelos matemáticos de asignación de rutas,

1.4.2. Objetivo Específicos

Los objetivos específicos identificados son los siguientes:

- Sistematizar la asignación de clientes a las rutas AM
- Sistematizar la metodología de ruteo de DHL Express
- Lograr un mejor control sobre los couriers y sus zonas

1.5. Organización del Documento

El siguiente trabajo está organizado de la siguiente manera. En el capítulo 2 se presenta el problema general de VRP y sus variaciones, así como los

métodos y heurísticos clásicos y modernos que han sido utilizados para resolverlo. En el capítulo 3 se explica detalladamente la metodología actual de DHL Express para diseñar y ajustar sus rutas. Adicionalmente, en este capítulo se exponen los sistemas y tecnologías de información que dispone la Empresa para la realización de su actividad. El capítulo 4 comienza con la descripción de los posibles modelos matemáticos a utilizar. Posteriormente, describe la adaptación del método propuesto a la Empresa, incluyendo el análisis de los resultados obtenidos de la aplicación de dos modelos matemáticos de clustering (agrupamiento de clientes). A continuación, en el capítulo 5, se realiza un plan de implantación de la metodología propuesta, incluyendo los costos y el personal involucrado. En este capítulo también se mencionan las posibles aplicaciones de la metodología propuesta a diferentes tipos de industrias. El trabajo finaliza con conclusiones y recomendaciones para la Empresa en el capítulo 6.

2. MARCO TEORICO

2.1. Problema de Asignación de Rutas

El problema general de asignación de rutas comprende un centro de distribución que utiliza un cierto número de vehículos para realizar las entregas a los clientes, que a su vez, presentan distintas demandas. El objetivo principal es diseñar un sistema de rutas que minimice la distancia total recorrida (la cual es proporcional a los costos). A continuación se presenta una descripción más detallada de las variaciones de este tipo de problemas (Machado, Tavares y Pereira , 1).

2.2. Modelos de Asignación de Rutas

2.2.1. VRP – Modelo General

El modelo VRP (Vehicle Routing Problem) es una abstracción de un grupo de problemas que han sido estudiados desde el punto de vista teórico y su relevancia en la práctica. El objetivo de estos modelos es realizar entregas a un conjunto de clientes con demanda conocida al mínimo costo partiendo y terminando en un origen y destino establecido. Es importante mencionar que este tipo de problemas requiere de un esfuerzo computacional considerable para ser resuelto y que el esfuerzo incrementa exponencialmente a medida que incrementa el tamaño del problema (Dorronsoro , Internet). A continuación se presenta la formulación del problema:

El problema de VRP se considera un problema de combinatorias que define su espacio dentro de un gráfico $G(V,E)$ en donde la notación se describe a continuación (Dorronsoro , Internet):

$V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ es el conjunto de vértices; y,

$A = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V; i \neq j\}$ es el conjunto de arcos.

Se considera que el almacén se encuentra en v_0 . Además se emplea C como una matriz no-negativa de costos (o distancias asumiendo que son directamente proporcionales) c_{ij} entre los clientes v_i y v_j . Cuando $c_{ij} = c_{ji}$ para todos

los $(v_i, v_j) \in A$, el problema es simétrico y se puede reemplazar A por E , siendo $E = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V; i < j\}$.

Además se tiene que:

- d es el vector de demandas
- R_i la ruta para el vehículo i
- m el número de vehículos (asumiendo que son idénticos y que una ruta se asigna a tan solo un vehículo y viceversa)

Adicionalmente, se considera un tiempo o nivel de servicio δ_i (tiempo de descarga del material) que requieren los vehículos para descargar la carga q_i en v_i . Además se debe tomar en cuenta que cada ruta que se realiza no debe sobrepasar un límite D de tiempo en circulación (el cual puede considerarse como una jornada del día) (Lenstra y Kan , 1-6).

Una manera de solucionar este problema se da al establecer cada c_{ij} como tiempos de recorrido; entonces se puede realizar lo siguiente:

Partir a V en R_1, \dots, R_m y determinar una permutación σ_i para determinar el orden de entrega dentro de la ruta R_i .

Establecer el costo de una ruta:

$$C(R_i) = \sum_{i=0}^m c_{i, i+1} + \sum_{i=1}^m \delta_i \quad (1)$$

Entonces el objetivo del problema se convierte en:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^m C(R_i) \quad (2)$$

Es importante mencionar que se van a encontrar varias maneras de definir el problema y asimismo de solucionarlo, como se verá en la sección 2.3 (Ralphs, Kopman y Pulleyback , 1)

2.2.2. CVRP – Límite de Capacidad

Este problema es un tipo de VRP en el cual todos los vehículos tienen una capacidad de almacenamiento dada y deben servir un conocido número de clientes desde un origen a un costo mínimo. En definitiva, este problema es similar al de VRP con la única restricción adicional de que los vehículos tienen la misma capacidad (Dorronsoro , Internet).

Este problema es factible si la capacidad total de las rutas no excede la capacidad del vehículo de dicha ruta. Si se designa a Q como la capacidad de un vehículo, matemáticamente, el modelo de este problema es igual que el de VRP (Ecuaciones 1 y 2) más una restricción (Dorronsoro, Internet).

$$\sum_{i=1}^m d_i \leq Q \quad \forall R_i \quad (3)$$

2.2.3. VRPTW – Ventanas de Tiempo

De igual manera, este problema es una adaptación del problema VRP, a diferencia que toma en consideración ventanas de tiempo en las que se pueden realizar las entregas a los diferentes clientes (Dorronsoro, Internet). Es así entonces que se define el intervalo $[e_v, l_v]$ como la ventana de tiempo en la que el cliente v debe atenderse. El objetivo de esta modificación es minimizar el número de vehículos, los tiempos de entrega y tiempos de espera necesarios para atender a todos los clientes. Para esto se deben añadir las siguientes restricciones/consideraciones al modelo (Dorronsoro, Internet):

- Se debe atender al cliente antes de su límite superior en la ventana de tiempo.
- Un vehículo que llega a donde el cliente antes del inicio de su ventana de tiempo implica una espera (que se debe minimizar).
- Cada ruta debe iniciar y finalizar con la ventana de tiempo del almacén principal.
- En el caso de ventanas de tiempo más flexibles, se puede considerar la opción de penalizar en la función objetivo por algún atraso.

La representación matemática de estas restricciones para este sub-problema no se aborda debido a la complejidad de las mismas.

2.2.4. MDVRP – Utilización de Varios Almacenes

Este es el caso para cuando una compañía tiene varios centros de distribución. El problema puede ser abordado como dos problemas independientes de VRP en el caso de que los clientes estén agrupados de

manera idónea, sin embargo, muchas veces este no es el caso (Dorronsoro , Internet).

En este problema es necesaria la asignación de una flota de vehículos a su respectivo almacén; cada vehículo parte de un almacén y llega al mismo almacén del que partió. El objetivo de este sub-problema de VRP permanece similar al original: minimizar la flota de vehículos y la suma de tiempos de entrega satisfaciendo la demanda de todos los clientes. A continuación se presenta la formulación matemática de la extensión del problema (Dorronsoro , Internet):

Se define el conjunto de vértices o clientes como:

$$V = \{v_1, \dots, v_n\} \cup V_0$$

En donde:

c es el conjunto de vértices que representa los almacenes. Entonces una ruta R_i está definida como:

$$R_i = \{d, v_1, \dots, v_m, d\} / d \in V_0; \quad i \geq 0$$

El costo de la ruta se calcula igual que para el problema de VRP original.

2.2.5. VRPPD – Entregas y Recolecciones

En esta extensión del problema VRP original, se considera la posibilidad de que los clientes regresen una cantidad determinada de artículos a los almacenes (sea como dañados o como recolecciones que hacen las rutas). Es así entonces que se debe tomar en cuenta que los vehículos tengan la capacidad de regresar con estos ítems (Gribkivskaia, Halskau y Bugge , 1). Para simplificaciones del problema es necesario asumir que todas las recolecciones deben ser trasladadas al almacén, por lo que se elimina la posibilidad de cambiar artículos entre clientes. Otra relajación del problema se logra al eliminar la restricción original de que todos los clientes deben ser visitados una sola vez (entonces se establece una política de entrega total de paquetes antes de empezar las recolecciones) (Dorronsoro , Internet).

El problema se vuelve factible si es que la cantidad total asignada para cada ruta no excede la capacidad de un vehículo que sirve la ruta y si el vehículo tiene capacidad suficiente para realizar todas las recolecciones asignadas (Gribkivskaia, Halskau y Bugge , 1). Para la formulación matemática se considera

el costo de una ruta de igual manera que el problema VRP general más tres restricciones que determinarán la factibilidad de la ruta (para este propósito se define p como el vector de recolecciones):

- Factible en entrega
- Factible en recolecciones
- Factible en carga

2.2.5.1. Factible en Entrega

Esto significa que la cantidad total de artículos no debe exceder la capacidad del vehículo (Dorronsoro , Internet). Dado $R_i = \{v_0, v_1, \dots, v_{m+1}\}$ y el vehículo asignado una capacidad C , esta restricción se puede expresar matemáticamente como:

$$C_d(v_k) \leq C \quad (4)$$

$$C_d(v_{k+1}) > C \quad (5)$$

El índice k denota la secuencia de visita a los clientes en una ruta. En la ecuación (4), $C_d(v_k)$ es la cantidad total de artículos entregados a todos los clientes dentro de la ruta que empieza en el almacén y termina en v_k . Por lo tanto se tiene:

$$C_d(v_k) = \sum_{v_i \in P(1, v_k)} d_i \quad (6)$$

En donde $P(1, v_k)$ denota los clientes visitados en la ruta desde v_0 (el almacén) hasta v_k .

2.2.5.2. Factible en Recolecciones (Pick-ups)

Esta restricción asegura que el vehículo tiene la capacidad suficiente para recolectar todos los pedidos de su ruta (Dorronsoro , Internet):

$$C_p(v_k) \leq C \quad (7)$$

$$C_p(v_{k+1}) > C \quad (8)$$

En donde $C_p(v_k)$ es la cantidad total de artículos o material recogido de todos los clientes en la ruta hasta v_k . De igual manera se tiene:

$$C_p(v_k) = \sum_{v_i \in P(1, v_k)} p_i \quad (9)$$

2.2.5.3. Factible en Carga

La capacidad del vehículo no puede ser violada en cada parada de la ruta; el cumplimiento o no de la capacidad dependerá entonces de la secuencia de los clientes dentro de la ruta. Sea $L(v_k)$ la carga del vehículo después de dejar el cliente v_k , asumiendo que la carga inicial es (Dorronsoro , Internet):

$$L(1) \leq C \quad (10)$$

Entonces, la carga del vehículo en cualquier punto está descrita por la ecuación:

$$L(v_k) = C_p(v_k) + L(1) - C_d(i_k) \quad (11)$$

Según la ecuación anterior, la carga puede exceder la capacidad del vehículo, por lo que se debe incluir las siguientes restricciones para que la ruta sea factible:

$$L(v_k) \leq C \quad (12)$$

$$L(v_{k+1}) > C \quad (13)$$

2.2.6. **Otros Modelos**

A continuación se presenta una descripción general de otros sub-problemas que se presentan con menos frecuencia.

2.2.6.1. SDVRP – Cliente Atendido por Diferentes Vehículos

Este sub-problema de rutas es una relajación del problema VRP general, en el cual se permite que un mismo cliente sea atendido por diferentes vehículos si esto reduce el costo total. La aplicación real de este tipo de modelos se da cuando las cantidades ordenadas por los clientes son tan grandes como la capacidad de los vehículos (Dror, Laporte y Trudeau , 1-5). El cambio para transformar un VRP en un SDVRP consiste en permitir entregas separadas; esto se logra separando las entregas de los clientes en números indivisibles más pequeños (Dorronsoro , Internet).

2.2.6.2. SVRP – Existen Valores Desconocidos (Random)

Este tipo de problemas se los considera problemas estocásticos (en los cuales se desconoce algún parámetro como los clientes, la demanda, los tiempos de entrega, etc.). Cuando el número de clientes y sus ubicaciones son los parámetros desconocidos, se utiliza entonces una formulación de probabilidad en la que se menciona que se encuentran presentes con probabilidad p_i y ausentes con probabilidad $1-p_i$. En cuanto a la demanda y el tiempo de servicios puede ser modelada a través de una distribución de probabilidad. La formulación de este tipo de problemas difiere en el sentido de que al no conocer los valores reales, se debe establecer probabilidades de cumplimiento de las restricciones o penalizaciones por incumplimiento de restricciones (Laporte y Louveaux , 1-8).

2.2.6.3. PVRP – Entregas Periódicas

El modelo general de VRP considera diseño de rutas para períodos o jornadas diarias. Sin embargo el sub-problema PVRP generaliza el modelo VRP al extender el período de planeación a m días. En este caso no es necesario que el vehículo regrese a la estación el mismo día; esto dependerá de la optimización del modelo; éste se basa en la creación de grupos de rutas para cada día y así cumplir las restricciones y minimizar los costos (Dorronsoro , Internet).

2.2.6.4. VRPSF – Almacenes Móviles

Este sub-problema del VRP está siendo desarrollado cada vez más; consiste en la utilización de almacenes móviles para reabastecer a los vehículos durante el transcurso de su ruta. De esta manera se logra una jornada continua (sin regresos a la estación) logrando incrementar la productividad en las entregas (Bard, Huang y Dror , 1-4).

2.3. Métodos de Resolución de los Modelos de Asignación de Rutas

Como se mencionó en un principio, es muy diferente la teoría de la realidad en cuanto se refiere a modelar. La mayoría de los modelos presentados anteriormente podrá modelar la realidad para pequeñas empresas o situaciones

de ejemplo; inclusive tal vez se puedan representar a través de un modelo una complejidad muy grande, sin embargo, la resolución y ejecución del modelo para encontrar una solución óptima se vuelve casi imposible con la utilización de métodos tradicionales (Dorrnsoro , Internet). Es por esta razón que se investigó las diferentes metodologías que se pueden aplicar a los problemas para encontrar soluciones lo más cercanas al óptimo posible.

2.3.1. *Ant Colony System*

Se encontraron algunos trabajos que describen el problema de rutas óptimas de vehículos y lo asocian al sistema de distribución que tienen las hormigas. En especial Bullnheimer (1-8), quien basa su idea del diseño de rutas en que el problema se puede resolver a través de simulación, donde los valores objetivo corresponden a las fuentes de comida para las hormigas y la feromona que producen representa la memoria dinámica que se genera. En este algoritmo se consideran probabilidades y heurísticos en cada elemento (hormiga) que recorre la respectiva ruta. Este método de resolución se enfoca básicamente en el problema de VRP en su forma básica, es decir, con restricciones de capacidad y la existencia de un solo almacén (CVRP).

2.3.2. *Branch and Bound*

Este ejemplo es una técnica de partición y unión de vértices basado en programación lineal para resolver problemas discretos de gran escala. Esta técnica puede atacar problemas en donde las variables son dinámicas y por ende presenta la habilidad de manejar cambios en los conjuntos de vértices, sin embargo, esto presenta retos importantes el momento de la implantación (Ralphs, Kopman y Pulleyback , 1-4)

2.3.3. *Programación Basada en Restricciones*

Este método se basa en la relajación de restricciones para encontrar soluciones óptimas y partir de esto para alcanzar soluciones óptimas. La técnica explora un gran número de soluciones vecinas para remover visitas del plan de ruta e insertar otras visitas dependiendo de las restricciones que se modifiquen.

La utilización de esta técnica para resolver problemas de VRP es realmente eficaz debido a que justamente en problemas reales es en donde aparecen las restricciones que limitan la obtención de la solución óptima. Generalmente, esta técnica se utiliza para resolver problemas de CVRP (Shaw , 1-4)

2.3.4. Ramificación y Acotamiento para el VRPSF

Este es uno de los métodos más actualizados en cuanto a resolución de problemas del tipo VRPSF. El método fue desarrollado básicamente debido a la aleatoriedad que existía en la demanda. De esta manera se garantizaba que cuando se realicen cambios en la demanda, los costos no sean excesivos (Bard, Huang y Dror , 1-4). El método presenta en un inicio una formulación de programación lineal mixta y posteriormente describe una serie de inecuaciones que permiten que el problema se relaje hasta una programación lineal. Además se mencionan algunos heurísticos que se pueden utilizar para realizar la relajación. Uno de los puntos más interesantes de este estudio es que se van obteniendo soluciones factibles (tal vez no óptimas) a lo largo de todo el procedimiento de acotamiento y relajación.

2.3.5. Algoritmo Genético Híbrido Basado en Programación Dinámica

Este algoritmo presenta una excelente solución para el problema de VRPTW y VRPPD (el problema de rutas con ventanas de tiempo, capacidad y recolecciones). A pesar de que la programación dinámica ha sido utilizada para encontrar la ruta óptima para este tipo de problema, requiere de un tiempo de cómputo exponencial en relación con el número de tareas que se va a ejecutar. Por esta razón, la programación dinámica aislada fracasa en proveer soluciones factibles en tiempos reales de operación. Este algoritmo híbrido tiene la ventaja de combinar la programación dinámica con algoritmos genéticos para resolver problemas en tiempo real. El procedimiento se basa en correr una programación dinámica hasta encontrar soluciones óptimas parciales, y a partir de estas encontrar aproximaciones óptimas utilizando algoritmos genéticos (Jih y Hsu , 1-4).

2.3.6. Recocido Simulado

Este es un procedimiento para resolver el problema VRP con ventanas de tiempo y restricciones de capacidad. El algoritmo comienza asumiendo óptima cualquier solución factible. Según este procedimiento se recomienda que la solución inicial se encuentre utilizando la secuencia de “Czarnas” que no se describe en esta investigación. En cada paso del procedimiento, se determina una solución vecina basada en cualquiera de los dos parámetros siguientes (Czech y Czarnas , 1-5):

- Moviendo el mejor cliente de una ruta al mejor lugar de otra ruta (mejor en términos de costos).
- Moviendo el mejor cliente de una ruta al mejor lugar de esa misma ruta (de igual manera, se define mejor en términos de costos).

Estas rutas se escogen de manera aleatoria; las soluciones vecinas de menor costo obtenidas de esta manera son aceptadas, las soluciones de mayor costo son aceptadas con una cierta probabilidad. El algoritmo secuencial se detiene el momento que se llega a un equilibrio. Este equilibrio se alcanza en el momento en el que no se realice ningún cambio de vecindad de rutas al realizar un número δ de iteraciones. La ventaja de este método es justamente la aleatoriedad con la que se escogen las rutas; esto garantiza que el procedimiento no se quede estancado en una solución óptima local (Czech y Czarnas , 1-5).

2.3.7. Algoritmo Tabu Search

El propósito de este algoritmo es investigar un problema de “clustering” o agrupamiento para problemas de CVRP. En primer lugar el problema para encontrar rutas específicas se determina a través de un algoritmo de árboles de capacidad conjuntamente con un heurístico aplicado a la solución inicial. En esta etapa inicial se realiza un gráfico que abarque todas las rutas basados en el método de Euler. Una vez teniendo los árboles de capacidad, se eliminan nodos con el fin de obtener árboles de costo mínimo que satisfagan las necesidades de capacidad (Amberg, Domschke y Vob , 1-4).

3. METODOLOGÍA ACTUAL PARA EL DISEÑO DE RUTAS

La información para realizar esta sección, con sus respectivas subsecciones, se obtuvo en base a varias reuniones programadas con el Ingeniero de Proyectos de la regional y el Asistente de Operaciones de DHL Express durante el mes de Julio del 2008 (período durante el cual se realizó el rediseño de las rutas de DHL Express).

La metodología actual de rediseño de rutas que utiliza DHL Express se la denomina “routing productivity management” (RPM) y consiste en modificar las rutas en base a comparaciones del desempeño de cada ruta individual con estándares internacionales. El RPM se lo realiza cada 2 años aproximadamente en ciudades importantes donde se encuentra DHL Express y su duración es de aproximadamente una semana por ciudad. Como resultado, el RPM busca establecer las rutas (zonas) que se recorrerán en el día a día de la operación de la Empresa.

A continuación se describe cómo se realiza el levantamiento de información de las rutas (clientes), los sistemas de información que utilizan (al igual que las restricciones que estos presentan), el procedimiento para ajustar las rutas y el actual desempeño de las mismas.

3.1. Levantamiento de Información

Para el levantamiento de la información se recurrió al apoyo de todos los couriers durante un mes (Julio 2008). Cada courier estaba encargado de anotar cada dirección en donde realizaba una entrega. De todas las direcciones que se recopilaron en el mes, se escogieron aquellas del día más representativo para ingresarlas al sistema. En base a la experiencia del Departamento de Operaciones, se estableció que día representativo sería aquel en donde la demanda no haya sido muy alta ni muy baja en el mes.

Posterior al levantamiento de datos, se realizó el ingreso de datos en un software de información geográfica que será descrito más adelante. El ingreso se realizó de manera manual. Los clientes de cada ruta se mapearon y codificaron (georeferenciaron) para obtener un despliegue de las coordenadas en una tabla unificada.

3.2. Sistemas de Información

Actualmente, DHL Express maneja varios sistemas, entre los que se pueden mencionar, sistemas para coordinación de pedidos, facturación, coordinación de horarios, entre otros. El sistema de interés para el presente trabajo es el que está ligado a los pedidos, entregas y trazabilidad de las órdenes. Por otro lado, DHL Express apoya sus operaciones en un software de información geográfica llamado MapInfo® desarrollado por MapInfo Corporation. A continuación se describe en qué consiste cada una de estas herramientas.

3.2.1. Sistema SIS

El sistema de control de pedidos y trazabilidad de órdenes (SIS), se maneja con el apoyo de escáneres personalizados (cada courier y los supervisores respectivos cuentan con un escáner). Una orden se escanea varias veces durante el proceso de entrega de acuerdo a las etapas en las que se encuentre (arribo a la estación, en ruta, entregado). Los escáneres están ligados al sistema y a su vez a una página Web. De esta manera los clientes pueden ingresar a la página Web e identificar el estado de su orden. Entre las ventajas que este sistema presenta, se encuentran las siguientes:

- Trazabilidad de la orden
- Visibilidad de la orden
- Mejor gestión de reclamos
- Automatización en el control y registros de la orden

Sin embargo, a pesar de poseer algunas ventajas, el sistema presenta algunas debilidades debido a factores externos que se deben considerar para el problema de ruteo. Algunos de los problemas se mencionan a continuación.

Actualmente, en el Distrito Metropolitano de Quito, no existe una nomenclatura estandarizada y completa para las calles y avenidas. Esto impide que la orden que arriba a los establecimientos de DHL Express esté ligada, a través del sistema, a una dirección específica. De esta manera, el momento que las órdenes arriban a la estación, se les asigna una ruta de manera manual.

Además, una vez que se determina la asignación de las órdenes a las rutas, el orden de entrega se establece en base a la experiencia y criterio del courier.

Además, el proceso de clasificación y ordenamiento de las órdenes de cada ruta demora aproximadamente una hora (alrededor del 15% del tiempo productivo para realizar las entregas). Esto último refleja que el sistema tiene una capacidad potencial alta para mejorar en términos de optimización de tiempo.

3.2.2. Software MapInfo®

En segundo lugar, DHL Express cuenta con un software, MapInfo®, que se utiliza para identificar la ubicación exacta de sus clientes más frecuentes y para gestionar las entregas y recolecciones durante toda la jornada de trabajo. En este software se ha cargado un mapa completo del Distrito Metropolitano de Quito donde se especifican las manzanas, calles y avenidas con su respectivo sentido y vías de acceso. El software se alimenta de una base de datos en donde se encuentran todas las especificaciones de los clientes (incluyendo las coordenadas); información que es utilizada para su respectiva ubicación en el mapa desplegado por el software.

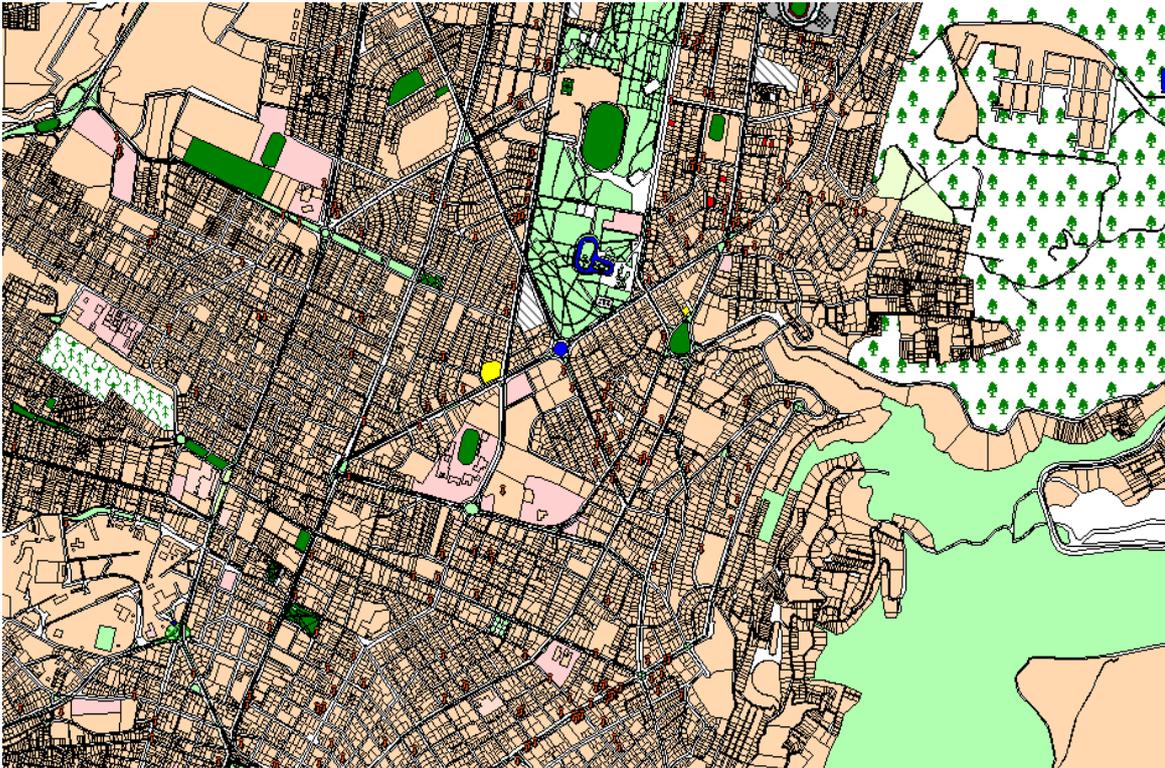
MapInfo® posee una herramienta característica que es el ruteador. Esta herramienta se alimenta de las coordenadas de los clientes y despliega la ruta óptima para visitar a los clientes. La ventaja de la herramienta es que calcula la ruta óptima en base a las distancias (coordenadas de los clientes), y restricciones geográficas que se presentan en la realidad; se consideran los sentidos de las vías y los accesos a dichas vías. Sin embargo, el ruteador no incluye en absoluto las siguientes restricciones:

- Tráfico en las vías
- Tiempo de la ruta
- Capacidad de los couriers (carga, tiempo, recorrido)
- Cantidad de semáforos en la ruta
- Límites de velocidad/ velocidad variable de los vehículos
- Ventanas de tiempo para realizar las entregas
- Paradas usuales/inusuales

Por otro lado, es importante mencionar que el ruteador no crea rutas, es decir, no agrupa clientes en varias rutas automáticamente. La herramienta necesita ser alimentada manualmente, es decir, se debe establecer para qué clientes se va a calcular una ruta óptima. Por ejemplo, si se desea determinar una ruta óptima para un total de 150 clientes de DHL Express, el ruteador determina el camino (ruta) que se debería seguir sin tomar en cuenta las restricciones antes mencionadas. En definitiva, el software (MapInfo®) no realiza ningún tipo de “clustering” (agrupamiento de clientes).

Un problema importante que se presenta es que el software no se encuentra atado de ninguna manera a las operaciones de la Empresa. Actualmente, el software se utiliza sólo como una guía para los couriers en caso de necesitar ayuda al momento de ubicar a un cliente (problemas con las direcciones). Además, el software se alimenta de manera manual; se colocan los clientes en base a las direcciones que se encuentran documentadas, sin embargo, no está integrado al sistema de escaneo que utiliza el personal operativo.

Finalmente, es importante describir el funcionamiento básico de MapInfo®. En primer lugar, la información se recibe en tablas. Luego, el MapInfo® despliega su información por capas, es decir, cada tabla que se ingresa se representa en una capa diferente. La superposición de capas (o tablas) es el resultado final que se desearía obtener. Específicamente para el propósito de la tesis, diseño de rutas, el MapInfo® consta de las siguientes tablas: tablas para representar las calles, tablas para representar las manzanas y tablas para representar los clientes (Figura 1). Por lo tanto, la superposición de todas las tablas va a dar el resultado deseado.



Fuente: MapInfo® Software DHL Express

Figura 1. Representación de Quito en MapInfo®

3.3. Procedimiento de Ajuste de las Rutas

En primer lugar, utilizando las vistas de MapInfo®, se establecen los límites de las rutas actuales; se determinan las zonas y calles que abarca cada ruta. DHL Express maneja un indicador del número de paradas de la ruta por hora (Sphour). Entonces, mediante información del sistema SIS, se compara el Sphour de la ruta, para el día más representativo (antes establecido), con los estándares internacionales (fijados en base a datos históricos mundiales).

En caso de que el indicador sea menor que el estándar, se considera la ruta para una ampliación de su zona y, en conjunto con los Supervisores de Operaciones, se toma la decisión final. Por otro lado, en caso de que el indicador sea mayor que el estándar, se reducirá el alcance de la ruta. De esta manera se realiza el ajuste a todas las rutas. Por ejemplo, asumiendo que el estándar de una camioneta está fijado en 7 paradas (entregas) por hora, y su ruta en promedio posee 40 clientes (para la jornada de entregas AM), se determina que existen más clientes de los que se pueden atender en una jornada AM de 4 horas en ruta. Entonces, la ruta se rediseña quitándole un determinado sector. El procedimiento

concluye con la determinación de aumentar o reducir el número de rutas que se poseen.

3.4. Evaluación del Desempeño Actual en las Rutas

El indicador más relevante que utiliza DHL Express para medir el desempeño de las rutas es el Overtime. A este indicador se lo ha establecido como el porcentaje de entregas realizadas pasadas las 12PM. El indicador se encuentra actualmente en 28%. El área de Operaciones ha considerado que este valor de Overtime es aceptable para DHL Express Quito, dado la cantidad de couriers que poseen. Por otro lado, la sede regional de DHL Express presiona en reducir el indicador a la vez que limita la cantidad de recursos para hacerlo; la sede regional de DHL Express es la encargada de autorizar cualquier ingreso de personal en la nómina.

Finalmente, es importante mencionar que debido a que los promedios pueden no ser representativos para el lugar o condiciones geográficas de cada sector, para efectuar un rediseño en la ruta (asignar o quitar sectores), se requiere de la aprobación del Supervisor de Operaciones (el cual conoce la situación actual del tráfico y condiciones adicionales de las rutas).

Se puede determinar entonces, que la tasa de entregas por hora de un vehículo sirve de guía para rediseñar la ruta, sin embargo, la decisión final se toma en base al criterio del Supervisor de Operaciones. Esto revela que, a pesar de que existe un método estructurado de diseño de rutas, éste es en su mayor parte empírico (basado en criterios del Supervisor de Operaciones con una guía en la tasa de entrega de los vehículos).

3.5. Descripción del Proceso Inbound

El proceso operativo de ruteo, es decir, las actividades que se realizan día a día para abastecer la demanda de las rutas, se describe a continuación en base a la información proporcionada por el Supervisor de Operaciones Inbound de DHL Express. El proceso inicia con el arribo del material a la estación de DHL Express Quito y finaliza con la llegada de los couriers a la estación después de concluidas todas las entregas y recolecciones. El arribo del material ocurre a diferentes

horarios en la mañana; los paquetes de Guayaquil llegan a las 6:00 AM, de Ibarra y el resto del país a las 5:00 AM y los internacionales a las 11:00 AM. A las 7:00 AM empieza la clasificación del material (excepto internacional) para ser distribuido a las diferentes zonas de la ciudad de Quito y sus alrededores. La clasificación la realiza el grupo de turno (que varía cada semana), en base a las rutas establecidas; el grupo de turno clasifica los paquetes y documentos en anaqueles para cada ruta. A las 9:00 AM, todos los couriers arriban a la estación y clasifican su anaquel de acuerdo al orden en el que estiman que van a realizar sus entregas. A continuación, los couriers escanean sus paquetes en el mismo orden que se estableció previamente e imprimen un documento (POD) que sirve como prueba al momento de realizar la entrega. Una vez realizado este proceso, los couriers realizan las entregas programadas.

Debido al conflicto en los horarios de llegada del material internacional (11:00 AM), se ha designado a un grupo de couriers para que regresen a la estación a clasificarlo. Entonces, al mediodía, todos los couriers realizan una parada en la estación para recoger el material internacional. Durante la tarde, los couriers continúan realizando entregas así como recolecciones de paquetes y documentos. Finalmente, arriban a la estación para presentar el POD e ingresar los datos al sistema.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE RUTAS

4.1. Determinación de Modelos de Ruteo Aplicables

El objetivo del presente trabajo es presentar una alternativa para el modelamiento de las rutas de DHL Express Quito que brinde soporte al sistema actual. A continuación se describen los algoritmos que fueron tomados en cuenta y se determina aquellos que van a ser utilizados en la metodología propuesta.

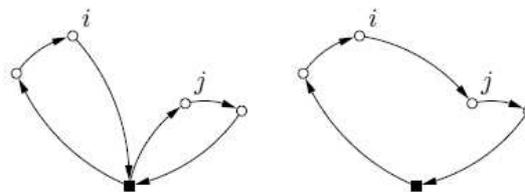
4.1.1. Algoritmos Clásicos

Los algoritmos clásicos que se consideraron son: el algoritmo de ahorros y la heurística de barrido. A continuación se detalla en qué consiste cada uno.

4.1.1.1. Algoritmo de Ahorros

Uno de los algoritmos más difundidos para problemas de VRP es el algoritmo de “ahorros” propuesto por Clarke y Wright (Oliveira, 10). El algoritmo de ahorros considera que dos rutas pueden juntarse si es que esto representa un ahorro en el costo.

Suponer que se tiene dos rutas diferentes representadas como $(0, \dots, i, 0)$ para la ruta 1 y $(0, \dots, j, 0)$ para la ruta 2 como se presenta en la Figura 2.



Fuente: Oliveira (10)

Figura 2. Dos Rutas Antes y Después de Ser Unidas

Entonces el ahorro obtenido por esta unión es:

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (14)$$

El algoritmo originalmente parte de una solución inicial, la cual, en este caso, se va a considerar asignar una ruta a cada cliente. Inicialmente, el algoritmo realiza los cambios que más ahorro representen siempre que no se violen las restricciones (capacidad, tiempo en ruta, número de vehículos, etc.) (Oliveira, 10).

Es importante tener en cuenta lo que sucede al momento que el máximo ahorro resulta negativo. En ese caso, será necesario evaluar, según la naturaleza del problema, si es conveniente aumentar la distancia recorrida y reducir el número de rutas en términos de costos (Olivera, 10).

4.1.1.2. Heurística de Barrido

El método de barrido es utilizado para generar grupos (clusters) de clientes girando una semirecta con origen en el depósito e incorporando los clientes “barridos” por la semirecta hasta que se viole la restricción de capacidad (Olivera, 16). Posteriormente, se procede a rutear cada cluster individualmente utilizando técnicas del agente viajero (TSP) (Olivera, 16). Sin embargo, para el caso de DHL Express, se utilizará el ruteador del MapInfo® para realizar las rutas.

Una gran ventaja del método de barrido es que por la manera en que se generan los clusters, las rutas nunca se superponen (Olivera, 16). Sin embargo, existen procedimientos que modifican ligeramente las rutas al eliminar clientes de las rutas generadas para esperar que estos clientes sean barridos por otras rutas (entonces las rutas podrían traslaparse).

4.1.2. Algoritmos Modernos

Adicionalmente, se han considerado dos algoritmos modernos: el algoritmo de k-means y el algoritmo de Dijkstra. Estos algoritmos se consideran modernos debido a sus aplicaciones en los diferentes campos de la ciencia. Por ejemplo, el algoritmo de k-means (algoritmo de clustering) se utiliza para realizar análisis de expresión genética (de Hoon, Imoto y Miyano, 1). Similarmente, el algoritmo de Dijkstra tiene aplicaciones en diversas áreas como son: lenguaje, tráfico aéreo, funciones económicas, minado de datos, entre otras (Sánchez y Lozano, 3-4). Estos algoritmos se describen a continuación.

4.1.2.1. K-means

El método de k-means consiste en asignar clientes a grupos (clusters) e iterar para encontrar la solución con el menor costo (siendo el costo proporcional a las distancias entre los clientes) (de Hoon, Imoto y Miyano, 10-14). Las

iteraciones consisten, primeramente, en encontrar los centroides de cada grupo (cluster) (de Hoon, Imoto y Miyano, 14-16). Posteriormente, se calculan las distancias de cada cliente a los centroides (clusters) y se determina cuál es el centroide más cercano para un cliente determinado, entonces ese cliente pertenecerá a ese cluster (centroide) (de Hoon, Imoto y Miyano, 14). En seguida, se asigna los clientes a los grupos y se recalculan los centroides. Se continúa iterando hasta que no exista una reasignación de los clientes a diferentes clusters (de Hoon, Imoto y Miyano, 13).

Es importante mencionar que el algoritmo k-means (centroides determinados por la media) depende de la solución inicial que se plantea (de Hoon, Imoto y Miyano, 13).

4.1.2.2. Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra es un tipo de algoritmo utilizado para encontrar las distancias más cortas entre determinados puntos que pertenecen a una zona. Dada una zona (cluster), se define el camino de costo mínimo de un punto u a un punto v que pertenecen a la zona, como el camino donde la suma de los pesos de los posibles caminos que los unen es la más baja (considerando todos los caminos posibles) (Sánchez y Lozano, 1). A continuación se describe cómo funciona el algoritmo.

Para una ruta (un conjunto de clientes), se determina el mínimo de los tiempos desde el centro de distribución hacia los clientes de la ruta, y se escoge al cliente con el tiempo mínimo como el primero en la ruta. Ahora, desde el cliente previamente escogido se establecen los tiempos hasta el resto de clientes, y se escoge el cliente con el tiempo de traslado mínimo. Se sigue escogiendo de esta manera los clientes hasta que se han escogido todos los de la ruta (Sánchez y Lozano, 1).

4.1.3. Determinación de los Algoritmos a Utilizar

Según Byung-In, en su artículo "Balanced Clustering Algorithms for Improving Shapes on Vehicle Routing Problems", que una solución sea atractiva visualmente es un criterio importante en muchas aplicaciones prácticas del VRP

ya que este atractivo visual depende de dos factores principales: la manera en cómo están agrupados los clientes y en qué grado las rutas se superponen entre ellas (1). Al aplicar los algoritmos clásicos (Algoritmo de Ahorros y la Heurística de Barrido) para tratar de resolver el problema planteado, se evidenció que las soluciones encontradas no eran atractivas visualmente. Por esta razón, estos algoritmos no se desarrollaron más a profundidad.

Por otro lado, el algoritmo de k-means y el de Dijkstra han sido utilizados en aplicaciones modernas para resolver problemas prácticos de VRP (Sánchez y Lozano, 3-4); y, por lo tanto, van a utilizarse como parte del análisis de la metodología propuesta para el diseño de rutas de DHL Express.

4.2. Método de Ruteo Propuesto

El método de ruteo propuesto está conformado por dos componentes principalmente: un componente sistemático y un componente empírico. A continuación se describe brevemente en qué consiste cada componente, así como las consideraciones especiales del método propuesto.

4.2.1. Componente Sistemático

El componente sistemático se refiere a la parte del método que se cuantifica con exactitud (basados en datos y estimaciones). Esto comprende las coordenadas de los clientes del Distrito Metropolitano de Quito (distancias entre clientes), el tiempo en ruta por cada vehículo (jornada de trabajo AM) y el número de rutas para suplir la demanda.

4.2.2. Componente Empírico

El componente empírico se refiere a los parámetros del método que se establecerán en base a la experiencia y conocimiento de los couriers y sus respectivos supervisores. Estos parámetros son los siguientes:

- Estimaciones de tráfico en zonas representativas
- Tiempo promedio de traslado entre clientes en diferentes sectores
- Tiempo promedio de servicio al realizar la entrega
- Velocidad promedio de traslado en las rutas

En base a los dos componentes (sistemático y empírico), se desarrolló un método para el diseño de las rutas de DHL Express. En la sección 4.3 se presenta en detalle el método y la adaptación a las condiciones de DHL Express.

4.2.3. Consideraciones Especiales del Método

Los algoritmos descritos anteriormente en la sección 4.1 sólo toman en consideración las distancias que existen entre los clientes de cada ruta. Sin embargo, el método que es parte de esta propuesta, de manera integral considera adicionalmente, la velocidad de traslado en una determinada ruta, los tiempos de traslado entre clientes, aspectos del tráfico de acuerdo a las zonas y tiempos de servicio a los clientes para que las rutas no excedan el límite de tiempo (determinado por la jornada de entrega AM).

4.3. Adaptación del Método a la Empresa

De manera general, el método propuesto consiste en agrupar (cluster) clientes en rutas tomando en consideración los tiempos de traslado que existen entre los clientes para que una ruta no exceda su tiempo máximo de 4 horas (jornada AM). Los tiempos de traslado están asociados a la distancia entre los clientes, velocidad promedio a la que el courier se traslada en determinada ruta, el tráfico en determinada zona y el tiempo que se demora un courier en atender al cliente (tiempo de servicio).

Antes de explicar en detalle en qué consiste el método, es necesario estimar los parámetros clave (previamente establecidos en el apartado 4.2) y describir brevemente las herramientas que se podrían utilizar para desarrollarlos. Estos puntos se presentan en las siguientes tres secciones.

4.3.1. Estimación de Parámetros

En el apartado 4.2 se mencionaron los puntos que se considerarán en el método. A continuación se definen estos parámetros.

4.3.1.1. Distancia Entre Clientes

Se consideró que para el cálculo de la distancia se van a utilizar dos representaciones: la distancia Euclideana y la distancia Rectilínea.

De acuerdo a Bailey, la distancia Euclideana es considerada la mínima distancia entre dos puntos y por lo tanto servirá de cota inferior para el método (1). Por otro lado, la representación Rectilínea (“distancia Manhattan”) es una aproximación más real al problema de ruteo y asignación de clientes ya que representa los movimientos horizontales y verticales necesarios para viajar entre dos clientes (Bailey, 1).

La distancia Euclideana está definida de la siguiente manera (Bailey, 1):

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (15)$$

En donde d es una medida de distancia bidimensional. La ecuación (15) adaptada al problema de ruteo se modifica de la siguiente manera:

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (16)$$

En donde el cliente i está ubicado en las coordenadas globales (x_i, y_i) y el cliente j en las coordenadas globales (x_j, y_j) , d representa la distancia entre los clientes.

La medida de distancia Rectilínea está definida de la siguiente manera (Bailey, 2):

$$d = |x| + |y| \quad (17)$$

De igual manera, al adaptar la medida de distancia al problema de ruteo, la ecuación 17 se convierte en lo siguiente:

$$d_{i,j} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (18)$$

En donde d es la distancia Rectilínea entre dos clientes con coordenadas globales (x_i, y_i) y (x_j, y_j) .

A partir de las coordenadas de los clientes se debería construir una matriz de distancias rectilíneas la cual será un parámetro importante para realizar los cálculos de los tiempos en ruta posteriormente.

4.3.1.2. Matriz de Pesos

Basados en la relación básica que existe entre distancia, velocidad y tiempo (velocidad promedio = desplazamiento / tiempo) (Serway and Jewett , 21), se determinó la necesidad de una ecuación que represente al tiempo entre clientes considerando, la distancia entre ellos, el tráfico existente por zona y el tiempo de servicio a cada cliente. Así entonces se desarrolló una ecuación que comprende tres componentes principalmente: un tiempo estándar, un componente de tráfico y un componente de servicio como se muestra a continuación:

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v} + tr + \delta \quad (19)$$

En donde d_{ij} representa la distancia rectilínea entre el cliente i y el cliente j , tr es el componente de tráfico, y δ es el componente de servicio. Es entonces que t_{ij} representa el tiempo total desde que el courier llega al cliente i hasta que se produce el arribo al cliente j .

El parámetro v de la ecuación (19) representa la velocidad promedio a la que se viaja en ruta. Este parámetro debería establecerse mediante un análisis estadístico a partir de una recolección de tiempos de traslado entre clientes en distintas zonas. Para aplicar, a manera de ejemplo, la metodología que se propone, se ha llegado a establecer en base a la experiencia de los couriers de DHL Express, que esta velocidad es de 15 kilómetros por hora.

El factor d_{ij} dividido para v (constante), representa un tiempo estándar sobre el cual se actuará para determinar el tiempo total en ruta.

El componente de tráfico (tr) se debería calcular en base a las zonas en donde se ubican los diferentes clientes. Es entonces que para la aplicación actual se definieron ciertas zonas críticas, en cuestiones de tráfico, a las cuales se les asignó un parámetro (peso). El peso se definió, de igual manera como la velocidad, en base a la experiencia de los couriers y supervisores al realizar las entregas por determinados sectores. La escala utilizada fue de 0 a 1, siendo 0 el menor tráfico y 1 el mayor tráfico (este componente va a representar tanto el tráfico de la zona como la accesibilidad a la misma). La asignación de los pesos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de Tráfico en Base a Zonas

Sector	Parámetro
Panecillo (Centro)	0.8
República del Salvador	0.7
El Bosque	0.6
Aeropuerto	0.4
Quito Norte	0.3
Quito Sur	0.2
Otro	0.4

En la implementación de esta metodología, estos parámetros deberían ser determinados a partir de una evaluación de ciertos factores como el número de carriles de las vías, el ancho de la vía, si son de unidireccionales o de doble sentido, regulaciones de parqueo, volumen de tráfico, número de semáforos, número de señales de Pare y la calidad del asfalto (Ghiani, Laporte, Musmanno, 251).

Luego de establecer los parámetros, se debe realizar una regresión para determinar la relación entre los parámetros y el componente de tráfico del tiempo total. Para esto se deben estimar los tiempos de traslado de los couriers en las distintas zonas (entre dos clientes) y a este tiempo se le debe restar el componente de tiempos de traslado estándar. Con esto se aislaría el componente del tiempo que pertenece al tráfico. Debido a que el tiempo total entre dos clientes $t_{i,j}$ involucra dos parámetros (un parámetro de cada cliente), se debería utilizar el promedio de ambos parámetros para establecer la relación con el componente de tráfico del tiempo total tr .

Para la aplicación de la metodología propuesta se estimaron los tiempos totales de traslado entre varios clientes en distintas zonas, y a partir de estos, se llevó a cabo una regresión con la cual se obtiene lo siguiente:

$$tr = 0.0398 * \text{promedioParámetros} \quad (20)$$

Finalmente, se debería introducir un componente del tiempo de servicio en el tiempo total representado por delta (δ). El tiempo de servicio es el tiempo que toma a un courier desde que llega a la ubicación de un cliente hasta que la abandona. Este componente se obtendría mediante un análisis estadístico de los tiempos de servicio que deberían ser recolectados por los couriers de DHL

Express. Para la aplicación que se está llevando a cabo, la constante de tiempo de servicio se fijó en 5 minutos basados en la información obtenida por el área de Operaciones en cuanto a los tiempos de servicio reportados por los couriers.

En conjunto, el tiempo estándar, el tiempo de tráfico y el componente de servicio establecen el tiempo total entre clientes. A partir de esta información, se puede establecer una matriz de tiempos que se debería utilizar en la determinación de los clusters.

4.3.1.3. Matriz de Tiempos

La matriz de tiempos se obtiene de la relación que se planteó en la ecuación (19). Sin embargo, es importante aplicar un factor de corrección a la ecuación (19) debido a que la matriz de distancias se encuentra en un sistema de coordenadas globales (longitud y latitud), y para la obtención de los tiempos, se necesitan las distancias en kilómetros (unidades métricas). El factor de conversión es 1 grado decimal = 111 kilómetros (RASC Calgary Centre, Internet).

En conclusión, la ecuación 19 se modifica como sigue:

$$t_{i,j} = 111 \frac{d_{i,j}}{v} + tr + \delta \quad (21)$$

4.3.2. **Herramientas Utilizadas**

Para desarrollar el método y aplicar los modelos propuestos, se escribió un código en el lenguaje de programación Java® con el fin de desarrollar una aplicación que resuelva el problema de ruteo. Este lenguaje de programación es un lenguaje orientado a objetos, es decir, presenta mayor facilidad, comparado con otros lenguajes de programación, en representar gráficamente los resultados obtenidos.

Adicionalmente, la información de los clientes se almacenó en una base de datos (MySQL®). La base de datos contiene información sobre las coordenadas de cada cliente, así como los parámetros de los clientes por zona. Por último, se utilizó Microsoft Excel® y Minitab® para realizar los cálculos de los parámetros que determinan el componente de tráfico en el tiempo de la ruta y para determinar la constante de proporcionalidad descrita en la sección anterior.

Adicionalmente, el código en Java® despliega una interfaz gráfica en donde se pueden apreciar de mejor manera los resultados obtenidos. A pesar de eso, la intención no es utilizar el software como herramienta visual, por lo que el código escrito también genera tablas con los clientes de las rutas (una tabla por ruta que consta de las coordenadas de los clientes). Al tener las tablas en archivos de Microsoft Excel®, se pueden importar fácilmente a MapInfo® para visualizarlos ahí y con el ruteador de MapInfo®, obtener la ruta a seguir.

4.4. Aplicación del Método K-means

4.4.1. Procedimiento

En primer lugar, como se mencionó en el apartado 3.1 (Levantamiento de Información), las coordenadas de los clientes se agruparon en una tabla unificada. Los datos de las coordenadas se ingresaron en la aplicación Java® y se corrió el algoritmo de k-means (desarrollado en base a código fuente) variando el número de clusters que se pretendían formar hasta encontrar una solución aceptable (en términos de tiempo en ruta). Tal como se mencionó en la delimitación del problema bajo estudio (capítulo 1), el tiempo en ruta de los couriers no puede exceder las 4 horas (la ruta AM se lleva a cabo desde las 9:00 hasta las 13:00). Además, en la aplicación del método a la situación de DHL Express se busca una solución en la que los tiempos de las rutas sean lo más cercanos a la jornada de cuatro horas, es decir se busca una baja variabilidad en los tiempos de recorrido de los couriers con el fin de que cada uno de ellos tenga una carga de trabajo balanceada. El método asume que cada grupo (cluster) será equivalente a una ruta y por lo tanto será satisfecho por un courier. El procedimiento se describe paso a paso a continuación.

Siendo K = número de clusters (K inicial es 1), se tiene:

Paso 1: Ingresar las coordenadas al programa (matriz de distancias)

Paso 2: Correr el algoritmo k-means para K número de clusters

Paso 3: Validar la solución haciendo uso de la matriz de tiempos; si la solución es válida terminar el algoritmo, de lo contrario realizar el paso 4.

Paso 4: Aumentar K en 1 y volver al paso 2.

El método, en el paso 3, valida la solución encontrada con el tiempo real que un courier puede estar en ruta; para valores pequeños de K , los grupos resultantes (rutas resultantes) van a violar la restricción de tiempo debido a que no se podrán satisfacer en una jornada de 4 horas (jornada AM previamente establecida). La validación de los clusters se realiza utilizando el algoritmo de Dijkstra descrito anteriormente.

Para el establecimiento de los centroides iniciales se realiza un cálculo matemático para distribuirlos uniformemente a lo largo de una diagonal que cubre toda el área en donde se encuentran los clientes.

4.4.2. Discusión y Análisis de los Resultados

Al iniciar y correr el programa con el algoritmo k-means, se pudo observar varios limitantes. A continuación se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos y las restricciones encontradas.

Los resultados de los tiempos de los clusters (tiempo de la ruta) cuando K (número de clusters) es igual a 16, 23 y 30 se presentan en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4 respectivamente.

Tabla 2. Resultados Obtenidos para el Método k-means $K=16$

Cluster	Tiempo de la Ruta (horas)	Cluster	Tiempo de la Ruta (horas)
1	5.085	9	3.867
2	3.547	10	2.791
3	7.573	11	5.061
4	6.145	12	4.092
5	4.855	13	5.771
6	2.536	14	4.808
7	3.821	15	4.654
8	12.546	16	3.472
		Total	80.622

Tabla 3. Resultados Obtenidos para el Método k-means $K=23$

Cluster	Tiempo de la Ruta (horas)	Cluster	Tiempo de la Ruta (horas)
1	1.917	13	4.917
2	7.196	14	2.166
3	2.504	15	2.536
4	6.277	16	2.946
5	3.026	17	3.578
6	3.333	18	3.428
7	2.464	19	4.051
8	3.516	20	3.910
9	3.459	21	3.547
10	5.992	22	2.776
11	4.324	23	2.996
12	3.473	Total	84.333

Tabla 4. Resultados Obtenidos para el Método k-means $K=30$

Cluster	Tiempo de la Ruta (horas)	Cluster	Tiempo de la Ruta (horas)
1	6.391	16	2.996
2	1.897	17	3.473
3	3.082	18	1.857
4	5.113	19	2.461
5	2.946	20	2.452
6	2.526	21	2.142
7	2.513	22	3.589
8	3.844	23	4.081
9	2.536	24	3.334
10	3.547	25	1.937
11	4.877	26	2.003
12	6.327	27	2.139
13	2.560	28	2.262
14	2.441	29	1.792
15	2.349	30	2.443
		Total	91.907

A continuación en la Tabla 5 se presenta un resumen estadístico de los resultados mostrados en las tres tablas anteriores con el fin de llevar a cabo un análisis de la aplicación del método k-means.

Tabla 5. Resumen Estadístico de los Resultados

Cluster	K=16	K=23	K=30
Promedio (horas)	5.039	3.667	3.064
Des. Estándar (horas)	2.374	1.327	1.231
Varianza (horas cuadradas)	5.636	1.761	1.515
CV	0.471	0.362	0.402
Rango (horas)	10.011	5.279	4.599
Mínimo (horas)	2.536	1.917	1.792
Máximo (horas)	12.546	7.196	6.391
Total (horas)	80.622	84.333	91.907

De los resultados obtenidos, en primer lugar, se descarta la opción de realizar 16 clusters, debido a que la media para este caso (5.039 horas), es mayor que el límite establecido de 4 horas para el tiempo en ruta en el periodo AM. Por otro lado, a pesar de que la media para los clusters cuando $K=23$ y $K=30$ es menor que 4 horas, existen rutas con tiempos que exceden de igual manera el límite de 4 horas. Esto se evidencia en que el valor del rango para ambos casos es demasiado grande. Por ejemplo, no sería admisible que existan rutas de 7 horas y otras de 2 horas ($K=23$ con rango de 5.28 horas) o rutas de 6 horas y otras de 2 horas ($K=30$ con rango de 4.6 horas), debido a que esto implicaría couriers con cargas de trabajo no balanceadas e incumplimiento de la restricción de 4 horas en ruta. Por lo tanto, utilizar este método para modelar los clusters de DHL Express no resulta adecuado. En las siguientes secciones se plantean las restricciones que se evidenciaron al aplicar el algoritmo de k-means.

El principal problema al utilizar el algoritmo de k-means es que los resultados que se obtienen dependen drásticamente de la solución inicial, es decir, de la ubicación de los centroides iniciales (de Hoon, Imoto y Miyano, 11). Por otro lado, el algoritmo requiere el número de clusters que se van a formar. Ambas restricciones se encuentran concatenadas ya que si se requiere más clusters, se necesitará reubicar todos los centroides nuevamente.

A continuación se presenta un análisis de las restricciones mencionadas para lograr esclarecer la complejidad del problema y lograr obtener una solución.

4.4.2.1. Restricción de una Solución Inicial

La determinación de una solución inicial adecuada resulta sumamente compleja debido a que no se tiene una referencia específica sobre la cual basarse para realizar la construcción de dicha solución. Además, la solución inicial dependerá de las condiciones geográficas del sitio así como de factores de densidad de clientes (de Hoon, Imoto y Miyano, 11). A pesar de que existen varios algoritmos de inserción de clientes que pueden ser utilizados para determinar la solución inicial, la siguiente restricción verifica que el algoritmo de k-means no es una solución viable para lograr determinar los clusters (Byung-In, Seongbae y Surya , 2).

4.4.2.2. Restricción del Número de Clusters

En un principio, durante el planteamiento del problema se establece que se quiere determinar el número de clusters necesarios para cubrir la demanda de DHL Express. Sin embargo, una entrada para el algoritmo k-means es el número de clusters que se quiere realizar. En principio, la idea de aplicar k-means no era errónea debido a que se pensaba incrementar el número de clusters hasta encontrar una solución cercana al óptimo. El problema que se presentó fue el hecho de tener una alta variabilidad en los tiempos de las rutas (lo que impide evaluar cuándo una solución estaría cerca al óptimo). Se podrían aplicar algoritmos de mejora que reducen la variabilidad de los tiempos de los clusters (Byung-In, Seongbae y Surya , 4), sin embargo, el problema es balancear los clusters mientras que a la vez se incrementa su número hasta encontrar una solución cercana al óptimo.

Por otro lado, el método k-means no ofrece un control total sobre el cumplimiento de la restricción del tiempo en ruta (4 horas). Al correr el algoritmo varias veces, para diferentes K's, se debe escoger el que más cercano a 4 horas se encuentre, es decir, es un procedimiento manual.

4.5. Elaboración de un Nuevo Algoritmo

Una vez determinadas las restricciones que presenta el algoritmo de k-means en cuanto a la representación de la realidad y dificultad de programación,

se pretende crear un nuevo algoritmo que considere los aspectos mencionados en las secciones anteriores.

4.5.1. Ideas Claves para el Desarrollo del Nuevo Algoritmo

El principio del Nuevo Algoritmo que se propone es evaluar el tiempo de la ruta de manera dinámica; asignando clientes uno por uno, y para cada asignación evaluando el tiempo en ruta. Si con una nueva asignación, el tiempo de la ruta excede las 4 horas, entonces se debe establecer el cluster hasta la asignación anterior; así se garantiza el total cumplimiento de la restricción del tiempo en ruta. Este algoritmo no toma en cuenta la capacidad de los vehículos, sin embargo, es un parámetro que se podría incluir posteriormente de la misma forma como se evalúa el tiempo.

Además, el algoritmo propuesto en este punto, se basa en la asignación de clientes a zonas, lo cual resulta ser equivalente a agrupar los clientes en clusters como se realizaba anteriormente, pero debido a la manera en la cual se implementa el mismo, se hace necesario establecer esta distinción.

4.5.2. Descripción del Nuevo Algoritmo

El algoritmo empieza identificando el cliente más lejano al centro de distribución de DHL Express (para explicar el algoritmo a este cliente se lo denominará como el más lejano). Partiendo del más lejano, se identifica el cliente más cercano a este y se establece una zona inicial (de igual manera, al cliente más cercano se lo llamará el más cercano). Si los clientes de la zona cumplen con la restricción del tiempo en ruta, entonces se busca el siguiente cliente. El siguiente cliente que se asigna a la zona es el cliente más cercano al más lejano que no se encuentre en la zona previamente establecida. Mientras la restricción del tiempo en ruta no se viole, se siguen asignando clientes a la zona. Una vez que se viole la restricción, se establece un nuevo cliente más lejano, que viene a ser el siguiente cliente más lejano al centro de distribución que no está en la zona definida anteriormente. De esta manera se sigue iterando hasta que no existan clientes sin ser asignados a una zona. A continuación se describe en detalle el procedimiento y el establecimiento de las zonas

4.5.2.1. Establecimiento de la Zona

En el establecimiento de la zona de entrega para un courier, el primer paso es establecer el cliente más lejano a DHL Express. Luego de haber determinado el cliente más lejano (Punto A), se debe establecer el cliente más cercano a este último (Punto B). En el momento en que se establece el cliente más lejano, es importante determinar el cuadrante en el que este se encuentra, siendo el centro de distribución de DHL Express el origen, para con esta información poder establecer la zona inicial de agrupamiento, debido a que, siendo este el punto más lejano, en la mayoría de los casos, el resto de clientes estarán localizados espacialmente hacia el centro de distribución. Por ejemplo, suponiendo que el Punto A en la Figura 3, se encuentra en el primer cuadrante con respecto a DHL Express, entonces la zona inicial debe ser creada hacia abajo y a la izquierda (como se muestra en la Figura 3). Si el Punto A (cliente más lejano) pertenece al tercer cuadrante la zona debe construirse hacia arriba y a la derecha desde el más lejano.

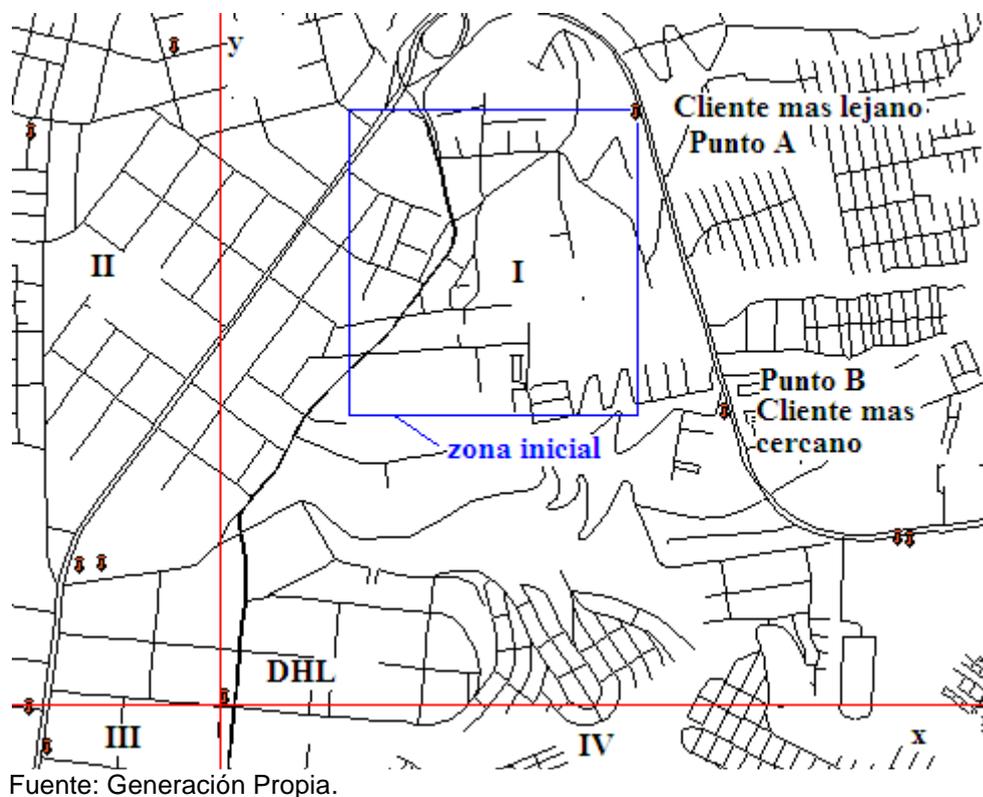


Figura 3. Construcción de la Zona Inicial

En definitiva, la zona inicial que se crea debe apuntar hacia el centro de distribución. En este caso, coincide que el Punto B no se encuentra dentro de la zona inicial establecida, sin embargo, esto no es un limitante para el siguiente paso del algoritmo.

Antes de explicar el siguiente paso, es importante comprender que las dimensiones de la zona se van a establecer en base a una medida específica de distancia del Punto A al Punto B. Por ejemplo, para el caso que se muestra en la Figura 3, se tiene la distancia Euclideana dada desde el Punto A hasta el Punto B (en base a la cual se definió que Punto B es el cliente más cercano al Punto A), pero sin embargo, para la determinación de la zona, se elige el mayor componente de la medida de distancia rectilínea que existe entre los Puntos A y B (puede ser el componente x o el componente y). En la Figura 4, se muestra que la distancia rectilínea entre el Punto A y el Punto B tiene un componente en x y un componente en y . Es a partir del mayor componente de dicha distancia (en este caso el componente y) que se determina la dimensión de la zona inicial; el mayor componente de la distancia rectilínea determinará la magnitud del lado del cuadrado que forma la zona inicial.

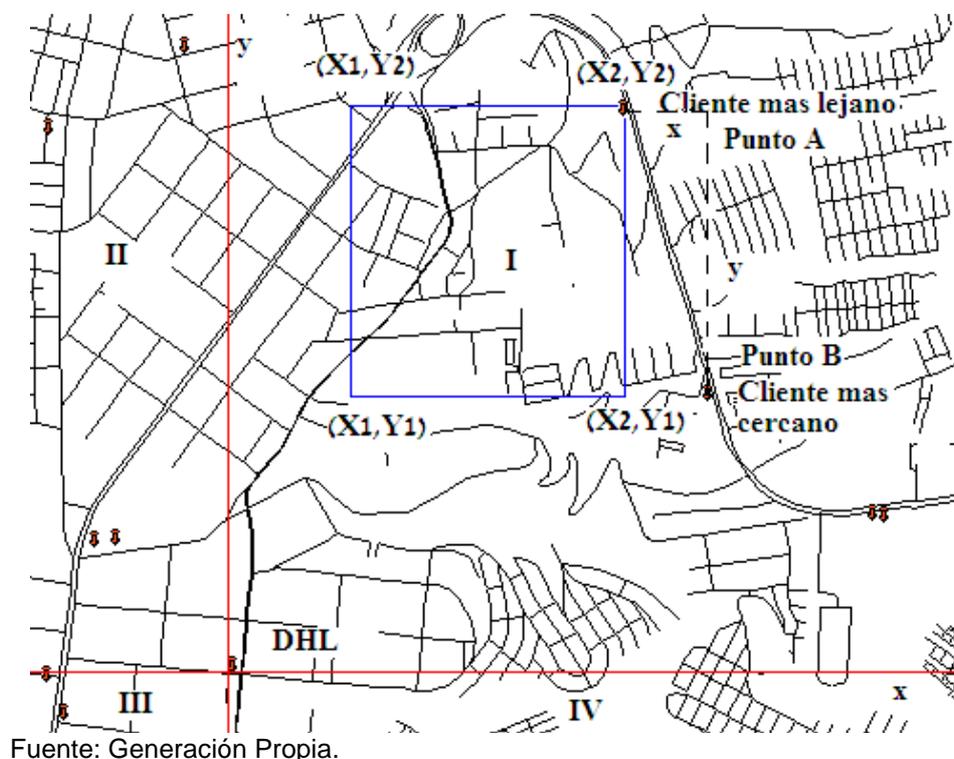


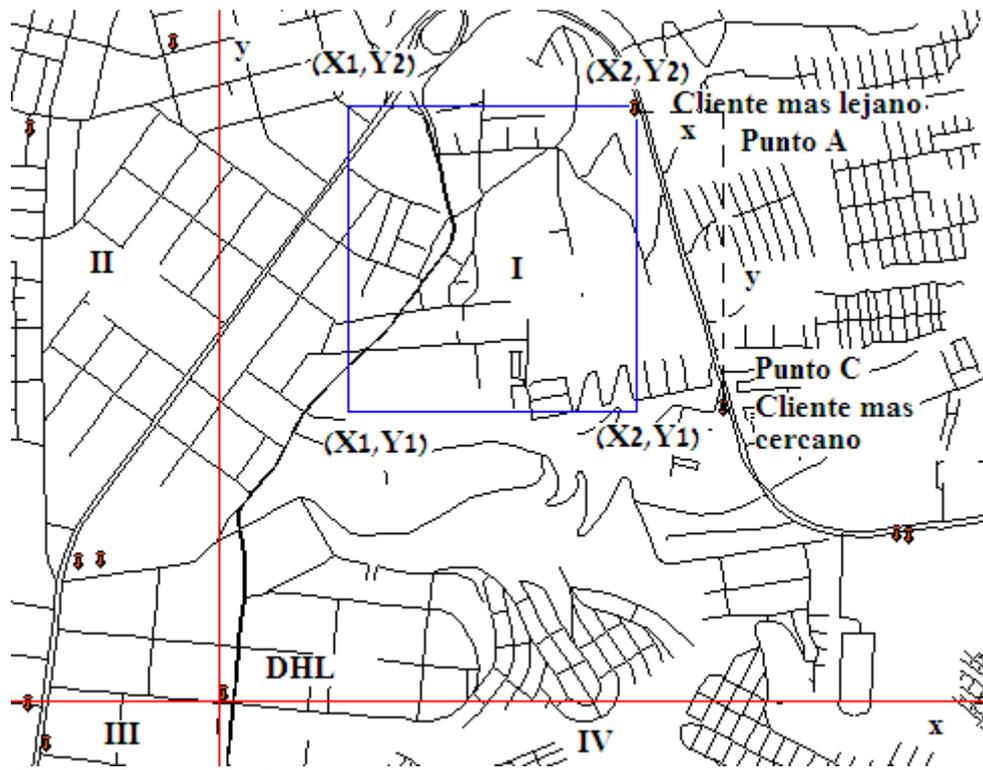
Figura 4. Componentes para la Zona

Debido a que no existen clientes tan lejanos al centro de distribución de DHL Express tal que los couriers requieran más que el tiempo máximo en ruta de 4 horas para visitarlos a ellos únicamente (visitarlos y regresar), no se realiza una validación para la primera iteración del algoritmo.

El siguiente paso es buscar el siguiente cliente más cercano al Punto A que no se encuentre dentro de la zona previamente establecida. A este nuevo punto se le denomina Punto C y será utilizado para redimensionar la zona. En este caso específico, resulta que el cliente más cercano al Punto A es el mismo Punto B que se estableció en un principio dado que éste no está incluido en la zona inicial generada, y por ende es el punto que se selecciona para realizar la siguiente iteración (sólo que ahora se denomina Punto C).

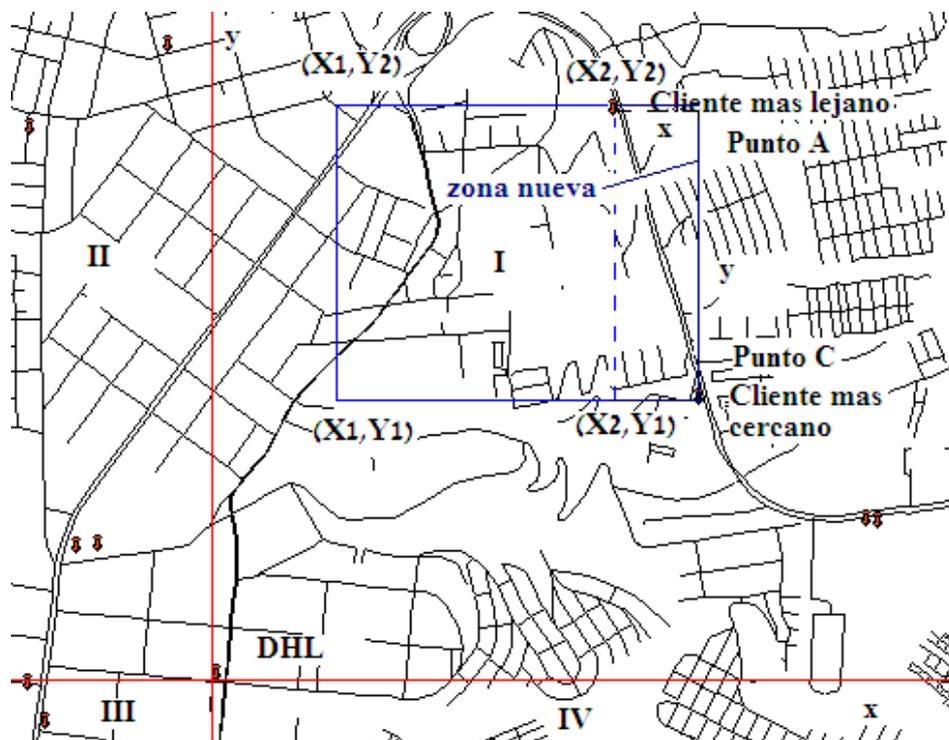
Una vez determinado el siguiente cliente más cercano (Punto C), se procede a redimensionar la zona comparando las coordenadas del Punto C con la zona establecida hasta este instante. En el presente ejemplo, las coordenadas de la zona establecida se encuentran presentadas en la Figura 5. Así, se tiene que si la coordenada en x del Punto C excede la coordenada X_2 de la zona, entonces el nuevo valor de la coordenada X_2 de la zona se cambia al valor de la coordenada x del Punto C. Similarmente, en otro caso, si la coordenada x del Punto C fuera menor que la coordenada X_1 de la zona, el valor de la coordenada X_1 se fijaría en el valor que tiene la coordenada x del Punto C. Únicamente en el caso en el cual la coordenada x del Punto C se encuentre entre las coordenadas X_1 y X_2 , no existirá ninguna actualización de las coordenadas x de la zona.

De igual manera se realiza la comparación para las coordenadas Y 's de la zona. El resultado de la nueva zona se muestra en la Figura 6. Este procedimiento es el mismo independientemente del cuadrante en el que se encuentren los puntos (el indicador del cuadrante sirve solamente para establecer la zona inicial).



Fuente: Generación Propia.

Figura 5. Determinación del Siguiente Cliente Más Cercano (Punto C)



Fuente: Generación Propia.

Figura 6. Establecimiento de la Nueva Zona en Función del Punto C

El siguiente paso es validar si los clientes de la nueva zona se pueden satisfacer con tan solo un courier, es decir, determinar si es posible cubrir todos los clientes y regresar al centro de distribución en el lapso de las 4 horas de jornada. La validación, al igual que en el algoritmo de k-means, se realiza en base al algoritmo Dijkstra.

Una vez que la nueva zona haya sido validada por factibilidad, se debe iterar y buscar el nuevo cliente más cercano (nuevo Punto C) que no esté en la zona establecida y comparar sus coordenadas con las de la zona para actualizarla de ser el caso. El procedimiento continúa de esta manera hasta el momento en el que se llegue a violar la restricción del tiempo en ruta, en donde se procede a detener la asignación y a establecer un nuevo cliente más lejano (nuevo Punto A) que no se encuentre en las zonas establecidas anteriormente. El algoritmo finaliza el momento en el que no existen clientes sin pertenecer a una zona.

4.5.3. Aplicación del Nuevo Algoritmo

La información necesaria para la aplicación del Nuevo Algoritmo se obtuvo del levantamiento de información realizado para el RPM, descrito en el capítulo 3 el cual se llevó a cabo en Julio de 2008 (de esta manera se obtuvieron las coordenadas de los clientes y las rutas AM respectivas). Del mismo RPM se obtuvo el mapeo (geocodificación) de las coordenadas de los clientes.

Para la aplicación del Nuevo Algoritmo, en primer lugar se procedió a exportar las coordenadas de los clientes a un archivo de texto (la extensión .txt es compatible con varios lenguajes de programación). Este archivo se lo almacenó en un base de datos MySQL®. El software desarrollado se alimenta de la base de datos y ejecuta el procedimiento descrito en la sección anterior. De manera similar, las zonas de tráfico y sus respectivos parámetros se encuentran almacenados en esta base de datos.

Al correr el software se utilizaron las coordenadas de los clientes y los parámetros del tráfico (almacenados en la base de datos) para generar las rutas. Se logró determinar que la demanda podía ser satisfecha con 23 rutas (zonas) en

un tiempo de corrida de dos minutos con once segundos. En la siguiente sección se realiza un análisis estadístico de los resultados obtenidos y se los compara con los que se obtuvieron mediante de la aplicación del método k-means con el fin de determinar su adecuación y efectividad.

Adicionalmente, en la sección 4.5.5 se mostrará el despliegue gráfico de los resultados obtenidos, y en el capítulo 5 se describirá en detalle la implantación de la metodología en la Empresa.

4.5.4. Discusión y Análisis de los Resultados

La aplicación del Nuevo Algoritmo al caso de DHL Express Quito muestra que se deberían realizar 23 clusters (23 rutas). Los resultados de los tiempos de las rutas se presentan a continuación en Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del Nuevo Algoritmo

Cluster	Tiempo en Ruta (horas)	Cluster	Tiempo en Ruta (horas)
1	2.940	13	3.856
2	3.890	14	3.837
3	3.996	15	3.931
4	2.547	16	3.833
5	3.628	17	3.895
6	3.471	18	3.600
7	3.993	19	3.997
8	3.952	20	3.998
9	3.526	21	3.991
10	3.966	22	3.986
11	3.894	23	3.986
12	3.964	Total	86.678

Como se observa más adelante en la Tabla 7, los tiempos de las rutas son más uniformes; se pueden apreciar rutas con menor variabilidad entre los tiempos de recorrido que lo que se obtuvo en el caso de la aplicación del algoritmo de k-means.

Tabla 7. Resumen Estadístico de Resultados del Nuevo Algoritmo

Cluster	Valor
Media (horas)	3.769
Des. Estándar (horas)	0.365
Varianza (horas cuadradas)	0.133
CV	0.097
Rango (horas)	1.451
Mínimo (horas)	2.547
Máximo (horas)	3.998
Total (horas)	86.678

Adicionalmente, en la Tabla 8 se resume el análisis de los datos obtenidos. Se puede apreciar que el resultado obtenido es bastante mejor que el algoritmo de k-means ya que, en primer lugar, la cantidad de rutas está determinada por el mismo algoritmo y no es un parámetro de entrada para el mismo como en el caso del método k-means. En segundo lugar, la variabilidad de las rutas (CV = 0.097) es casi la cuarta parte de la mejor opción del k-means (para $K = 23$, CV = 0.362).

En este punto es muy importante considerar los resultados obtenidos con ambos métodos de clustering (k-means y el nuevo algoritmo) en igualdad de condiciones. La Tabla 8 presenta los estadísticos descriptivos de los resultados obtenidos para los tiempos de ruta asumiendo igual número de rutas con ambos métodos (método k-means $K = 23$ y el nuevo algoritmo).

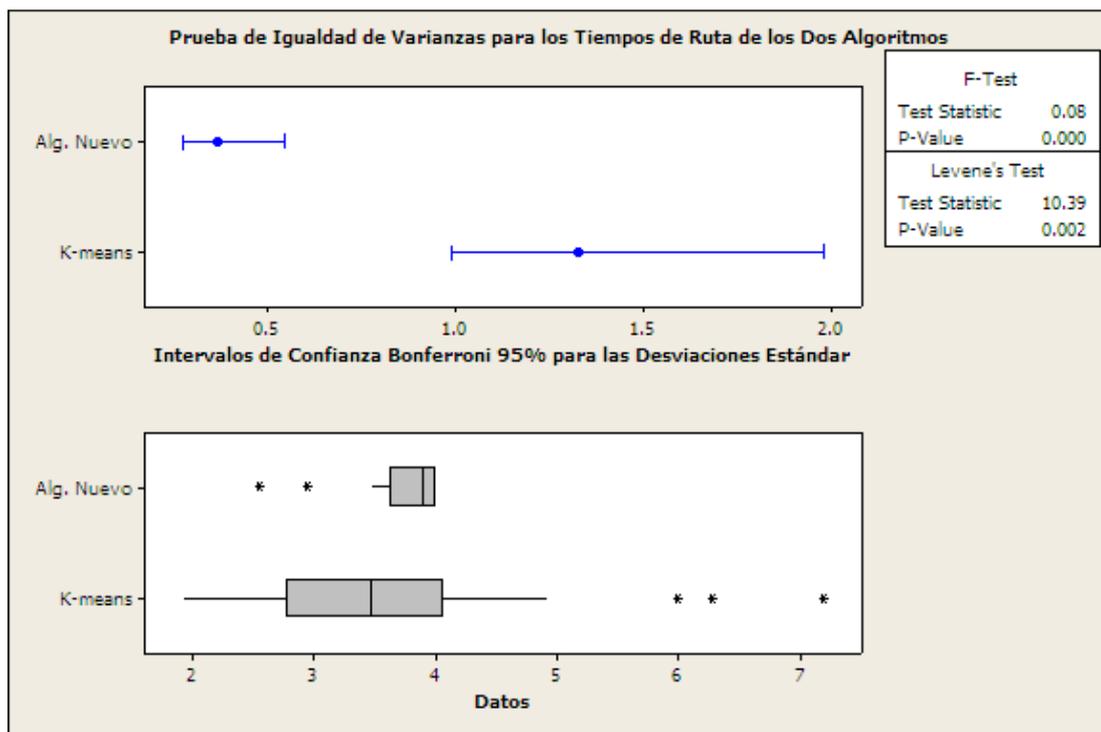
Tabla 8. Resumen Comparativo de los Resultados de los Algoritmos

Cluster	k-means ($K = 23$)	Nuevo Algoritmo
Promedio (horas)	3.667	3.769
Des. Estándar (horas)	1.327	0.365
Varianza (horas cuadradas)	1.761	0.133
CV	0.362	0.097
Rango (horas)	5.279	1.451
Mínimo (horas)	1.917	2.547
Máximo (horas)	7.196	3.998
Tiempo Total (horas)	84.333	86.678

En la Tabla 8 se observa que el tiempo total de las rutas generadas es bastante similar para ambos algoritmos. Existe diferencia de 2.3 horas en el

tiempo total de las rutas (3% del tiempo total de la ruta) entre los dos algoritmos, lo cual no es crítico según parámetros especificados por DHL Express, por lo cual se puede concluir que el nuevo algoritmo tiene un desempeño similar al método k-means en cuanto al tiempo total de las rutas generadas.

Por otro lado, al realizar una prueba de hipótesis del 95% de confianza de que las varianzas de la distribución de tiempos de ruta obtenidos con ambos métodos son iguales (Levene's test), se concluyó que no existe evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula (con un valor p de 0.002) (Figura 7). De esta manera, se llega a la conclusión de que el nuevo algoritmo presenta un mejor desempeño en cuanto a la variabilidad de los tiempos de recorrido de las rutas creadas ya que la varianza de los mismos es significativamente menor a la que se obtiene con el método k-means.



Fuente: Generación Propia, Minitab®.

Figura 7. Prueba de Igualdad de Varianzas para los Tiempos de Ruta de los Dos Algoritmos

La dificultad de adoptar una política para rutas con tiempos de recorrido variables depende mucho de las posibilidades que presentan los couriers y de la programación de ruteo que se realice, ya que se debe coordinar con las entregas PM, las recolecciones y las rutas prioridades que también atiende DHL Express.

Además, se debe coordinar con recursos humanos debido a que existirían conflictos de horarios. Por esta razón, será mucho más factible adoptar una política de rutas que sea lo menos variable posible (inclusive, se partió de esa restricción para desarrollar el problema de ruteo). Este factor limita al algoritmo de k-means en posibilidades de expansión, en términos de alcance del problema (debido a la variabilidad en los tiempos de ruta que presenta), a diferencia del nuevo algoritmo que puede ampliarse para las rutas prioridad (8:00am a 10:00am), recolecciones y rutas PM (13:00 a 17:00).

Como se menciona en el capítulo 4, el RPM se lo realiza cada 2 años, esto presenta un problema en cuanto a la adaptación de las rutas a situaciones eventuales inesperadas y cambios que ocurren en su mercado en períodos a corto plazo. La metodología desarrollada en este capítulo pretende solucionar este problema.

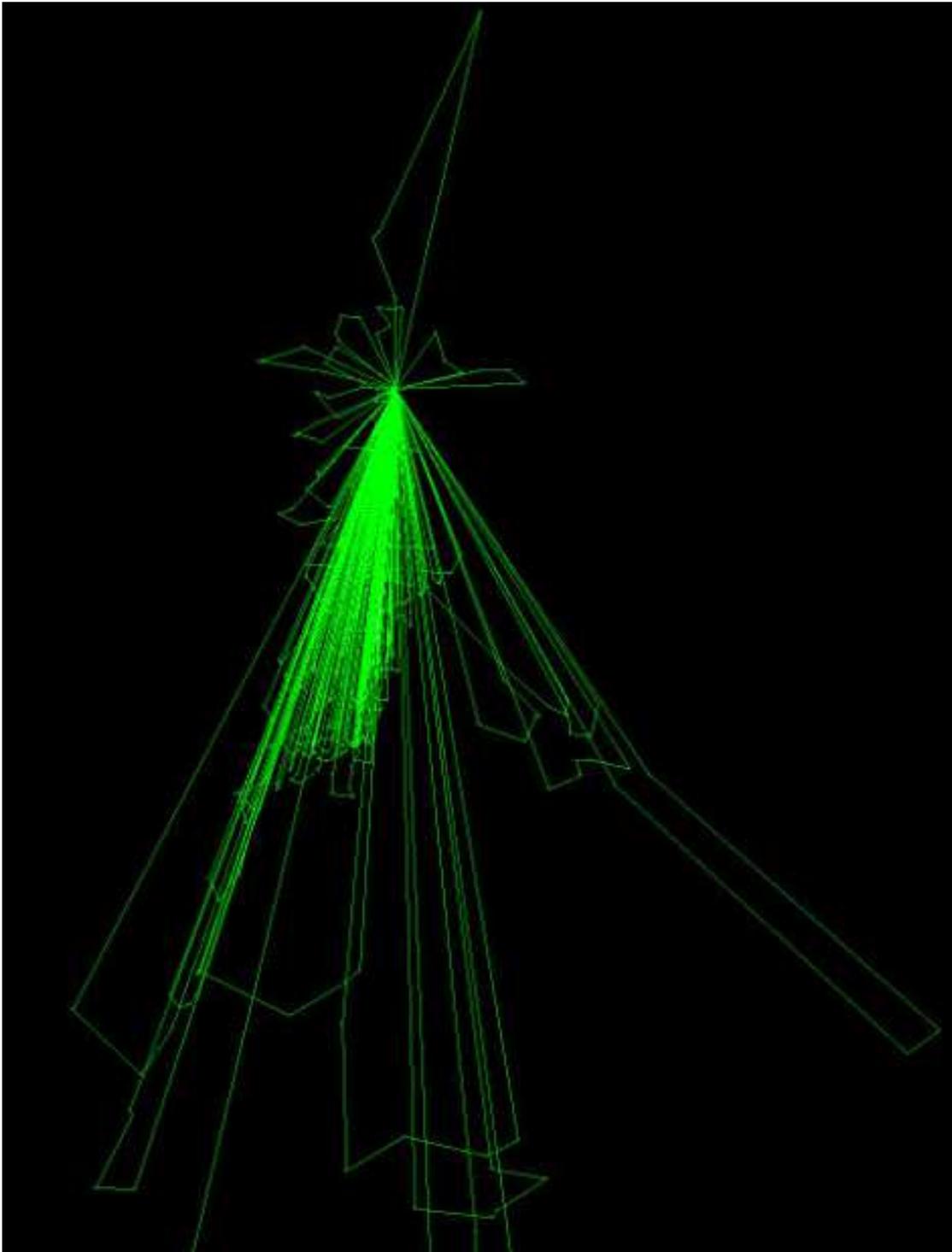
Actualmente, DHL Express, maneja todas las circunstancias de cambios y eventualidades de manera incierta y de acuerdo a su experiencia (la demanda de entregas en ciertas zonas aumenta o disminuye de un día para otro). En esos casos, las rutas cambian para adaptarse a las nuevas condiciones (partiendo de las rutas obtenidas con el RPM).

La metodología propuesta considera este punto ya que se adapta a la demanda en períodos relativamente cortos. Es así que los cambios necesarios en las rutas para cubrir la demanda se harán automáticamente al ingresar los nuevos datos de los clientes en el sistema. Entonces, el objetivo es establecer escenarios para diferentes niveles de demanda (como se mencionará en el capítulo 5), así como reducir el tiempo de ingreso de datos al sistema. Este resultado refleja una mayor agilidad en la adecuación a situaciones cambiantes y un nivel de sistematización de los procedimientos de la empresa mayor (Deutsche Post DHL).

Para tener una idea de las zonas (rutas) generadas por el algoritmo y sus capacidades se desarrolló un despliegue gráfico de los resultados, lo que se presenta a continuación.

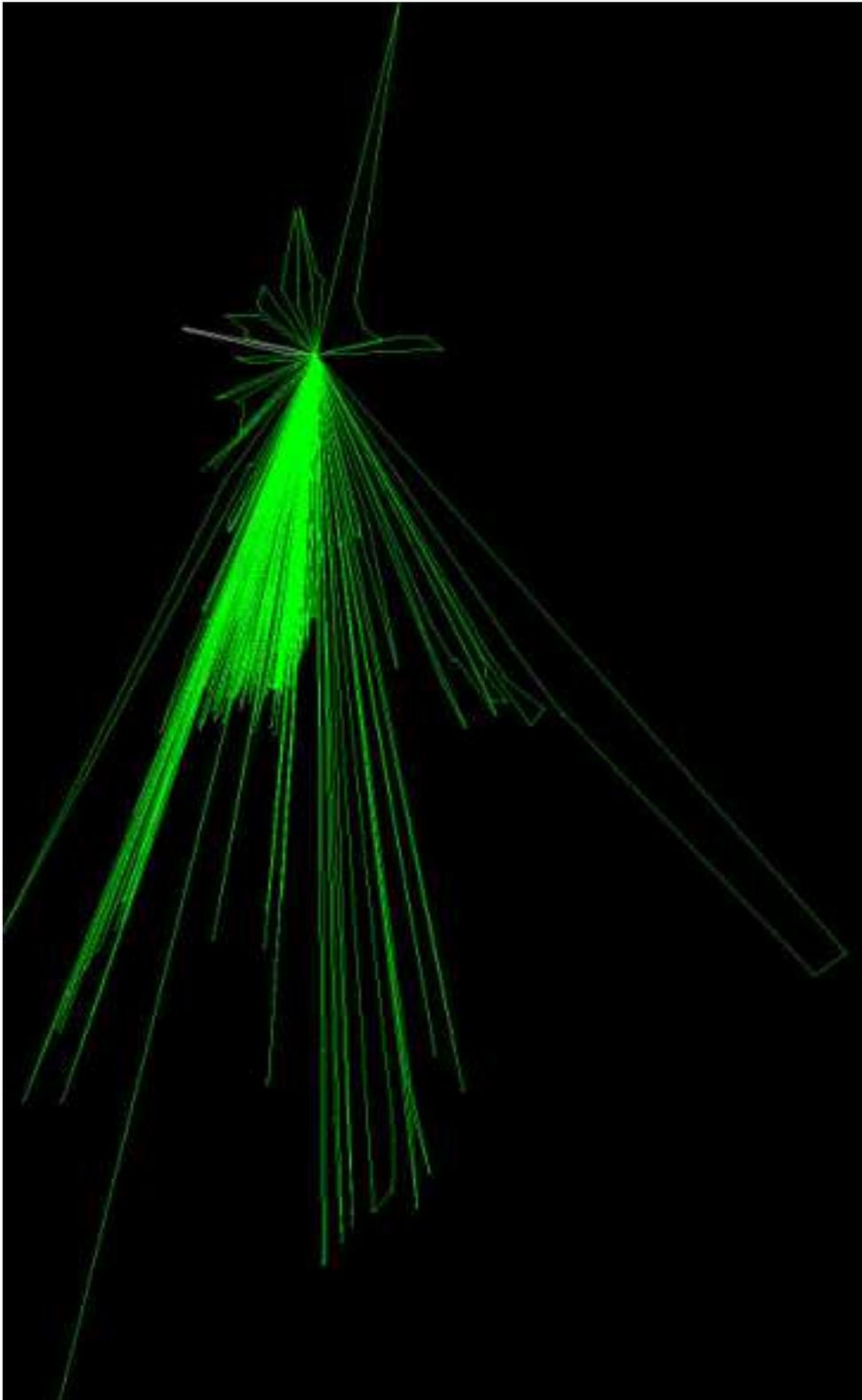
4.5.5. Interfaz Gráfica del Nuevo Algoritmo

La interfaz gráfica inicial desarrollada al implementar el algoritmo en el lenguaje Java® brinda la posibilidad de escoger entre varios modelos para resolver el problema de ruteo: Algoritmo de Ahorros, Heurística de Barrido, k-means y el Nuevo Algoritmo. Como se mencionó al inicio del capítulo 4, se pretendía resolver el problema de ruteo con algoritmos clásicos como son el de Clarke y Wright o la Heurística de Barrido, sin embargo, como se presenta en las Figuras 8 y 9 respectivamente, estos métodos no presentaban ningún atractivo visual y por ende no fueron desarrollados a profundidad.



Fuente: Generación Propia.

Figura 8. Rutas Obtenidas al Aplicar el Algoritmo de Clarke y Wright

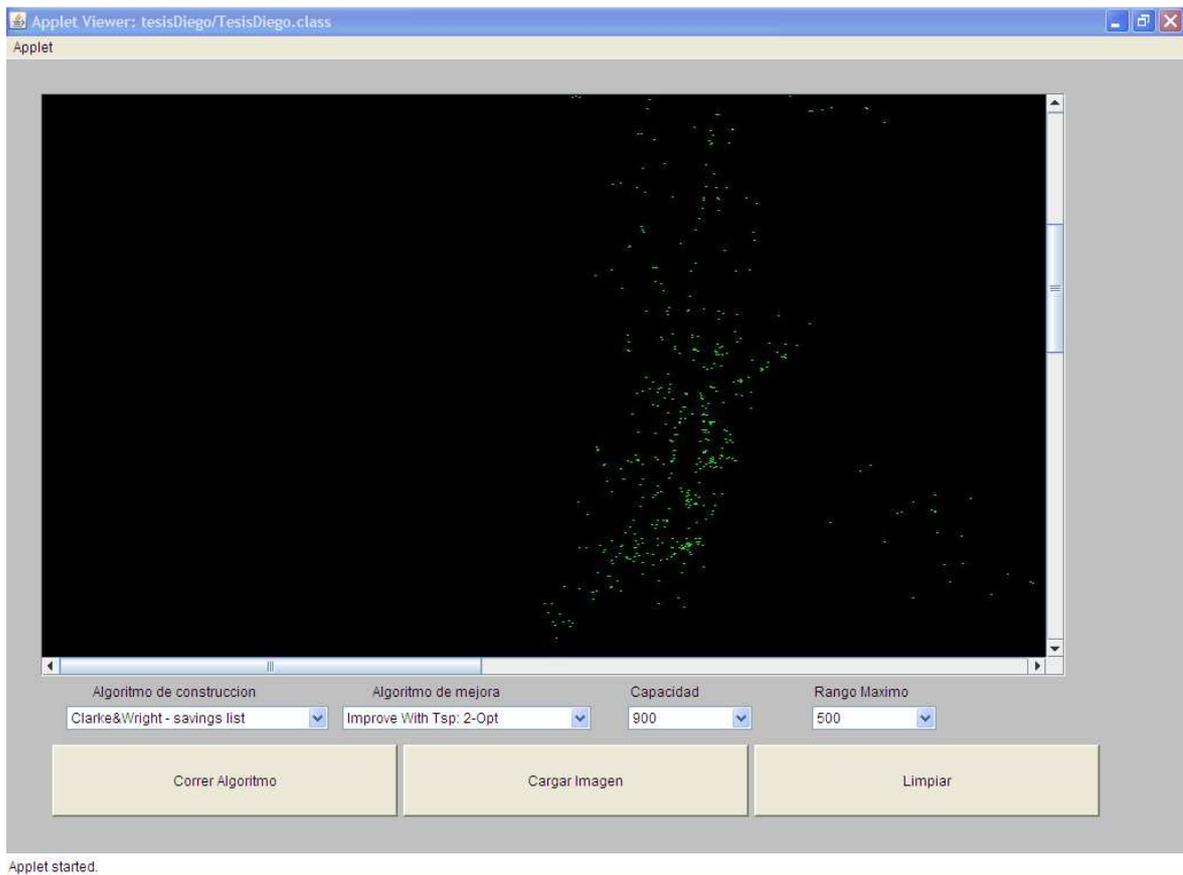


Fuente: Generación Propia.

Figura 9. Rutas Obtenidas al Aplicar la Heurística de Barrido

Como se mencionó en la sección 4.4.2., debido a la variabilidad de los tiempos de las rutas que se presentó al aplicar el método de k-means, no se desarrolló un despliegue gráfico de los clusters resultantes.

Por otro lado, la interfaz gráfica de donde se ejecutan todos los algoritmos se presenta en la Figura 10.



Applet started.

Fuente: Generación Propia.

Figura 10. Interfaz Gráfica de Desarrollo

Para el Nuevo Algoritmo, la representación gráfica se desarrolló como se muestra en la Figura 11. Aquí se muestran pintados de diferentes colores los clientes que pertenecen a un determinado cluster para que no existan confusiones debido a los cruces que se observan en las zonas. Es importante mencionar que un cruce de zonas se debe a la forma en la que procede el algoritmo para el establecimiento de rutas, sin embargo, esos clientes no se toman en cuenta dos veces para el cálculo del tiempo de la ruta y se encuentran asignados a un único cluster (se los puede distinguir en base a los colores).



Fuente: Generación Propia.

Figura 11. Representación Gráfica para el Nuevo Algoritmo

Tal como se mencionó en un principio, el software estaba diseñado para agrupar los clientes en rutas y no para establecer la ruta dentro de la zona ya que la herramienta MapInfo® dispone de un ruteador para determinar el orden en el que se van a visitar los clientes (como se explicó previamente en la descripción de los sistemas de información que utiliza actualmente DHL Express).

5. PROPUESTA DE IMPLANTACIÓN

En este capítulo se presentan los aspectos generales que se deben considerar al implementar el software de apoyo propuesto, así como las implicaciones que esto tiene en cuanto a costos y personal involucrado.

5.1. Consideraciones Previas

En primer lugar, se debe determinar dónde va a correr el software y qué licencias de uso y permisos se requieren. Debido a que DHL Express es una organización internacional, posee varias restricciones en cuanto al manejo de la información e instalación de nuevo software en la Empresa; sin embargo, con el apoyo del Área de Sistemas y la Gerencia de Operaciones de DHL Express, se ha considerado pertinente utilizar el software de apoyo desarrollado (esto implica liberación de información al software).

El encargado de manejar el software será el “dispatcher” (encargado de coordinar y apoyar a los couriers que se encuentran en ruta). Se han revisado las especificaciones de hardware de la máquina del “dispatcher” y no presentan ningún problema para correr el software.

El acceso al software va a ser único para el “dispatcher”. Sin embargo, es de vital importancia capacitar al personal de nivel medio del Área de Operaciones en el funcionamiento del software para que se involucren más en la propuesta y para que puedan suplir la ausencia del “dispatcher” en caso de cualquier eventualidad.

5.2. Procedimiento para la Implantación

En primer lugar, es necesario constatar que el último mapeo de los clientes del Distrito Metropolitano de Quito sea representativo para el momento actual, es decir, que no se hayan presentado variaciones significativas en la demanda global o en la densidad de clientes por zonas desde el último mapeo.

Por esta razón, previo a la implantación, se debe comenzar por conocer el estado actual del nivel de demanda. Para esto, se realizarán pronósticos con el fin de conocer las fluctuaciones de la demanda a lo largo del año. La técnica de pronósticos a utilizar dependerá de la información obtenida (esta información se encuentra en el sistema).

Una vez determinado el nivel en el que se encuentra la demanda, se procederá a establecer las políticas para la aplicación del software. El objetivo es que las zonas sean lo más representativas para la situación actual de la Empresa (en términos del nivel de demanda). Entonces, basados en los resultados de los pronósticos, se debe realizar el mapeo de los clientes para períodos de baja, media y alta demanda, así como la determinación de las rutas para dichos períodos.

A continuación, la implantación debe iniciar con una toma de datos, similar a la descrita en la sección 3.1. Básicamente, es necesario ajustar los tres componentes del tiempo total de la ecuación (19) que sirve para construir la matriz de tiempos que es utilizada por el Nuevo Algoritmo para el establecimiento de las zonas o rutas. Por lo tanto, se deben tomar los tiempos entre visitas a clientes para obtener un total de tiempo en ruta. Una vez que se obtienen los tiempos reales en ruta, se procede a ajustar el componente de tráfico y el de la velocidad promedio de la ecuación (19). Adicionalmente, es importante medir el tiempo de atención de un courier a un cliente (tiempo de servicio) para ajustar el tercer componente. Para esto, se debe disponer de cronómetros para todos los couriers e igualar la hora entre ellos (para que no existan desfases en el análisis de datos y validación de las rutas).

Así, antes de comenzar la ruta, cada courier imprime el POD, en donde se encuentra la información de cada parada (dirección y cliente). En este documento se deberá anotar la hora de llegada a la parada, así como la hora de salida de la misma. Con estos datos se obtiene directamente el componente de servicio para la ecuación (19). De manera similar, se obtienen los tiempos entre visitas para que, al correr una regresión, se logre estimar la velocidad promedio y los parámetros de tráfico. A partir de esta información se ajustarán los componentes y se determinará si es necesario incrementar, disminuir o mantener el número de zonas para el establecimiento de los parámetros de tráfico. De igual manera, en base a los resultados obtenidos, y en caso de ser necesario, se deberá zonificar la velocidad promedio y tiempo de servicio. Sectores en donde existan demasiados semáforos y menores límites de velocidad, deberán tener una velocidad promedio más baja.

Posterior al levantamiento de información, se debe realizar una prueba piloto para realizar ajustes al modelo y verificar que las rutas sean representativas para la situación actual. A continuación se describe el procedimiento para realizar la prueba piloto.

5.2.1. Prueba Piloto

Una vez ajustados los parámetros del modelo de manera general, se obtienen las zonas iniciales. La prueba piloto iniciará con la adecuación y validación de tan solo una zona. Para esto, a un courier se le designará una zona (ruta) generada por el modelo para que la realice durante el lapso de una semana. Posteriormente, en base a la información obtenida, se deben realizar los ajustes necesarios a la zona para que esta se adecue al Sphour establecido por la Empresa; la zona puede agrandarse o acortarse (añadir o quitar clientes a la zona). Los ajustes necesarios se pueden deber a conflictos con el tiempo en ruta, restricciones geográficas, dificultad de coordinación con rutas en otros horarios, etc.

Es importante mencionar que el tiempo de ruta de 4 horas se estableció como una referencia para realizar el presente trabajo; sin embargo, en la práctica, este tiempo depende en gran medida de la hora de llegada del material a la estación de DHL Express. Por esta razón, la adecuación de la ruta se evaluará en términos del Sphour (paradas por hora) con una tolerancia establecida por la Empresa del 5 al 10% dependiendo de la ruta.

Así, culmina la prueba piloto y comienza el procedimiento para ajustar todas las rutas; una vez ajustada (validada) una ruta, se procede con la siguiente, y así sucesivamente hasta culminar con todas las rutas.

5.3. Plan de Acción para Implantar la Propuesta

El plan para implantar la propuesta se divide en cuatro grandes etapas. La primera etapa consiste en instalar el software y capacitar al personal en su utilización. La segunda etapa se divide a su vez en las dos fases siguientes: determinación del nivel de demanda actual mediante pronósticos y el levantamiento de tiempos para ajustar el modelo. La tercera etapa consiste en

realizar la prueba piloto que se describió anteriormente. Finalmente, se procede a realizar la puesta en marcha y ajustes finales en la cuarta etapa.

El plan de implantación considera los recursos necesarios para realizar cada actividad, así como los costos involucrados. Se han considerado recursos humanos, materiales y tecnológicos para la implantación. Similarmente, los costos han sido aproximados en base al tiempo que debe dedicar el personal de la Empresa así como el consultor externo. El plan de implantación que se desarrolló tomando en cuenta estos aspectos se detalla en el Anexo C. Al realizar el plan de implantación, se determinó que el costo total de implantación presupuestado se estima será de aproximadamente \$8500 con una duración de 4 meses (fecha de iniciación del 1 de Junio 2009).

5.4. Discusión de la Propuesta

La información presentada en esta sección se obtuvo en base a reuniones programadas con el Asistente de Operaciones y el Supervisor del ciclo AM de DHL Express Quito.

Actualmente, DHL Express cuenta con 39 rutas para realizar entregas AM y PM, así como para realizar recolecciones. De las 39 rutas en total, dos de ellas la realizan los camiones, por lo que las rutas a considerar se reducen a 37. Adicionalmente, durante el ciclo AM también se realizan recolecciones; se ha estimado que con 35 rutas (de las 37) se podría cubrir la demanda sin incluir las recolecciones.

Además, no existen diferenciaciones claras para determinar si un cliente pertenece al ciclo AM o al PM, por esto, dentro de la jornada establecida de 4 horas se puede presentar una cierta tolerancia (definida por la Empresa). El método propuesto, ha determinado que se pueden realizar las entregas AM con 23 rutas; esto implica una reducción de 12 rutas.

Estimando el costo por ruta como se muestra en la Tabla 9, se ha determinado que se pueden ahorrar hasta \$750 por ruta, es decir, al reducir 12 rutas se ahorrarían \$9,000 mensuales en un caso teórico.

Tabla 9. Costo Estimado por Ruta

Rubro	Valor (mensual)
Salario Courier	\$400
Alquiler Vehículo	\$300
Gasolina	\$50
Total	\$750

Esto implica que la implantación sería cubierta tan solo con el ahorro del primer mes. Ahora, tomando en cuenta que los componentes iniciales de la ecuación (19) presentan un error considerable (25% de subestimación de los tiempos), se estableció que se puede cubrir toda la demanda con 29 rutas. Esto implica un ahorro de \$4,500 al mes, lo que significa que el costo de la implantación podría ser cubierta con el ahorro de los dos primeros meses.

A pesar de que la propuesta implica una reducción de los costos de operación significativos, existen otras ventajas evidentes. Con la implantación de la metodología se logra tener un mejor control sobre rutas existentes y a la asignación de clientes a las rutas. Esto implica una mayor sistematización de las actividades de la Empresa.

Por otro lado, a pesar de que en un principio se limitó el problema a rediseñar rutas AM, con la inclusión de nuevos clientes en la base de datos, se podría generar rutas (zonas) PM de la misma manera y extender el alcance del problema; se podría realizar la misma prueba piloto para la extensión del problema y así sistematizar la mayoría de las rutas.

Así como se puede extender la metodología para las rutas PM, se lo puede hacer para las diferentes ciudades en las que opera DHL Express. Debido a que se tienen estandarizados los procesos, la implantación de la metodología en las distintas ciudades no variaría significativamente a la implantación realizada en la ciudad de Quito.

5.5. Aplicaciones Reales del Método

A pesar de que la aplicación del método se desarrolló en una empresa de courier como es DHL Express, el método puede utilizarse en varias industrias para diferentes propósitos. A continuación se explican algunas aplicaciones.

En empresas de logística, por ejemplo, se puede utilizar la metodología para propósitos similares a los de DHL Express; agrupar clientes y establecer rutas en base a dichas agrupaciones. Una desventaja es que el software aislado (sin el MapInfo®) tiene limitaciones. Sin embargo, para problemas de mayor escala, por ejemplo, distribución a todo el país, se puede aplicar bastante bien el modelo ya que la zonificación se vuelve crucial para la distribución.

Por otro lado, el método también se lo puede adaptar para ser utilizado en laboratorios farmacéuticos. El interés de los laboratorios está en zonificar sus clientes para determinar los puntos de ventas estratégicos en base a la densidad de los mismos. Para esto, el método deberá agrupar clientes en base a su densidad; esto es similar a agruparlos en base a parámetros de tráfico como sucede en la aplicación del método a DHL Express.

De manera general, la aplicación para productos de consumo masivo es amplia. La distribución para empresas como Nestlé, Pronaca, Quifatex, entre otras, puede ser modelada por el método desarrollado. Así, estas empresas lograrían establecer sus repartos a tiendas y supermercados de manera sistemática, ordenada y zonificada en base a parámetros que las empresas establezcan.

Finalmente, se puede mencionar el caso de las empresas aseguradoras. En este caso, la aplicación sería similar a la de las empresas farmacéuticas. Las empresas aseguradoras pueden utilizar la metodología propuesta para zonificar sus clientes en base a sus propios parámetros. Por ejemplo, es de gran interés zonificar a los clientes en base al riesgo que se presenta en una determinada zona.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El transporte es un costo significativo para varias empresas y por lo tanto el potencial de ahorro es grande. En el caso de DHL Express, por ejemplo, el transporte representa el giro del negocio.
- La clase de problemas VRP modelan el problema de transporte, sin embargo, son difíciles de resolver y por lo tanto, no es posible encontrar una solución óptima en tiempos cortos. Por esta razón, se consideraron una serie de algoritmos y heurísticos que pretenden resolver el problema en períodos de tiempo reducidos.
- Las soluciones que se obtienen al aplicar algoritmos clásicos al problema de ruteo de DHL Express no presentan un atractivo visual y, por lo tanto, no resulta práctica su aplicación en este caso.
- El procedimiento actual para el diseño de rutas de DHL Express es efectivo en su aplicación práctica, sin embargo, se realiza con una frecuencia muy prolongada. Esto limita la adaptabilidad de las rutas a cambios a corto plazo.
- El tiempo de ejecución del RPM es bastante mayor al tiempo en el que se obtienen las rutas con la metodología propuesta. Esto presenta una ventaja y agilidad al proceso de diseño de rutas.
- La generación de rutas con carga de trabajo balanceadas es un factor importante para la Empresa ya que facilita la programación de las operaciones.
- La aplicación del método k-means presentó como resultado rutas con cargas de trabajo desbalanceadas, por lo cual no se utilizó para modelar la situación actual de la Empresa.
- El proceso para llegar a la construcción de la metodología propuesta se puede resumir en tres etapas: la aplicación de algoritmos clásicos, la aplicación de algoritmos modernos y el análisis de las limitaciones de ambos algoritmos.
- El modelo propuesto considera los principales factores influyentes en la determinación de las zonas de DHL Express: las distancias que existen

entre los clientes (con lo que se determina la velocidad promedio de traslado), el tráfico dependiendo de la zona y los tiempos de servicio.

- El Nuevo Algoritmo se creó con un fin práctico más que teórico en función de los objetivos de la Empresa. La base del algoritmo fue tomar en cuenta los parámetros influyentes en la realización de las rutas para DHL Express, no el de optimizar los tiempos de entrega o reducir la cantidad de rutas originales; no es un modelo de optimización.
- Con esta propuesta se logra un alto grado de sistematización del proceso de diseño de rutas de DHL Express, esto es, el establecimiento y ajuste de las rutas a corto plazo, así como un control de cambios de las mismas.
- La interfaz gráfica presentada como parte de la metodología permite observar los clientes en las zonas, así como el panorama global del diseño de las rutas.
- Tomando como ejemplo el software desarrollado, se evidencia que se pueden crear aplicaciones específicas para atacar problemas particulares dentro de las empresas

6.2. Recomendaciones

- Para el proceso de levantamiento de información se debería aplicar un sistema GPS que permita un mapeo de los clientes más preciso y eficiente.
- A partir de la propuesta planteada se pueden desarrollar planes de contingencia que tomen en cuenta la incertidumbre del mercado.
- El Overtime podría ser utilizado como medida de desempeño durante la implementación de la propuesta y luego de manera regular, con el fin de controlar y evaluar el desempeño de las rutas generadas.
- Se debe realizar un análisis económico detallado de la propuesta para determinar el nivel de beneficios reales en términos de ahorros económicos.
- Una vez realizada la prueba piloto e implementación de la propuesta al establecimiento de las rutas AM, se debe considerar extender al alcance a las rutas PM y recolecciones. De igual manera, se debe considerar la

adaptación e implementación de la propuesta en diferentes ciudades donde opera la Empresa.

- Se recomienda realizar una capacitación al personal que hará uso del software desarrollado tomando en cuenta, adicionalmente, la compatibilidad de esta herramienta con el MapInfo®.
- Se deben realizar revisiones periódicas de la información de los clientes y de los parámetros del modelo como controles para asegurarse que las rutas establecidas sean las más adecuadas en todo momento.
- En las operaciones diarias de la Empresa, se recomienda la utilización del ruteador que posee MapInfo® para determinar la ruta que debe seguir un courier dentro de la zona establecida.
- En caso de que el ordenamiento de los clientes que se obtiene a partir del ruteador del MapInfo® no sea el adecuado al momento de realizar las entregas, se debería tratar de desarrollar otra herramienta sistematizada que aplique un método de resolución para el problema de ruteo, posiblemente utilizando el algoritmo del vecino más cercano.
- La Empresa deberá modificar el software para la alimentación de la información de los clientes desde la base de datos de la Empresa, ya que actualmente se alimenta de una base de datos de uso libre.
- La metodología propuesta presenta un gran potencial de adaptabilidad a las circunstancias del mercado en dos sentidos: se pueden modificar los parámetros del modelo en base a los cambios presentados y se pueden agregar parámetros adicionales de acuerdo a las circunstancias que se evidencien durante el proceso de implantación del modelo en DHL Express.
- A pesar de que la metodología propuesta está enfocada a una empresa de courier como es DHL Express, ésta se puede adaptar a diferentes industrias para propósitos de distribución y zonificación de clientes.
- Se puede hacer uso comercial de la herramienta desarrollada en esta propuesta al utilizarla para realizar consultorías en empresas con necesidades similares a las de DHL Express.

BIBLIOGRAFÍA

- Amberg, Anita, Wolfgang Domschke and Stefan Vob. "Multiple center capacitated arc routing problem: A tabu search algorithm using capacitated trees." European Journal of Operational Research (2000): 1-4.
- Bailey, Donald G. An Efficient Euclidean Distance Transform. Paper. Massey, n.d.
- Bard, J.F, et al. A Branch and Cut Algorithm for the VRP with Satellite Facilities. Paper. Austin, 1997.
- Bullnheimer, Bernd, Richard F. Hartl and Christine Strauss. "Applying the Ant System to the Vehicle Routing Problem." 2ND International Conference on Metaheuristics. Vienna, 1997. 1-8.
- Byung-In, Kim, Kim Seongbae and Sahoo Surya. Balanced Clustering Algorithms for Improving Shapes on Vehicles Routing Problems. Report. The Woodlands, 2004.
- Czech, Zbigniew J. and Piotr Czarnas. Parallel simulated annealing for the vehicle routing problem with time windows. Paper. Spain: Distributed and Network-based Processing, 2002.
- de Hoon, Michiel, Seiya Imoto and Satoru Miyano. The C Clustering Library. C Library. Tokyo, 2008.
- DHL Express. Nuestra Historia. 06 02 2009 <www.dhl.com.ec>.
- Dorronsoró, Bernabé. The VRP Web. 03 2007. 05 02 2009 <<http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>>.
- Dror, M., G. Laporte and P. Trudeau. "Vehicle routing with split deliveries." Paper. 1994.
- Forero, David. "Prácticas realizadas en DHL." Quito, 1 7 2008.
- Ghiani, Gianpaolo, Gilbert Laporte and Roberto Musmanno. Introduction to Logistics Systems Planning and Control. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- Gribkivskaia, Irina, et al. Models for Pick-up and Deliveries from Depots with Lasso Solutions. Molde, n.d.
- Jativa, Esteban. Sistemas de Información y Análisis de Datos de DHL Diego Flores. 05 02 2009.

- Jih, Wan-rong and Jane Yung-jen Hsu. "Dynamic Vehicle Routing Using Hybrid Genetic Algorithms." International Conference on Robotics & Automation. Detroit, 1999. 1-6.
- Laporte, G. and F.V Louveaux. Solving Stochastic Routing Problems with the Integer L-shaped Method. Paper. Boston: Kluwer Academic, 1998.
- Lenstra, J. K. and Rinnooy Kan. "Complexity of vehicle routing and scheduling problems." Paper. 1981.
- Machado, Penousal, et al. Routing Problem: Doing it the Evolutionary Way. Paper. Coimbra, n.d.
- Mallarines, Eduardo. Descripcion y Posicionamiento de DHL en el mercado Diego Flores. Quito, 05 02 2009.
- Olivera, Alfredo. Heurística para Problemas de Ruteo de Vehículos. Paper. Uruguay, 2004.
- Ralphp, T.K, et al. "On The Capacitated Vehicle Routing Problem." Paper. 2001.
- RASC Calgary Centre. The Royal Astronomical Society of Canada. 10 05 2009 <<http://calgary.rasc.ca/>>.
- Sanchez, Gloria Torrubia and Victor M. Lozano. "Algoritmo Dijkstra: Un Tutorial Interactivo." 2001. Universitat de les Illes Balears. 02 04 2009 <<http://www.uib.es/ca/>>.
- Serway, Raymond A and John W Jewett. Fisica para ciencias e ingeniería. Séptima Edición. Mexico D.F: EDITEC S.A. de C.V., 2008.
- Shaw, Paul. Using Constraint Programming and Local Search Methods to Solve Vehicle Routing Problems. Paper. Glasgow, 1998.

