Optimizing the Distribution of Finished Products in a Pastry, Applying Vehicle Routing Heuristics

Jonatán Edward Rojas Polo, Mg.[1], Álvaro Samaniego Osorio[2], Alexandra Rivera Lahura[3], and Katherine De la Cruz Fernández [1]

[1] *Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, jrojasp@pucp.pe, alvaro.samaniego@pucp.pe, a20110283@pucp.pe, katherine.delacruz@pucp.pe*

Abstract*– *This research arises given the need to resolve the problematic posed by certain medium size pastry unable to plan the distribution of their finished products properly. This issue is approached by seeking routes that optimize travel routes and transportation of the products offered by the pastry, trying to minimize the distances and costs that occur between the point of entry of the company and distribution centers for products (sales intermediates), which, mostly, are baking companies that have large concentrations of people and a high level of sales who are located at different points of Lima City. Currently, there is no defined method for scheduling route taken by CTUs but are mostly empirically defined by drivers of vehicles in charge of the distribution. For that reason, this research is first performed to identify all relevant variables that are important in this distribution model and then applying a two phases heuristic and using graphs theory, design an algorithm that improves the route clearance of this pastry and find the best way to saturate the capacity of the vehicle without compromising the quality of the final product in order to obtain a relevant percentage of savings to the company and present our proposed initial improvement to them.

Keywords*— *Distribution centers, distribution route optimization, minimize distribution costs.

Digital Object Identifier (DOI): http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.110
ISBN: 13 978-0-9822896-8-6
ISSN: 2414-6668

Optimización de la distribución de productos terminados en una repostería, aplicando heurísticas de ruteo de vehículos

Jonatán Edward Rojas Polo, Mg.[1], Álvaro Samaniego Osorio.[2], Alexandra Rivera Lahura.[3] y Katherine De la Cruz Fernández [4]
Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, jrojasp@pucp.pe, alvaro.samaniego@pucp.pe, a20110283@pucp.pe, katherine.delacruz@pucp.pe

Abstract*– This research arises given the need to resolve the problematic posed by certain medium size pastry unable to plan the distribution of their finished products properly. This issue is approached by seeking routes that optimize travel routes and transportation of the products offered by the pastry, trying to minimize the distances and costs that occur between the point of entry of the company and distribution centers for products (sales intermediates), which, mostly, are baking companies that have large concentrations of people and a high level of sales who are located at different points of Lima City. Currently, there is no defined method for scheduling route taken by CTUs but are mostly empirically defined by drivers of vehicles in charge of the distribution. For that reason, this research is first performed to identify all relevant variables that are important in this distribution model and then applying a two phases heuristic and using graphs theory, design an algorithm that improves the route clearance of this pastry and find the best way to saturate the capacity of the vehicle without compromising the quality of the final product in order to obtain a relevant percentage of savings to the company and present our proposed initial improvement to them.

Keywords -Distribution centers, distribution route optimization, minimize distribution costs.

Resumen* – La presente investigación surge ante la necesidad de resolver la problemática que presentan ciertas empresas de repostería de mediano tamaño al no poder planificar adecuadamente la distribución de sus productos terminados. Aborda esta problemática buscando rutas que optimicen el recorrido y traslado de los productos ofrecidos por la empresa de repostería, tratando de minimizar las distancias y costos que se producen entre el punto de despacho de la empresa y los centros de distribución de los productos (intermediarios de ventas), los cuales, en su gran mayoría, están ubicados en diversos puntos de la ciudad de Lima y son empresas panaderas que poseen gran concentración de personas y un alto nivel de ventas. Actualmente, no existe un método definido para programar la ruta que toman las unidades de transporte, sino que principalmente son definidas de forma empírica por los conductores de los vehículos encargados de la distribución. Por esa razón, en esta investigación se realiza primero la identificación de todas las variables relevantes que son importantes en este modelo de distribución, para luego, aplicando una heurística de dos fases y usando los métodos de grafos, diseñar un algoritmo que permita mejorar la ruta de despacho de esta repostería y a su vez saturar de la mejor manera la capacidad de los vehículos sin afectar la calidad del producto final, con el fin de obtener un porcentaje de ahorro relevante y presentar a la empresa nuestra propuesta de mejora inicial.

Palabras clave -- Centros de distribución, Optimización de rutas de distribución, minimizar costos de distribución.

I. Introducción

El flujo de vehículos que transitan por las calles de Lima está incrementándose de manera desproporcionada año a año, principalmente por la necesidad de los ciudadanos de transportarse y llegar oportunamente a sus centros laborales. Esto indefectiblemente genera que el tráfico se pueda congestionar en los horarios de entrada/salida de los lugares de trabajo (7-9 am, 5-7 pm) lo cual causa incomodidad y ansiedad tanto en los pasajeros de los vehículos como en los choferes de los mismos, lo que a su vez genera que algunos de ellos busquen realizar maniobras peligrosas para minimizar el tiempo de llegada, lo cual en muchas ocasiones trae consecuencias fatales. A esto se le debe sumar el incremento del tránsito de camiones de carga pesada (ha mejorado el mercado de exportación), vehículos interprovinciales (ciudad a ciudad) y principalmente los vehículos de distribución de todo tipo de mercadería (deben garantizar la disponibilidad de los productos para no tener venta perdida). En general, las empresas dedicadas a la distribución (por ejemplo, empresas logísticas) conocen del problema y manejan el uso de sistemas integrados que les permiten definir de la forma más conveniente las rutas para sus unidades considerando diversos factores; sin embargo, para una pequeña empresa de repostería que asume la distribución de sus diferentes productos, la opción de invertir en este sistema no es muy atractiva debido a su alto costo, el cual no puede ser mantenido a largo plazo. Este es el caso de "El Gran Molino", una empresa que en los últimos 30 años se ha caracterizado por la calidad de sus productos y está en la búsqueda de mejorar continuamente la forma en cómo estos llegan a sus clientes, es decir, que los productos de pastelería lleguen frescos como si fueran preparados en cada punto de venta.

A todo ello, nos planteamos la siguiente pregunta: ¿Existe alguna manera de poder optimizar la distribución de una repostería pequeña sin necesidad de realizar una gran inversión? ¿Es posible hacer uso de algoritmos que contribuyan a la reducción de las distancias a recorrer? ¿De qué manera podremos maximizar el uso de la capacidad de nuestro vehículo? De hecho, tratando de buscar una respuesta a nuestro inconveniente nos lleva a pensar en el uso de métodos heurísticos como el de Clarke & Wright, el cual es utilizado para encontrar las distancias más cortas de un punto a otro, en general.

Adaptando este planteamiento se puede obtener la ruta más corta que relacione todos los nodos de una red, lo que en teoría significa la creación de una ruta con los mismos puntos de inicio y fin de mínima distancia o mínimo costo. Para nuestro caso, se busca obtener la ruta más corta entre la repostería "El Gran Molino" (representa un depósito) y sus clientes (puntos de distribución, nodos), considerando las restricciones de la capacidad máxima que puede enviar un solo camión (medida en unidades estándares).

II. MARCO TEORICO

El problema de distribuir productos desde ciertos depósitos a ciertos clientes juega un papel fundamental en la gestión de muchos de los sistemas logísticos existentes, por lo que su buena planificación es, en esencia, la mayor fuente de ahorros (costo de distribución) en una empresa. Tal es así que en el mundo de la Investigación Operativa estos problemas son clasificados de forma especial como Problemas de Ruteo de Vehículos (VRP) y sus variantes, que incluyen restricciones de capacidad o recorrido máximo (CVRP- Capacity Route Vehicle Problem), restricciones de tiempo (VRPTW, por sus siglas en inglés) o incluso ambos. En el siguiente apartado se describe de forma compacta estas variaciones:

***TSP (Travelling Sales Problem)*:** En este tipo de problema se cuenta únicamente con 1 vehículo (recurso), no existen restricciones de capacidad ni demandas en los nodos, por lo que busca encontrar la ruta de mínima distancia que pueda recorrer todos los nodos, de inicio a fin.

***m-TSP (variación del TSP)*:** En este problema se cuentan con "m" vehículos que deben realizar "m" rutas de forma ideal, buscando la mínima distancia posible por ruta que tome cada uno de estos vehículos desde el nodo de inicio hasta su retorno.

VRP (CVRP): Este problema se aborda como una extensión del m-TSP en la cual cada cliente posee una demanda interna y cada vehículo dispone de una capacidad máxima para el envío. A este problema se le pueden agregar restricciones de cotas máximas para la determinación de la distancia mínima por ruta, lo cual hace que el número de vehículos no necesariamente sea un dato fijo, sino que este dependa también de las rutas óptimas.

En lo referido a nuestro análisis, y dado que la demanda de los productos de la repostería es satisfecha por la capacidad que posee el camión, por el momento lo más recomendable es optimizar directamente el consumo de combustible y minimizar el numero de paradas en tales puntos; en otras palabras, determinar la ruta óptima de distribución de su mercancía para cada grupo de clientes seleccionados.

Las variables que se han considerado para la optimización fueron las siguientes:

Vehículos: Se dispone de un solo camión para todo el transporte de productos de la repostería. Las dimensiones de nuestro camión (VAN) son de 3.54 m de largo por 1.8 m de ancho, con capacidad volumétrica de 12 m^3. Dada la diversidad de pedidos, se hará uso de una medida estandarizada de carga unitaria, en la cual 12 m^3 equivalen a 200 cargas unitarias.

Clientes: Son los puntos de reparto de la mercadería; el reparto se hace en función a pedidos específicos de cada cliente.

Empresa: Viene a ser el punto de origen de nuestro reparto, y a su vez el destino final del camión.

Para resolver estos problemas (el enfoque principal en el TSP) se llegó a la conclusión de que es necesario utilizar la heurística de Clarke & Wright [1], dado que inicialmente la empresa evaluará la mejora propuesta en solo algunos puntos de distribución (pocos nodos). Esta heurística (también conocida como algoritmo de ahorros) es un procedimiento simple para poder resolver los Problemas de Ruteo de Vehículos (VRP), la cual se basa en el concepto del ahorro en una secuencia de nodos respecto a un punto fijo ya definido. Lo que realiza este algoritmo es analizar si, partiendo de una ruta inicial, es posible conseguir una ruta mejorada uniendo dos nodos de forma consecutiva que se manifieste en un ahorro, ya sea de tiempo, costo o distancia. Es decir, si se tienen 2 rutas diferentes e independientes, y pueden ser combinadas formando una nueva ruta que inicié y finalicé al origen (deposito central), es posible calcular el ahorro. Se denota como par ordenado al arco (i, O) y (O, j) donde "O" es el origen o nodo precedente e "i, j", los nodos posteriores. El cálculo del ahorro es:

$$\mathbf{S_{ij} = a_{ij} = d_{iO} + d_{Oj} - d_{ij}}$$

Y la solución inicial (que sirve de base de comparación) toma las distancias más largas de ida y vuelta entre el nodo de origen y todos los demás nodos, con un solo vehículo. Observe la figura 1.

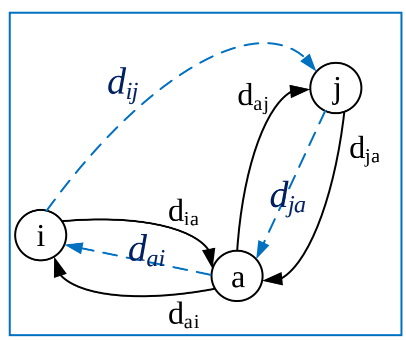

Figura 1 Calculo del ahorro en distancia i, j.

Se definen ciertos parámetros como:

- a: Punto de almacén o partida de nuestro vehículo.
- Nodos i, j: Representan los puntos de distribución a los que llega el vehículo.
- d_{ia}, d_{aj} : Distancias entre los nodos i, j al punto a (de los puntos de distribución a la empresa)
- d_{ij}: Distancia del nodo i al nodo j (puntos de distribución).

- Las flechas negras representan la ruta inicial, mientras que las flechas celestes no continuas representan la ruta mejorada.
- El ahorro es: $d_{ia} + d_{aj} - d_{ij} = S_{ij}$

En lo referido a la programación lineal del modelo de ruteo de vehículos, consiste en seleccionar una ruta que visite a todos los clientes (por grupo de clientes) a costo mínimo utilizando un solo vehículo (nuestro caso VRP simple), por lo que se puede formular como la función objetivo:

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} d_{ij} * x_{ij}$$

Esta expresión nos indica que se debe minimizar las distancias totales de recorrido en función a la elección del camino que se tome. Por lo tanto esta expresión indica que el costo o distancia total de la solución es la suma de los costos o distancias de los arcos utilizados.

Asimismo se usó la formulación inicial de VRP propuesta por Dantzig, Fulkerson y Johnson [2]. A continuación se especifican las restricciones de contexto:

a) Solamente uno de los caminos puede ser tomado por el camión, tanto de ida como de vuelta (2 restricciones de contexto):

$$\sum_{i=1\ \&\ i\neq j}^{n} x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \ldots, n)$$

$$\sum_{j=1\ \&\ j\neq i}^{n} x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \ldots, n)$$

b) Finalmente se debe utilizar un artificio para evitar que el programa considere como solución óptima a algún sub-camino que forme un ciclo con sus anteriores o sucesores (demás nodos), lo cual aumentaría el valor de la distancia y no representaría la solución óptima. La restricción para el eliminar sub-caminos es la siguiente:

$$u_i - u_j + p * x_{ij} \leq p - 1 \qquad (1 \leq i \neq j \leq n)$$

(Desigualdad de Miller, Tucker y Zemlin)

Donde "u_i" son números reales arbitrarios (i = 1,…, n), y son variables contadores de ruta, "p" expresa la cantidad de nodos restantes a "saturar" y X_{ij} son números enteros no negativos y expresan la decisión de tomar un cierto camino entre nodos o no. Esta restricción fue propuesta por Miller, Tucker, y Zemlin [3].

Además, para lo referido a la configuración de la capacidad, se buscará saturar la mayor cantidad de unidades utilizando el método del barrido, para luego hacer una resolución de un TSP para cada ruta creada (cada ruta es un llamada clúster), siguiendo la filosofía de la asignación "Asignar primero, rutear después", bajo la asignación de clústeres según lo descrito en los modelos de Gillet & Miller [5].

III. DESCRIPCION DEL MODELO

"El Gran Molino" es una empresa de repostería que se ubica en la Av. Dominicos Cdra. 490, en la provincia constitucional del Callao, en el departamento de Lima. Sus destinos de distribución (ubicación de los clientes) se encuentran en los distritos de Los Olivos, Independencia, San Martin de Porres, Comas y Callao, que suman un total de 15 puntos de entrega. En esta agrupación (clusterizacion de rutas) se utiliza una unidad de distribución (camión o minivan) para cada zona. De esta manera, se consiguió hallar la menor distancia recorrida que cumpla con abastecer por completo a todos los clientes de la empresa. En la Tabla I se muestra las locaciones de los clientes.

Tabla I
Descripción de locaciones de los clientes, por distrito.

Cliente	Dirección	Distrito	Demanda estandarizada
1	Av. García y García 378	Callao	47
2	Av. Colonial 3064	Callao	84
3	Calle Sáenz Peña, 566	Callao	43
4	Av. Estado de Israel, 202 - El Álamo	Comas	41
5	Av. El Maestro 211	Comas	29
6	Jr. Alejandro Iglesias, 190	Comas	12
7	Av. Guillermo de la Fuente N° 370	Comas	24
8	Av. Túpac Amaru 498	Independencia	11
9	Av. Las Palmeras 4056 - Los Olivos - Lima	Los Olivos	17
10	Av. Antúnez de Mayolo 1223	Los Olivos	15
11	Calle Santa Marina, 101 - Urb. José de San Martín	San Martin de Porres	12
12	Jr. Eliseo Herrera Zapata, 162 - San Germán	San Martin de Porres	17
13	Av. Perú 1836	San Martin de Porres	15
14	Av. Paramonga - Mz.A Lt.21, Urb. Virgen de la Puerta	San Martin de Porres	13
15	Av. Perú cuadra 35	San Martin de Porres	11

Con los datos presentados, se determinó la distancia entre cada par de clientes; estos datos se almacenaron en una matriz de distancias y se realizó un mapa inicial en un plano geográfico de la ciudad de Lima con todos los nodos que intervienen en el modelo (tanto depósitos como clientes). En este mapa inicial se considera la distancia de ida y vuelta entre un par de nodos, puesto que se está calculando la solución inicial al problema y además, en la Figura 2, se considerará las rutas que se están utilizando actualmente.

Dado que existen realmente las distancias entre todos los puntos de distribución y la repostería, entonces no fue necesario aplicar el algoritmo de Dijkstra como artificio de cálculo para las distancias faltantes.

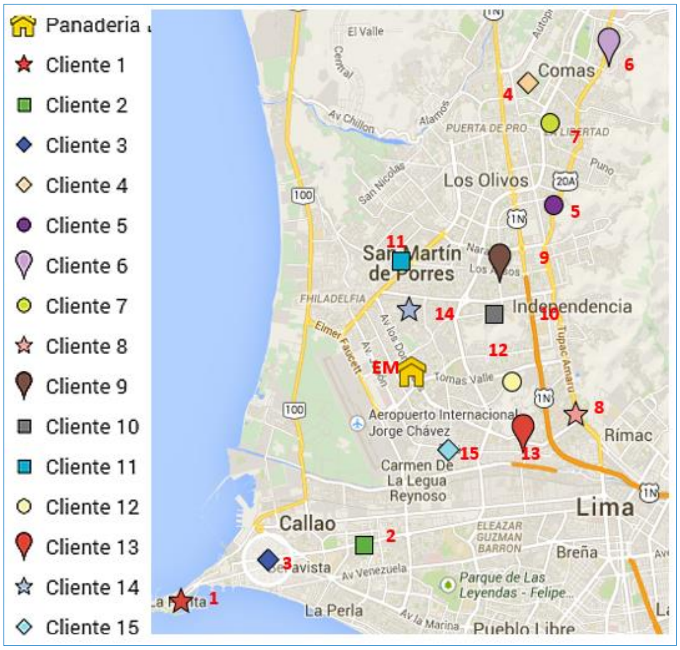

Figura 2 Distribución de los puntos de venta en el plano geográfico.

A. SITUACIÓN ACTUAL

En la Tabla II se observa la distancia en kilómetros entre “El Gran Molino” y todos sus clientes, además también se muestra la distancia entre cada par de cliente.

Tabla II

Matriz distancia resumida entre todos los nodos (Km).

Distancia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Empresa	5.26	8.30	12.80	12.30	8.88	25.10	11.20	7.60	6.70	3.40	9.60	5.10	3.30	8.70	5.00
	1	7.54	11.49	9.93	3.63	19.04	4.31	25.63	0.69	1.60	7.80	7.08	17.13	2.98	10.81
		2	4.91	5.78	10.71	13.76	11.67	19.02	6.93	5.98	17.32	4.53	12.46	6.24	16.65
			3	16.31	7.44	10.32	7.93	23.89	3.12	1.99	22.23	6.84	16.60	1.64	21.40
				4	6.12	7.87	7.56	22.98	7.33	7.94	22.04	5.81	16.50	8.81	19.53
					5	3.04	1.46	27.66	4.32	5.47	26.41	8.95	18.35	5.94	24.50
						6	2.47	30.34	7.24	8.38	29.17	11.76	20.71	8.74	27.06
							7	29.01	4.91	6.04	27.72	10.27	19.79	6.32	25.89
								8	25.21	24.56	2.20	18.75	10.45	25.04	3.77
									9	1.15	23.72	6.80	16.89	1.72	22.38
										10	23.01	6.50	16.57	0.89	21.84
											11	17.46	10.10	23.45	4.16
												12	10.10	7.25	15.72
													13	17.27	17.27
														14	22.4
															15

Como se ha mencionado con anterioridad, la programación de los vehículos del Gran Molino se realiza según el criterio del administrador, y sin ningún criterio de optimización para elegir la mejor ruta. Para poder atender este plan piloto compuesto de quince clientes, el vehículo realiza dos viajes (atención por clúster). Las rutas utilizadas actualmente se muestran en la Figura 3 y Figura 4.

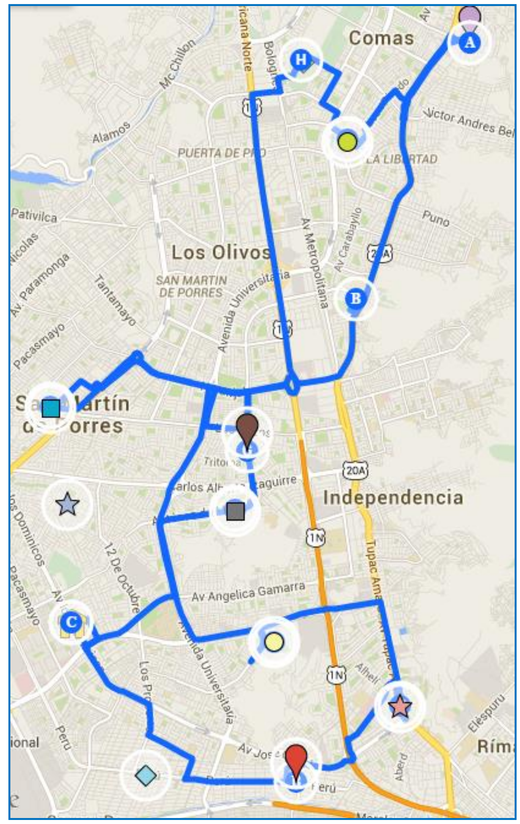

Figura 3 Secuencia de Distribución Actual de los Clientes (primera ruta).

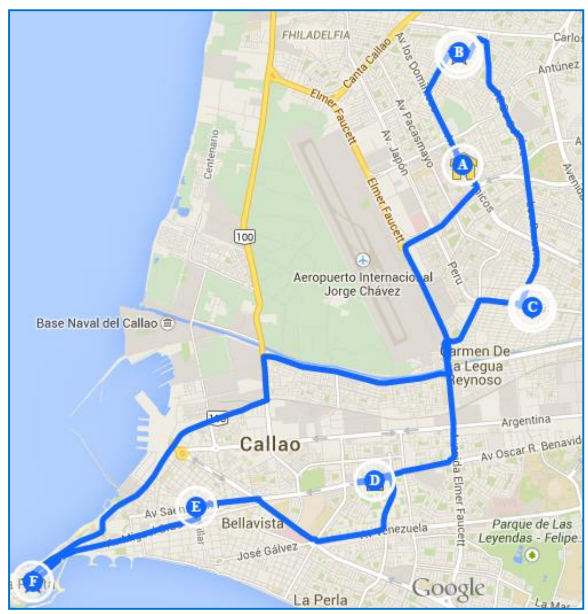

Figura 4 Secuencia de Distribución Actual de los Clientes (segunda ruta).

Para enviar el producto a los clientes es necesario realizar dos viajes con el vehículo, y la distancia total recorrida es de 122.6 kilómetros al día, asumiendo que las vías de transito se encuentran disponibles día a día.

B. MODELO PROPUESTO

Se realizó el algoritmo de dos fases, primero con el algoritmo de clusterización de Gillet & Miller, y luego con el algoritmo de Clarke and Wright.

Para aplicar el algoritmo de Gillet & Miller se utilizó la siguiente notación y definiciones.

N: número de clientes, incluyendo al depósito.
Q (i): la demanda en el lugar i.
(X (i), Y (i)): coordenadas rectangulares de la localización iésima.
C: capacidad de cada vehículo.
D: Distancia máxima de recorrido para cada vehículo.
A (i, j): distancia entre los puntos i y j.
An (i): ángulo de la coordenada polar i (i = 2, 3,..., N).

En síntesis los clústeres se forman girando una semirrecta con origen en el depósito, e incorporando los clientes "barridos" hasta completar la capacidad del vehículo.

A continuación, siguiendo con los pasos del algoritmo, escogemos el mayor ahorro de distancia entre todos los nodos y analizamos si cumple con las siguientes restricciones:

- Si el grado del nodo es mayor que cero, aun podemos iterar. T (O, i), T(O, j) > 0
- Que el nodo i y el nodo j no se encuentran en la misma ruta.
- Evitar violar las restricciones indicadas (máximo 1 camión y respetar su capacidad máxima)

Si cumple con las restricciones mencionadas, se procede a unir los nodos y se va creando la secuencia de la ruta óptima que debe tener la distribución de nuestra empresa.

Tabla III
Matriz ahorro para cada par de nodos (Km).

Ahorro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	1	6.02	6.57	7.63	10.51	11.32	12.15	-12.77	11.27	7.06	7.06	3.28	-8.57	10.98	-0.55
		2	16.19	14.82	6.47	19.64	7.83	-3.12	8.07	5.72	0.58	8.87	-0.86	10.76	-3.35
			3	8.79	14.24	27.58	16.07	-3.49	16.38	14.21	0.17	11.06	-0.50	19.86	-3.60
				4	15.06	29.53	15.94	-3.08	11.67	7.76	-0.14	11.59	-0.90	12.19	-2.23
					5	30.94	18.62	-11.18	11.26	6.81	-7.93	5.03	-6.17	11.64	-10.62
						6	33.83	2.36	24.56	20.12	5.53	18.44	7.69	25.06	3.04
							7	-10.21	12.99	8.56	-6.92	6.03	-5.29	13.58	-9.69
								8	-10.91	-13.56	15.00	-6.05	0.45	-8.74	8.83
									9	8.95	-7.42	5.00	-6.89	13.68	-10.68
										10	-10.01	2.00	-9.87	11.21	-13.44
											11	-2.76	2.80	-5.15	10.44
												12	-1.70	6.55	-5.62
													13	-5.27	-8.97
														14	-8.70
															15

Sin embargo, dadas las condiciones de capacidad, el método del ahorro debería ser restringido a los limitantes de entrega, dado que el camión solo posee capacidad para 200 cargas unitarias estándar. Para ello, en la clusterizacion inicial, aplicando el algoritmo de Giller y Miller, se formará primero los clústeres con C = 200, y luego se planteará el método del ahorro para los clientes que resulten parte de dichos clústeres. El método de barrido (algoritmo de Giller y Miller) se observa en la figura 5.

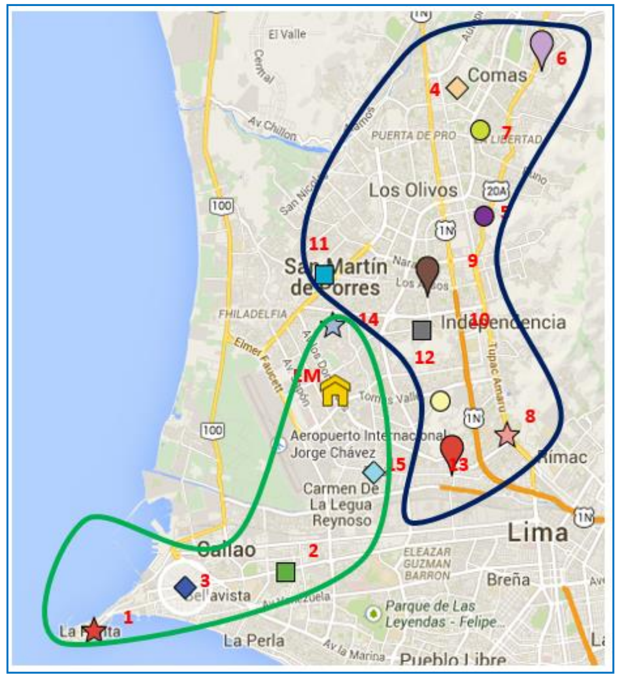

Figura 5 Determinación de los clúster.
El clúster A esta delimitado por la curva verde y el B, por la curva azul

A partir de la generación de estos clústeres, y basándonos en la filosofía de asignación anterior, se aplicó el método del ahorro para encontrar la distancia mínima de recorrido en cada sub-ruta, lo cual es equivalente a resolver un TSP por ruta.

CLÚSTER A

Se encuentra conformado por los clientes 1, 2 ,3, 14 y 15, los cuales totalizan una demanda de 47 + 84 + 43 + 13 + 11 = 198 cargas unitarias estándar, lo cual es menor a la capacidad que posee un camión (200 cargas unitarias estándar). Se aplicará el algoritmo de Clarke & Wright en este primer clúster. En la Tabla IV se muestra las distancias entre los nodos de este clúster.

Tabla IV
Matriz distancia para cada par de nodos en el clúster A (Km).

Ubicación	Empresa	1	2	3	14	15
Empresa		5.26	8.3	12.8	8.7	5
1	5.26		7.54	11.49	2.98	10.81
2	8.3	7.54		4.91	6.24	16.65
3	12.8	11.49	4.91		1.64	21.4
14	8.7	2.98	6.24	1.64		22.4
15	5	10.81	16.65	21.4	22.4	

Luego de proceder a aplicar el algoritmo de Clarke & Wright se obtiene la secuencia de distribución para este clúster. Los resultados de este clúster los observamos en la Figura 6, y las iteraciones en la Tabla V.

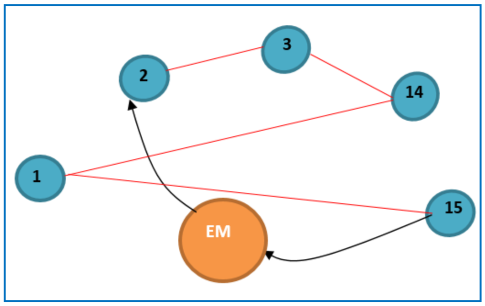

Figura 6 Situación optimizada de la ruta en el clúster A.

Tabla V
Matriz de ahorros final para la optimización A (Km).

Ahorro	1	2	3	14	15
T	0	1	0	0	1
	1	6.02	6.57	10.98	-0.55
		2	16.19	10.76	-3.35
			3	19.86	-3.60
				14	-8.70
					15

Por ende, para el clúster A, la ruta óptima está conformada por EM – 2 – 3 – 14 – 1 – 15 – EM, con una distancia de 8.3 + 4.91 + 1.64 + 2.98 + 10.81 + 5 = 33.64 kilómetros.

CLÚSTER B

Análogamente, se observa que está conformado por los clientes 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13 los cuales totalizan una demanda de 193 cargas unitarias estándar. Se realizó el mismo procedimiento que en el clúster A. En la Tabla VI se muestra las distancias entre los nodos de este clúster.

Tabla VI
Matriz distancia para cada par de nodos en el clúster B (Km).

Ubicación	Empresa	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Empresa		12.3	8.88	25.1	11.2	7.6	6.7	3.4	9.6	5.1	3.3
4	12.3		6.12	7.87	7.56	22.98	7.33	7.94	22.04	5.81	16.5
5	8.88	6.12		3.04	1.46	27.66	4.32	5.47	26.41	8.95	18.35
6	25.1	7.87	3.04		2.47	30.34	7.24	8.38	29.17	11.76	20.71
7	11.2	7.56	1.46	2.47		29.01	4.91	6.04	27.72	10.27	19.79
8	7.6	22.98	27.66	30.34	29.01		25.21	24.56	2.2	18.75	10.45
9	6.7	7.33	4.32	7.24	4.91	25.21		1.15	23.72	6.8	16.89
10	3.4	7.94	5.47	8.38	6.04	24.56	1.15		23.01	6.5	16.57
11	9.6	22.04	26.41	29.17	27.72	2.2	23.72	23.01		17.46	10.1
12	5.1	5.81	8.95	11.76	10.27	18.75	6.8	6.5	17.46		10.1
13	3.3	16.5	18.35	20.71	19.79	10.45	16.89	16.57	10.1	10.1	

Así también, procedemos a aplicar el algoritmo de Clarke & Wright. Los resultados de este clúster los observamos en la Figura 7, y las iteraciones en la Tabla VII.

Luego de proceder a aplicar el algoritmo de Clarke and Wright se obtienen los resultados de este clúster, lo observamos en la figura 6, y las iteraciones en la tabla V.

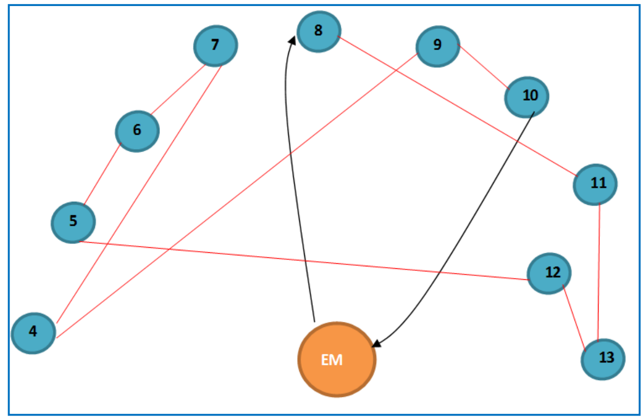

Figura 7 Situación optimizada de la ruta en el clúster B.

Tabla VII
Matriz de ahorros final para la optimización B (Km).

Ahorro	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	15.06	29.53	15.94	-3.08	11.67	7.76	-0.14	11.59	-0.90
		5	30.94	18.62	-11.18	11.26	6.81	-7.93	5.03	-6.17
			6	33.83	2.36	24.56	20.12	5.53	18.44	7.69
				7	-10.21	12.99	8.56	-6.92	6.03	-5.29
					8	-10.91	-13.56	15.00	-6.05	0.45
						9	8.95	-7.42	5.00	-6.89
							10	-10.01	2.00	-9.87
								11	-2.76	2.80
									12	-1.70
										13

Siguiendo el mismo procedimiento de Clarke and Wright, se obtiene la ruta óptima para el segundo clúster, la cual tiene una distancia de 7.6 + 2.2 + 10.1 + 10.1 + 8.95 + 3.04 + 2.47 + 7.56 + 7.33 + 1.15 + 3.4 = 63.90 km, y la secuencia óptima es EM – 8 – 11 – 13 – 12 – 5 – 6 – 7 – 4 – 9 – 10 – EM.

PROGRAMACIÓN LINEAL EN CLÚSTER A Y CLÚSTER B

El algoritmo de Clarke & Wright es eficiente cuando se presenta pocos puntos de distribución, no obstante, si se incrementasen nuestros clientes, sería conveniente apoyarnos en el uso de un software de programación lineal para la rapidez de ejecución del algoritmo, la cual brinde la ruta óptima de una manera rápida y no compleja. Se usó LINGO.

El código en lingo de la programación lineal de los clústeres A y B, los podemos observar en el Anexo 1 y Anexo 2. Con estos códigos se determinó la secuencia y ruta óptima de los clústeres.

Con ello, se pudo comparar las distancias reales existentes entre la mejora propuesta y el modelo inicial, lo que se presentará en la sección de resultados.

IV. RESULTADOS

Como se ha descrito en puntos anteriores, la reducción de la distancia recorrida es significativa, y dado que el transporte es proporcional al costo, un recorrido menor significa costos menores (aproximadamente una reducción del 20%).

Tabla VIII
Comparación de los métodos (Km).

Método	Secuenciación	Distancia Total
Ruteo Actual	Ruta A: EM-14-15-2-3-1-EM = 45.3 km Ruta B: EM-13-8-12-10-11-9-4-7-6-5-EM = 77.3 km	122.6 km
Mejora Propuesta	Ruta A: EM-2-3-14-1-15-EM = 33.64 km Ruta B: EM-8-11-13-12-5-6-7-4-9-10-EM = 63.90 km	97.54 km

Finalmente se calculó el ahorro de la distancia propuesta con relación a la distancia actual, obteniendo como resultado un ahorro de recorrido en distancia de 25.06 km al día, el cual expresado en tiempo en la ciudad de Lima es de aproximadamente dos horas.

V. Conclusión

Se logró encontrar una ruta óptima para la distribución de productos de pastelería que minimizó la distancia recorrida por el vehículo desde la empresa (centro de distribución) hasta los clientes, lo que significa un ahorro en costos de transportes. Si bien es cierto no es el único algoritmo que puede proporcionar rutas óptimas, es uno de los que más se acerca al ideal y mejora el recorrido actual.

El uso de este algoritmo redujo la distancia total de distribución y permitió encontrar las rutas más apropiadas para la distribución de los pedidos por clúster. Sin embargo, la resolución por la Heurística de Clarke & Wright es considerada como una buena solución inicial mas no como la mejor de ellas, ya que presenta algunas inexactitudes que otros modelos (por ejemplo, VRPTW) pueden abarcar.

Además, el método no dispone de información acerca de las direcciones de las avenidas y calles y asume hasta cierto punto que está permitido el recorrido por ambos sentidos en algunas avenidas y que las distancias son iguales en distancia (lo cual supone de que no existe tráfico ni problemas viales en todo momento).

A pesar de lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la implementación de algoritmos de ruteo de vehículos y modelos matemáticos (y sobre todo, del método escogido) representa una inversión de costo mínimo, de fácil implementación y que puede ofrecer grandes beneficios. Por lo tanto, la empresa puede aplicarlo sin problemas, además que brinda información para analizar diferentes indicadores como: tiempo que el vehículo se mantiene en movimiento/Tiempo de recorrido total, Entregas oportunas/ Número total de entregas, entre otros indicadores importantes.

Además, dado que la empresa se encuentra en constante crecimiento, se está analizando la idea de abrir nuevas sucursales en la zona centro de Lima (ya que las tiendas actuales abarcan mayormente la zona Norte), por lo que se necesitaría un nuevo centro de distribución y un mayor número de vehículos para abastecer dicha demanda. Por lo tanto la empresa puede invertir en un software que permita ingresar las diferentes variables que se presenten (capacidad de abastecimiento, número de vehículos, tiempo de entrega admisibles, etc.) y obtener un proceso de ruteo más preciso (al involucrar una mayor cantidad de variables y obtener resultados más confiables y cercanos a la realidad) y óptimo.

Teniendo en cuenta que un vehículo de la empresa recorre 20 kilómetros por galón de combustible, y que el galón de combustible emite 10.395 Kg CO_2, hemos sido capaces de reducir 12.99 Kg de CO_2 eq. por día, y 4.742.72 Kg de CO_2 eq. por año, por lo tanto hemos contribuido ligeramente con la reducción de emisiones de carbono.

Referencias

[1] Clarke, G. y Wright, J., *Scheduling of vehicles from A central Depot to a number of delivery points*. Cooperative Wholesale Society. Operations Research 12 (1964), pp 568 – 581, 1962.
[2] Dantzig, G. & Fulkerson, D. & Johnson, S. (1954). Solution of a large scale traveling Salesman problem. Operations Research 2.
[3] Miller, C. & Tucker, A. & Zemlin, R. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems.
[4] Dijkstra, E. W., *A note on two problems in connexion with graphs.* Numerische Mathermatik 1, 269 – 271, 1959.
[5] Gillett, B. & Miller, L. *A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem*. Operations Research 22 (1974), pp 340 -349, 1971.
[6] Olivera, *A. Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República, Montevideo. : Uruguay, 2004.
[7] Ballou, R. *Logística: Administración de la cadena de suministro*. 5ta ed. Editorial Pearson, 2004.
[8] Christopher, M. *Logistics & Supply Chain Management.* Fourth Edition. Pearson Education, 2011.
[9] Cadillo, José. Tesis: *Estudio Comparativo de la aplicación de heurísticas al problema de ruteo de vehículos*. Consulta: 15 de Junio 2013. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/874/CADILLO_PAREDES_JOSE_HEURISTICAS_RUTEO_VEHICULOS.pdf?sequence=1

Authorization and Disclaimer

Authors, Jonatán Edward Rojas Polo, Álvaro Samaniego Osorio, Alexandra Rivera Lahura & Katherine De la Cruz Fernández, authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.

ANEXO

Anexo 1

```
MODEL:

SETS:
CIUDAD/1..6/:U;
RED (CIUDAD,CIUDAD): DIST,  X;
ENDSETS

DATA:
DIST =
0       5.26       8.3    12.8       8.7     5
5.26     0         7.54   11.49      2.98   10.81
8.3    7.54        0      4.91       6.24   16.65
12.8   11.49       4.91   0          1.64   21.4
8.7     2.98       6.24   1.64       0      22.4
5       10.81      16.65  21.4       22.4   0;
ENDDATA

N = @SIZE(CIUDAD);
MIN = @SUM( RED: DIST * X);
@FOR( CIUDAD( K):@SUM( CIUDAD( I)| I #NE# K: X( I,
K)) = 1; @SUM( CIUDAD( J)| J #NE# K: X( K, J)) = 1;
@FOR( CIUDAD( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:U( J) >=
U( K) + X ( K, J) -( N - 2) * ( 1 - X( K, J)) +( N -
3) * X( J, K)););
@FOR( CIUDAD( K)| K #GT# 1:U( K) <= N - 1 - ( N - 2)
* X( 1, K);U( K) >= 1 + ( N - 2) * X( K, 1));
END
```

Anexo 2

```
MODEL:
SETS:
CIUDAD/1..11/: U;
RED (CIUDAD, CIUDAD): DIST,  X;
ENDSETS

DATA:
DIST =
0 12.3 8.88 25.1 11.2 7.6 6.7 3.4 9.6  5.1  3.3
12.3 0 6.12 7.87 7.56  22.98 7.33 7.94 22.04 5.81 16.5
8.88 6.12 0 3.04 1.46 27.66 4.32 5.47 26.41 8.95 18.35
25.1 7.87 3.04 0 2.47 30.34 7.24 8.38 29.17 11.7 20.71
11.2 7.56 1.46 2.47 0 29.01 4.91 6.04 27.72 10.2 19.79
7.6 22.98 27.6 30.3 29.01 0 25.2 24.56 2.2 18.75 10.45
6.7 7.33 4.32 7.24 4.91 25.21 0 1.15 23.72 6.8 16.89
3.4 7.94 5.47 8.38 6.04 24.56 1.15 0 23.01 6.5 16.57
9.6 22.0 26.4 29.17 27.72 2.2 23.72 23.01 0 17.46 10.1
5.1 5.8 8.95 11.76 10.27 18.75 6.8 6.5 17.46 0 10.1
3.3 16.5 18.3 20.7 19.79 10.5 16.89 16.5 10.1 10.1 0;
ENDDATA

N = @SIZE(CIUDAD);
MIN = @SUM( RED: DIST * X);
@FOR( CIUDAD( K):@SUM( CIUDAD( I)| I #NE# K: X( I,
K)) = 1; @SUM( CIUDAD( J)| J #NE# K: X( K, J)) = 1;
@FOR( CIUDAD( J)| J #GT# 1 #AND# J #NE# K:U( J) >=
U( K) + X ( K, J) -( N - 2) * ( 1 - X( K, J)) +( N -
3) * X( J, K)););
@FOR( CIUDAD( K)| K #GT# 1:U( K) <= N - 1 - ( N - 2)
* X( 1, K);U( K) >= 1 + ( N - 2) * X( K, 1));
END
```