

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
Departamento de Matemáticas
Ingeniería en Logística y Transporte**

TEMA:

Diseño de una heurística para la clusterización y planificación de visita a clientes de un supermercado mayorista ubicado en la ciudad de Milagro

PROYECTO DE GRADUACIÓN
(Dentro de una materia de la malla)

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE

AUTORES:

Milton Eduardo Bustamante Yansaguano
José Vicente Arellano Banegas

Guayaquil-Ecuador
2013

DEDICATORIAS

A la Santísima Trinidad por darme su respectiva bendición, a mi familia especialmente a mis padres que han sido motivo de inspiración durante aquellos días difíciles que he atravesado a lo largo de mi vida académica, además de ser mi fuente de fortaleza para lograr todos y cada uno de las metas que me propongo.

Milton Eduardo Bustamante Yansaguano

A Dios por sobre todas las cosas por guiarme, protegerme y acompañarme en este viaje. A mis padres, porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí. A la Monse y mis abuelas. Gracias por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida. Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, comprensión y consejos en los momentos difíciles. A mis amigos (a los tres), gracias por estar, se les agrade el apoyo.

A todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

José Vicente Arellano Banegas

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia a Dios por prestarme vida e iluminar mi camino. También a mis padres: Milton e Isabel por confiar en mí y regalarme el más preciado de los tesoros el cual es la educación. A mis hermanos por estar a mi lado y darme todo su apoyo incondicional y necesario para cumplir con mis propósitos.

Milton Eduardo Bustamante Yansaguano

Primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado. A la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional. A mi director de tesis, Magister Erwin Delgado por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito. También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación. A mis compañeros de trabajo especialmente a la Ing. Com. Mariuxi C. por el conocimiento impartido y el apoyo brindado ayudándome a compaginar trabajo y estudio. A mi familia por ser un apoyo constante e incondicional en este camino, mis logros son suyos también.

José Vicente Arellano Banegas

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad del contenido de este proyecto de graduación, nos corresponden exclusivamente; así como el patrimonio intelectual de la misma a la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas de la ESPOL (Escuela Superior Politécnica del Litoral).

Milton Bustamante Yansaguano

José Arellano Banegas

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

M. Sc. Vanessa Salazar
PRESIDENTE

M. Sc. Erwin Delgado
DIRECTOR DE TESIS

Índice general

1. Planteamiento del Problema	14
1.1. Breve reseña de la Empresa	14
1.1.1. Misión	15
1.1.2. Visión	15
1.2. Descripción de la situación actual	15
1.2.1. Proceso de preventa de mercancías	16
1.2.2. Proceso de distribución de mercancías	16
1.3. Análisis de la problemática	18
1.3.1. Preventa de las mercancías	18
1.3.2. Distribución de las mercancías	19
1.4. Objetivo General	21
1.5. Objetivos Específicos	21
1.6. Hipótesis	22
2. Marco teórico	23
2.1. Introducción	23
2.2. Métodos de Agrupación y/o Clusterización	24
2.2.1. Introducción	24
2.2.2. Algoritmo de K -medias (Mac Queen 1967)	25
2.2.3. Algoritmo de CURE	26
2.2.4. Heurística de Asignación Generalizada de Fisher & Jaikumar	27
2.3. El problema de ruteo de vehículos	29
2.3.1. Introducción	29
2.3.2. El problema del agente viajero (TSP)	29
2.3.3. El problema de los m -agentes viajeros	31
2.3.4. El problema de ruteo con capacidades VRP o CVRP	33
2.4. Heurísticas para la resolución del TSP	34
2.4.1. Introducción	34
2.4.2. Heurística del vecino más cercano	35
2.4.3. Heurística de inserción	36
2.5. Métodos de búsqueda local	37
2.5.1. Procedimiento 2-intercambio	38

3. Metodología de Solución Propuesta	39
3.1. Estimación de Parámetros	40
3.1.1. Distancias entre Clientes	40
3.1.2. Tiempo de servicio en cada cliente	41
3.1.3. Velocidades de desplazamientos entre clientes	41
3.1.4. Matriz de tiempos de traslados	42
3.2. Clusterización de clientes	42
3.2.1. Funciones necesarias para la implementación de la heurística	43
3.2.2. Algoritmo de clusterización de clientes	45
3.2.3. Estructura de la solución	47
3.3. Determinación de las rutas diarias de los vendedores	48
3.3.1. Algoritmo de inserción para resolver el m -TSP	48
3.3.2. Estructura de la solución	49
3.4. Planificación de entrega de pedidos a clientes	50
3.4.1. Algoritmo de inserción para resolver el TSP	50
3.4.2. Estructura de la solución	51
4. Implementación de la heurística propuesta y análisis de los resultados	52
4.1. Introducción a Software a utilizar	52
4.1.1. Wolfram Mathematica 8.0.0	52
4.1.2. Google Earth 7.0.2.8415	53
4.1.3. Microsoft Office Excel 2013	54
4.2. Obtención de datos de los Clientes	54
4.2.1. Mapeo de Clientes	55
4.2.2. Depósito	56
4.2.3. Tiempo de Servicio en cada cliente	57
4.3. Clusterización de clientes	62
4.4. Determinación de las rutas diarias de los vendedores	68
4.4.1. Parámetros y Limitaciones	68
4.4.2. Implementación	68
4.5. Planificación de entrega de pedidos a clientes	72
4.5.1. Parámetros y Limitaciones	72
4.5.2. Implementación	73
4.5.3. Ejemplificación	75
4.6. Comparativo entre la Planificación de entrega de pedidos actual vs. Planificación de entrega propuesta	75
4.6.1. Comparación N°1	76
4.6.2. Comparación N°2	79
5. Conclusiones	82
6. Recomendaciones	85

Índice de figuras

Figura 1.1. Instancia de un día de entrega de mercancías	20
Figura 2.1. Posibles Agrupamientos (b,c,d) para una instancia (a) de 20 clientes [1].	25
Figura 2.2. Ejemplificación del VRP o CVRP [3].	34
Figura 2.3. Ejemplificación de un movimiento 2-opt [8].	38
Figura 4.1. Ubicación espacial de Clientes del Supermercado Mayorista	56
Figura 4.2. Ubicación espacial del Supermercado Mayorista	57
Figura 4.3. Distribución Weibull para el Tiempo de Servicio del Vendedor	61
Figura 4.4. Distribución Weibull para el Tiempo de Servicio del Transportista	61
Figura 4.5. Representación de Clientes en el Plano	64
Figura 4.6. Representación de Clientes Agrupados en el Plano	65
Figura 4.7. Clúster 1	65
Figura 4.8. Clúster 2	65
Figura 4.9. Clúster 3	66
Figura 4.10. Clúster 4	66
Figura 4.11. Clúster 5	66
Figura 4.12. Clúster 6	66
Figura 4.13. Clúster 7	66
Figura 4.14. Clúster 8	66
Figura 4.15. Clúster 9	67
Figura 4.16. Clúster 10	67
Figura 4.17. Secuencia de Visita a Clientes del Clúster 1 (Vendedor 1)	71
Figura 4.18. Secuencia de Visita a Clientes del Clúster 1 (Vendedor 2)	71
Figura 4.19. Secuencia de Visita a Clientes del Clúster 1 (Vendedor 3)	72
Figura 4.20. Secuencia de Visita del Transportista (Ejemplificación)	76
Figura 4.21. Clientes georeferenciados para la Comparación N° 1	77
Figura 4.22. Comparación N° 1 Ruta Transportista	78
Figura 4.23. Comparación N° 1 Ruta Propuesta	78
Figura 4.24. Clientes georeferenciados para la Comparación N° 2	79
Figura 4.25. Comparación N° 2 Ruta Transportista	81
Figura 4.26. Comparación N° 2 Ruta Propuesta	81

Índice de tablas

Tabla 4.1. Especificaciones del Depósito	56
Tabla 4.2. Estadísticas descriptivas: Tiempo servicio Vendedores (Min.)	58
Tabla 4.3. Estadísticas descriptivas: Tiempo servicio Transportistas (Min.)	59
Tabla 4.4. Parámetros de Distribución Weibull para el Tiempo de Servicio	62
Tabla 4.5. Planificación de visita a clientes según Clústers definidos	67
Tabla 4.6. Planificación de visita a clientes del Clúster 1	70
Tabla 4.7. Ejemplo de planificación de entrega de pedidos	75
Tabla 4.8. Resumen de la Comparación N° 1	78
Tabla 4.9. Resumen de la Comparación N° 2	80

RESUMEN

La empresa en estudio es un supermercado mayorista que se encarga de la preventa y distribución de mercaderías de consumo masivo en Milagro y en ciudades aledañas. El estudio se centra en mejorar la logística de distribución de las mercaderías en Milagro mediante el diseño de una heurística, la misma que consta de tres etapas: clusterización de clientes, determinación de las rutas diarias de los vendedores, y planificación de entrega de pedidos a clientes.

En la primera etapa se agrupan los clientes considerando la ubicación geográfica de cada uno, es decir agrupando a aquellos que se encuentran lo más próximos entre sí, y respetando una cantidad determinada de clientes para cada agrupación.

La siguiente etapa consiste en la determinación de las rutas diarias de los vendedores, para lo cual se toman en cuenta las agrupaciones definidas en la etapa anterior, adicionalmente se considera el número de clientes que cada vendedor puede atender diariamente. Luego se determina la secuencia de visita a los clientes que cada vendedor debe realizar, mediante la implementación de un algoritmo de inserción que resuelve un m -TSP.

La última etapa consiste en el diseño de la ruta de entrega de pedidos, para los clientes que lo solicitaron previamente en la visita realizada por los vendedores. La ruta está dada por la implementación de un algoritmo de inserción que resuelve un TSP.

Cabe indicar que de la heurística que se diseña, la primera y la segunda etapa se las realiza para definir la planificación táctica de visita a clientes. Es decir organizar técnicamente una base de datos de clientes que deben ser visitados en un horizonte de planificación establecido.

INTRODUCCIÓN

Debido a las exigencias actuales del mundo globalizado, y con la finalidad de tener una mejora continua de cada uno de los procedimientos que se llevan a cabo dentro del módulo de distribución de bienes en el área logística, surge la necesidad de tomar medidas que se adapten a la pronta resolución de la problemática tradicional que afecta directa e indirectamente la oportuna entrega de pedidos a clientes. Es así como dar solución al problema de la planificación de visita a clientes, resulta de suma importancia para el desarrollo y competitividad del mundo empresarial ya que si se emplean eficientes metodologías se logrará la disminución de factores críticos que afectan a las compañías, tales como: tiempos de ejecución de actividades, costos operativos, exceso de kilómetros recorridos en su rutas de distribución, etc.

El presente estudio fue realizado para un supermercado mayorista, el cual muestra una de las muchas situaciones por las que atraviesa una empresa la cual tiene dentro de sus actividades principales la venta de productos de consumo masivo, donde se es requerida la oportuna y eficaz toma de decisiones para poder lograr un mayor beneficio ya sea maximizando utilidades o minimizando costos.

Las herramientas hoy en día utilizadas para la correcta planificación de actividades, son aquellas que nos proveen los métodos de optimización, los cuales nos permitirán encontrar el resultado óptimo o a su vez aproximaciones en tiempos relativamente razonables.

Respecto a la heurística que se diseña y previo a la planificación de visitas a clientes, es indispensable analizar el comportamiento que tienen los pedidos que cada uno genera diariamente dando origen a la sectorización o clusterización de aquellos que de alguna manera estén correlacionados por variables tales como: frecuencia de pedidos o distancias geográficas.

Cabe mencionar que es relativamente más ventajoso enfocar el estudio respecto a la ubicación geográfica; luego de aquello es imprescindible que se realice una visita sistemática y ordenada a la hora de realizar la preventa de las mercaderías, para que posteriormente el proceso de entrega de las mismas de igual manera sea realizado eficientemente.

Luego de la implementación de la heurística, se espera que la empresa en estudio así como muchas que se encuentran con problemas similares, logren una correcta sectorización del territorio en el cual realizan sus ventas y además puedan obtener mayor eficiencia a la hora de llevar a cabo sus operaciones diarias en cuanto a planificación de visitas a sus clientes.

Capítulo 1

Planteamiento del Problema

1.1. Breve reseña de la Empresa

La empresa en la cual se orienta el presente estudio es de tipo familiar, tiene más de 9 años brindando servicios de abastecimientos de mercancías, a un considerable número de tiendas en Milagro y sus zonas aledañas. A través de todos estos años, se ha mantenido la excelente calidad y el buen precio de cada uno de sus productos, además del buen servicio al cliente que los caracteriza.

El supermercado mayorista cuenta con diversos formatos de atención a los usuarios. Uno de sus principales puntos operativos y el de mayor importancia es la venta de mercancías de consumo masivo mediante dos medios: vía call center y mediante la visita de los vendedores a sus respectivos clientes. Además se dedica a la distribución de las ya mencionadas mercancías a sus clientes clasificados como: mayoristas, semi-mayoristas y minoristas (cobertura).

1.1.1. Misión

Comercializar productos y servicios excediendo las expectativas de nuestros clientes y proveedores, logrando negocios de beneficio mutuo, contando con personal calificado y motivado y comprometiéndonos con el desarrollo comunitario.

1.1.2. Visión

Ser el distribuidor preferido del pequeño y mediano comercio ecuatoriano.

1.2. Descripción de la situación actual

En este contexto se analizará como la empresa distribuye sus productos desde su almacén principal hacia sus diferentes clientes. Para efectos de estudio se tomará en cuenta solo los clientes ubicados en Milagro, y el almacén principal de donde se proveerá todos los productos de consumo masivo.

Para la distribución de las mercancías ya se ha dividido a Milagro en sectores, cabe mencionar que cada cliente se encuentra dentro de un sector específico, además la nomenclatura usada para etiquetar dichos sectores es el abecedario, comprendido desde la letra A hasta la letra Z incluidas las letras CH, LL y RR.

Actualmente se cuenta con 30 sectores de los cuales 18 son atendidos mediante camiones (DUTRO / CAMION FURGON) y 12 son atendidos con el sistema de transporte conocido como moto carguera (tricimoto).

En ocasiones cuando existen notas de pedido cuyo volumen es representativo se procede a entregar la mercadería sólo en camión, esto generalmente sucede con clientes mayoristas o semi-mayoristas.

Para obtener una mayor perspectiva de la actividad operacional que la empresa realiza diariamente para distribuir sus productos, se definen 2 procesos, los cuales se describen a continuación:

1.2.1. Proceso de preventa de mercancías

- **Toma de pedidos**

El inicio de la actividad surge mediante los pedidos por parte de los clientes hacia los vendedores, los cuales visitan a los clientes diariamente dependiendo de la planificación previamente diseñada por día y por sector a cubrir (Milagro). Los pedidos son enviados simultáneamente a la empresa mediante dispositivos electrónicos conectados al sistema. Además se generan constantemente durante las horas laborables de los vendedores, es decir desde las 08H00 hasta 17H00.

1.2.2. Proceso de distribución de mercancías

- **Clasificación de los pedidos solicitados**

Una vez generados los pedidos por parte de los clientes se los clasifica de tal manera que se dé prioridad a aquellos con entrega inmediata. Posteriormente a esto se procede a una nueva clasificación de las notas de pedidos generadas por: días de envío, por ciudad y por sector en el caso de la ciudad de Milagro y Babahoyo. El software con el que dispone

la empresa clasifica las notas de pedido en 2 categorías las cuales son: productos que salen por cajas y productos que salen por unidades, ubicados en bodega principal (01) y bodega de varios (07) respectivamente; con la finalidad de realizar en la medida posible una gestión ordenada.

- **Fase de recolección de productos**

En cada una de las bodegas (01) y (07), se realizan independientemente el proceso de recolección de productos para armar cada uno de los pedidos solicitados (picking).

Bodega de varios (07)

El personal encargado, realiza la recolección de los productos simultáneamente cada vez que les pasan las notas de pedidos previamente clasificadas por día, ciudades, y sectores específicos en el caso de Milagro. Cada uno de los pedidos solicitados por los clientes es colocado en fundas etiquetadas con el nombre del cliente y el detalle del número de fundas que fueron necesarias para empacar el pedido. En cada nota de pedido se procede manualmente a colocar la cantidad de fundas que fueron utilizadas, la cantidad de bultos y sueltos, junto con el número de gaveta en la que se va a colocar todo el pedido. Adicionalmente existen productos que no son empacados y simplemente son denominados para efectos de identificación como bultos y sueltos. Posteriormente, se colocan las fundas en gavetas numeradas con la finalidad de facilitar la búsqueda de los mismos en el camión al momento de la distribución.

Bodega principal (01)

El personal encargado a la hora de realizar la recolección de productos lleva a cabo el siguiente orden en cuanto a prioridades de despacho:

1. Transferencias de productos para abastecer el almacén
2. Pedidos de clientes presenciales
3. Pedidos de clientes mayoristas y minoristas que van a ser entregados al día siguiente.

Al igual que en la bodega (07), existen productos denominados para efectos de identificación como bultos y sueltos.

- **Fase de carga y verificación de las mercancías en los camiones**

En el área de embarque, antes de cargar: las gavetas, las cajas, los bultos y los sueltos en cada uno de los camiones de distribución, personal encargado (chequeadores), procede a revisar cada una de las notas de pedidos y a su vez cada línea del pedido, mediante una constatación física de la mercadería. Luego de aquello se embarca toda la mercadería en cada uno de los camiones, considerando únicamente el aprovechar el máximo espacio disponible en los mismos.

1.3. Análisis de la problemática

1.3.1. Preventa de las mercancías

La empresa tiene a su disposición 3 vendedores, los cuales tienen ya establecido una cartera de clientes. Si bien es cierto existe una planificación de visita a los clientes pero

no se la ha realizado con fundamentos técnicos, es decir no se ha considerado: ubicación geográfica de los clientes, tiempo de traslados entre ellos, ni el tiempo de jornada laboral de cada vendedor.

1.3.2. Distribución de las mercancías

En la actualidad no existe un estudio del ruteo de los vehículos que realizan el transporte de la mercadería desde el almacén principal hacia las tiendas o puntos de entrega de las mercaderías solicitadas. Por lo tanto, la ruta a seguir diariamente es según el criterio y la vasta experiencia de los transportistas, quienes toman en cuenta la proximidad entre los puntos de entrega que le han sido designados por las solicitudes de pedido, además consideran situaciones en las que ciertos puntos de entrega solamente reciben los pedidos en las mañanas o solamente en las tardes, debido a que pertenecen a sectores de alto riesgo y a clientes que disponen del dinero para cancelar lo solicitado únicamente en horas de la tarde (sea el caso de algún restaurante).

Bajo este contexto el problema en sí se deriva desde que se genera el despacho de los productos en la bodega (07) ya que al no seguir una secuencia de visita, los operarios ingresan la mercadería de manera desordenada, tan solo considerando el sector a la cual pertenece el cliente. Esto a su vez, genera que al momento de cargar las gavetas, cajas y bultos en el transporte, tampoco se siga una secuencia lógica, lo que ocasionaría que posiblemente el primer cliente al cual el transportista visitará este ubicado en la parte final del camión, ya que como mencionamos anteriormente el transportista se encarga de

seguir una secuencia de visita en base a su experiencia. En otras palabras, el problema que básicamente se puede observar es que no se cuenta con una integración total de los procesos implicados dentro de la distribución, ya que cada área trabaja de manera independiente y esto produce que los costos operativos se incrementen.

Adicionalmente, existen problemas implicados netamente en la distribución de las mercancías, debido a que no se está respetando los sectores previamente definidos a cubrir por el camión. Es decir, por cubrir un cliente de un sector diferente al que está planificado en la ruta del día, los tiempos se incrementan así como también el costo de la ruta en dólares.

A continuación en la Figura 1.1 se muestra la planificación definida y una instancia para un día particular con el objetivo de ilustrar de mejor manera la operación que se está realizando actualmente con respecto a la recepción y entrega de los pedidos:

Planificación definida							
Día de Entrega	Sectores a Visitar						
Martes	A	B	C	D	E	F	

Proceso	Día / Sector Atendido	A	B	C	CH	D	E	F	G	H	I	J	K	L	LL	M	N	Ñ	O	P	Q	R	RR	S	T	U	V	W	X	Y	Z	Total
Toma de pedidos y despacho	Lunes	25	22	22	0	15	2	10	3	2	2	0	0	0	0	2	1	2	0	0	1	0	1	2	3	1	1	3	2	0	2	124
Entregas de Pedidos	Martes	25	22	22		15	2	10															1								96	

Se realiza un viaje al Sector RR por 1 sólo cliente.

Figura 1.1: Instancia de un día de entrega de mercancías

Mediante un análisis se pudo constatar que para el día lunes en promedio se generan 124 notas de pedido, de las cuales el 77% pertenece al sector designado a la distribución del día siguiente y un 23% pertenecen a clientes de otro sector. El mismo análisis se

realizó para los días posteriores, evidenciando así la falta de cumplimiento de las políticas de visitas a clientes establecidas para las preventas. De la misma manera la entrega de las mercancías también se verán afectadas ya que se debe de cumplir con la promesa de entrega.

1.4. Objetivo General

Diseñar una planificación táctica de visita a clientes, mediante el desarrollo de una heurística, para así contribuir con el mejoramiento de la logística de distribución de la empresa en estudio y generar mayor ventaja competitiva en el mercado.

1.5. Objetivos Específicos

- i) Diseñar una adecuada sectorización, por medio de clustering de clientes de acuerdo a su ubicación geográfica, y el número de clientes que puede atender cada vendedor diariamente.
- ii) Proponer una planificación de visita diaria por parte de los vendedores a todos los sectores que se definan.
- iii) Minimizar las distancias recorridas, tiempos y costos operativos involucrados en los procesos de preventa y entrega de los pedidos.
- iv) Proponer una planificación operativa y eficiente de la entrega de pedidos, a aquellos clientes que lo solicitaron previamente.

1.6. Hipótesis

La implementación de la metodología de solución propuesta determinará una planificación eficiente de visita a clientes, además ayudará a contribuir con el desarrollo y competitividad de la empresa aumentando sus niveles de servicio al cliente.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción

La optimización de recursos empezará en base a la aplicación de un modelo heurístico para la agrupación y/o clusterización de los clientes, para de esta manera diseñar la planificación de la visita de los vendedores que realizan la preventa de las mercancías, así como también la entrega de las mismas por los transportistas, luego se procederá a la aplicación de un método de post-optimización con el cual se espera mejorar la solución encontrada inicialmente en cuanto a la planificación. La aplicación de lo mencionado, provocaría en la empresa una reducción de factores críticos que se generan naturalmente al momento de la preventa y distribución de las mercancías hacia los diferentes puntos (clientes).

En el presente capítulo se analizarán: teorías, técnicas y avances de la ciencia existentes en la actualidad que ayudarán para la resolución de la problemática antes descrita y que contribuirán además con el cumplimiento de los objetivos

planteados.

2.2. Métodos de Agrupación y/o Clusterización

2.2.1. Introducción

El problema de generar k agrupamientos de una población heterogénea de N elementos (total de clientes) es considerado como un problema NP-Completo, cuando se consideran restricciones o características que incrementan su complejidad, aún cuando los puntos a ser agrupados se encuentren en un espacio euclídeo de dos-dimensiones. Para estos casos, los métodos de solución aplicados son los heurísticos, debido a que para este tipo de problemas no se conoce un algoritmo determinístico en tiempo polinomial que los resuelva [1].

Cada grupo o clúster, en la mayoría de ocasiones se los definen según criterios de ubicación geográfica, específicamente mediante cercanía entre los elementos de una población, tratando así de minimizar la distancia entre los elementos de un mismo agrupamiento [1].

En la Figura 2.1 se muestra 3 ejemplos (b,c,d) de agrupamientos que se pueden realizar a un determinado grupo de clientes ubicados de forma dispersa en un plano. Los agrupamientos vienen dados por 3 distintos criterios de agrupación.

En la actualidad existen varios algoritmos de agrupamientos los mismos que se

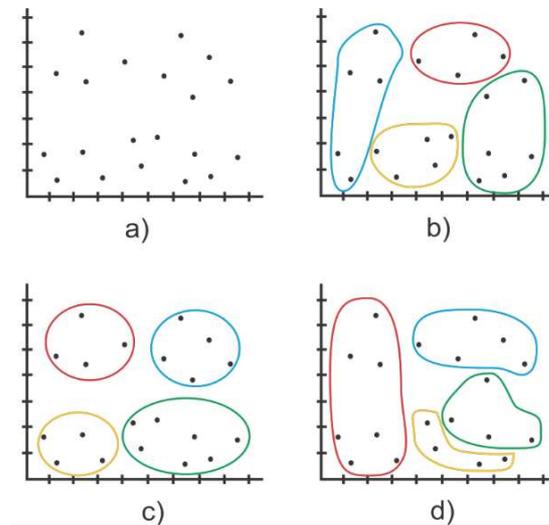


Figura 2.1: Posibles Agrupamientos (b,c,d) para una instancia (a) de 20 clientes [1].

dividen en: paramétricos y no paramétricos. A su vez aquellos algoritmos no paramétricos también se dividen en: jerárquicos, particionales y basados en densidad.

En el presente estudio es de mayor interés presentar los algoritmos particionales, que son aquellos que realizan una división inicial de los datos, en grupos y luego mueven los objetos de un grupo a otro según se optimice alguna función objetivo [2].

A continuación se muestran algunos de los métodos de clusterización de tipo particionales disponibles en la literatura:

2.2.2. Algoritmo de K -medias (Mac Queen 1967)

Es uno de los más simples y conocidos algoritmos de agrupamiento, sigue una forma fácil y simple para dividir una base de datos dada en k grupos (fijados a

priori). La idea principal es definir k centroides (uno para cada grupo) y luego tomar cada punto de la base de datos y situarlo en la clase de su centroide más cercano. El próximo paso es recalcular el centroide de cada grupo y volver a distribuir todos los objetos según el centroide más cercano. El proceso se repite hasta que ya no hay cambio en los grupos de un paso al siguiente [2].

2.2.3. Algoritmo de CURE

Constituye un algoritmo híbrido entre los dos enfoques jerárquico y particional, que trata de emplear las ventajas de ambos y de eliminar las limitaciones. En éste, en lugar de usar un solo punto como representante de un grupo se emplea un número c de puntos representativos del grupo. La similaridad entre dos grupos se mide por la similaridad del par de puntos representativos más cercanos, uno de cada grupo [2].

Para tomar los puntos representativos selecciona los c puntos más dispersos del grupo y los atrae hacia el centro del mismo por un factor de contracción α , en cada paso se unen los dos grupos más cercanos y una vez unidos se vuelve a calcular para éste su centro y los c puntos representativos [2].

Con este algoritmo se encuentran grupos de diferentes tamaños y formas, con ese método de sacar c puntos representativos y atraerlos hacia el centro del grupo CURE maneja los puntos ruido y outliers¹ [2].

¹outliers, son datos que pueden contener información importante presentes en la base de datos

Es importante mostrar adicionalmente un método muy particular de realizar una sectorización enfocado directamente a clientes que previamente ya se han determinado sus ubicaciones geográficas.

2.2.4. Heurística de Asignación Generalizada de Fisher & Jaikumar

Fisher & Jaikumar [4], propusieron una heurística para resolver un problema de ruteo de vehículos en la cual primero realizan clusters de clientes mediante la resolución de un problema de asignación Generalizada (GAP). Dentro de la primera fase se fijan k clientes semillas con $k = 1, 2, \dots, n$ que van a ser una especie de centroide sobre los cuales se formarán los clústers. Luego de aquello, se decide que clientes asignar a cada uno de los clusters de modo de no violar la capacidad del recurso (vehículo o vendedor), mediante un GAP que se formula a continuación como una programación entera.

La notación utilizada en [3] para el GAP es la siguiente:

I : Conjunto de clientes ($i = 1, 2, \dots, m$)

K : Conjunto de clientes semillas S_k ($k = 1, 2, \dots, n$)

Parámetros y Variables

Q : Capacidad del recurso (vehículo o vendedor)

q_{ik} : Demanda cliente i si es asignado al cliente semilla k

d_{ik} : Costo del cliente i si es asignado al cliente semilla k

La variable binaria:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{si el cliente } i \text{ es asignado al cliente semilla } k \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

Modelización matemática

$$\text{Min } z = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m x_{ik} d_{ik} \quad (2.1)$$

sujeto a :

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^m q_{ik} x_{ik} \leq Q \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (2.3)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad \forall k = 1, 2, \dots, n \quad (2.4)$$

El objetivo es minimizar el costo total de la asignación, como se indica en (2.1).

La restricción (2.2) indica que cada cliente es asignado a exactamente un clúster.

En la restricción (2.3) se impone que la demanda de los clientes en un mismo clúster no puede superar la capacidad del recurso (vehículo o vendedor). En (2.4)

se define la naturaleza de la variable x [3].

El costo de insertar un cliente i en el cluster k se define como el costo de la mejor inserción del cliente i en la ruta $(0, s_k, 0)$. En el caso de que los costos sean simétricos, $d_{ik} = c_{0i} + c_{i,s_k} - c_{0,s_k}$ [3].

2.3. El problema de ruteo de vehículos

2.3.1. Introducción

Hoy en día, es importante que se realice una eficiente planificación y gestión de la flota disponible en cada una de las empresas para de esta manera reducir en la medida de lo posible costos fijos y variables generados por el exceso de kilómetros recorridos en sus rutas. Para llevar a cabo lo mencionado urge dar solución al Problema de ruteo de vehículos que de manera generalizada básicamente consiste en:

Dado un conjunto de clientes y depósitos dispersos geográficamente y una flota de vehículos, determinar un conjunto de rutas de costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos, para que los vehículos visiten a todos los clientes [3].

Aunque el problema de ruteo de vehículos pueda tener muchas variaciones, podemos reducirlas a unos cuantos tipos básicos como observaremos a continuación:

2.3.2. El problema del agente viajero (TSP)

El problema del Agente Viajero o TSP por sus siglas en inglés (Travelling Salesman Problem) es uno de los problemas combinatorios que más ha revolucionado a través del tiempo generando iniciativa y motivación a muchos matemáticos y científicos. Su primera aparición en los años 1930 en el estudio de la Universidad de Princeton llamado “48 States Problem” presentado por Hassler Whitney, quien planteaba encontrar el tour más corto para el agente viajero comenzando desde

una ciudad (estado) dada, visitando cada una de las ciudades (estados) de un grupo específico. Luego regresando al punto original de partida [5].

A partir del estudio realizado por Hassler podemos definir hoy en día al TSP como la visita de un solo vehículo o vendedor a todos los clientes en una sola ruta y a un costo mínimo [5], y de esta manera adaptarlo a muchas situaciones por las que atraviesan empresas distribuidoras como es el caso del supermercado mayorista en este estudio.

La notación utilizada para el TSP es la siguiente:

I : Conjunto de clientes ($i = 1, 2, \dots, n$)

J : Conjunto de clientes ($j = 1, 2, \dots, n$)

Parámetros y Variables

c_{ij} : Costo operacional del cliente i al cliente j

La variable binaria:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el cliente } i \text{ es visitado justo antes de visitar al cliente } j \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

Modelización matemática

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^n \sum_{i=j}^n x_{ij} c_{ij} \quad (2.5)$$

sujeto a :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

$$\sum_{i \in S, j \in \Delta^+(i) \setminus S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V \quad (2.8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (2.9)$$

La función objetivo (2.5) establece que el costo total de la solución es la suma de los costos de los arcos utilizados. Las restricciones (2.6) y (2.7) indican que la ruta debe llegar y abandonar cada nodo exactamente una vez. Finalmente, las restricciones (2.8) son llamadas restricciones de eliminación de sub-tours e indican que todo subconjunto de nodos S debe ser abandonado al menos una vez [3].

En (2.9) se define la naturaliza de la variable x .

2.3.3. El problema de los m -agentes viajeros

A diferencia del TSP, el Problema de los m Agentes Viajeros o m -TSP tiene un depósito y m vehículos. El objetivo es construir exactamente m rutas, una para cada vehículo, de modo que cada cliente sea visitado una vez por uno de los vehículos. Cada ruta debe comenzar y finalizar en el depósito y puede contener a lo sumo p clientes [3].

Una formulación existente en la literatura y propuesta por C. Miller, A. Tucker es la siguiente:

Notación utilizada para el m -TSP:

I : Conjunto de clientes ($i = 1, 2, \dots, n$)

J : Conjunto de clientes ($j = 1, 2, \dots, n$)

Parámetros y Variables

c_{ij} : Costo operacional del cliente i al cliente j

La variable binaria:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el cliente } i \text{ es visitado justo antes de visitar al cliente } j \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

Modelización matemática

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} c_{ij} \quad (2.10)$$

sujeto a :

$$\sum_{j=1}^n x_{oj} = M \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2.11)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.13)$$

$$u_i - u_j + px_{ij} \leq p - 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (2.15)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

La función objetivo (2.10) establece que el costo total de la solución es la suma de los costos de los arcos utilizados.

La restricción (2.11) indica que exactamente M vehículos salen del depósito y las restricciones (2.12) y (2.13) aseguran que cada cliente es un nodo intermedio en exactamente una ruta. Finalmente, con (2.14) se eliminan los sub-tours y se impone que en cada ruta no haya más de p clientes [3].

En (2.15) y (2.16) se define la naturaliza de las variables: x y u .

Existe un caso particular cuando el número de clientes a visitar no está acotado es decir cuando $p = n$, este caso el M-TSP puede formularse como un TSP con m copias del depósito tales que la distancia entre ellas es infinita (para que el arco entre ellas no sea escogido). Es decir las soluciones a ese TSP no utilizarán arcos que conectan dos copias del depósito y por lo tanto, pueden ser interpretadas como soluciones del m-TSP [3].

2.3.4. El problema de ruteo con capacidades VRP o CVRP

El VRP aparece naturalmente como un problema central en transporte, distribución y logística. Este modelo ha sido estudiado por cerca de 50 años. Sistemas computarizados y modelos como éste empleados en el diseño de rutas son ampliamente aplicados en la actualidad. Estos registran potenciales ahorros, entre el 5% y el 20% de los costos totales de transportación y entre el 10% y el 20% del costo final de los bienes [3].

El VRP es una extensión del m -TSP en la cual cada cliente $i \in V$, tiene asociada una demanda d_i y cada vehículo tiene una capacidad C (la flota es homogénea). En este problema la cantidad de rutas no es fijada de antemano como en el TSP y en el M -TSP, ya que m (cantidad de rutas) generalmente es desconocido y se determina como una de las soluciones del problema.

En la Figura 2.2 se muestra una ejemplificación del VRP.

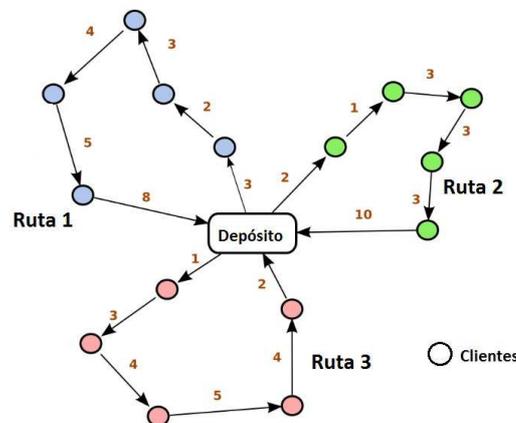


Figura 2.2: Ejemplificación del VRP o CVRP [3].

2.4. Heurísticas para la resolución del TSP

2.4.1. Introducción

Debido a que el TSP está enmarcado dentro de los problemas NP-Difíciles (NP-Hard), es decir que aunque sea de fácil formulación, encontrar una solución óptima es muy difícil, ya que el tiempo de cómputo que se lleva a cabo para la resolución de estos problemas crece de manera exponencial según el número de nodos (clientes) con los que se esté trabajando.

Por tal motivo se hace de gran utilidad hacer uso de técnicas heurísticas que aunque no necesariamente se llegue a encontrar la solución óptima, nos generarán un conjunto de soluciones excelentes y muy probablemente cercanas a la óptima. A continuación se describen dos de las heurísticas de tipo constructivas mencionadas en la literatura:

2.4.2. Heurística del vecino más cercano

Se trata de un método que consiste en la elección del nodo (cliente) más cercano para ir trazando los arcos de unión y de esta manera construir la ruta final. Las fases o etapas de este método son las siguientes:

- 1) Elegir cualquier nodo como comienzo de la ruta.
- 2) Encontrar el nodo más cercano al último nodo añadido a la ruta y añadirlo a la misma.
- 3) Repetir el segundo paso, hasta completar todos los nodos y finalmente unir los nodos: primero y último.

Se trata del proceso más sencillo y simplista, aunque resulta de enorme aplicación práctica por su sencillez. Los resultados obtenidos a través de este método son generalmente muy pobres y muy fácilmente mejorables, de ahí que su aplicación requiera utilizar en un segundo momento procedimientos de mejora de rutas. Una de las ventajas del método es que se trata de un método completamente determinista, dado que siempre proporciona la misma solución.

2.4.3. Heurística de inserción

Otra aproximación intuitiva a la resolución del TSP consiste en comenzar construyendo ciclos que visiten únicamente unos cuantos nodos (clientes), para posteriormente extenderlos insertando los nodos restantes. En cada paso se inserta un nuevo nodo en el ciclo hasta obtener la ruta final de tal manera que se visiten todos los nodos [8].

Este procedimiento se analiza en el siguiente esquema [8]:

Algoritmo de inserción

Inicialización

Seleccionar un ciclo inicial (subtour) con k vértices.

Hacer $W = V \setminus \{\text{vértices seleccionados}\}$.

Mientras ($W \neq \emptyset$)

Elegir j de W de acuerdo con algún criterio preestablecido

Insertar j donde menos incremente la longitud del ciclo

Hacer $W = W \setminus \{j\}$.

Cabe mencionar que existen varias posibilidades para implementar el esquema anterior según varios criterios de selección o de elección del nodo j de W que luego va a ser insertado en el ciclo [9].

Algunos criterios para ELEGIR o tomar un nodo j son:

- j sea el nodo más próximo a un nodo que ya está en el ciclo.
- j sea el nodo más lejano a un nodo que ya está en el ciclo.
- j sea el nodo más barato, o sea el que hace crecer menos la longitud del ciclo.
- j se elige al azar (aleatoriamente).

Para INSERTAR el nodo j , previamente elegido en una posición del ciclo:

Sea $C_{i,j}$ es el costo o la longitud de la arista (i, j) .

Se toma dos nodos consecutivos del ciclo, $(i, i + 1)$ de manera que:

$C_{i,j} + C_{j,i+1} - C_{i,i+1}$ sea mínimo o sea el que hace crecer menos la longitud del ciclo [9].

Entonces insertamos j entre i y $i + 1$.

2.5. Métodos de búsqueda local

Los métodos de búsqueda local son aquellos utilizados para mejorar en lo posible las soluciones antes encontradas por los métodos constructivos debido a que éstas, generalmente no son tan buenas y pueden fácilmente ser mejoradas mediante una búsqueda en la vecindad de la solución encontrada es decir realizando movimientos o intercambios en dicha solución de tal manera que hagan mejorar una determinada función objetivo.

A continuación se muestra uno de los métodos existentes en la literatura revisada:

2.5.1. Procedimiento 2-intercambio

Este procedimiento está basado en la siguiente observación para grafos euclídeos.

Si un ciclo Hamiltoniano (solución de un TSP) se cruza a sí mismo, puede ser fácilmente mejorado, basta con eliminar las dos aristas que se cruzan y reconectar los dos caminos resultantes mediante aristas que no se crucen.

El ciclo final será un camino hamiltoniano de menor longitud que el inicial.

Un *movimiento 2-opt* consiste en eliminar dos aristas y reconectar los dos caminos resultantes de una manera diferente para obtener un nuevo ciclo.

La figura 2.3 ilustran este movimiento en el que las aristas (i, j) y (l, k) son reemplazadas por (l, j) y (i, k) [8].

Notar que sólo hay una manera de reconectar los dos caminos formando un único tour.

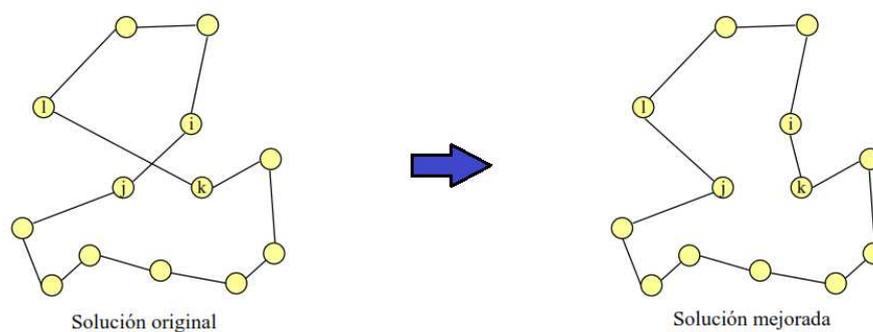


Figura 2.3: Ejemplificación de un movimiento 2-opt [8].

Capítulo 3

Metodología de Solución Propuesta

En este capítulo se presenta una alternativa de solución diseñada para la planificación de visita a clientes por parte de los vendedores y además para los transportistas de la empresa en estudio, mediante el diseño de una heurística la cual consta de las siguientes etapas:

- Clusterización de clientes
- Determinación de las rutas diarias de los vendedores
- Planificación de entrega de pedidos a clientes

Cada una de las etapas descritas tienen una estrecha relación y actúan de manera dependiente, para la etapa de Clusterización se tomarán en cuenta restricciones tales como: el número de clientes que cada vendedor puede atender diariamente en una jornada laboral normal, luego cada clúster va a tener el total de clientes que pueden atender todos los vendedores con los que se dispone.

Se necesita tener disponible la clusterización de los clientes para poder realizar la determinación de las rutas diarias de los vendedores. En cada una de las rutas que se definen se consideran los tiempos de traslado entre cada cliente que pertenece a un determinado clúster, así como los tiempos de atención a cada uno de ellos.

Así mismo se estima la cantidad de clientes que solicitarán los pedidos en un determinado clúster, para luego proceder a la elaboración de una planificación diaria de entrega de los pedidos.

3.1. Estimación de Parámetros

Antes de la explicación detallada de las etapas de la heurística es indispensable la estimación de parámetros que son necesarios para su posterior implementación. Los parámetros más relevantes son los tiempos de traslados, los mismos que están asociados directamente a las distancia entre clientes, tiempo de atención a cada uno de ellos y velocidades de desplazamientos de los vendedores y/o transportistas.

3.1.1. Distancias entre Clientes

Para el cálculo de las distancias, se utiliza la métrica de Manhattan o distancia rectilínea, debido a que esta métrica considera que la menor distancia entre dos puntos cualesquiera, es la medida a lo largo de los ejes de coordenadas y por lo tanto en ángulo recto.

Sean $P_1 = (x_1, y_1)$ y $P_2 = (x_2, y_2)$ puntos en el plano y que representarán un par de clientes comprendidos en la base de datos proporcionada por la empresa.

Entonces, la distancia rectilínea entre estos dos puntos o dos clientes está dada por la ecuación:

$$Distancia(P_1, P_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|$$

Sin lugar a dudas el uso de esta métrica es una aproximación más real, para ser considerada en un problema de ruteo vehicular y en la heurística que se propone porque toma en cuenta movimientos horizontales y verticales en el plano, lo cual es equivalente a un movimiento realizado por un vendedor y/o transportista en las calles de una ciudad determinada.

3.1.2. Tiempo de servicio en cada cliente

Es aquel tiempo que le toma al vendedor y/o transportista atender a cada uno de los clientes ya sea por la toma de un pedido o por la entrega del mismo. Para estimar el tiempo de servicio en cada cliente se procede a realizar un análisis estadístico durante un período de tiempo dado.

3.1.3. Velocidades de desplazamientos entre clientes

La velocidad de desplazamiento va a depender de algunos factores tales como: medio de transporte, tráfico en horas normales y horas picos, etc. Por tales motivos se realiza entrevistas personalizadas a los vendedores y transportistas para lograr una estimación de las velocidades normales de traslados de cada uno de ellos. El parámetro de velocidad posteriormente contribuirá con la construcción de la matriz de tiempos de traslados.

3.1.4. Matriz de tiempos de traslados

Es una matriz la cual guarda los tiempos en que cada vendedor y/o transportista va a incurrir si se traslada de un cliente determinado hacia cualquier otro. Y será estimado según la relación básica que existe entre: la distancia entre un par de puntos P_1 y P_2 , la velocidad de desplazamiento entre ellos y además el tiempo de servicio del cliente P_1 . La ecuación que posteriormente permitirá dar origen a la Matriz de tiempos de traslados es la siguiente:

$$Tiempo\ Traslado(P_1, P_2) = \frac{Distancia(P_1, P_2)}{Velocidad} + Tiempo\ de\ Servicio(P_1)$$

A continuación se explica en detalle en que consiste cada una de las etapas de la heurística propuesta para la resolución del problema en estudio.

3.2. Clusterización de clientes

En esta etapa lo que se busca es crear grupos de clientes que posteriormente van a ser visitados de una manera ordenada y bajo criterios técnicos que conlleven a la optimización de los recursos disponibles, sean éstos humanos y tiempo de ejecución de las actividades.

Para el desarrollo de esta etapa sería muy útil el modelo de asignación generalizada presentado en la sección (2.2.4) y propuesto por Fisher & Jaikumar, si estuviéramos manejando una cantidad poco considerable de clientes, pero debido

al gran número de clientes que constan en la base de datos de la empresa en estudio y específicamente de la ciudad de Milagro surge la necesidad del diseño de una heurística que resuelva esta etapa del problema en un tiempo computacional razonable.

Si bien es cierto la empresa en estudio ya cuenta con una partición de sus clientes en sectores tal como se explicó en la sección (1.2), pero no está elaborada bajo parámetros que aseguren una correcta agrupación de clientes, es por eso que el propósito de la presente etapa es volver a agruparlos de tal manera que cada cliente que pertenece a un determinado clúster se encuentre lo más contiguo posible a todos los demás clientes que también pertenecen a este clúster, adicionalmente se pretende que cada cliente, tenga definido un día de visita el cual será respetado por el vendedor que le corresponda, y además que la entrega de los pedidos solicitados pasen a realizarse eficientemente.

3.2.1. Funciones necesarias para la implementación de la heurística

- **Función: Nodo Lejano**

Consiste en encontrar el nodo (cliente) más lejano geográficamente respecto al depósito (Supermercado Mayorista), para ser considerado como centroide de un clúster que se va a empezar a definir. Además el nodo lejano o centroide que se encuentre debe de pertenecer a una lista de nodos posibles a elegir. A continuación, se muestra el procedimiento.

Procedimiento NodoLejano (TD, Indicador)

Inicialización

TD =Tabla de Distancias

Indicador = {Nodos Posibles a elegir}

bandera = 0

Mientras *bandera* = 0

Hacer MasLejano = Nodo más Lejano del Depósito

Si *MasLejano* \in *Indicador* **Entonces** *bandera* = 1

Sino MasLejano aún no ha sido elegido *bandera* = 0

Fin Si

Fin Mientras

Fin Procedimiento

▪ **Función: Nodo Cercano**

Consiste en encontrar un nodo (cliente) más cercano geográficamente respecto al nodo lejano o centroide que se encontró previamente. De manera similar el nodo (cliente) más cercano que se encuentre debe pertenecer a una lista de nodos posibles a elegir. A continuación, se muestra el procedimiento.

Procedimiento NodoCercano (TD, Centroide, Indicador)

Inicialización

TD =Tabla de Distancias

Indicador = {Nodos Posibles a elegir}

bandera = 0

Mientras *bandera* = 0

Hacer MasCercano = Nodo más Cercano al Centroide

Si *MasCercano* ∈ *Indicador* **Entonces** *bandera* = 1

Sino MasCercano aún no ha sido elegido *bandera* = 0

Fin Si

Fin Mientras

Fin Procedimiento

3.2.2. Algoritmo de clusterización de clientes

A continuación se muestra el algoritmo que fue diseñado para realizar la agrupación de los clientes, brevemente se dará una descripción del mismo:

Consiste en seleccionar inicialmente el nodo (cliente) más lejano al depósito que será considerado como centroide del primer clúster, luego respecto a él, se irán seleccionando los clientes más cercanos, hasta que se viole la restricción del número de clientes que máximo deben de pertenecer a este clúster.

Luego se selecciona el siguiente nodo (cliente) más lejano al depósito y que no haya sido elegido previamente, para que sea nuevamente considerado como el centroide del siguiente clúster que se va a definir. De manera similar se van añadiendo

clientes más cercanos a este nodo mientras se respete las restricciones de que el nodo no haya sido elegido y que aún no se llegue al máximo número de clientes que deben de pertenecer a este clúster.

El algoritmo finaliza cuando ya se hayan seleccionado todos los nodos (clientes), que es equivalente a decir cuando ya estén definidos todos los clústers y/o agrupaciones de clientes. A continuación, se muestra el algoritmo.

Procedimiento Agrupaciones (Tabla de Distancias)

Inicialización

TD =Tabla de Distancias

Indicador = {Nodos Posibles a elegir}

Clúster = { } \leftarrow **SOLUCIÓN INICIAL**

$c = 1$

Mientras Indicador \neq { }

Hacer $Centroide = NodoLejano(TD, Indicador)$

Indicador = Indicador \setminus { $Centroide$ }

$Clúster(c) = \{Centroide\}$

Mientras $Length\{Clúster(c)\} \leq$ Número de clientes por cada Clúster

y Indicador \neq { }

Hacer $Cercano = NodoCercano (TD, Centroide, Indicador)$

Indicador=Indicador \setminus { $Cercano$ }

$Clúster(c) = Clúster(c) \cup \{Cercano\}$

Fin Mientras

$c = c + 1$

Fin Mientras

Clúster = {Todas las Agrupaciones que se formaron} ← **SOLUCIÓN FINAL**

Fin Procedimiento

3.2.3. Estructura de la solución

La **Solución Final** del Algoritmo de clusterización de clientes tiene la siguiente estructura:

$$\begin{aligned} \text{Clúster} = & \{ \{ \text{Centroide}(1), \text{NCercano1}, \text{NCercano2}, \text{NCercano3}, \\ & \text{NCercano4} \}, \{ \text{Centroide}(2), \text{NCercano5}, \text{NCercano6}, \text{NCercano7}, \\ & \text{NCercano8} \}, \{ \text{Centroide}(c), \text{NCercano9}, \text{NCercano10} \} \} \end{aligned}$$

La estructura anteriormente mostrada representa lo siguiente: contiene c centroides, los mismos que también indican el número de agrupaciones que se formaron ($c = 3$), además cada agrupación que se forma contiene: el centroide que es el cliente más lejano al depósito que se elige al inicio y también clientes más cercanos a él, de tal manera que por ejemplo en la estructura anterior, la primera agrupación: {Centroide(1), NCercano1, NCercano2, NCercano3, NCercano4} tiene 5 clientes. Mientras que la tercera agrupación contiene solamente 3 clientes.

Finalmente a cada agrupación se le asignará un día de visita comprendido entre los días Lunes y Viernes del horizonte de planificación que se emplee.

3.3. Determinación de las rutas diarias de los vendedores

Para dar inicio a la elaboración de esta etapa, se requiere antes tener listos los diferentes clústers y/o agrupaciones de clientes, los mismos que previamente ya fueron definidos mediante la primera etapa.

El propósito de esta etapa es que cada vendedor tenga definido la ruta que va a seguir para visitar a todos sus clientes en un determinado día.

El orden de la visita a los clientes vendrá dado por la solución de un m -TSP para cada clúster. Pero debido a la gran cantidad de clientes con los que se dispone, resulta eficiente dar solución al m -TSP mediante el diseño de un algoritmo que nos provea resultados en tiempos computacionales relativamente cortos.

El algoritmo que se diseña está basado en el método de inserción que se explicó en la sección (2.4.3). Adicionalmente se le realizó una adaptación para obtener los resultados deseados.

3.3.1. Algoritmo de inserción para resolver el m -TSP

El algoritmo, necesita como parámetro de entrada la Matriz de Distancias entre los clientes de un determinado clúster, luego mientras cada ruta aún no exceda el número establecido de clientes se realizan los siguientes pasos:

1) Elección de un nodo (cliente) del clúster aleatoriamente

Se elige un nodo al azar del conjunto de nodos del clúster, que no hayan sido elegidos previamente.

2) Inserción del nodo (cliente)

Se inserta el nodo (cliente) elegido en la mejor posición de la ruta que se está formando. Esto es: En la posición en la cual aumente lo menos posible la longitud en Km 's de la ruta.

Cuando la ruta completa el número de clientes que se establece, y aún faltan clientes por visitar se empieza a crear otra ruta y se siguen los pasos mostrados en líneas anteriores.

El algoritmo finaliza cuando ya todos los nodos (clientes) del clúster, pertenezcan a una determinada ruta.

3.3.2. Estructura de la solución

Considerando un clúster, que contiene 10 clientes y adicionalmente sabiendo que cada vendedor solo puede atender a lo sumo 4 Clientes, entonces:

La **Solución Final** del algoritmo de inserción, que se emplea para la determinación de las rutas diarias de los vendedores tendrá la siguiente estructura:

$$\mathbf{Rutas} = \{ \{ \text{Depósito}, \text{Cliente1}, \text{Cliente2}, \text{Cliente3}, \text{Cliente4}, \text{Depósito} \}, \{ \text{Depósito}, \text{Cliente5}, \text{Cliente6}, \text{Cliente7}, \text{Cliente8}, \text{Depósito} \}, \{ \text{Depósito}, \text{Cliente9}, \text{Cliente10}, \text{Depósito} \} \}$$

La estructura anteriormente mostrada representa lo siguiente: contiene 3 rutas, cada una de ellas empieza y termina en el Depósito. Y la secuencia de visita viene dada por el orden en que se expresa la solución obtenida para cada ruta.

3.4. Planificación de entrega de pedidos a clientes

De manera similar se elabora la ruta diaria del transportista mediante la implementación del algoritmo de inserción que resuelve un TSP para aquellos clientes que solicitaron sus pedidos.

3.4.1. Algoritmo de inserción para resolver el TSP

El algoritmo, necesita como parámetro de entrada la Matriz de Distancias entre los clientes que generan pedidos, luego para la construcción de la solución se realizan los siguientes pasos:

1) Elección de un nodo (cliente) aleatoriamente

Se elige un nodo al azar del conjunto de nodos de los clientes que generaron pedidos y además que dicho nodo no haya sido elegido previamente.

2) Inserción del nodo (cliente)

Se inserta el nodo (cliente) elegido en la mejor posición de la ruta, esto es:

En la posición en la cual aumente lo menos posible la longitud en Km ´s de la ruta.

El algoritmo finaliza cuando ya todos los nodos (clientes) que generan pedidos, son considerados en la ruta.

3.4.2. Estructura de la solución

La **Solución Final** del algoritmo de inserción, que se emplea para la elaboración de rutas diarias de los transportistas tiene la siguiente estructura:

$$\text{Ruta}=\{\text{Depósito, Cliente1, Cliente2, Cliente3, Cliente4, Cliente5, Cliente6, Cliente7,} \\ \text{Cliente8, Cliente9, Cliente10, Depósito}\}$$

La estructura anteriormente mostrada representa lo siguiente: Contiene una ruta, en la cual el transportista tiene que entregar la mercadería a 10 clientes específicos. Además el orden de visita es tal y como se los expresa en la Solución Final es decir: se inicia en el depósito, luego el primer cliente a visitar es el “Cliente1”, luego se procede a visitar al cliente “Cliente2”, y así sucesivamente hasta visitar el último cliente que es el “Cliente10”, finalmente se debe retornar al depósito.

Capítulo 4

Implementación de la heurística propuesta y análisis de los resultados

4.1. Introducción a Software a utilizar

La metodología empleada en el estudio de nuestro proyecto se lleva a cabo mediante la programación de cada una de las etapas de la heurística diseñada, para lo cual es de vital importancia la ayuda de herramientas informáticas, tales como: “WOLFRAM MATHEMATICA 8.0.0 ¹”, “GOOGLE EARTH 7.0.2.8415 ²” Y “MICROSOFT OFFICE EXCEL 2013 ³”.

4.1.1. Wolfram Mathematica 8.0.0

- Wolfram Mathematica es un sistema de álgebra computacional originalmente desarrollado por Stephen Wolfram y vendido por su compañía, Wolfram

¹© Copyright 1988-2010. Mathematica es una marca registrada de Wolfram Research, Inc.

²© Copyright 2012. Google Earth es una marca registrada de Google, Inc.

³© Copyright 2008. Excel 2013 es una marca registrada de Microsoft Corporation.

Research.

- Mathematica es también un poderoso lenguaje de programación. Utiliza bloques de código (librerías), para ampliar las capacidades y reorientar el cálculo.
- Wolfram y su equipo iniciaron trabajos en este programa en 1986, sacando al mercado la primera versión en 1988. La versión 8.0 salió al mercado el 15 de noviembre del 2010. Se encuentra disponible para una gran variedad de sistemas operativos.
- El lenguaje de programación de MATHEMATICA está basado en re-escritura de términos, y soporta el uso de programación funcional y de procedimientos.
- Está implementado en el lenguaje de programación C orientado a objetos, pero el grueso del extenso código de librerías está en realidad escrito en el lenguaje Mathematica, que puede ser usado para extender el sistema algebraico [10].

4.1.2. Google Earth 7.0.2.8415

- Google Earth es un programa informático similar a un Sistema de Información Geográfica (SIG), creado por la empresa Keyhole Inc., que permite visualizar imágenes en 3D del planeta, combinando imágenes de satélite, mapas y el motor de búsqueda de Google que permite ver imágenes a escala de un lugar específico del planeta.
- Google Earth permite introducir el nombre de un hotel, colegio o calle y

obtener la dirección exacta, un plano o vista del lugar. También se pueden visualizar imágenes vía satélite del planeta. La forma de moverse en la pantalla es fácil e intuitiva, con cuadros de mandos sencillos y manejables.

- Además, incorpora Maps que sirve para encontrar las calles, avenidas y negocios y ampliarlas de una manera muy tangible. También es posible compartir con otros usuarios enlaces, medir distancias geográficas, ver la altura de las montañas, ver fallas o volcanes y cambiar la vista tanto en horizontal como en vertical.
- El programa Google Earth está disponible en dos versiones, en pago y una gratuita. La versión (7.0.2.8415 beta) permite una mejor integración de Google Street View en Google Earth. Se añaden árboles en tres dimensiones para algunas ciudades de los Estados Unidos, Europa y Japón [11].

4.1.3. Microsoft Office Excel 2013

Microsoft Excel es una aplicación conocida como hoja de cálculo, adicionalmente es desarrollada y distribuida por Microsoft, y es utilizada normalmente en tareas financieras y contables [12].

La base de datos de los clientes que nos facilitó la empresa viene dada en esta aplicación.

4.2. Obtención de datos de los Clientes

El primer paso para el desarrollo del proyecto fue solicitar al departamento de sistemas la base de datos de clientes pertenecientes a la muestra en estudio, es decir clientes que

pertenecen a Milagro. En dicha base de datos se contaba con: código, nombre, dirección de cada uno de los clientes.

4.2.1. Mapeo de Clientes

Una vez seleccionados los clientes, es necesario establecer su ubicación geográfica y espacial. Para el efecto, con las direcciones de cada uno de los clientes y con la herramienta Google Earth se pudieron conocer las coordenadas geográficas. Los clientes se mapearon y codificaron (georeferenciaron) con el objetivo de obtener sus coordenadas geográficas UTM ⁴. Esta información es indispensable para la estimación de uno de los parámetros según lo mencionado en la sección (3.1), más concretamente para obtener la tabla de distancias entre todos los clientes y el supermercado.

A continuación en la Figura 4.1, se muestra una visualización espacial de todos los clientes georeferenciados.

Cabe mencionar que dentro de todo la base de datos proporcionada por el departamento de sistemas, se contabilizó un total de 1693 clientes, dentro de los cuales se encontraron 286 clientes repetidos. Es decir, se trabajó con un total de 1407 clientes, de donde fueron ubicados en su totalidad 970 clientes equivalentes a un 68,94 % de la nueva base de datos, y un total de 436 clientes en los cuales por diferentes motivos se hizo difícil su ubicación, ya sea por tener una dirección incompleta, equivocada y en algunos casos por no contar con la misma, este número de clientes corresponden a un 30,99 % del total de la base de datos.

⁴Siglas de Universal Transversal de Mercator

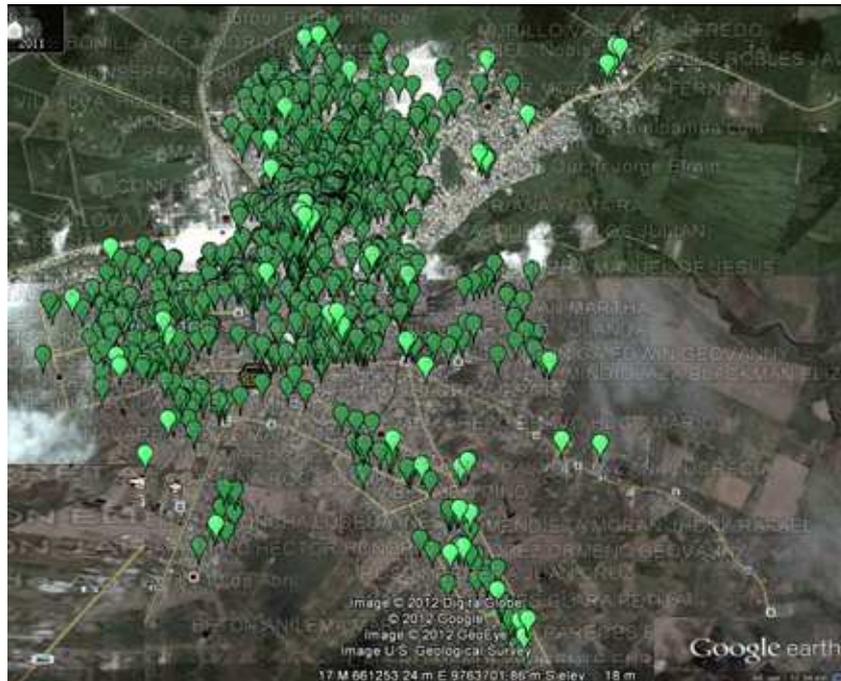


Figura 4.1: Ubicación espacial de Clientes del Supermercado Mayorista

4.2.2. Depósito

El depósito o bodega principal es el lugar en el que se realizan las gestiones respectivas previo a la preventa y distribución de las mercaderías, se encuentra ubicado dentro de las instalaciones de la empresa en estudio.

Tabla 4.1: Especificaciones del Depósito

Nodo	Depósito	Dirección	Coordenadas X	Coordenadas Y
0	Supermercado	Milagro	656038.29	9763255.51

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.2 se muestra la ubicación espacial de la empresa en estudio:

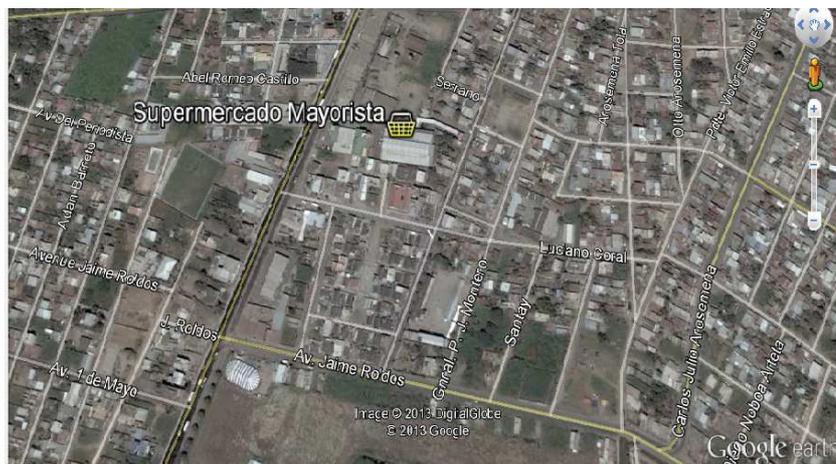


Figura 4.2: Ubicación espacial del Supermercado Mayorista

4.2.3. Tiempo de Servicio en cada cliente

Antes de realizar lo mencionado en la sección (3.1), se dará una breve descripción del tiempo de servicio en los clientes, específicamente cuando lo visita un vendedor y además cuando es visitado por un transportista. El propósito es conocer la distribución estadística a la cual se ajusta el tiempo de servicio, para posteriormente estimar el tiempo en que cada vendedor y/o transportista va a incurrir en un cliente determinado, para así obtener la Matriz de tiempos de traslados, y como objetivo final estimar la duración de una determinada ruta.

- **Vendedores**

El tiempo de servicio, para un cliente cuando es visitado por un vendedor es aquel tiempo en el cual dura todo el proceso de preventa de las mercaderías, desde que el vendedor llega a cada tienda, procede a ofertar la mercadería hasta que se registran y se envían los pedidos solicitados al sistema de in-

formación de la empresa en estudio.

Para lograr estimar el tiempo de servicio en cada cliente, se realiza un análisis estadístico del comportamiento la variable de tiempo de servicio.

Durante un período de estudio de 2 días se analizó el tiempo de servicio para cada uno de los clientes visitados por un vendedor, más específicamente la muestra cuenta con 63 clientes, de los cuales se obtuvo la tabla 4.2 que contiene el resumen estadístico de los datos.

Tabla 4.2: Estadísticas descriptivas: Tiempo servicio Vendedores (Min.)

Medidas	Valores
Media	8.952
Error Típico	0.703
Mediana	8
Moda	8
Desviación Estándar	5.586
Varianza de la Muestra	31.21
Rango	25
Mínimo	0
Máximo	25

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de servicio promedio en que un cliente es atendido por un vendedor es de: 8.95 minutos, así como existe una desviación estándar de 5.58 min. Además se puede observar que el mínimo tiempo de servicio es 0 min. esto es debido a que un cliente en ocasiones rechaza realizar un pedido, mientras que a veces los pedidos son muy extensos que podrían demorar alrededor de 25 min.

- **Transportista**

El tiempo de servicio es considerado a partir que el transportista llega al punto de entrega, procede a buscar la mercadería dentro del camión para luego ser descargada, el tiempo que el ayudante de la ruta consume en verificar la mercadería en presencia del cliente y finalmente el tiempo en que se realiza el cobro de la misma en caso de que el cliente haya hecho su pedido al contado, o hace firmar la factura en caso de ser un pedido a crédito. Para lograr estimar el tiempo de servicio en cada cliente, se llevó a cabo un análisis estadístico del comportamiento que sigue actualmente la variable de tiempo de servicio. Durante un período de estudio de 5 días se analizó el tiempo de servicio para cada uno de los clientes visitados, de una muestra de 185 clientes se obtuvo la tabla 4.3 que contiene el resumen estadístico de los datos recolectados.

Tabla 4.3: Estadísticas descriptivas: Tiempo servicio Transportistas (Min.)

Medidas	Valores
Media	4.838
Error Típico	0.24
Mediana	4
Moda	2
Desviación Estándar	3.211
Varianza de la Muestra	10.310
Rango	19
Mínimo	1
Máximo	20

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de servicio promedio en que un cliente es atendido es de: 4.84

minutos, así como existe una desviación estándar de 3.21 min, sin embargo existieron situaciones en las que los pedidos a ser entregados eran de un volumen considerable de mercadería por lo que originó un tiempo máximo de servicio el cual es de 20 minutos.

A más de aquello se usó un complemento de Microsoft Excel 2013 llamado Palisade DecisionTools, el cual contiene una aplicación que permite determinar la distribución estadística a la que se ajusta una variable, su nombre es @Risk 5.5.0⁵.

Con ayuda de esta aplicación se pudo determinar la distribución estadística a la cual se ajustan los tiempos de servicios.

El resultado obtenido fue el siguiente:

Distribución de Weibull

Se trata de un modelo continuo asociado a variables del tipo tiempo de vida, tiempo de operación, tiempo de servicio, tiempo hasta que un mecanismo falla, etc. La función de densidad de este modelo viene dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

⁵© Copyright 2009. @Risk es una marca registrada de Palisade Corporation.

Se observa que la distribución, depende de dos parámetros: $\alpha > 0$ y $\beta > 0$, donde α es un parámetro de escala y β es un parámetro de forma (lo que proporciona una gran flexibilidad a este modelo).

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestra el tiempo de servicio analizado para el vendedor y/o transportista, y se observa claramente que los datos se aproximan a una distribución Weibull con los siguientes parámetros: (Véase la Tabla 4.4)

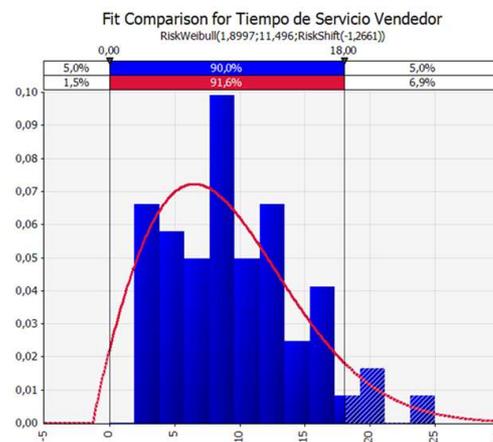


Figura 4.3: Distribución Weibull para el Tiempo de Servicio del Vendedor

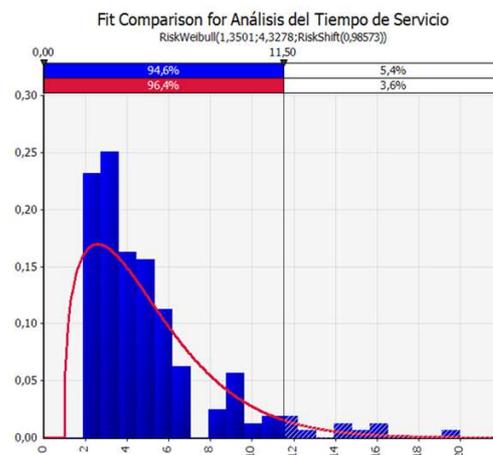


Figura 4.4: Distribución Weibull para el Tiempo de Servicio del Transportista

Tabla 4.4: Parámetros de distribución Weibull para el tiempo de servicio

Parámetros	Vendedor	Transportista
α	1.899	1.3501
β	11.496	4.3258
μ	8.952	4.838
σ	5.586	3.211

Fuente: Elaboración propia

La distribución estadística Weibull junto con los parámetros correspondientes, son utilizados para hacer una simulación del tiempo de servicio de un vendedor y/o transportista en cada cliente.

A partir de la misma se construye la matriz de tiempos de traslados con el componente de tiempo de servicio estocástico.

Luego es posible realizar una estimación del tiempo de duración para cada una de las rutas que se definan, es decir que se asemeje lo más posible al tiempo real que utilizará cada vendedor y/o transportista en realizar su ruta.

4.3. Clusterización de clientes

Para cada vendedor diariamente se detectó que es capaz de atender entre 30 y 40 clientes al día aproximadamente, además la empresa en estudio cuenta con un total de: 3 vendedores, que son destinados a realizar las preventas en Milagro.

Esta información es muy relevante, como parámetro inicial de la etapa de clusterización de clientes, ya que al inicio requiere de un número de clientes como máximo para cada clúster.

En el presente estudio se considera que un vendedor, en promedio es capaz de atender alrededor de 34 clientes.

Entonces:

$$\# \text{ Clientes por Clúster} = (\# \text{ Vendedores}) \cdot (\text{Clientes que atiende 1 vendedor})$$

$$\# \text{ Clientes por Clúster} = (3) \cdot (34)$$

$$\# \text{ Clientes por Clúster} = 102$$

Para una mejor planificación y manteniéndonos en un rango moderado respecto al valor antes encontrado, se establece crear clústers que contengan 100 clientes. Dado que existen 970 clientes en la base de datos que se está manejando, se crearán 10 clústers, los 9 primeros con 100 clientes cada uno, y el décimo con la diferencia, que es de 70 clientes.

A su vez los 10 clústers definidos dan origen a un horizonte de planificación de 2 semanas, las cuales están comprendidas en 10 días laborales, que serán de Lunes a Viernes para cada semana.

El objetivo posterior de la planificación es que en el horizonte determinado de 2 semanas, se cumpla con la visita a todos los clientes que se encuentran en la base de datos actual.

Con la ayuda de Mathematica 8.0 , en la Figura 4.5 se representan las ubicaciones de cada uno de los clientes que se georeferenciaron para extraer sus coordenadas UTM⁶.

⁶UTM, Universal Transversal de Mercator. Es un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros.

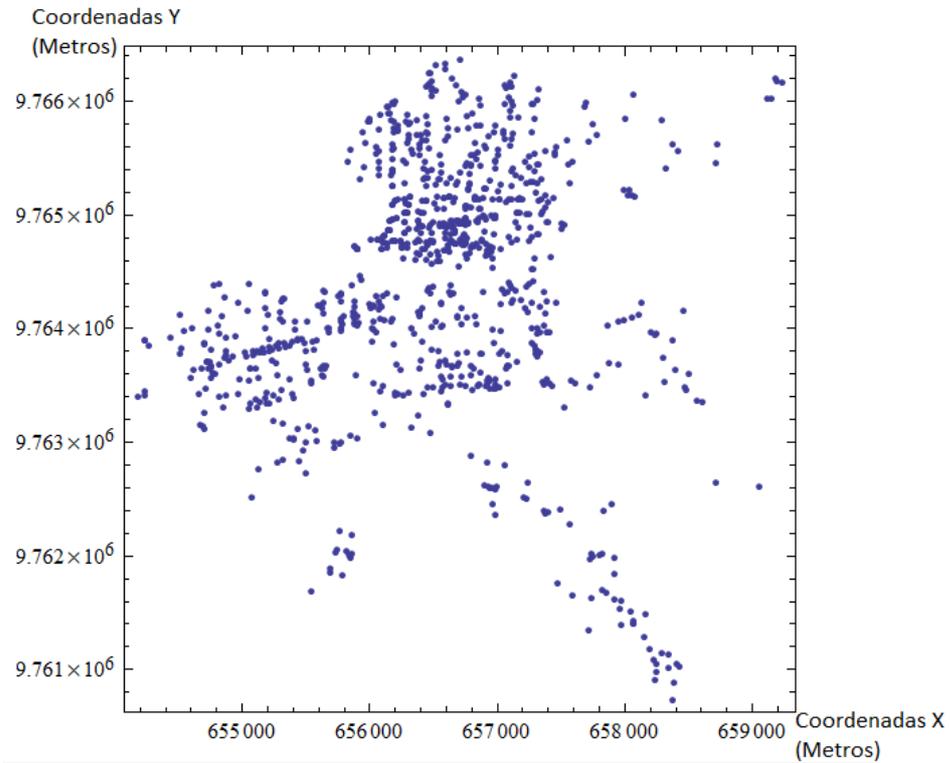


Figura 4.5: Representación de Clientes en el Plano

Luego mediante la implementación del Algoritmo de clusterización, se obtiene la Figura 4.6, en la que se muestran las agrupaciones generadas, a las mismas que se les ha añadido su respectiva etiqueta de identificación.

En las Figuras: 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 se muestran de manera independiente, cada una de las agrupaciones definidas previamente.

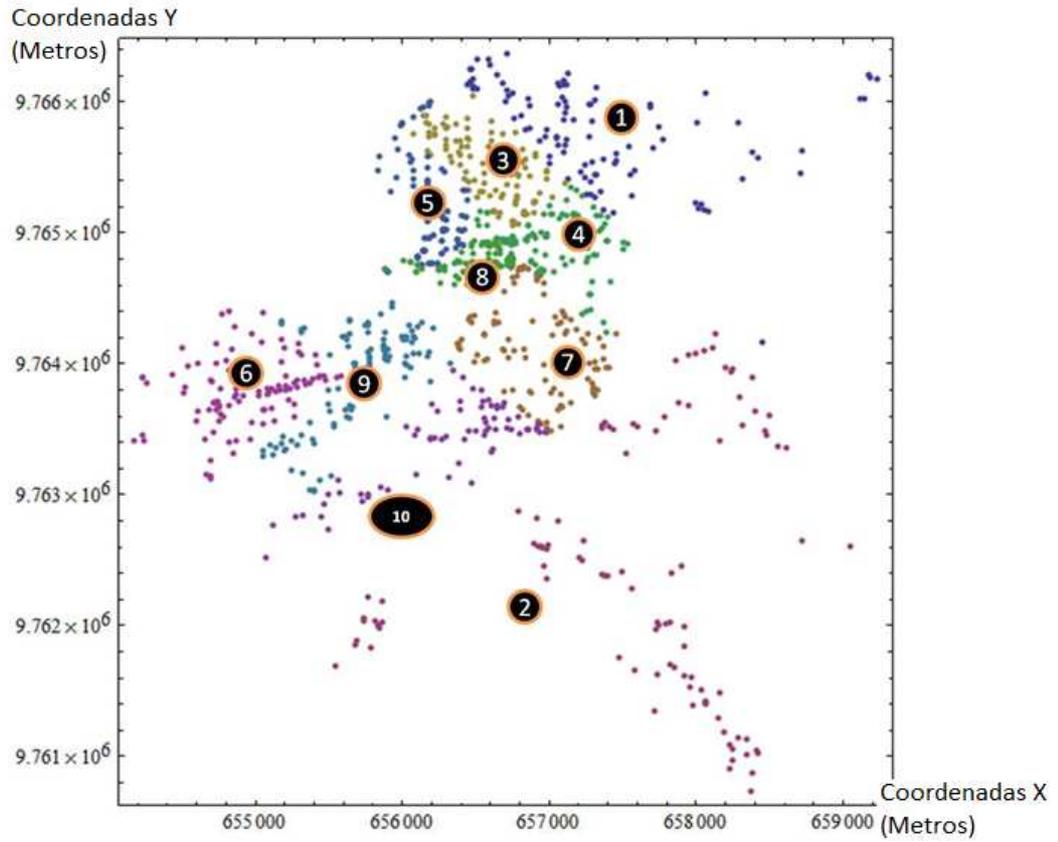


Figura 4.6: Representación de Clientes Agrupados en el Plano

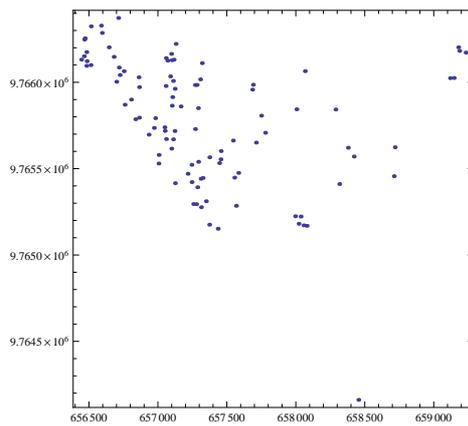


Figura 4.7: Clúster 1

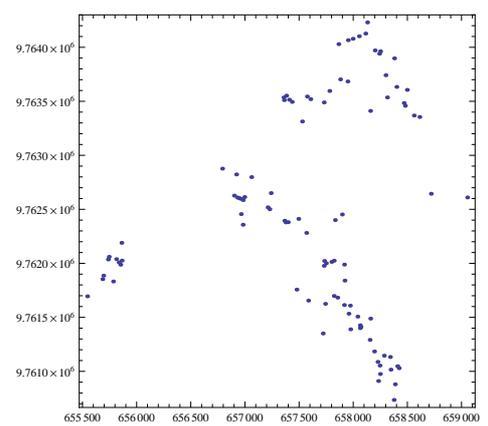


Figura 4.8: Clúster 2

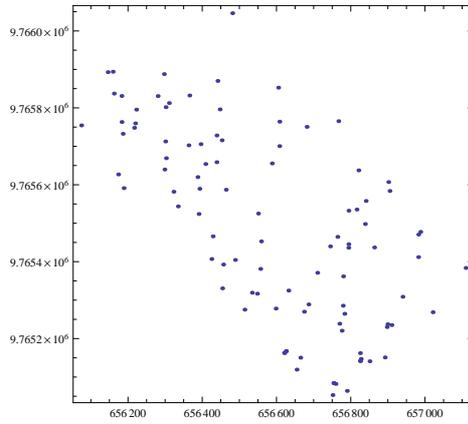


Figura 4.9: Clúster 3

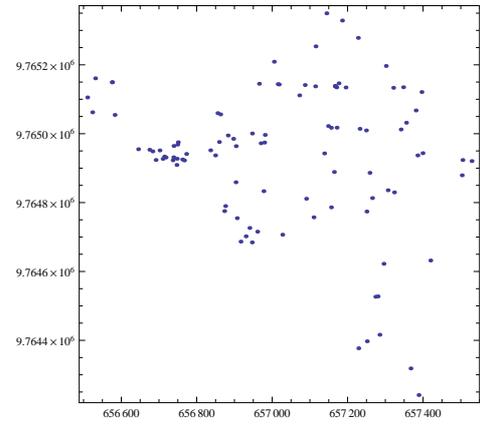


Figura 4.10: Clúster 4

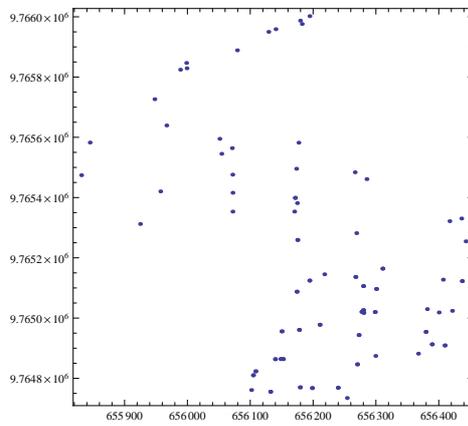


Figura 4.11: Clúster 5

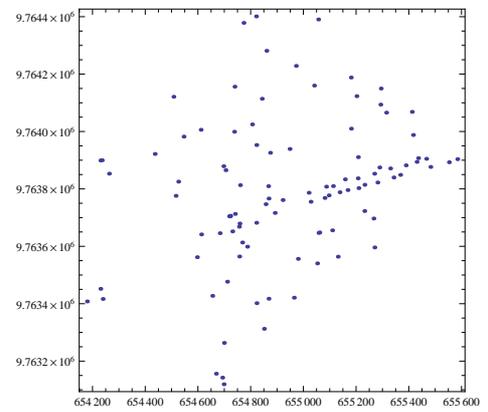


Figura 4.12: Clúster 6

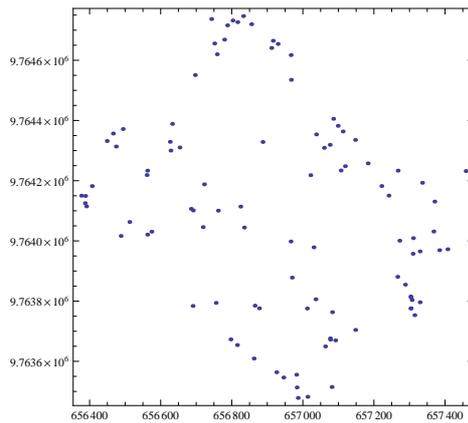


Figura 4.13: Clúster 7

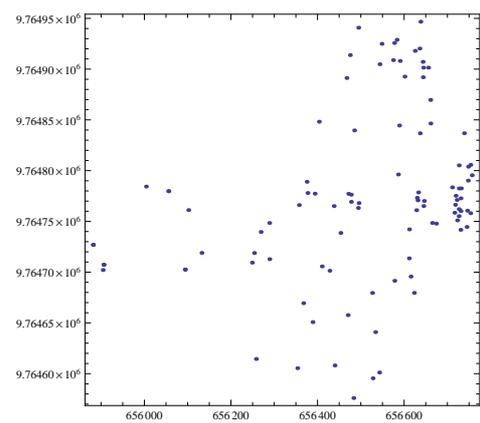


Figura 4.14: Clúster 8

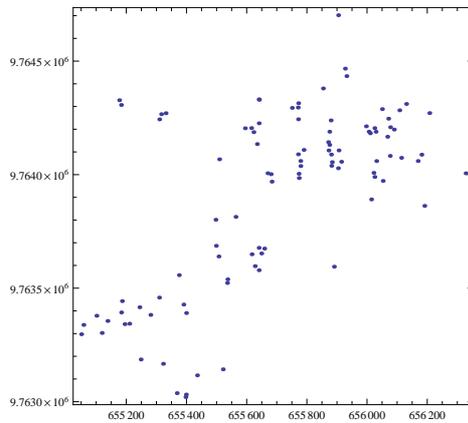


Figura 4.15: Clúster 9

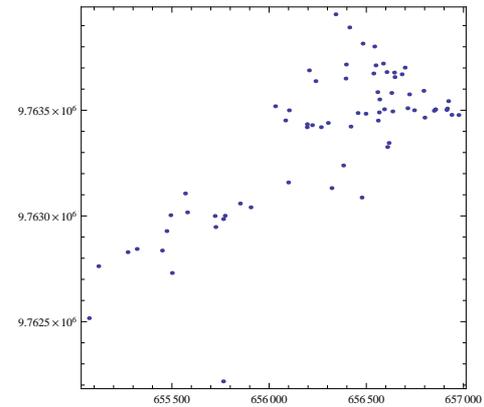


Figura 4.16: Clúster 10

Finalmente, se consigue la tabla 4.5 en la cual se muestra el resumen de la planificación de visita a clientes según las agrupaciones que se definieron y considerando el horizonte de planificación de 2 semanas, las cuales constan de 5 días laborables cada una.

Tabla 4.5: Planificación de visita a clientes según Clústers definidos

Agrupaciones	Semana 1					Semana 2				
	L	M	Mi	J	V	L	M	Mi	J	V
Clúster 1	x									
Clúster 2						x				
Clúster 3		x								
Clúster 4				x						
Clúster 5			x							
Clúster 6										x
Clúster 7								x		
Clúster 8					x					
Clúster 9									x	
Clúster 10							x			

Fuente: Elaboración propia

4.4. Determinación de las rutas diarias de los vendedores

4.4.1. Parámetros y Limitaciones

- Se realizó entrevistas con los vendedores, concluyendo que una velocidad promedio en la ciudad de Milagro para realizar la preventa de las mercaderías es de 8 Km/Hr ya que manifestaron que para lograr cumplir con la visita a sus clientes deben caminar rápidamente.
- Cada cliente contemplado dentro de la planificación que se pondrá en marcha, es visitado una y solo una vez, es decir no se permite visitar a un cliente determinado por repetidas ocasiones.

4.4.2. Implementación

Una vez realizado el calendario de visita a cada clúster, es necesario establecer o definir la secuencia de visita que los vendedores van a tener que ejecutar para visitar a todos los clientes que pertenecen a un determinado clúster.

Se sabe que cada clúster previamente se lo formó considerando que cada vendedor puede atender en promedio 34 clientes.

Entonces para la elaboración de las rutas diarias, también es de vital importancia dicho parámetro, de tal manera que el número máximo de clientes a atender por cada ruta de un vendedor va a ser de 34.

Posteriormente de los 100 clientes que posee cada clúster, y considerando los 3 vendedo-

res que tiene la empresa en estudio, cada uno visitará: 34, 34, 32 clientes respectivamente.

Para efectos de la implementación de esta etapa de la heurística, y por circunstancias de confidencialidad a los clientes de cada clúster se los va a identificar con los números del 1 al 100.

Cabe indicar que también cada cliente tiene asociado un número identificador en la base de datos original, es decir número comprendidos entre 1 y 970. Se hace énfasis en esto ya que si en algún momento se requieren todas las rutas, no se tendrá inconvenientes en mostrar cada una de ellas ya que no habrá ningún tipo de confusión entre los clientes.

A continuación se presenta en detalle la planificación de visita del Clúster 1, cuyos clientes se los observa en la Figura 4.7.

Mediante la implementación del algoritmo de resolución del m -TSP, la solución viene dada por:

Rutas = $\{\{0, 94, 78, 50, 47, 83, 81, 97, 82, 90, 98, 85, 37, 36, 43, 33, 15, 35, 42, 34, 32, 48, 31, 18, 16, 11, 14, 6, 74, 60, 68, 69, 73, 3, 13, 0\}, \{0, 17, 66, 88, 86, 95, 96, 22, 26, 38, 30, 49, 21, 46, 19, 24, 80, 4, 56, 55, 70, 61, 58, 62, 59, 51, 53, 72, 67, 77, 2, 79, 12, 41, 45, 0\}, \{0, 89, 93, 91, 84, 87, 100, 92, 99, 29, 39, 23, 76, 52, 27, 28, 25, 40, 20, 44, 1, 10, 75, 57, 64, 71, 63, 54, 65, 9, 7, 5, 8, 0\}\}$

Como se lo mencionó anteriormente, mediante los parámetros considerados es posible estimar la duración de cada una de las rutas, así como los kilómetros recorridos.

Es importante mencionar que gracias a las aplicaciones informáticas utilizadas, se puede generar un gráfico de la secuencia de visita a los clientes, así como exportar a excel el orden de visita a los clientes con sus respectivos: códigos, nombres, direcciones, etc. De tal manera que sirva como orientación a los vendedores a la hora de ejecutar la visita diariamente.

Tabla 4.6: Planificación de visita a clientes del Clúster 1

Vendedores	Detalle de la Ruta		
	Secuencia de Visita	Km´s Recorridos	Tiempo Aprox. (Minutos)
Vendedor 1	{0, 94, 78, 50, 47, 83, 81, 97, 82, 90, 98, 85, 37, 36, 43, 33, 15, 35, 42, 34, 32, 48, 31, 18, 16, 11, 14, 6, 74, 60, 68, 69, 73, 3, 13, 0}	15.76	447.02
Vendedor 2	{0, 17, 66, 88, 86, 95, 96, 22, 26, 38, 30, 49, 21, 46, 19, 24, 80, 4, 56, 55, 70, 61, 58, 62, 59, 51, 53, 72, 67, 77, 2, 79, 12, 41, 45, 0}	18.455	492.85
Vendedor 3	{0, 89, 93, 91, 84, 87, 100, 92, 99, 29, 39, 23, 76, 52, 27, 28, 25, 40, 20, 44, 1, 10, 75, 57, 64, 71, 63, 54, 65, 9, 7, 5, 8, 0}	15.1062	510.908

Fuente: Elaboración propia

A continuación en las figuras: 4.17, 4.18, 4.19 se muestran las secuencias de visita de los vendedores de manera gráfica:

Sólo se ha mostrado la planificación detallada del Clúster 1, pero mediante la implementación de esta etapa se realiza la planificación para los 9 Clústers restantes; cumpliendo así la planificación de visita de todos los clústers y por ende a todos los clientes.

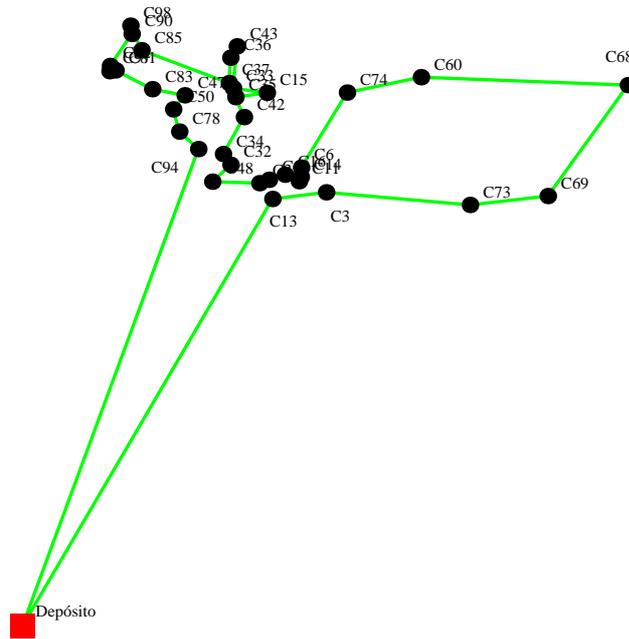


Figura 4.17: Secuencia de Visita a Clientes del Clúster 1 (Vendedor 1)

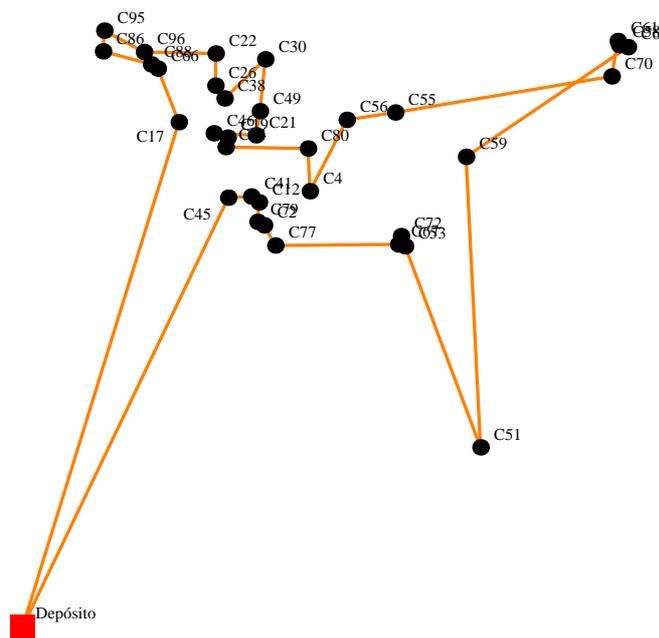


Figura 4.18: Secuencia de Visita a Clientes del Clúster 1 (Vendedor 2)

consideración, que el cliente se encuentre sin dinero, o que no se encuentre en el local, motivos por los cuales no se podría receptar la mercadería.

- Cada cliente contemplado dentro de la planificación que se pondrá en marcha, es visitado una y solo una vez, es decir no se permite visitar a un cliente determinado por repetidas ocasiones.
- Los clientes se los atenderá de acuerdo a la secuencia de entrega definida en la ruta, dejando de lado situaciones tales como las características especiales que presente cada sector, sean éstas: riesgo delincriminal y accesibilidad, ésta última se refiere a que todas las calles son hábiles para el tipo de transporte con que se cuenta.

4.5.2. Implementación

Antes de mostrar la manera de como se realizará la planificación de entrega a clientes, es importante mencionar que:

- La planificación de entrega de pedidos se la debe realizar diariamente.
- Depende de los clientes que realizaron sus pedidos, cuando el vendedor los visitó.

Una vez obtenida la información de aquellos clientes que realizaron los pedidos en un día determinado, se debe planificar la entrega de las mercaderías para el día siguiente; Dicha planificación es posible realizarla en un tiempo corto gracias a la clusterización y planificación de visita que se tiene para los vendedores. Esto, debido a que en la base de

datos con la que se dispone se le han agregado columnas adicionales en las cuales para manipular rápidamente la información, se han colocado para cada cliente: el clúster al que pertenece y también el vendedor que lo visita.

Es también indispensable agregar a la base de datos una columna denominada **Indicador de Pedidos**, en la cual se colocará el número 1 si el cliente realiza pedido.

Diariamente, el encargado de la planificación de la entrega de pedidos realizará los siguientes pasos:

- i) Extracción de la base de datos de todos clientes que realizaron pedidos, desde Excel 2013 hacia Mathematica 8.0 con la finalidad de proceder a la manipulación de los datos de tal manera que se tengan disponibles todos los parámetros necesarios para resolver el TSP.
- ii) Ejecución de la Heurística de inserción para la resolución del TSP, cabe mencionar que antes de mostrar la ruta final, se realiza el procedimiento 2-intercambio (Método de post-optimización), de tal manera que se garantiza una excelente solución.
- iii) La solución, indicará la secuencia u orden en que cada uno de los clientes deberá ser atendido, la misma que es mostrada gráficamente. Luego se exportan los resultados obtenidos a Excel 2013 con el objetivo de tener disponible el orden de visita óptimo a los clientes en formato de fácil interpretación para el encargado y el transportista.

4.5.3. Ejemplificación

Imaginemos que en el Clúster 1, cada vendedor realizó la preventa de las mercaderías a 5 clientes, de manera tal, que al siguiente día el transportista deberá entregar los pedidos a 15 clientes. Tan sólo a 15 clientes del total de 100 clientes que contiene el clúster. Se debe planificar la secuencia de visita a cada cliente, para ello realizan los pasos mencionados anteriormente.

Luego de la implementación, la solución viene dada por:

Tabla 4.7: Ejemplo de planificación de entrega de pedidos

Secuencia de Visita	Detalle de la Ruta	
	Km´s Recorridos	Tiempo Aprox.(Minutos)
{0, 11, 8, 13, 12, 15, 7, 9, 10, 4, 6, 2, 3, 5, 1, 14, 0}	8.296	90.00

Fuente: Elaboración propia

El grafo de la ruta óptima se muestra en la figura 4.20:

4.6. Comparativo entre la Planificación de entrega de pedidos actual vs. Planificación de entrega propuesta

En el siguiente contexto se va a analizar la efectividad de la etapa de planificación de entrega de pedidos que se diseña, mediante la comparación de rutas realizadas por el transportista, con las rutas que se proponen.

Cabe indicar que en las comparaciones que se presenta, no se ha considerado la nueva

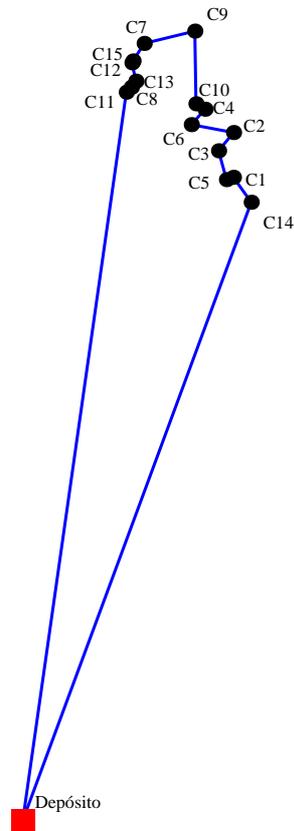


Figura 4.20: Secuencia de Visita del Transportista (Ejemplificación)

agrupación de clientes debido a que la empresa aún no pone en marcha la propuesta del proyecto. Sin embargo ya se cuenta con excelentes soluciones, esto es un indicio de que a partir de la aplicación de la clusterización, la entrega de pedidos será aún más eficiente.

4.6.1. Comparación N°1

En este día en particular se atendieron pedidos solicitados de 57 clientes, los cuales están repartidos entre los sectores: Z, Q, LL, RR, R, S, M, Z, W, Ñ. de la sectorización actual de la empresa. Cabe recalcar que este día según la planificación predeterminada

solamente se debió atender a clientes que pertenecían a los sectores Z, Q, LL. Sin embargo se procede a evaluar y a realizar un análisis comparativo entre la ruta que hizo el transportista versus la ruta propuesta.

Para una mejor apreciación, fueron georeferenciados los 57 clientes que fueron visitados, los cuales se muestran a continuación en la figura 4.21:



Figura 4.21: Clientes georeferenciados para la Comparación N°1

Resultados Obtenidos

Aplicando el algoritmo propuesto para obtener la secuencia u orden de visitas a los 57 clientes se pudo obtener la tabla que muestra la comparación entre la ruta que hizo el transportista denominada Ruta Transportista y la Ruta Propuesta.

La distancia total recorrida por el transportista, bajo su fundamento en la experiencia obtenida a lo largo del tiempo en la empresa, da como resultado una distancia total

Tabla 4.8: Resumen de la Comparación N°1

	Ruta Transportista	Ruta Propuesta
Secuencia de Visita	{0, 1, 7, 5, 11, 6, 2, 4, 10, 9, 8, 12, 3, 13, 57, 51, 48, 55, 43, 47, 44, 52, 49, 46, 54, 23, 27, 22, 24, 25, 26, 29, 32, 18, 56, 40, 19, 20, 42, 41, 50, 45, 28, 31, 30, 21, 53, 14, 39, 37, 36, 38, 34, 33, 35, 16, 15, 17, 0}	{0, 33, 35, 17, 15, 16, 39, 36, 38, 37, 34, 1, 8, 12, 3, 9, 10, 4, 2, 6, 11, 14, 7, 5, 51, 13, 43, 57, 48, 55, 47, 44, 52, 49, 46, 54, 23, 32, 27, 24, 22, 25, 29, 26, 31, 28, 45, 50, 56, 53, 41, 42, 40, 30, 21, 19, 20, 18, 0}
Km´s Recorridos	29.7251	19.7201
Tiempo Aprox.(Horas)	6.18	4.97

Fuente: Elaboración propia

recorrida de 29.725 km. Frente a la distancia total recorrida por la ruta propuesta que es de 19,720 km. Es notable el ahorro del 33,66 % en función de la distancia que se tiene al secuenciar la visita a clientes mediante nuestro algoritmo.

Los grafos de las rutas se muestran en las figuras: 4.22, 4.23 :

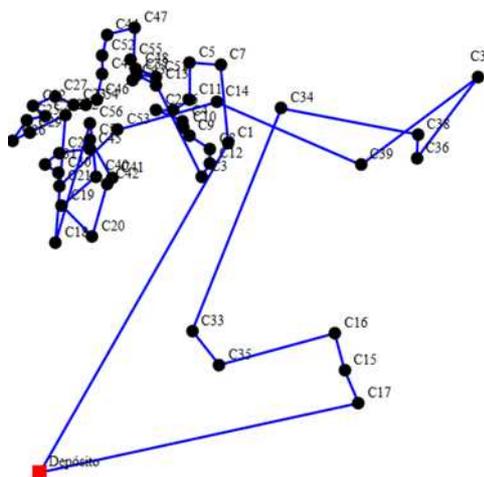


Figura 4.22: Comparación N°1 Ruta Transportista

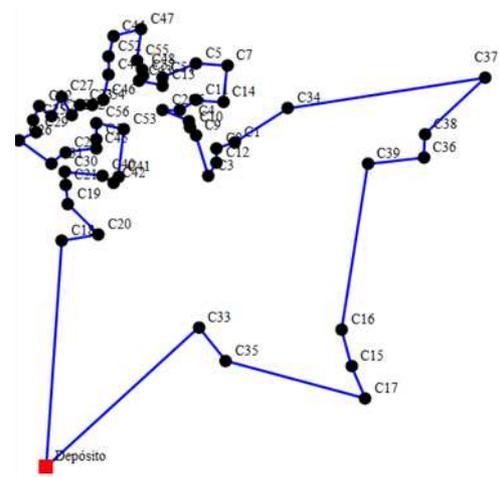


Figura 4.23: Comparación N°1 Ruta Propuesta

4.6.2. Comparación N°2

En este día en particular se atendieron pedidos solicitados de un total de 28 clientes, los cuales están repartidos entre los sectores: E, H, N, P, R, S, O. Se presenta nuevamente un desajuste con respecto a la planificación de rutas diarias ya que solamente se debió atender a clientes que pertenecían a los sectores N, P, T.

A continuación se evalúa y se realiza un análisis comparativo entre la ruta que hizo el transportista versus la ruta propuesta por el algoritmo.

De manera similar para una mejor apreciación, fueron georeferenciados los 28 clientes que fueron visitados, los cuales se muestran a continuación en la figura 4.24:

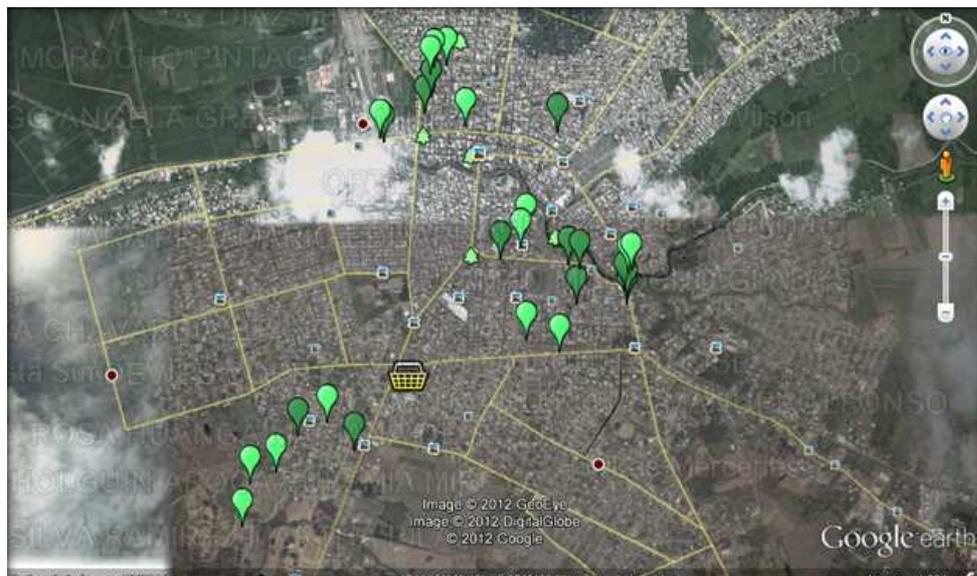


Figura 4.24: Clientes georeferenciados para la Comparación N°2

Resultados Obtenidos

Aplicando el algoritmo propuesto para obtener la secuencia u orden de visitas a los 28 clientes se pudo obtener la tabla que muestra la comparación entre la ruta que hizo el transportista denominada Ruta Transportista y la Ruta Propuesta.

Tabla 4.9: Resumen de la Comparación N°2

	Ruta Transportista	Ruta Propuesta
Secuencia de Visita	{0, 14, 11, 15, 9, 8, 21, 13, 25, 26, 18, 28, 6, 2, 4, 1, 3, 5, 7, 16, 17, 10, 12, 27, 20, 19, 24, 22, 23, 0}	{0, 6, 1, 4, 3, 2, 5, 22, 25, 23, 24, 19, 21, 20, 13, 27, 28, 8, 12, 17, 11, 18, 26, 9, 15, 16, 10, 14, 7, 0}
Km´s Recorridos	22.192	10.664
Tiempo Aprox.(Horas)	3.33	2.31

Fuente: Elaboración propia

Nuevamente se puede apreciar en la tabla 4.9, una disminución de la distancia total empleada del 51,95 %, para cumplir con la entrega predefinida de los pedidos.

Es de vital importancia reducir kilómetros recorridos, ya que de esta manera implícitamente se resuelve una problemática común dentro de un proceso completo de distribución, es decir se trata a medida de lo posible reducir el costo total en dólares así como también el tiempo total empleado en la ruta.

La tabla 4.9 muestra lo antes mencionado, se reduce el costo total de la ruta, además el tiempo total estimado se ve afectado positivamente como se lo espera con una disminución de aproximadamente 1 hora de la jornada del transportista.

Los grafos de las rutas se muestran en las figuras: 4.25, 4.26 :

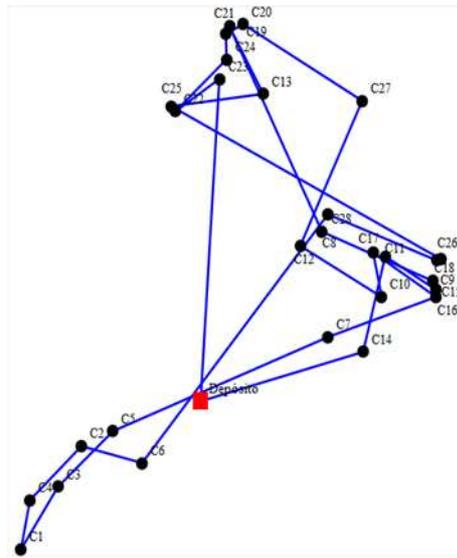


Figura 4.25: Comparación N°2 Ruta Transportista

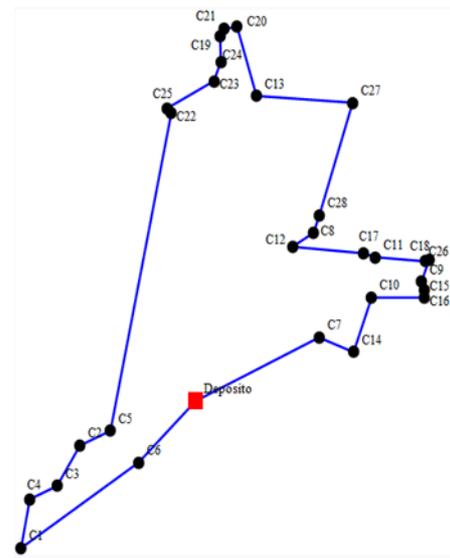


Figura 4.26: Comparación N°2 Ruta Propuesta

Con este análisis se pudo demostrar que es más que obvio que la política actual con la que la empresa maneja su distribución no es la óptima. Y existe grandes posibilidades de mejorar mediante la aplicación de la heurística diseñada.

Capítulo 5

Conclusiones

- Este trabajo fue realizado para resolver el problema de la distribución física de productos de consumo masivo, siendo éste un problema de alta complejidad no sólo por el hecho de que la empresa cuente con una cartera de clientes bastante significativa, que solamente en Milagro superan fácilmente una cifra de 1400 clientes, sino también por muchas variables relacionadas con el problema, variables tales como: situaciones de tránsito vehicular, la demanda de los clientes es estocástica y no todos los clientes realizan sus pedidos con algún patrón establecido, sino que las veces en las que piden o la frecuencia de pedidos está sujeta también a la variabilidad. De tal manera todo lo mencionado hace una muy difícil tarea, a la hora de realizar una planificación óptima de visita a clientes. Sin embargo, ya que el costo del transporte (distribución) según algunos autores representa del 20% al 30% del total de costos logísticos, es notorio que hay oportunidades de reducir aquellos costos que generalmente se dan por mala organización, y/o por

no contar con una correcta planificación. Más aún es de suma importancia cuando las ventas y la distribución forman parte del core business de una compañía.

- Con un manejo eficiente de los recursos empleados dentro de la distribución se puede cumplir con los dos principales objetivos involucrados dentro de un proceso logístico los cuales se basan en la disminución de los costos operativos y en el aumento de la satisfacción del servicio al cliente.
- El algoritmo propuesto para la clusterización de los clientes considera una de las variables más relevantes, como lo es distancia entre clientes. De tal manera que cada agrupación que se define en el presente estudio, siempre tendrá sus clientes muy cercanos entre sí.
- Respecto a los tiempos de las rutas que realiza cada vendedor, mediante la aplicación del algoritmo generalmente oscilan entre 7.5 a 8.5 horas, tiempos que se han reducido en un 20% en comparación con las rutas que siguen actualmente los vendedores. Cabe indicar que el tiempo de cada ruta es estimado, ya que uno de los componentes como lo es el tiempo de servicio a cada cliente es aleatorio (simulado mediante la distribución weibull).
- Con respecto a la planificación de la entrega de los pedidos solicitados, se observa que la aplicación del algoritmo propuesto, es sin lugar a dudas muy eficiente y significativamente mejor que la planificación actual que realiza la empresa. Mediante las comparaciones N°1 y N°2, se puede observar que

se tienen ahorros en distancias recorridas considerables del 33,66 %, y el 51,95 % respectivamente.

- Con puesta en marcha del algoritmo para la planificación de la entrega de los pedidos se pudo comprobar, que efectivamente el criterio de experiencia del conductor considerado para realizar una ruta de entrega no es totalmente factible, sin embargo si así lo fuera, tampoco sería del todo saludable para la empresa que su distribución dependa del conocimiento de una persona, ya que si por diferentes motivos aquella persona renuncia a sus labores, sería muy difícil delegar a otra persona dichas funciones.
- Para lograr resultados deseados más realistas es decir, romper con una o algunas de nuestras limitaciones por ejemplo en el supuesto de que el cliente si recibe la mercadería, se puede optar por plantear ventanas horarias de atención y de esta forma que garanticen de alguna manera la aceptación de la mercadería a la primera visita que se realice.

Capítulo 6

Recomendaciones

- Se ve diariamente el problema de la mala organización, si bien es cierto actualmente la empresa cuenta con una planificación de visita a sus clientes por parte de los vendedores muy buena pero lamentablemente no se la sigue al pie de la letra el día en que cada sector debe ser visitado, la política de visita a clientes que se propone es significativamente mejor que la actual, pero para que funcione y se obtengan los resultados esperados se debería seguir tal y como se la propone.

En un día determinado se deben visitar única y exclusivamente a aquellos clientes que está previsto hacerlo, no se debe de atender clientes lejanos al día en curso, ya que representaría indiscutiblemente costos elevados, no sólo en función de las distancias totales recorridas, sino también tiempo total de la ruta, y probablemente retrasos en la segunda ruta de distribución en caso de que la demanda así lo amerite.

- Es recomendable que la empresa maneje un correcto flujo de información,

cosa que actualmente no se está haciendo. Un ejemplo palpable a dicho problema se da en el manejo de información que se cuenta por parte de los clientes, el cual muchas veces se pudo constatar que es muy ineficiente. Clientes repetidos, direcciones incompletas, direcciones erróneas son algunos de los ejemplos que se observaron al momento de desarrollar este proyecto.

- Recordemos que luego de conocer las direcciones de cada uno de los clientes, estas fueron georeferenciadas con el uso de Google Earth, para obtener las coordenadas de cada cliente. Dichas coordenadas son aproximaciones que pueden ser mejoradas realizando una visita personalizada a una muestra de clientes y obteniendo sus coordenadas más exactas mediante un GPS, para luego encontrar algún factor que permita calibrar las coordenadas de todos los clientes de la base de datos.
- Cabe recalcar que el flujo de información es el input necesario para realizar cualquier mejora dentro los procesos que giran entorno al negocio y es la propia empresa la encarga de proporcionársela a los empleados para que estos le den la utilidad que sea necesaria en progreso de la misma.
- El Supermercado Mayorista es una empresa que ha ido creciendo poco a poco para lograr estandarizar las políticas con las que cuenta actualmente. Sin embargo, no es para nada aconsejable seguir manejando una política de distribución en la cual no se respeten estándares previamente definidos.

La empresa como tal no debe amoldarse a las circunstancias y a los requerimientos exigentes por parte de los clientes, ya que estamos hablando de más de 1400 personas (sólo en Milagro) que piensan y desean de manera diferente.

Lo ideal es que los clientes se amolden a las políticas o circunstancias en las que gira el negocio, objeto que sólo se conseguirá únicamente estableciendo relaciones con el cliente. Esto es, ir creando poco a poco una cultura de venta óptima que con el transcurrir de tiempo se vaya grabando en la retina de todos los usuarios. Para así mejorar los procesos de preventa y distribución de las mercaderías solicitadas.

Bibliografía

- [1] Alina Martínez-Oropeza, Marco Antonio Cruz-Chávez. “*Método de Agrupamiento no Supervisado para el problema de Ruteo Vehicular con restricciones de capacidad en los vehículos*”. Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad autónoma del Estado de Morelos.
- [2] D. Pascual, S. Sánchez “*Algoritmos de Agrupamientos*”.
- [3] Alfredo Olivera (2004). “*Heurísticas para el Problema de ruteo de vehículos*”. Instituto de Computación Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- [4] Fisher M, Jaikumar R (1981). “A generalized assignment heuristic for the vehicle routing problem”.
- [5] José Josymar Cadillo Paredes (2011). “*Estudio comparativo de la aplicación de heurísticas al problema de ruteo de vehículos*”. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [6] Diego Flores Benítez (2009). “*Propuesta de Rediseño de rutas de entrega AM para DHL Express en Quito*”. Universidad San Francisco de Quito.
- [7] Fernando Sandoya Sánchez. (2007). “*Métodos Exactos y Heurísticos para resolver el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)*”. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil-Ecuador.
- [8] Rafael Martí Cunquero. “*Algoritmos heurísticos en Optimización Combinatoria*”. Universidad de Valencia.
- [9] Irene Loiseau. (2012). “*Metaheurísticas (ideas, mitos, soluciones)*”.
- [10] (8 de Diciembre del 2012). Wolfram Mathematica. Consultado el 17 de Julio del 2013 “*Mathematica*”. <http://www.wolfram.com/mathematica/>
- [11] (15 de Diciembre del 2012). Google Earth. Consultado el 17 de Julio del 2013 “*Google Earth*”. <http://www.google.com/intl/es/earth/index.html>
- [12] (28 de Enero del 2013). Microsoft. Consultado el 17 de Julio del 2013 “*Microsoft Excel 2013*”. <http://www.microsoft.com/es-ec/default.aspx>