



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE TECNOLOGÍA DE LA INDUSTRIA**

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

***Creación de un manual para la selección de una ruta de distribución usando el Problema del Agente Viajero mediante una hoja de cálculo en Excel tomando como referencia la empresa Antojitos Leoneses***

**ELABORADO POR:**

Br. Adíac Amaru Avilés Arróliga

Br. Ricardo Jesús Largaespada Fernández

Br. Satchel Antonio Vásquez

**TUTOR:**

MSc. Fredy Fernando Boza Castro

**Managua, Octubre de 2014**





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
Facultad de Tecnología de la Industria

**DECANATURA**

**A:** Brs. Adiac Amaru Avilés Arróliga  
Ricardo Jesús Largaespada Fernández  
Satchel Antonio Vásquez

**DE:** Facultad de Tecnología de la Industria

**FECHA** Lunes 09 de junio del 2014

Por este medio hago constar que su trabajo de Investigación Titulado **“Creación de un Manual para la Selección de una ruta de Distribución usando el Problema del Agente Viajero mediante una hoja de cálculo en Excel tomando como referencia la empresa Antojitos Leoneses”**. Para obtener el título de Ingeniero Industrial, y que contara con el Ing. Fredy Fernando Boza Castro, como profesor guía, ha sido aceptado por esta Decanatura por lo que puede proceder a su realización.

Cordialmente,

Ing. Daniel Cuadra Horney  
Decano



Cc: Archivo

Managua, Nicaragua. Apdo. 5595 • Tel.: 2249-6437 • 2248-6879 • 2251 8271 • 2251 8276  
Telefax: 2240 1653 • 2249 0942

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Adiac Avilés**

Agradezco a mis padres por ser un apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida sin el cual no hubiera alcanzado esta meta. A mis hermanas que son un pilar más y una gran motivación en mi vida. A todos mis maestros que se preocuparon por compartir y transmitir el conocimiento, que confiaron en mí y supieron orientarme a lo largo de todos estos años.

### **Satchel Vásquez**

Agradezco primeramente a mi madre, por su gran apoyo, por ser el pilar de mi vida, la cual me motiva siempre a seguir adelante, a mis maestros que dedicaron su tiempo a mostrarme sus conocimientos y tuvieron paciencia para explicarme y orientarme y a mis compañeros que fueron de gran ayuda a lo largo de toda mi carrera.

### **Ricardo Largaespada**

Agradezco a mi madre y a mi padre por su gran ejemplo de superación personal y profesional. A mi hermana y hermano por ayudarme a lograr esta meta. A los profesores que sirvieron de guía y soporte durante la elaboración del presente trabajo.

## RESUMEN EJECUTIVO

### Empresa

Para este trabajo se decidió trabajar en la empresa “*Antojitos Leoneses*”, la cual actualmente distribuye productos a 14 locales en el municipio de Managua, que están agrupados en 4 rutas que se forman a partir de la zona. El problema es que quedan rutas con pocos locales haciendo ineficiente el diseño de esa ruta.

Este diseño de rutas de la empresa se describe fácilmente a través del TSP, permitiendo evaluar las rutas actuales y hacer propuestas de mejoras al proceso de generación y diseño de rutas.

### Análisis

El TSP puede resolverse a partir de gran cantidad de algoritmos es por eso se realizó un proceso de análisis en el cual evaluamos la calidad de solución que brindaban cada uno de estos.

Este proceso se hizo a partir de problemas reales de librerías internacionales que brindaban la solución óptima a cada uno de ellos, siendo éste el punto de comparación para cada uno de los algoritmos evaluados.

### Desarrollo del método

Una vez realizada la selección del algoritmo que brinda mejor solución procedimos a evaluar el modelo actual de la empresa “*Antojitos Leoneses*” para identificar costos, cabe resaltar que tomamos como relación las variables distancias y costos ya que son directamente proporcionales, a mayor distancia serán mayores los costos.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I. GENERALIDADES .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	3
1.2.1. Antecedentes del Problema.....	3
1.2.2. Antecedentes Técnicos.....	4
1.3. OBJETIVOS .....	7
1.3.1. Objetivo General.....	7
1.3.2. Objetivos Específicos.....	7
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	10
2.1. Rutas .....	10
2.2. La Investigación de Operaciones y El Problema de Ruteo .....	10
2.2.1. El Modelo de Transporte .....	11
2.2.2. Modelo de Transbordo .....	12
2.2.3. Modelos de Redes .....	13
2.3. Problema del Agente Viajero .....	15
2.3.1. Origen .....	15
2.3.2. Definición .....	16
2.3.3. Clasificación .....	16
2.4. Problemas de Optimización Combinatoria.....	18
2.4.1. Complejidad de Algoritmos y de un Problema Combinatorio .....	19
2.5. Formulaciones Matemáticas de TSP y mTSP .....	22
2.5.1. Formulación en Programación Entera de sTSP .....	22
2.5.2. Formulación en Programación Entera de aTSP .....	23
2.5.3. Formulación en Programación Entera de mTSP .....	23
2.6. Heurísticas.....	25
2.6.1. Heurísticos del Vecino más Próximo.....	26
2.6.2. Heurísticos de Inserción.....	26

2.6.3. Heurísticos Basados en Árboles Generadores .....	26
2.6.4. Heurísticos Basados en Ahorros .....	26
2.7. Metaheurísticas .....	27
2.7.1. Intensificación y Diversificación.....	27
2.7.2. Técnicas Metaheurísticas aplicables a TSP.....	28
2.8. Manual .....	30
2.9. HIPÓTESIS Y VARIABLES .....	31
2.10. DISEÑO METODOLOGICO .....	32
CAPÍTULO III. ESTUDIO COMPARATIVO .....	34
3.1. Instancias del TSP distancias Euclidianas.....	34
3.1.1. Instancia EIL51.....	35
3.1.2. Instancia ST70 .....	37
3.1.3. Instancia KROA100.....	38
3.1.4. Instancia EIL101.....	39
3.2. Instancias del TSP distancias Geográficas.....	41
3.2.1. Instancia ULYSSES16 .....	42
3.2.2. Instancia ULYSSES22 .....	43
3.2.3. Instancia BAYS29 .....	44
3.2.3. Instancia GR96.....	45
3.2.4. Instancia GR120.....	46
3.3 Conclusiones del Estudio Comparativo.....	47
CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL SISTEMA ACTUAL .....	51
CAPÍTULO V. PROPUESTA DE RUTEO .....	55
5.1. Ruta 1 .....	56
5.2. Ruta 2 .....	56
5.3. Ruta 3 .....	57
5.4. Ruta 4 .....	58
CAPÍTULO VII: MANUAL DE SELECCIÓN DE RUTA.....	60
7.1. Elaboración de la matriz de distancias.....	60
Coordenadas Geodésicas.....	60
Matriz de Coordenadas .....	61

Fórmula de Haversine .....	62
Matriz de Distancias .....	62
Medición Exacta de las distancias .....	63
7.2. Elaboración de la Hoja de Cálculo para la Selección de Ruta .....	64
Instalación de complementos en Excel .....	64
Creación de Hoja de Cálculo.....	65
Matriz de Distancias y Hoja de Cálculo .....	67
7.3. Parámetros para corrida .....	68
Parámetros.....	68
7.4. Resultados .....	70
Solución .....	70
Ruta.....	70
Otras soluciones .....	70
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	72
8.1 Conclusiones .....	72
8.2 Recomendaciones .....	74
CAPÍTULO IX. BIBLIOGRAFÍA .....	75



## LISTA DE FIGURAS

<i>Ilustración 1 - Espacio de búsqueda</i>	28
<i>Ilustración 2 - Gráfico de ruta para EIL51</i>	36
<i>Ilustración 3 - Gráfico de ruta ST70</i>	37
<i>Ilustración 4 - Gráfico de ruta EIL101</i>	40
<i>Ilustración 5 - Ruta 1 Antojitos Leoneses</i>	52
<i>Ilustración 6 - Ruta 2 Antojitos Leoneses</i>	53
<i>Ilustración 7 - Ruta 3 Antojitos Leoneses</i>	53
<i>Ilustración 8 - Ruta 4 Antojitos Leoneses</i>	54
<i>Ilustración 9 - Coordenadas Geodésicas, Universidad Nacional de Ingeniería</i>	61
<i>Ilustración 10 - Matriz de Distancias</i>	62
<i>Ilustración 11 - Creación de Hoja de Cálculo: Selección de Parámetros Iniciales</i>	65
<i>Ilustración 12 - Creación de Hoja de Cálculo, Ejemplo 16 Nodos</i>	66
<i>Ilustración 13 - Utilización de la Hoja de Cálculo dadas las Coordenadas Cartesianas</i>	68
<i>Ilustración 14 - Parámetros para la Corrida</i>	69
<i>Ilustración 15 - Resultados de Corrida</i>	70
<i>Ilustración 17 – Otras Soluciones de la Instancia ULYSSES16</i>	71

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1 – Instancias euclidianas seleccionadas para TSP</b>	35
<b>Tabla 2 - Resultados de la Instancia EIL51</b>	35
<b>Tabla 3 - Secuencia EIL51</b>	36
<b>Tabla 4 - Resultados de la Instancia ST70</b>	37
<b>Tabla 5 - Secuencia ST70</b>	38
<b>Tabla 6 - Resultados de la Instancia KROA100</b>	38
<b>Tabla 7 - Secuencia KROA100</b>	39
<b>Tabla 8 - Resultados de la Instancia EIL101</b>	39
<b>Tabla 9 - Secuencia EIL101</b>	40
<b>Tabla 10 – Instancias geográficas seleccionadas para el TSP</b>	41
<b>Tabla 11 - Resultados de la Instancia ULYSSES16</b>	42
<b>Tabla 12 - Secuencia ULYSSES16</b>	42
<b>Tabla 13 - Resultados de la Instancia ULYSSES22</b>	43
<b>Tabla 14 - Secuencia ULYSSES22</b>	43
<b>Tabla 15 - Resultados de la Instancia BAYS29</b>	44
<b>Tabla 16 - Secuencia BAYS29</b>	44
<b>Tabla 17 - Resultados de la Instancia GR96</b>	45
<b>Tabla 18 - Secuencia GR96</b>	45
<b>Tabla 19 - Resultados de la Instancia GR120</b>	46
<b>Tabla 20 - Secuencia GR120</b>	46
<b>Tabla 21 - Valores asignados</b>	47
<b>Tabla 22 - Análisis cuantitativo de algoritmos</b>	48
<b>Tabla 23 - Puntos de distribución de la empresa Antojitos Leoneses</b>	51
<b>Tabla 24 - Rutas de distribución de la empresa Antojitos Leoneses</b>	52
<b>Tabla 25 - Ruta de distribución propuesta</b>	55
<b>Tabla 26 - Propuesta para Ruta 1</b>	56
<b>Tabla 27 - Propuesta para Ruta 2</b>	57
<b>Tabla 28 - Propuesta para Ruta 3</b>	58
<b>Tabla 29 - Propuesta para Ruta 4</b>	58
<b>Tabla 30 - Conversión de Grados a Radianes</b>	61
<b>Tabla 31 - Matriz de Distancias, dadas las Coordenadas Geodésicas</b>	63
<b>Tabla 32 - Resultados - Configuración de la Ruta</b>	70

## **LISTA DE ANEXOS**

*Anexo 1 - Lista de Archivos anexos al disco*

*Anexo 2 - Camión de distribución de la empresa Antojitos Leoneses*

*Anexo 3 - Productos de la empresa Antojitos Leoneses*

## **CAPÍTULO I. GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

El definir rutas en las que la materia prima pueda llegar a la empresa y los productos terminados a los consumidores siempre ha sido un problema logístico que ha atrapado la atención de gran número de empresas e ingenieros, a consecuencia de la influencia que tienen estas en los costos del producto.

Siempre se busca hacer recorridos en menor tiempo o a menor distancia con el fin de optimizar recursos continuamente. Sí a esto le sumamos aspectos como el aumento en las exigencias de los clientes hacia los proveedores, la dificultad de contar con un programa de transporte entre otros, ha hecho que el definir rutas adecuadas sea una prioridad para todas las empresas.

En Nicaragua, al igual que en el resto del mundo, las empresas tienen que hacerle frente a esta problemática, sin embargo, no todas lo hacen con las herramientas ingenieriles adecuadas que permitan disminuir la incertidumbre del método que se aplica, simplemente se basan en procesos empíricos para el diseño de rutas.

Estas prácticas llevan a las organizaciones a incurrir en gastos que fácilmente pueden ser evitados sí se usaran herramientas basadas en métodos científicos. Lo que las coloca en gran desventaja en un mercado altamente competitivo.

Entre las herramientas que sirven para definir rutas encontramos el modelo nombrado Problema del Agente Viajero o TSP (Travel Salesman Problem) por sus siglas en inglés, es un modelo en el cual describe o conceptualiza uno de los problemas de ruteo que la mayoría de las empresas nacionales enfrenta. Donde se busca visitar  $n$  locaciones distintas, sin pasar dos veces por el mismo lugar y volver al punto de origen.

Este modelo ha sido estudiado desde hace algunas décadas, pero por la complejidad que tiene al ir aumentando el número de localidades a visitar, hace casi

imposible resolver el problema por medios normales, sino que requiere de un algoritmo matemático de calidad junto a un ordenador potente.

Antojitos Leoneses es una empresa dedicada a la distribución de algunos tipos de pan y al igual que la mayoría de las empresas cuenta con recursos limitados para su funcionamiento los cuales deben de optimizarse.

Esta PYME, como muchas otras, a la fecha no tiene un registro de cuanto se gasta realmente en la distribución logística de sus productos, lo que hace complejo el tomar decisiones que aporten a disminuir costos de la cadena de distribución.

Por estos motivos el presente trabajo incluirá un manual de procedimiento para el diseño de rutas por medio de la resolución del TSP, que podrá ser utilizado por aquellas empresas que caigan dentro de la tipificación especificada para disminuir sus costos logísticos.

Este manual se basará en el uso de una hoja de cálculo en Excel, donde explicaremos paso a paso la instalación de los complementos necesarios que necesita este programa para realizar el ejercicio, además de cómo sacar las distancias de punto a punto y finalmente el diseño de la ruta.

El manual se realizara a partir de información básica que recabaremos de librerías internacionales sobre el punto de partida y los puntos de entrega de materia prima o producto terminado asumiendo que los puntos, unos a otros, están en línea recta.

## **1.2. ANTECEDENTES**

### **1.2.1. Antecedentes del Problema**

La empresa Antojitos Leoneses nace a inicios de 2009, como una idea de la Lic. María Eugenia Sequeira, ya que sentía la necesidad de traer un poco de León a Managua, debido a que muchas de las comidas que le gustan sólo las comía cuando iban a esa ciudad, entonces decidió formar la empresa. Al inicio se comenzó como una empresa familiar con tres hijos y doña María Eugenia Sequeira, donde cada uno atendía un área distinta.

Se comenzó con un solo cliente, Portas, el cual sus compras no iban más allá de las 50 unidades de picos, galletas y enchiladitas, por problemas de tiempo se pensaba cerrar el negocio, pero María Eugenia Mayorga la cual es hija de María Eugenia Sequeira tenía tiempo disponible acepto estar a cargo de la empresa, ella se encargaba del área de distribución, empaque, pedido.

En el año 2010 se creció con dos nuevos clientes y en 2011 se creció con uno más, ya que los primeros tres años de la empresa se dedicaron a poner todos los papeles de la empresa en orden. Así en 2011 la empresa pasa a nombre de María Eugenia Mayorga. Estando para este entonces abasteciendo a 5 superes colonias y 3 mini superes, con tres productos: Picos, Galletas y Enchiladas.

Al inicio se contaba con 3 personas, para 2011 eran cinco personas y dependiendo de la época se contrataba una más. Para el año 2012 se compró un camión para garantizar una mejor distribución. Igualmente para esta época se aumentó el número de clientes a 5 misceláneas y 5 superes. Para hacer ese crecimiento a los superes se tuvo que hacer un préstamo y mejorar el empaque, etiqueta, código de barra, facturas membretadas y sellado del producto.

Ya para el año 2013 se empezó a suplir todos los superes colonias que son 17 en total estando 9 ubicados en Managua y el resto en otros departamentos como Granada, León, Chinandega y Matagalpa. Para este entonces se empezó a hacer una mejor estructura de la empresa, y se organizaron de mejor manera, se

contaba con: encargada de ventas, distribuidor (que es el conductor) y dos empacadoras. El departamento de logística sigue a cargo de María Eugenia Mayorga, reconfirmar rutas, reconfirmar capacidad de pedidos.

Actualmente no hay un cálculo exacto de cuanto se gasta en transporte, únicamente se hace un llenado con C\$650.00, esto para hacer el viaje a León y de vuelta a Managua. Esto debido a que el producto lo hacen en León y es traído a Managua a ser empacado.

Factor importante para el crecimiento de la empresa, es que igualmente iban creciendo los clientes. A la fecha los principales problemas logísticos que han tenido han sido en el transporte, porque para poder traer el producto y lograr distribuirlo se hacía con el carro de la familia, a medida que el negocio crecía se compró otro carro que no resulto muy viable y por eso se aventuraron a comprar un camión nuevo.

Anteriormente se distribuía a todos los superes la colonia y esto dificultaba darle seguimiento a los demás clientes, por eso en el 2013 se inicia a usar un centro de acopio para todos los supermercados La Colonia. Aunque esto aumento los costos ya que de esta forma le tocaba pagar un poco más a los supermercados la colonia.

Actualmente las rutas se definen de acuerdo a los pedidos que se tienen en la semana. La empresa tiene como meta a corto plazo, distribuirle a la cadena Walmart. Exportar dentro de un plazo de 5 años aproximadamente y aumentar en la cantidad de Minisuperes. Mejorar el empaque y aumentar en personal.

### **1.2.2. Antecedentes Técnicos**

El Problema del Agente Viajero TSP por sus siglas en inglés (Traveling Salesman Problem), es el problema más famoso de la familia de problemas referentes a la distribución de mercadería o personal, búsqueda de información o prestación de servicios a un conjunto de clientes por medio de vehículos.

Los vehículos realizarán los recorridos a través de una red de rutas (carreteras) partiendo de puntos fijos, llamados depósitos. A los puntos de distribución se les llama nodos, cada tramo entre un nodo y otro tiene asociado un costo que puede ser tiempo o distancia.

Ejemplos de estos problemas son la recolección y entrega de pedidos, el recorrido del personal de una empresa, repartición de periódico, etc. En el Problema del Agente Viajero se dispone de un vehículo que debe visitar a un conjunto de clientes, pasando por cada uno de ellos una sola vez y retornar a la ciudad de origen. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida por el vehículo.

Si bien puede generalizar el TSP para los casos en donde se pueden utilizar  $m$  vehículos, la solución del primero no es para nada sencilla. Los avances acerca de este tipo de problema se atribuyen a George Dantzig, Ray Fulkerson, y Selmer Johnson quienes publicaron una descripción de un método para resolver el TSP, el cual se ilustró con 49 ciudades, punto de partida para que el mismo Dantzig aplicara un planteamiento similar en la gestión de distribución de combustible. Luego Clarke y Wright, desarrollaron el primer algoritmo heurístico efectivo para su resolución: el algoritmo de ahorros.

Las principales características de los problemas de ruteo de vehículos están dadas por las restricciones que se generan a los tres niveles de decisión: estratégico, táctico y operativo. Así las decisiones relativas a la localización de instalaciones (plantas, almacenes o depósitos) son estratégicas, los problemas de determinar el tamaño de la flota y su composición, son identificadas como tácticas y finalmente, las decisiones operativas incluyen las relativas a la definición de las rutas y la programación de los vehículos.

Otra particularidad en la que pueden diferir los miembros de esta familia de problemas es el objetivo que debe ser optimizado. Algunas de las características más usuales que han surgido a lo largo de la historia del estudio de estos problemas son:



- Cantidad y capacidad de vehículos disponibles. La flota de vehículos puede ser homogénea (vehículos de igual capacidad) o heterogénea.
- Cantidad de depósitos: La empresa de distribución puede tener varios puntos de abastecimiento. Cada uno de ellos puede tener un posible subconjunto de clientes a abastecer.
- Cada cliente tiene asociada una demanda, o cantidad de mercancía que debe de recibir. Puede además existir la restricción que dicha demanda deba ser satisfecha por un único vehículo o que exista la posibilidad que más de un vehículo visite a todos los clientes.
- Punto de partida o finalización de las rutas. En general los vehículos tiene que retornar al depósito de donde salieron. En alguna de las aplicaciones esta exigencia no existe. Por ejemplo si el conductor de una ruta regresa a su casa después de haber finalizado la entrega de productos sin necesidad de pasar por el punto del cual partió.
- Red de comunicación entre los clientes. En algunas de las instancias existe vía de comunicación entre cada par de clientes, mientras que en otras la red vial no es completa.
- Costo de traslado. Entre cada par de clientes, el costo de traslado puede ser fijo, depender de la distancia, del tamaño del camión o rendimiento del mismo etc.

Cada combinación de factores da como resultado un problema de ruteo de vehículos en particular. Otra característica muy importante que presentan estos problemas es que por su naturaleza se encuentran en la categoría de problemas de optimización combinatoria. En términos generales estos problemas son muy difíciles de resolver en la práctica, básicamente por la cantidad de tiempo que es necesario invertir en la resolución de los mismos, incluso con computadoras súper avanzadas. La mayoría de estos problemas son clasificados NPHard, lo que significa que no existe un algoritmo conocido que los resuelva en un tiempo polinomial. Más adelante en el marco teórico se abordará de manera más clara el porqué de la complejidad de estos problemas.

## 1.3. OBJETIVOS

### 1.3.1. Objetivo General

Diseñar un manual de procesos que permita a las empresas poder establecer un ruteo de sus productos mediante algoritmos que aborden con eficiencia el modelo del *Travel Salesman Person*.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Estudiar los algoritmos Heurísticos y Metaheurísticos que resuelven el TSP basados en problemas de librerías internacionales.
- Georreferenciar las localidades de cada uno de los puntos de distribución de la empresa *Antojitos Leoneses*.
- Implementar un análisis comparativo entre los modelos más ajustables a la tipificación de la empresa *Antojitos Leoneses*.
- Desarrollar un manual que permita la selección de rutas de distribución a partir de la resolución del TSP.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN**

Toda empresa debe de buscar la mejora continua de sus procesos, debido a la alta competitividad que hay en el mercado, esto debe lograrse sin afectar la calidad del producto o servicio que se ofrece. Por ende se deben de buscar maneras de reducir costos de cualquier índole, uno de los costos que afectan sensiblemente a las empresas son los costos de transporte. Por lo cual se debe de tomar muy en cuenta los sistemas de distribución con los que se cuenta, ya que estos en su gran mayoría generan costos muy elevados.

En Nicaragua son pocas las empresas que cuentan con un sistema de distribución bien estructurado y que les permita gastar lo menos posible<sup>1</sup>, al igual que distribuir en un menor tiempo. Esto debido a que no se hacen estudios con el fin de definir dicho sistema, por miedo a gastar mucho dinero y que no se llegue a obtener el resultado adecuado.

Existen distintos algoritmos heurísticos y metaheurísticos orientados a la resolución del TSP, ya que se considera como un problema genérico en el cual caben gran cantidad de empresas, sobre todo PYMES, de Nicaragua. Por lo que pretendemos que esta investigación sirva de base para el diseño de zonas y rutas de distribución para otras empresas del país.

De esta forma esperamos que los recursos, de por sí ya limitados, sean invertidos de mejor manera por parte de las empresas nacionales y de esta forma tener procesos que hagan sus negocios más sostenibles.

Igualmente en Nicaragua no se han hecho muchos estudios respecto a este tema, por eso consideramos necesario que el país empiece a incursionar en investigaciones que contribuyan considerablemente el desarrollo de sus empresas, se espera que esta investigación sea innovadora para muchas empresas.

---

<sup>1</sup> (Banco Mundial, 2013)

Se espera esta investigación sea un gran apoyo para la empresa *Antojitos Leoneses*, ayudándola a ser una empresa auto sostenible que maneje procesos más eficientes y la haga competitiva en el mercado local.

Con esta investigación pretendemos servir una herramienta que en un futuro cuando la empresa *Antojitos Leoneses* vaya creciendo en clientes y puntos de distribución pueda responder de manera óptima a estos cambios que seguramente se vendrán más adelante para la empresa.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Rutas**

El estudio de rutas puede definirse como la técnica que optimiza los recursos utilizados en la distribución de los productos terminados de una empresa, mediante el estudio y establecimiento de los mejores circuitos de desplazamiento que se deban realizar para satisfacer la demanda de sus clientes.

Ruta, es el conjunto de direcciones que un vendedor ha de seguir para visitar a los clientes designados, las rutas tienen asociada una función de costos. Por lo tanto, el estudio de rutas es la previsión y coordinación los traslados y movimientos de los vendedores.

Entre algunos de los objetivos de un estudio de rutas se encuentra el aprovechar mejor el tiempo de desplazamiento al reducir lo máximo posible los kilómetros de desplazamiento. Además de reducir la fatiga física de los vendedores, permitir la buena cobertura del mercado de clientes y reducir los gastos improductivos

Las ventajas de definir rutas son el incremento del tiempo productivo, facilitación para elaborar el presupuesto de gastos por transporte y aumento de la regularidad de las visitas y con ello la satisfacción del cliente de sentirse atendido.

### **2.2. La Investigación de Operaciones y El Problema de Ruteo**

La Investigación de Operaciones al ser una herramienta dominante e indispensable para tomar decisiones estudia generalmente problemas de transporte y por medio de un modelo matemático encuentra una solución óptima o en su defecto una solución factible. Existen características bien definidas para los diferentes tipos de escenarios que se puedan presentar al estudiar un problema de transporte.

A continuación, se establecen algunos de los modelos matemáticos de problemas de transporte, especificando cuando cada uno de ellos puede ser tomado como guía para resolver un problema que resuelva el diseño de una ruta de distribución.

### 2.2.1. El Modelo de Transporte

El Modelo de Transporte es una clase especial de programación lineal que tiene que ver con transportar un artículo desde sus fuentes hasta sus destinos. El objetivo es determinar el programa de transporte que minimice el costo total del transporte y que al mismo tiempo satisfaga los límites de la oferta y la demanda. En el modelo se supone que el costo de transporte es proporcional a la cantidad de unidades transportadas en determinada ruta.

Definición: Hay  $m$  fuentes y  $n$  destinos, cada fuente y cada destino representados por un nodo. Los arcos representan las rutas que enlazan las fuentes y los destinos. El arco  $(i, j)$  que une a la fuente  $i$  con el destino  $j$  conduce dos clases de información: el costo de transporte  $c_{ij}$  por unidad, y la cantidad transportada  $x_{ij}$ . La cantidad de oferta en la fuente  $i$  es  $a_i$  y la cantidad de demanda en el destino  $j$  es  $b_j$ . El objetivo del modelo es determinar las incógnitas  $x_{ij}$  que minimicen el costo total de transporte, y que al mismo tiempo satisfagan las restricciones de oferta y demanda.

Este modelo será útil cuando una empresa posea varios centros de distribución y necesite conocer cuales sucursales distribuirán a cuales clientes. Además que cantidad de productos se requieren en cada punto de distribución de cada sucursal. El resultado será la serie de clientes que atenderá cada centro de distribución y no una secuencia o ruta que debe de seguir un vendedor. Para empresas que tengan diferentes almacenes y una demanda definida por cada cliente y la restricción de límite de capacidad de varios medios de distribución es ajustable a este tipo de modelos.

Así este modelo no es aplicable para determinar un recorrido cuando solamente existe un único punto de distribución, pues ya se conoce que todos los clientes serán abastecidos por ese vendedor, como es el caso de las medianas y pequeñas empresas en donde existen en su mayoría un camión distribuidor y una ruta que se debe de seguir para atender a sus clientes.

### **2.2.2. Modelo de Transbordo**

En el modelo de transbordo se explora el hecho de que puede ser más económico el transporte pasando por nodos intermedios o transitorios antes de llegar al destino final. Este concepto es más general que el del modelo normal de transporte, en el que sólo se permiten envíos directos entre una fuente y un destino.

El objetivo de este modelo es determinar por cuales carreteras se transitará antes de llegar a los destinos finales, se asocia un costo el hecho de recorrer un camino. Existen nodos de transbordo que pueden ser las intersecciones de las carreteras, nodos de oferta pura o centros de distribución y nodos de demanda pura o puntos de distribución.

La implementación de este modelo, sin embargo, no genera como resultado una ruta o ciclo cerrado característico de los problemas de ruteo, sino que establece los caminos en los cuales debe de viajar una cantidad u oferta de productos, para satisfacer una demanda en cada destino. Ahora será imposible cambiar en cada nodo de transbordo la cantidad de productos que tiene un solo medio de transporte, a menos que el producto sea manipulado de manera individual o en cantidades que permitan tal separación continuamente.

Aquí la empresa que puede tomar como base este tipo de enfoque de resolución de problemas es aquella que presente una situación similar a la siguiente: “Necesito saber por cuales vías deben de circular mis camiones distribuidores (son más de uno) para que la distancia recorrida por estos del punto de salida a mi cliente sea la menor.” En donde cada camión distribuidor atiende únicamente a un cliente, por lo que la demanda ya está definida. El hecho de que existan varios medios de entrega de los productos asume que la empresa tiene muchos recursos y que posiblemente debe de pertenecer a las grandes y medianas.

La pequeña o micro empresa difícilmente utiliza este modelo de transporte, porque los productos que entrega pueden entregarse a varios clientes por solo

distribuidor, así el problema principal de algunas empresas es definir una ruta de distribución para atender a los diferentes clientes por un distribuidor.

### **2.2.3. Modelos de Redes**

Hay una gran variedad de situaciones, en Investigación de Operaciones, que se pueden modelar y resolver como redes. Según (Taha, pág. 213) encuestas recientes informan que hasta el 70% de los problemas de programación matemática del mundo real se pueden representar como modelos relacionados con las redes. Entonces es imperativo analizar las alternativas de solución para los problemas de transporte que ofrece este tipo de modelos.

Redes: Una red consiste en una serie de nodos enlazados con arcos (o ramas). La notación para describir una red es  $(N, A)$ , donde  $N$  es el conjunto de nodos y  $A$  es el conjunto de arcos.

Con cada red se asocia algún tipo de flujo (por ejemplo, flujo de productos petroleros en un oleoducto y flujos de tráfico de automóviles en carreteras). En general, el flujo en una red está limitado por la capacidad de sus arcos, que pueden ser finitos o infinitos.

Se dice que un arco es dirigido u orientado si permite un flujo positivo en una dirección, y flujo cero en la dirección opuesta. Una red dirigida tiene todos sus arcos dirigidos.

Una ruta es una sucesión de arcos distintos que unen dos nodos pasando por otros nodos, independientemente de la dirección de flujo en cada arco. Una ruta forma un ciclo si conecta un nodo consigo mismo, pasando por otros nodos. Un ciclo es dirigido si consiste en una ruta dirigida.

Una red conectada es aquella en que cada dos nodos distintos están enlazados al menos por una ruta. Un árbol es una red conectada que puede consistir sólo en un subconjunto de todos los nodos en ella, donde no se permiten ciclos, y un árbol de expansión es un árbol que enlaza todos los nodos de la red, también sin permitir ciclos.



### **2.2.3.1. Algoritmo de Árbol de Expansión Mínima**

El algoritmo de árbol de expansión mínima enlaza los nodos de una red, en forma directa o indirecta, con la mínima longitud de las ramas enlazantes.

Una aplicación característica es en la construcción de carreteras pavimentadas que unen varias poblaciones. El camino entre dos poblaciones puede pasar por uno o más poblaciones adicionales. El diseño más económico del sistema de caminos indica que se minimice la distancia total de caminos pavimentados, resultado que se obtiene implementando el algoritmo de árbol de expansión mínima.

### **2.2.3.2. Problema de la ruta más corta**

En el problema de la ruta más corta se determina ésta, entre una fuente y un destino, en una red de transporte.

Existen algoritmos como dos algoritmos, entre los principales, para resolver redes tanto cíclicas (es decir, que contienen bucles o lazos) como acíclicas:

1. El algoritmo de Dijkstra: tiene por objeto determinar las rutas más cortas entre el nodo fuente y todos los demás nodos de la red.
2. El algoritmo de Floyd: es general que el de Dijkstra, porque permite determinar la ruta más corta entre dos nodos cualesquiera en la red.

El problema de la ruta más corta, puede ser utilizado en empresas en donde se quiera conocer precisamente la ruta o camino más corto entre la posición de un cliente a la empresa, a través de una red. Lo que se establece es el recorrido más corto entre un punto y otro, no así la ruta que minimice el recorrido al visitar todos los clientes.

A través de los anteriores modelos se explican diferentes situaciones en donde la aplicación de estos varía según el problema que desee resolver. Pero, un tipo de situación que es la más común en pequeñas y medianas empresas no se ha establecido, a continuación se plantea uno de los problemas de transporte para el cual no existe una solución o algoritmo que lo resuelva hasta la fecha.

## **2.3. Problema del Agente Viajero**

El Problema del Agente Viajero, en inglés Traveling Salesman Problem. Es un ejemplo que muestra y analiza la problemática que subyace tras algunos tipos de problemas matemáticos que a priori parecen tener una solución relativamente sencilla, y que en la práctica presentan un gran problema. Es uno de los problemas más famosos en el campo de la optimización combinatoria.

Se conoce la forma de resolverlo pero sólo en teoría, en la práctica la solución no es aplicable debido al tiempo que computacionalmente se precisa para obtener su resultado.

Es uno de los problemas más populares en investigación de operaciones y sobre todo en problemas de optimización combinatoria, este puede definirse de una manera muy simple, imaginemos un agente de ventas que tiene que visitar  $n$  ciudades, comenzando y terminando en la misma ciudad, visitando solamente una vez cada ciudad y haciendo el recorrido al menor costo posible, la función de costos puede estar expresada en términos de distancia o tiempo.

Lo mismo ocurre para el caso del TSP, donde como se mencionó con anterioridad se tiene que viajar de una ciudad y volver a ella misma después de haber viajado –con el costo mínimo del viaje– por todas las otras ciudades. Si se tienen  $n$  ciudades que recorrer quiere decir que existen  $(n - 1)!$  soluciones factibles. Dada una instancia de 25 ciudades (que es un problema pequeño para muchos casos prácticos) y una computadora que examine respuestas a razón de un billón por segundo, la exploración de todas las soluciones en el espacio de búsqueda terminaría en alrededor de 19,674 años.

### **2.3.1. Origen**

El problema del viajero fue estudiado en el siglo XVIII por un matemático de Irlanda llamado Sir William Rowan Hamilton y por el matemático británico llamado Thomas Penyngton Kirkman.

### 2.3.2 Definición

Dado un conjunto de ciudades y el costo de transporte (o distancia) entre cada posible par de ciudades, el TSP, es encontrar el mejor camino posible para pasar por todas las ciudades y volver al punto de inicio visitando solamente una vez cada ciudad y haciendo el recorrido al menor costo posible.

### 2.3.3. Clasificación

El TSP es clasificado como Problema de Agente Viajero Simétrico (sTSP), Problema del Agente Viajero Asimétrico (aTSP) y Problema de Múltiples Agentes Viajeros (mTSP).

#### sTSP

Sea  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  un conjunto de ciudades,  $A = \{(r, s): r, s \in V\}$  el conjunto de bordes, y  $d_{rs} = d_{sr}$  la medida del costo asociado con borde  $(r, s) \in A$ .

El sTSP es el problema de encontrar a la longitud mínima de recorrido para visitar cada ciudad una vez. En este caso las ciudades  $v_i \in V$  son dadas en sus coordenadas  $(x_i, y_i)$  y  $d_{rs}$  es la distancia entre  $r$  y  $s$ .

#### aTSP

Si  $d_{rs} \neq d_{sr}$  para al menos un  $(r, s)$  entonces el TSP se transforma en un aTSP.

#### mTSP

El mTSP es definido como: Dado un conjunto de nodos, donde hay  $m$  vendedores localizados en un nodo estación. El restante de nodos (ciudades) tiene que ser visitados por los nodos intermedios. Entonces, el mTSP consiste en encontrar recorridos por todos los  $m$  vendedores, quienes empiezan y terminan en su estación, talque cada nodo intermedio es visitado una vez y el costo de visitar todos los nodos es mínimo. El costo métrico puede ser definido en términos de distancia, tiempo, etc. Las posibles variaciones del problema son los siguientes:

Solo vs. Estaciones múltiples: En la estación sola, todos los vendedores terminan sus viajes en un único punto mientras que en las estaciones múltiples los vendedores pueden ya sea volver a su estación inicial o pueden volver a cualquier

estación conservando el número inicial de vendedores en cada estación que sigue siendo el mismo que antes del viaje.

**Número de Vendedores:** El número de vendedores en el problema puede ser fijo o variable.

**Costo:** Cuando el número de vendedores no es fijo, entonces cada vendedor usualmente tiene asociado un costo que ocurre cuando este vendedor es usado. En este caso, la minimización de los requisitos de los vendedores también se vuelve un objetivo.

**Tiempo:** Aquí, algunos nodos necesitan ser visitados en un periodo particular de tiempo que usualmente son llamados tiempos ventana que es una extensión del mTSP, y se refiere a él como Problema de Múltiples Viajeros con Tiempo especificado por sus siglas en inglés mTSPTW. La aplicación del mTSPTW puede ser muchas veces vista en los problemas de programación de aviones.

**Otras limitaciones:** Limitaciones pueden ser el número de nodos que cada vendedor puede visitar, máxima o mínima distancia que un vendedor puede recorrer o cualquier otra restricción. El mTSP es generalmente tratado como una relajación de los problemas de ruteo de vehículos (VRP), en donde este no tiene restricciones de capacidad. Por lo tanto, las soluciones y métodos para el VRP son también válidos y ciertos para el mTSP si una gran capacidad es asignada a los vendedores (o vehículos). Además, cuando hay un solo vendedor, entonces el mTSP se reduce al TSP. La naturaleza de los problemas de ruteo exige que los problemas deben de ser tratados por medio de modelos de: Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) o una versión más simple de este que es el Problema del Agente Viajero (TSP). Además estos tipos de problemas son clasificados como Problemas de Optimización Combinatoria.

El Problema del Agente Viajero se clasifica dentro de los problemas de Optimización Combinatoria, veamos cómo se resuelven en general este tipo de problemas.

## 2.4. Problemas de Optimización Combinatoria

La optimización combinatoria se dedica al estudio de las configuraciones, por lo que un problema de optimización es la búsqueda de una configuración óptima con respecto a una función objetivo  $f(x)$ . La construcción de una o más funciones objetivo sobre el espacio de búsqueda que permite ordenar éste de forma más eficiente.

Cuando sobre el espacio de búsqueda se construye una sola función objetivo el problema de optimización combinatoria (POC) se conoce como uniobjetivo; multiobjetivo cuando es necesario más de una. Aunque por la finitud, en teoría, estos problemas no ofrecen dificultad para su resolución, en la práctica suele faltar tiempo para encontrar una solución. Asimismo un problema combinatorio es un problema de optimización que según (Flores) incluye los siguientes elementos:

- Un conjunto  $C_p$  de instancias del problema.
- Un espacio de búsqueda  $S_p(E)$  que incluye posibles soluciones de un ejemplar  $E \in C_p$ .
- Una función objetivo  $f(x)$  que le asigna a cada posible solución  $x \in S_p(E)$  de una instancia  $E \in C_p$  un valor  $f_p(E, x)$ .

Si el problema  $P$  es de minimización, la tarea sería encontrar un procedimiento que para cada instancia  $E$  permita encontrar una solución óptima  $x^* \in S_p(E)$  tal que:

$$f_p(E, x^*) \leq f_p(E, x), \text{ para todas las soluciones } x \text{ de la instancia.}$$

Si el problema es de maximización la solución óptima debe de cumplir:

$$f_p(E, x^*) \geq f_p(E, x), \text{ para todas las soluciones } x \text{ de la instancia.}$$

Una característica recurrente de los POC es que son fáciles de entender pero por lo general son difíciles de resolver. Podría pensarse que la solución a un POC se centra en encontrar el valor máximo o mínimo de un conjunto de posibilidades y

que utilizando una computadora veloz no tendríamos mayor dificultad, sin pensar por un momento, en el tamaño de ese conjunto.

La forma estándar de definir un POC sería la siguiente:

$$P: \text{Minimizar } f(x) \text{ tal que } x \in S \text{ en } \mathbb{R}^n$$

Donde  $f(x)$  sería la función objetivo que podría ser lineal o no lineal, y la condición  $x \in S$  es la restricción específica que  $x$  es una solución que pertenece al espacio de búsqueda  $S$ ,  $x$  toma valores discretos.  $S$  es el espacio de búsqueda el cual incluye ciertas restricciones.  $P$  puede representar una modificación de un problema original.

#### **2.4.1 Complejidad de Algoritmos y de un Problema Combinatorio**

El análisis de algoritmos es una de las ramas de la Teoría de Complejidad Computacional, que está orientada a determinar la cantidad de recursos requeridos por un algoritmo en particular para resolver un problema. Entre estos recursos tenemos:

- El tiempo de ejecución, medido en cantidad de operaciones elementales.
- La memoria de almacenamiento de datos, medida en la cantidad de variables elementales.

Las cuales son denominadas medidas de complejidad y estas no pueden ser estáticas, sino dinámicas puesto que dependen de la instancia a la cual se aplica el algoritmo.

Es por esto que el estudio de la eficiencia de algoritmos no puede ser atacado argumentando que las computadoras serán más rápidas en el futuro, ya que si no se mejora la eficiencia de los algoritmos problemas como el TSP para 100 ciudades tomara cien millones de años, por lo que esta mejora de los algoritmos debe estar orientada a las órdenes de magnitud.

Al tener un problema de optimización  $P$ , como por ejemplo el TSP, y un algoritmo  $A$  que lo resuelve ya sea de forma exacta o de forma heurística. Surge la siguiente pregunta.

¿Es el algoritmo  $A$  rápido y su calidad de solución es lo suficientemente buena para resolver el problema de optimización  $P$ ?

Por lo que el objetivo primordial de la teoría computacional<sup>2</sup> es clasificar los problemas de acuerdo a su tratabilidad. Como ejemplo de esto los problemas de programación lineal son tratables, es decir tienen solución óptima incluso a instancias grandes. Sin embargo existen problemas que no son tratables como el caso de las torres de Hanoi o en este particular caso el problema del agente viajero.

Se puede clasificar la tratabilidad de los problemas en cuatro clases: clase  $P$ , clase  $NP$ , clase  $NP$ -Completo y clase  $NP$ -Hard. Un problema se dice que es de clase  $P$  si puede ser resuelto a través de algoritmos polinomiales o puede ser reducido a un problema que es resuelto bajo un algoritmo de esta categoría. Por el contrario, un problema es de clase  $NP$  si se conoce un algoritmo no determinista, que lo resuelve exactamente en un tiempo expresable como un polinomio en función del tamaño del ejemplar.

Los problemas que no pueden ser resueltos en un tiempo polinomial son considerados difíciles y no existe un algoritmo polinomial para resolverlos, estos problemas son considerados  $NP$ -Completo o  $NP$ -Hard.

### Análisis del Peor Caso

De los métodos que durante un tiempo tuvieron bastante aceptación es analizar el comportamiento en el peor caso de un algoritmo; esto es, considerar el mayor

---

<sup>2</sup> Teoría Computacional: Es una rama de la matemática y la computación que centra su interés en las limitaciones y capacidades fundamentales de las computadoras. Específicamente esta teoría busca modelos matemáticos que formalizan el concepto de hacer un cómputo y la clasificación de problemas.

número de operaciones que un algoritmo puede tomar al resolver el problema y acotar analíticamente la máxima desviación respecto del óptimo del problema.

Lo mejor de este método es que acota el resultado del algoritmo para cualquier ejemplo; sin embargo, por esto mismo, los resultados no suelen ser representativos del comportamiento medio del algoritmo. Además, el análisis puede ser muy complicado para los heurísticos más sofisticados.

### Notación O Grande

La notación asintótica se usa para describir cómo se comporta el tiempo de ejecución de un algoritmo, son definidas en términos de funciones de dominio en entero positivo. Tal notación es conveniente para describir el peor caso de tiempo de ejecución.

En el análisis de algoritmos una cota superior asintótica es una función que sirve como una cota superior de otra función cuando el argumento tiende a valores muy grandes. La notación O Grande  $O(g(x))$ , se usa para referirse a las funciones acotadas superiormente por la función  $g(x)$ .

Según (Cormen, Leiserson, Rivest, & Stein) define como

$$O(g(n)) = \left\{ \begin{array}{l} f(n): \text{ existe una constante positiva } c \text{ y } n_0 \text{ tales que} \\ 0 \leq f(n) \leq cg(n), \quad \forall n \geq n_0 \end{array} \right.$$

La cota superior asintótica tiene gran importancia en la Teoría de complejidad a la hora de definir las clases de complejidad.

Muchos de los POC son clasificados como NP-Hard, por tanto encontrar un algoritmo polinomial que dé una solución óptima es muy improbable, así que se buscan algoritmos aproximados que sean eficientes. Es decir que den como respuesta una solución bastante cercana al óptimo en un corto tiempo. El TSP cae dentro de la categoría de NP-Hard por lo que es difícil de resolver.



## 2.5. Formulaciones Matemáticas de TSP y mTSP

El TSP puede ser definido en un grafo no dirigido  $G = (V, E)$  si este es simétrico o en un grafo dirigido  $G = (V, A)$  si es asimétrico. El conjunto  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  es el vértice del conjunto,  $E = \{(i, j) : i, j \in V, i < j\}$  es un lado del conjunto y  $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$  es un arco en el conjunto. Una matriz de costo  $C = (c_{ij})$  es definida en  $E$  o en  $A$ . La matriz de costo satisface la desigualdad triangular para cualquier  $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj}$ , para todo  $i, j, k$ .

### 2.5.1. Formulación en Programación Entera de sTSP

Muchas formulaciones de TSP están disponibles en la literatura. Entre ellas la formulación de Dantzig, es una de las formulaciones matemáticas más citadas para el TSP. Esta formulación asocia una variable binaria  $x_{ij}$  a cada lado  $(i, j)$ , igual a 1 si y sólo si el lado aparece en el tour óptimo. La formulación del TSP es como sigue.

Minimizar

$$\sum_{i < j} c_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

Sujeto a

$$\sum_{i < k} x_{ik} + \sum_{j > k} x_{kj} = 2, \quad k \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i, j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad (S \subset V, 3 \leq |S| \leq n - 3) \quad (3)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ó } 1, \quad (i, j) \in E \quad (4)$$

En esta formulación, las restricciones (2), (3) y (4), se conocen como restricciones de grado, restricciones de eliminación de subtour y restricciones de

integralidad. En presencia de (2), las restricciones (3) son algebraicamente equivalentes a las restricciones de conectividad

$$\sum_{i \in S, j \in V \setminus S, j \in S} x_{ij} \geq 2, \quad (S \subset V, 3 \leq |S| \leq n - 3) \quad (5)$$

### 2.5.2. Formulación en Programación Entera de aTSP

La formulación de Dantzig se extiende fácilmente para el caso asimétrico. Aquí  $x_{ij}$  es una variable binaria, asociada al arco  $(i, j)$ , y es igual a 1 si y sólo si el arco aparece en el tour óptimo. La formulación es como sigue.

Minimizar

$$\sum_{i \neq j} c_{ij} x_{ij}, \quad (6)$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad (i \in V, i \neq j) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad (j \in V, j \neq i) \quad (8)$$

$$\sum_{i, j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad (S \subset V, 2 \leq |S| \leq n - 2) \quad (9)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ó } 1, \quad (i, j) \in A \quad (10)$$

### 2.5.3. Formulación en Programación Entera de mTSP

Diferentes tipos de formulaciones en programación entera son propuestos para el mTSP. Antes de presentarlas, algunas definiciones técnicas son definidas como sigue. El mTSP es definido en un grafo  $G = (V, A)$ , donde  $V$  es el conjunto de  $n$  nodos (vértices) y  $A$  es el conjunto de arcos (lados). Sea  $C = (C_{ij})$  una matriz de

costo (distancia) asociada con  $A$ . La matriz  $C$  se dice que es simétrica cuando  $C_{ij} = C_{ji}, \forall (i, j) \in A$  y asimétrica en cualquier otro caso. Si  $c_{ij} + c_{jk} \geq c_{ik}, \forall i, j, k \in V$ , se dice que  $C$  satisface la desigualdad triangular. Varias formulaciones en programación entera para el mTSP han sido propuestas antes en la literatura, entre los que están formulaciones basadas en asignación, árbol y flujo de índice. La formulación basada en asignación será presentada a continuación.

#### Formulación en Programación Entera Basada en Asignación

El mTSP es usualmente formulado usando una asignación. Antes definiremos una variable binaria:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el arco } (i, j) \text{ es usado en el tour} \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

Entonces, un esquema general de como la formulación en programación lineal entera basada en asignación del mTSP se puede dar como sigue:

Minimizar

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

Sujeto a

$$\sum_{j=2}^n x_{1j} = m \quad (11)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1} = m \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 2,3, \dots, n \quad (14)$$

$$+\text{Restricciones de Eliminación de Subtour}, \quad (15)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall (i,j) \in A, \quad (16)$$

donde (13), (14) y (16) son llamadas restricciones de asignación, (11) y (12) aseguran que  $m$  agentes vayan y regresen del nodo 1 (estación). La restricción (15) es usada para prevenir subtours, que son tours degenerados que son formados entre nodos intermedios y que no se conectan con el origen. Hay muchas restricciones de eliminación de subtours propuestas para el mTSP en la literatura. La primera es la propuesta en el TSP, pero también es válida para el mTSP. Esas restricciones pueden ser mostradas como sigue:

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subseteq V \setminus \{1\}, \quad S \neq \emptyset \quad (17)$$

o alternativamente en la siguiente forma

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{ij} \geq 1, \quad \forall S \subseteq V \setminus \{1\}, \quad S \neq \emptyset \quad (18)$$

Las restricciones (17) or (18) imponen los requisitos de conectividad para la solución, como prevenir la formación de subtours de cardinalidad  $S$  no incluyendo el estacionamiento. Desafortunadamente, ambas restricciones incrementan exponencialmente el número de nodos, de aquí que no sea práctico para ni resolver el problema o su relajación lineal.

## 2.6. Heurísticas

Las técnicas heurísticas son algoritmos que encuentran soluciones de buena calidad para problemas combinatorios complejos explotando el conocimiento del dominio de aplicación. Las heurísticas son muchas veces diseñadas o específicas al problema.

Los algoritmos heurísticos son fáciles de implementar y encuentran buenas soluciones con esfuerzos computacionales relativamente pequeños; sin embargo, renuncian (desde el punto de vista teórico) a encontrar la solución óptima global de un problema. En problemas de gran tamaño rara vez un algoritmo heurístico encuentra la solución óptima global.

### **2.6.1. Heurísticos del Vecino más Próximo**

Uno de los heurísticos más sencillos para el TSP es el llamado “del vecino más cercano”, que trata de construir un ciclo Hamiltoniano<sup>3</sup> de bajo coste basándose en el vértice cercano a uno dado.

### **2.6.2. Heurísticos de Inserción**

Otra aproximación intuitiva a la resolución del TSP consiste en comenzar construyendo ciclos que visiten únicamente unos cuantos vértices, para posteriormente extenderlos insertando los vértices restantes. En cada paso se inserta un nuevo vértice en el ciclo hasta obtener un ciclo Hamiltoniano.

### **2.6.3. Heurísticos Basados en Árboles Generadores**

Los heurísticos considerados anteriormente construyen un ciclo Hamiltoniano basándose únicamente en los costes de las aristas. Los heurísticos de este apartado se basan en el árbol generador de coste mínimo, lo que aporta una información adicional sobre la estructura del grafo.

### **2.6.4. Heurísticos Basados en Ahorros**

El algoritmo siguiente se basa en combinar sucesivamente subtours hasta obtener un ciclo Hamiltoniano. Los subtours considerados tienen un vértice común llamado base. El procedimiento de unión de subtours se basa en eliminar las aristas que conectan dos vértices de diferentes subtours con el vértice base, uniendo posteriormente los vértices entre sí. Llamamos ahorro a la diferencia del coste entre las aristas eliminadas y la añadida.

---

<sup>3</sup> En el campo matemático de la teoría de grafos, un *camino hamiltoniano* en un grafo es una sucesión de aristas adyacentes, que visita todos los vértices del grafo una sola vez. Si además el último vértice visitado es adyacente al primero, el camino es un *ciclo hamiltoniano*.

## **2.7. Metaheurísticas**

Los algoritmos metaheurísticos son algoritmos de propósito general, que no dependen del problema, y que ofrecen buenos resultados pero que normalmente no garantizan encontrar una solución óptima sino soluciones subóptimas. Se acostumbran a utilizar para aquellos problemas en que no existe un algoritmo de heurística específicos que los resuelva, o bien cuando no es práctico implementar dichos métodos.

La Metaheurística guía a una heurística subordinada, combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar el espacio de búsqueda.

### **2.7.1. Intensificación y Diversificación**

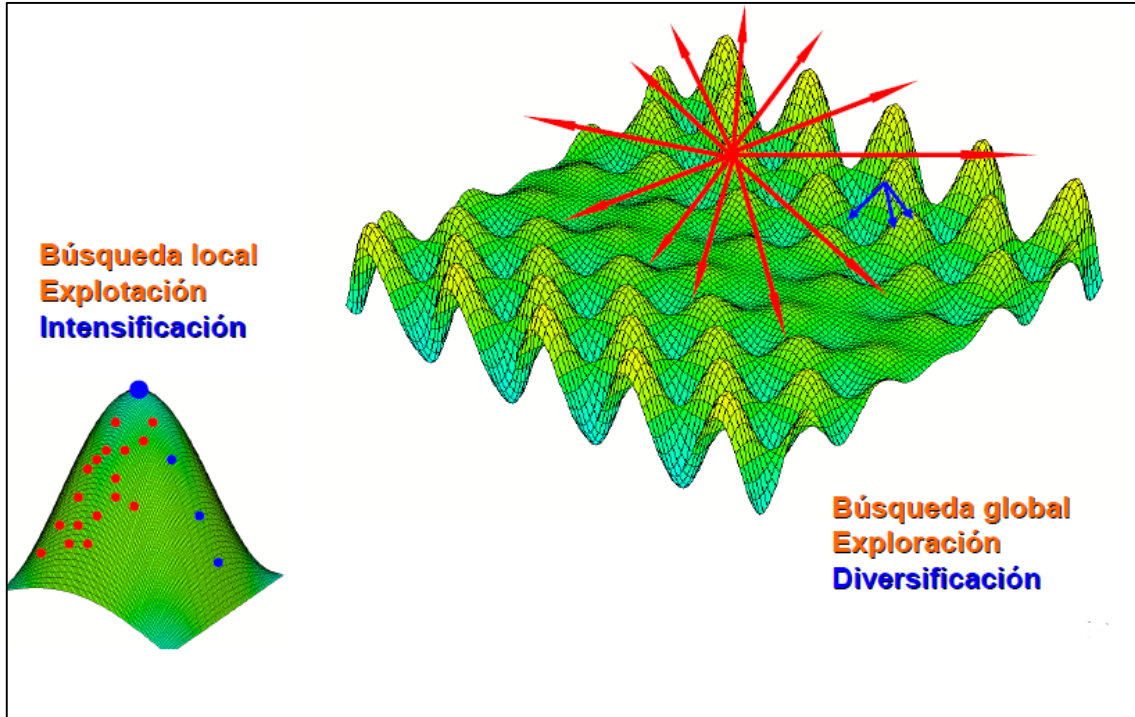
Para que los modelos metaheurísticos nos proporcionen una mejor solución y en un menor tiempo, debemos de tomar en cuenta dos características importantes, la intensificación y la diversificación, por lo cual las vamos a definir a continuación:

**Intensificación:** es la explotación del espacio, la cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda de porciones de la región actual que aparentan ser mejores o más prometedoras.

**Diversificación:** esta característica se trata de una búsqueda más global en áreas donde aún no se ha explorado. La diversificación es la cantidad de esfuerzo empleado en la exploración en regiones distantes del espacio.

Podemos decir entonces que para obtener mejores soluciones, cualquier algoritmo debe establecer un balance adecuado entre estas dos características, para ello las metaheurísticas utilizan diversas estrategias.

Ilustración 1- Espacio de búsqueda



## 2.7.2. Técnicas Metaheurísticas aplicables a TSP

### 2.7.2.1. Algoritmos genéticos (ag)

Son herramientas matemáticas que imitan a la naturaleza e intentan resolver problemas complejos empleando el concepto de la evolución. El algoritmo ejecuta una búsqueda simultánea en diferentes regiones del espacio de búsqueda, realiza una intensificación sobre algunas de ellas y explora otros sub-espacios a través de un intercambio de información entre configuraciones. Emplea tres mecanismos básicos que son: La selección, el crossover y la mutación.

**Selección:** Es el operador genético que permite elegir las configuraciones de la población actual que deben participar de la generación de las configuraciones de la nueva población (nueva generación). Este operador termina después de decidir el número de descendientes que debe tener cada configuración de la población actual.

Crossover o “Recombinación”: Es el mecanismo que permite pasar información genética de un par de cromosomas originales a sus descendientes, o sea, saltar de un espacio de búsqueda a otro, generando de esta forma diversidad genética.

Mutación: Permite realizar la intensificación en un espacio en particular caminando a través de vecinos. Significa intercambiar el valor de un gene de un cromosoma en una población. En forma aleatoria, se elige un cromosoma como candidato, se genera un número aleatorio y si es menor que la tasa de mutación ( $p < p_m$ ), entonces se realiza la mutación. La tasa de mutación puede elegir entre el rango [0.001, 0.05]

### **2.7.2.2. Colonia de hormigas (ACO)**

La optimización por ACO, es otra forma de imitar a la naturaleza en la forma que resuelve sus problemas, de la misma manera que lo hace el método de algoritmos genéticos.

En este método las actividades de búsqueda son distribuidas entre “hormigas”, esto es, agentes con capacidades simples, que son similares al comportamiento de las hormigas verdaderas.

Se encontró que las hormigas para intercambiar información entre los agentes sobre las rutas, utilizan rastros de feromonas. El método se trata de que una hormiga que se desplaza de un punto A a un punto B deje un rastro de feromona (en distintas cantidades), lo cual deja marcado su camino, así otra hormiga que pase por ahí, pueda decidir con alta probabilidad, si sigue el camino o no. Si esta decide seguirlo el nivel de feromona aumentara volviendo más fuerte el rastro. El comportamiento colectivo que se produce es una especie de comportamiento autocatalítico, donde mientras más hormigas sigan el rastro, más atractivo se vuelve el camino para ser seguido, [1, 2, 3, 7, 8, 9, 10].

En el problema del TSP, una hormiga artificial es un agente que se mueve de una ciudad a otra, el agente escoge la ciudad a la cual se va a desplazar de acuerdo a una función probabilística que depende de la cantidad de feromonas dejada en



ese trayecto y de una función heurística, la cual se define como una función de la distancia, el tiempo o cualquier otra característica del problema.

## **2.8. Manual**

Los manuales son exposiciones generales sobre una materia, siendo esta una de las referencias más utilizadas, según las normas UNE, son documentos didácticos que contienen las nociones esenciales de una ciencia, técnica o arte.<sup>4</sup>

Presentan ciertas características, entre las cuales tenemos:

- Son de fácil manejo.
- Están redactados y organizados de manera accesible.
- Contienen gráficos, diagramas, ilustraciones, etc., para ayudar a la comprensión.
- Son sintéticos.

El manual planteará el *know how* de tal forma que pueda ser resuelto de forma sencilla y práctica un problema de ruteo por medio del TSP, exponiendo cómo levantar datos, procesarlos, interpretarlos.

Este manual servirá a empresas PYME que estén dentro de la tipología especificada, puesto que deben presentar ciertas características y propiedades para abordar su problema de ruteo a partir del TSP.

---

<sup>4</sup> Norma UNE 50-11391/2

## **2.9. HIPÓTESIS Y VARIABLES**

### **2.9.1. Hipótesis:**

El diseño de las zonas y rutas de distribución de la empresa *Antojitos Leoneses* pueden mejorarse en un 5% a partir de la implementación de algoritmos matemáticos orientados a la resolución del TSP.

### **2.9.2. Variable:**

La selección de la ruta se hará a partir de un grafo, detallando que la distancia entre locaciones se hará de forma lineal, obviando el detalle de la distribución de las calles de la ciudad.

## **2.10. DISEÑO METODOLOGICO**

### **2.10.1. Tipo de estudio**

Esta investigación es de carácter analítica, que pretende identificar y realizar un análisis comparativo entre distintos algoritmos que son utilizados para la resolución del TSP en la vida real, y sean capaces de brindar una respuesta optima o cercana a esta.

Igualmente la investigación es de campo, puesto que resolveremos el TSP para una instancia real, como es el caso de la empresa “*Antojitos Leoneses*”, y su ruta de distribución de productos.

Así mismo la investigación es de tipo aplicada, debido a que como producto se elaborará un manual de procesos que explique cómo diseñar una ruta de distribución mediante el TSP a partir de complementos Excel (Combinatorics, Optimize).

### **2.10.2. Área**

Esta investigación es llevada a cabo en la empresa “*Antojitos Leoneses*”, ubicada en el departamento de Managua en los Altos de Villa Fontana, aunque esta igualmente se encarga de distribuir productos en el Departamento de León.

Se georreferenciará todos los centros de acopio donde distribuye la empresa “*Antojitos Leoneses*”, para crear un grafo que permita la implementación del TSP a su sistema de distribución.

### **2.10.3. Método de Investigación**

Utilizaremos el método analítico, ya que nuestros objetivos consisten en realizar un análisis a distintos algoritmos utilizados internacionalmente para la resolución del TSP, e igualmente haremos un análisis comparativo entre la forma actual de diseñar rutas en la empresa “*Antojitos Leoneses*” y los algoritmos que proporcionen la solución óptima o más cercana al TSP.

#### **2.10.4. Método de análisis de datos**

Toda la información que recopilemos en este proyecto la analizaremos de forma manual, en base a la bibliografía que usaremos de apoyo. Todos los resultados observados los presentaremos en gráficos, diagramas y tablas comparativas que analizaremos para brindar las conclusiones.

Se presentará un manual de procesos que permita a las empresas nicaragüenses que tengan cierta tipificación, especificada en el estudio, realizar el diseño de sus rutas de distribución basados en el TSP.

#### **2.10.5. Instrumentos de recolección de datos**

Para recolectar información haremos uso de librerías internacionales que nos brinden instancias reales de distintos tamaños para la comparación de distintos algoritmos y la calidad de respuestas de éstos, facilitando la selección de los mejores algoritmos para su aplicación al caso de la empresa “*Antojitos Leoneses*”.

Se realizará una entrevista a la encargada de la empresa “*Antojitos Leoneses*”, como también al encargado del diseño de rutas, para entender la situación actual del sistema de distribución de la empresa y poder hacer un análisis comparativo a partir de algoritmos matemáticos previamente seleccionados.

La ubicación de los puntos de distribución de la empresa “*Antojitos Leoneses*” serán georreferenciados a partir del uso de la aplicación de Google Maps, que nos brindará los valores de latitud y longitud de cada uno de ellos.

Mediante complementos de Excel, procesaremos la información obtenida por Google Maps mediante los algoritmos previamente seleccionados, dando como resultado el diseño de una ruta de distribución óptima.

El *know how*, será sistematizado en un manual de procesos que explique de forma clara a cualquier PYME que este dentro de la tipificación específica cómo abordar su problema de distribución mediante el TSP.

## **CAPÍTULO III. ESTUDIO COMPARATIVO**

El presente capítulo tiene como objetivo la implementación, validación, y comparación de los planteamientos del problema del agente viajero TSP descritos en el marco teórico utilizando Microsoft Excel y, esto permitirá como primer lugar una mejor perspectiva entre el uso de métodos exactos, heurísticas y metahurísticas y su posible aplicación a un sistema real de distribución como el caso de la empresa “Antojitos Leoneses”.

Otro objetivo que fundamenta la realización de este estudio comparativo es el de evaluar el desempeño de los optimizadores a utilizar, especialmente del Complemento Optimize Analyzer, si bien se sabe que no garantiza una solución óptima al problema, surgen las siguientes preguntas: ¿Qué tan buenas son las soluciones arrojadas para un determinado problema con respecto a las soluciones óptimas del mismo?, ¿Con qué frecuencia alcanza la solución óptima para un determinado problema?, ¿Cuál es el promedio de las soluciones no óptimas?, ¿Cuál es el peor resultado no óptimo para un determinado problema? Otro aspecto importante tomado en cuenta en el estudio es el tiempo de ejecución.

Como referencia para definir si una respuesta es aceptada, esta deberá tener una desviación respecto al óptimo no mayor del 7%, de esta forma garantizamos que la solución brindada por los algoritmos no divague y permita contar con información adecuada para la toma de decisiones en la selección de rutas.

Cabe resaltar que en este capítulo analizaremos tanto instancias euclidianas como geográficas, y debido a que los algoritmos utilizados analizan la información a partir de grafos es que las distancias se encontrarán de forma lineal obviando cualquier detalle en las distribuciones de calle de las ciudades.

### **3.1. Instancias del TSP distancias Euclidianas**

En esta sección se muestran los resultados del estudio comparativo realizado para la formulación del TSP, se evalúa cada uno de los métodos de solución estudiados en el marco teórico: vecino más cercano, algoritmo de cortes, árboles

generadores, aplicados a problemas de librerías internacionales (**Tabla 1- Instancias euclidianas seleccionadas para TSP**), de los cuales conocíamos la solución óptima de antemano, permitiendo ver las variaciones en la calidad de solución brindada por cada uno de los algoritmos en estudio.

*Tabla 1 – Instancias euclidianas seleccionadas para TSP*

<b>Tipo</b>	<b>Clientes</b>	<b>Solución Óptima</b>
Instancia EIL51	51	430
Instancia ST70	70	678.6
Instancia KROA100	100	21285.44
Instancia EIL101	101	641.1

*Fuente: Elaboración Propia*

El tipo de distancia utilizado por estas instancias es euclidiana, el tipo de unidad para cada una de estas distancias es estándar, por lo que se puede interpretar la función objetivo en kilómetros, metros o cualquier otra unidad longitudinal.

Estos modelos se resuelven bajo la suposición que la empresa cuenta con un solo vehículo para hacer la entrega de productos y la capacidad del mismo no es tomada en cuenta, por lo que puede transportar la carga necesaria.

### 3.1.1. Instancia EIL51

*Tabla 2 - Resultados de la Instancia EIL51*

<b>Algoritmo</b>	<b>Óptimo</b>	<b>GR<sup>5</sup></b>	<b>TWEI<sup>6</sup></b>	<b>NN<sup>7</sup></b>	<b>BB<sup>8</sup></b>	<b>CI<sup>9</sup></b>
<b>Distancia</b>	430.0	446.9	456.9	513.6	474.0	474.0
<b>% Contra Óptimo</b>	0.00%	3.94%	6.25%	19.45%	10.24%	10.24%
<b>Tiempo CPU (seg)</b>	-	1.67	<1	<1	<1	<1

*Elaboración Propia*

---

<sup>5</sup> Greedy Algorithm

<sup>6</sup> Two-Way Exchange Improvement

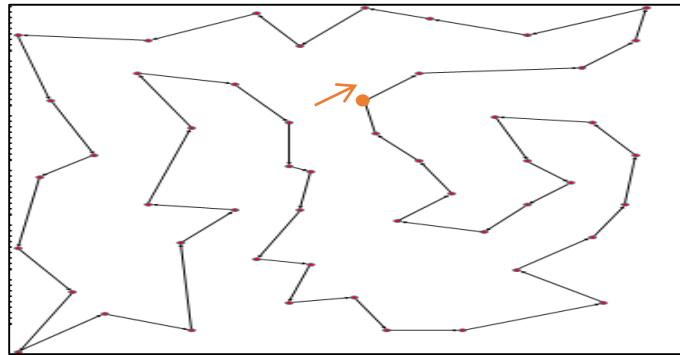
<sup>7</sup> Nearest Neighbor

<sup>8</sup> Branch and Bound

<sup>9</sup> Cheapest Insertion

Para la instancia EIL51 se observa que el algoritmo con mejor calidad de respuesta es el Greedy, el cual obtiene un 3.94% de desviación respecto al óptimo siendo el Two-Way Exchange Improvement el segundo en la lista con un 6.25%.

El resto de algoritmos se encuentran con una desviación arriba del 7% siendo soluciones no aceptadas, estos algoritmos brindaron la respuesta en menos de un segundo, siendo esta una variable importante a considerar debido a que muestra la intensidad de búsqueda que presenta cada uno de estos algoritmos.



*Ilustración 2 - Gráfico de ruta para EIL51*

Elaboración Propia

En la **Tabla 3 – Secuencias EIL51** podemos observar el recorrido propuesto para la instancia EIL51 según el Greedy Algorithm, de forma gráfica este recorrido lo podemos apreciar en la **Ilustración 2 – Gráfico de ruta**.

*Tabla 3 - Secuencia EIL51*

Secuencia EIL51									
1	22	20	35	36	3	28	31	8	26
7	43	24	14	25	13	41	40	19	42
4	47	18	6	23	48	27	51	46	12
17	37	44	15	45	33	39	10	30	34
21	29	2	16	50	9	49	5	38	11
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaboración Propia

### 3.1.2. Instancia ST70

Tabla 4 - Resultados de la Instancia ST70

Algoritmo	Óptimo	GR	TWEI	NN	BB	CI
Distancia	678.6	727.2	754.1	805.5	779.7	779.7
% Contra Óptimo	0.00%	7.16%	7.13%	18.71%	18.88%	18.88%
Tiempo CPU (seg)	-	3.03	1.65	<1	<1	<1

Elaboración Propia

En esta ocasión el algoritmo que mejor solución brinda a la instancia ST70 es el Two-Way Exchange Improvement seguido del Greedy, el cual quedó 0.03% por debajo. Es preciso hacer la observación que a pesar de las repetidas veces que se analizaron ambas instancias no se alcanzó un resultado menor o igual al 7% de desviación respecto al óptimo.

Los algoritmos restantes quedaron con un porcentaje de desviación respecto al óptimo superior al 18%, por lo que sus respuestas no serán aceptadas en el estudio de esta instancia.

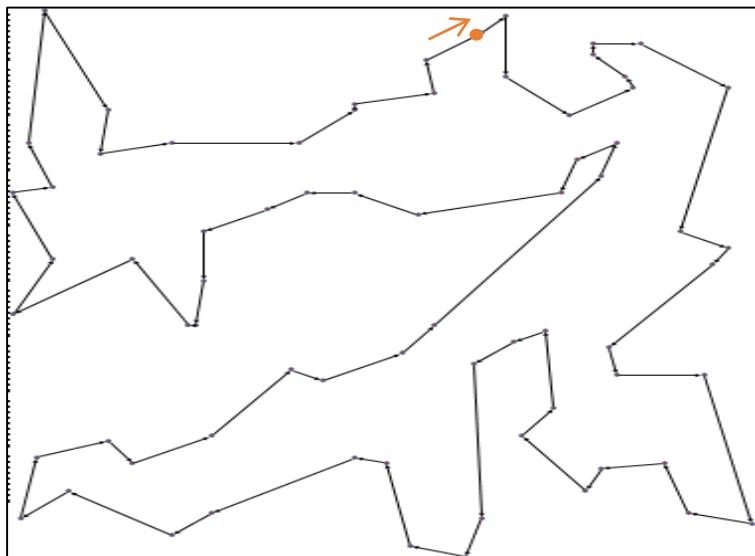


Ilustración 3 - Gráfico de ruta ST70

Elaboración Propia



La ruta que se identificó para esta instancia se muestra en la **Tabla 5 – Secuencia ST70** e igual hacemos muestra de su grafo en la **Ilustración 3 – Gráfico de ruta ST70**.

*Tabla 5 - Secuencia ST70*

Secuencia ST70									
1	36	23	38	69	31	13	29	70	35
57	15	24	2	7	19	55	49	26	8
28	3	32	4	18	42	14	20	30	44
68	27	46	45	25	39	61	40	9	17
43	41	6	63	59	22	66	53	5	10
52	60	12	21	34	33	62	54	48	67
11	64	65	56	51	50	58	37	47	16

*Elaboración Propia*

### 3.1.3. Instancia KROA100

*Tabla 6 - Resultados de la Instancia KROA100*

Algoritmo	Óptimo	GR	TWEI	NN	BB	CI
Distancia	21285.4	22933.9	22803.6	26856.4	25303.9	25303.9
% Contra Óptimo	0.00%	7.74%	7.13%	26.17%	18.88%	18.88%
Tiempo CPU (seg)	-	12.66	5.06	<1	3.00	<1

*Elaboración Propia*

La mejor solución es brinda por el algoritmo Two-Way Exchange Improvement dando una variación de 7.13% respecto al óptimo propuesto para la instancia de KROA100. Nuevamente se aprecia que la calidad de esta respuesta no cae dentro de nuestro rango de tolerancia, a pesar de las repetidas veces que se corrió esta instancia no se pudo obtener una respuesta de mejor calidad.

Los algoritmos de Branch and Bound y Cheapest Insertion han brindado soluciones por encima del 18%, mientras que el algoritmo Nearest Neighbor ha dado una solución de 26.17% demostrando su ineffectividad a medida que crece el

número de puntos de distribución dentro de una instancia. Nuevamente es repetitivo el hecho del poco tiempo de análisis de cada una estos algoritmos.

A continuación mostramos la ruta encontrada para la instancia de KROA100:

*Tabla 7 - Secuencia KROA100*

Secuencia KROA100									
1	47	93	28	67	58	61	51	87	25
81	69	64	40	54	2	44	50	73	68
85	82	95	13	76	33	37	5	52	78
96	39	30	48	100	41	71	14	3	43
46	29	34	83	55	7	9	57	20	12
27	86	35	62	60	77	23	98	91	45
32	11	15	17	59	74	21	72	10	84
36	99	38	24	18	79	53	88	16	94
22	70	66	26	65	4	97	56	80	31
89	42	8	92	75	19	90	49	6	63

*Elaboración Propia*

### 3.1.4. Instancia EIL101

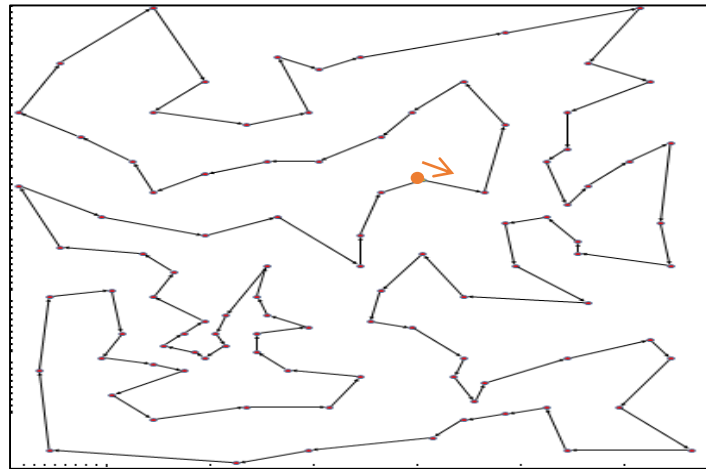
*Tabla 8 - Resultados de la Instancia EIL101*

Algoritmo	Óptimo	GR	TWEI	NN	BB	CI
<b>Distancia</b>	641.1	699.4	715.2	825.2	737.4	737.4
<b>% Contra Óptimo</b>	0.00%	9.08%	11.54%	28.71%	15.01%	15.01%
<b>Tiempo CPU (seg)</b>	-	6.32	6.28	<1	4.48	<1

*Elaboración Propia*

La instancia EIL101 fue resuelta de mejor manera por el Greedy Algorithm el cual dio una diferencia respecto al óptimo de 9.08% y un tiempo de cómputo de 6.32 segundos, siendo un tiempo eficiente para instancias tan grandes como lo es EIL101. Lamentablemente no se puede decir lo mismo respecto a la calidad de respuesta, se ha notado que a medida que la instancia presenta mayor número de puntos de distribución la calidad de la solución disminuye considerablemente.

Los demás algoritmos dieron soluciones con una diferencia mayor al 11%, llegando el Nearest Neighbor a brindar una respuesta con variación del 28.71%, respuestas que claramente no pueden ser aceptadas o consideradas para una toma de decisión acertada.



*Ilustración 4 - Gráfico de ruta EIL101*

Elaboración Propia

En la **Ilustración 4 – Gráfico de ruta EIL101** se aprecia el camino encontrado por para la instancia EIL101 por el Greedy Algorithm, esta secuencia puede evidenciarse en la siguiente tabla:

*Tabla 9 - Secuencia EIL101*

Ruta EIL101									
1	50	51	20	30	70	31	88	7	82
48	47	36	49	64	11	19	62	10	63
90	32	66	65	71	35	9	81	33	3
79	78	34	29	24	80	68	77	76	12
54	26	28	53	58	40	21	73	74	72
4	55	25	39	67	23	56	75	22	41
15	43	38	86	17	84	61	16	91	100
44	14	42	57	2	87	97	95	13	94
6	89	96	59	92	37	98	85	93	99

5	60	83	45	46	8	18	52	101	27
69	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaboración Propia

### 3.2. Instancias del TSP distancias Geográficas

En esta sección se muestran los resultados del estudio comparativo realizado para la formulación del TSP, esta vez a partir de instancias con distancias geográficas, las cuales a partir de sus coordenadas de latitud y longitud son representadas en un plano, estas coordenadas fueron convertidas en radianes y a partir de ahí se ha procedido a calcular la distancia euclidiana entre los puntos.

Estos modelos se resuelven continuando con la suposición que la empresa cuenta con un solo vehículo para hacer la entrega de productos y la capacidad del mismo no es tomada en cuenta, por lo que puede transportar la carga necesaria.

A diferencia de la sección anterior donde se estudiaban instancias con una cantidad media de puntos de distribución, en esta etapa se hará el estudio a partir de instancias que podrían ubicarse en los extremos por poseer una ruta con pocos puntos de distribución o contar con gran número de ellos.

Las instancias que estaremos estudiando en esta sección se muestran en la **Tabla 10 – Instancias geográficas seleccionadas para el TSP**, serán un total de cinco instancias las cuales serán resueltas por los métodos del Greedy Algorithm, Two-Way Exchange Improvement, Nearest Neighbor, Branch and Bound y Cheapest Insertion.

*Tabla 10 – Instancias geográficas seleccionadas para el TSP*

Tipo	Clientes	Solución Óptima
Instancia ULYSSES16	16	6,756.91
Instancia ULYSSES22	22	6,892.78
Instancia BAYS29	29	2,020
Instancia GR96	96	54,517.63
Instancia GR120	120	6,942

Elaboración Propia

### 3.2.1. Instancia ULYSSES16

Tabla 11 - Resultados de la Instancia ULYSSES16

Algoritmo	Óptimo	GR	TWEI	NN	BB	CI
Distancia	6756.91	6803.67	6933.63	9614.62	7227.79	7227.79
% Contra Óptimo	0.00%	0.69%	2.62%	42.29%	6.97%	6.97%
Tiempo CPU (seg)	-	<1	<1	<1	<1	<1

Elaboración Propia

Como se puede observar en la **Tabla 11 – Resultados de la Instancia ULYSSES16**, el algoritmo que más se acercó al óptimo es el Greedy Algorithm que solo quedo por debajo un 0.69%, resultando mejor muy por encima de los demás algoritmos.

De los demás algoritmos las respuestas que caen dentro de los parámetros de calidad aceptada son el Two-Way Exchange Improvement, Branch and Bound y Cheapest Insertion que brindaron respuestas por debajo del 7% de variación respecto al óptimo, siendo el primero de estos el que mejor solución brindo con un 2.625 de variación.

Vemos que Nearest Nieghbor tuvo una desviación exorbitante de un 42.29% en comparación al óptimo, siendo un caso particular por el hecho de que la instancia cuenta con únicamente 16 puntos de distribución y en ocasiones anteriores este mismo algoritmo presento una mejor calidad de respuesta con instancias de mayor amplitud.

Tabla 12 - Secuencia ULYSSES16

Ruta ULYSSES 16									
1	3	2	4	8	14	13	12	7	6
15	5	11	9	10	16	-	-	-	-

Elaboración Propia

### 3.2.2. Instancia ULYSSES22

Tabla 13 - Resultados de la Instancia ULYSSES22

Algoritmo	Óptimo	GR	TWEI	NN	BB	CI
Distancia	6892.78	6892.78	7108.36	8082.16	7545.85	7545.85
% Contra Óptimo	0.00%	0.00%	3.13%	17.26%	9.47%	9.47%
Tiempo CPU (seg)	-	<1	<1	<1	<1	<1

Elaboración Propia

Esta instancia fue resuelta en menos de un segundo por el Greedy Algorithm, quien fue el mejor algoritmo para esta instancia debido a que la desviación respecto al óptimo fue del 0.00%, una instancia relativamente sencilla por el hecho de tener muy pocos puntos de distribución.

El algoritmo de Two-Way Exchange Improvement brindó una respuesta dentro de los parámetros de calidad sin embargo los tres algoritmos restantes superaron estos márgenes, nuevamente el algoritmo de Nearest Neighbor proporciono una respuesta muy por encima del óptimo respecto a la facilitada por el resto de algoritmos.

La secuencia que nos brinda el Greedy Algorithm para la instancia ULYSSES22 es mostrada a continuación en la **Tabla 14 – Secuencia ULYSSES22**.

Tabla 14 - Secuencia ULYSSES22

Ruta ULYSSES22									
1	14	13	12	7	6	15	5	11	9
10	19	20	21	16	3	2	17	4	18
22	8	-	-	-	-	-	-	-	-

Elaboración Propia

### 3.2.3. Instancia BAYS29

Tabla 15 - Resultados de la Instancia BAYS29

Algoritmo	Óptimo	GR	TWEI	NN	BB	CI
Distancia	2020	2051	2092	2258	2130	2130
% Contra Óptimo	0.00%	1.53%	3.56%	11.78%	5.45%	5.45%
Tiempo CPU (seg)	-	1.78	<1	<1	<1	<1

Elaboración Propia

Para la instancia BAYS29 el algoritmo que mejor calidad de respuesta brindó fue nuevamente el Greedy Algorithm, habiendo encontrado como mejor respuesta 2051 sobre 2020 que es el óptimo, teniendo un error del 1.53%, en esta instancia el tiempo que tardo el CPU en darnos respuesta fue de 1.78 segundos.

El algoritmo de Nearest Neighbor fue el único en brindar una respuesta con calidad no aceptable, con un error del 11.78%, el resto se mantuvo por debajo del 7% de variación, de igual manera el resto de algoritmos facilitaron una respuesta en menos de 1 segundo.

A continuación hacemos referencia a la **Tabla 16 – Secuencia BAYS29** donde se muestra la ruta propuesta por el Greedy Algorithm para la instancia de BAYS29, hay que recordar que el último punto de distribución que visita es el 8 pero siempre a partir de acá vuelve al punto de origen.

Tabla 16 - Secuencia BAYS29

Ruta BAYS29									
1	28	6	12	9	5	26	29	3	2
21	20	10	4	15	18	17	14	22	11
25	7	23	27	16	19	13	24	8	-

Elaboración Propia

### 3.2.4. Instancia GR96

Tabla 17 - Resultados de la Instancia GR96

Algoritmo	Óptimo	GR	TWEI	NN	BB	CI
Distancia	54517.63	56543.7	63322.8	68935.1	68935.1	69401
% Contra Óptimo	0.00%	3.72%	16.15%	26.45%	26.45%	27.30%
Tiempo CPU (seg)	-	11.2	9.23	9.15	10.57	9.94

Elaboración Propia

En la instancia GR96 el algoritmo que más se acercó al óptimo fue el Greedy Algorithm, dando como resultado apenas un 3.73% por encima del óptimo, igualmente hay que apreciar que el tiempo de cómputo para esta instancia termino siendo de 11.2 segundos siendo el algoritmo que mayor tiempo presento.

Los algoritmos restantes no proporcionaron respuestas con un nivel de calidad que estuviera dentro del parámetro previamente establecido, por lo que podemos notar claramente que el hecho de haber incrementado considerablemente los puntos de distribución para esta instancia indica una tendencia de incremento en las variaciones de los algoritmos de poca profundidad.

La **Tabla 18 – Secuencia GR96** nos muestra la secuencia propuesta por el Greedy Algorithm para la instancia GR96.

Tabla 18 - Secuencia GR96

Ruta GR96									
1	30	31	32	36	37	35	34	33	44
45	11	46	47	48	54	53	55	51	52
50	49	43	42	41	40	39	38	79	80
81	82	83	91	90	89	87	88	78	86
85	84	74	73	70	69	57	56	58	59
60	61	62	63	64	66	67	68	71	72
75	76	77	92	93	95	94	96	65	28
27	24	25	23	26	22	21	19	18	20
17	16	15	14	13	12	10	9	7	8



6	5	4	3	2	29	-	-	-	-
---	---	---	---	---	----	---	---	---	---

Elaboración Propia

### 3.2.5. Instancia GR120

Tabla 19 - Resultados de la Instancia GR120

Algoritmo	Óptimo	GR	TWEI	NN	BB	CI
Distancia	6942	7427	7527	9351	7822	7822
% Contra Óptimo	0.00%	6.99%	8.43%	34.70%	12.68%	12.68%
Tiempo CPU (seg)	-	42.39	40.56	47.80	43.15	42.68

Elaboración Propia

Para la instancia GR120, se puede observar las altas variaciones de los algoritmos con respecto al óptimo, esto es debido a que cuenta con gran cantidad de puntos de distribución, hecho que también es reflejado en el tiempo de cómputo de cada uno de los algoritmos.

El algoritmo que con menor variación fue el Greedy Algorithm dando un resultado de 6.99%, la cual es una respuesta que está dentro del parámetro de calidad aceptable que se ha definido con anterioridad.

El Two-Way Exchange Improvement brindó una respuesta cercana a nuestro margen de aceptación, exceptuando al Nearest Neighbor quien dio una respuesta elevada los demás brindaron respuestas moderadamente altas.

Tabla 20 - Secuencia GR120

Ruta GR120									
1	76	29	30	59	15	94	81	66	31
117	85	18	19	25	108	43	79	52	33
100	58	91	68	65	13	49	118	17	50
98	42	41	56	7	38	119	103	9	23
51	11	115	2	82	3	53	64	93	21
109	88	97	12	95	77	39	83	57	67
37	62	99	104	10	35	84	36	6	55

89	110	112	106	73	63	5	27	80	114
101	102	48	47	71	26	4	34	40	72
105	74	87	75	44	46	20	113	69	107
22	86	14	78	45	28	92	32	120	116
70	8	54	90	96	111	24	60	16	61

*Elaboración Propia*

### 3.3 Conclusiones del Estudio Comparativo

Después de realizar este estudio comparativo para cinco tipos de algoritmos distintos que dan respuesta al TSP, en el cual se tomaron en consideración tanto instancias de tipo euclidianas e instancias geográficas, las cuales poseen cantidades variadas de puntos de distribución, permitiendo el análisis de los algoritmos en distintas circunstancias.

Las conclusiones fueron complementadas con un análisis cuantitativo de los algoritmos a partir de un análisis completo a las respuestas que brindaron, para esto haremos uso de la **Tabla 21 – Valores asignados** donde se muestra la forma en que serán repartidos puntos para cada algoritmo.

*Tabla 21 - Valores asignados*

Valores asignados	
Resultado	Puntaje
Óptimo	2
Dentro de RA.	1
Fuera del RA.	0

*Elaboración Propia*

La **Tabla 22 – Análisis cuantitativo de algoritmos** hace muestra de los resultados obtenidos por cada algoritmo al momento de resolver las distintas instancias presentadas con anterioridad.

Tabla 22 - Análisis cuantitativo de algoritmos

Análisis cuantitativo de algoritmos										
Algoritmo	Instancias Euclidianas				Instancias Geograficas					Total
	EIL51	ST70	KROA100	EIL101	ULYSSES16	ULYSSES22	BAYS29	GR96	GR120	
Greedy Algorithm	1	0	0	0	1	2	1	1	1	7
Two-Way Exchange I.	1	0	0	0	1	1	1	0	0	4
Nearest Neighbor	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Branch and Bound	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2
Cheapest Insertion	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2

Elaboración Propia

- El **Greedy Algorithm** brinda una respuesta de mejor calidad respecto a los demás algoritmos analizados, situación fácilmente apreciada en las instancias geográficas que se mostraron, aunque en las instancias euclidianas no fue el mejor. Brindó respuestas dentro del margen de aceptación en seis de las nueve instancias que analizamos, a excepción de la instancia EIL101, mostrando que tuvo una eficacia de 88.88% para la resolución del TSP.

Es importante resaltar que en el estudio cuantitativo logro conseguir un total de 7/18 puntos, lo que representa el 39% de los puntos máximos alcanzados, reflejando que a pesar de haber brindado muchas respuestas dentro de los márgenes de aceptación logro llegar únicamente una vez a una respuesta óptima, demostrando que el algoritmo responde bien para un nivel de confianza del 93% pero si se quisiera un mayor porcentaje este algoritmo no podría darnos una certeza plena para la toma de decisiones.
- El **Two-Way Exchange Improvement** es el algoritmo que ocupa la segunda posición en el análisis cualitativo con un porcentaje de 44.44% de respuestas dentro del nivel de confianza del 93%. Como defecto podemos notar que a medida que el TSP se complica (eleva el número de puntos de distribución) la calidad en la respuesta va

disminuyendo paulatinamente, aunque este es un fenómeno que puede apreciarse en todos los algoritmos vemos que hay un cambio brusco en instancias superiores a los 29 puntos de distribución ya que sólo alcanzó estar dentro del parámetro de aceptación para una instancia de cinco que cumplían esta característica.

En cuanto a la puntuación alcanzó un total de 4/18 lo que representa un 22% de éxito al momento de caer dentro del margen de aceptación (desviación menor o igual al 7% respecto al óptimo) haciendo notar que el nivel de confianza de 93% le quedo muy alto.

- El algoritmo **Nearest Neighbor** es quién brinda la solución con peor calidad para un nivel de confianza del 93% en cada una de las instancias, sean euclidianas o geográficas, que se han propuesto en este estudio. Es un método efectivo para instancias con pocos puntos pero definitivamente hacer instancias de 16 puntos de distribución o más lo complica seriamente.

No logro conseguir puntos en el estudio cuantitativo, demostrando que el nivel de confianza de 93% le queda muy alto para estas instancias, tendría que hacerse un análisis con menor cantidad de puntos de distribución para poder realizar una recomendación apropiada sobre en qué circunstancias se debe hacer uso de este método, aunque es un hecho que algoritmos como el Greedy Algorithm o el Two-Way Exchange Improvement podrían obtener mejores resultados en instancias como esas.

- Los algoritmos **Branch and Bound** y **Cheapest Insertion** brindaron respuestas muy similares a lo largo de todo el estudio. Ambos estuvieron dentro de los parámetros de en dos ocasiones lo que refleja un 22% de eficacia y en cuanto al estudio cuantitativo consiguieron 2 puntos de 18, qué era el máximo alcanzable, por lo

nuevamente el nivel de confianza de 93% queda muy por encima para estos algoritmos.

Los resultados aceptables fueron brindados para instancias no superiores a los 29 puntos de distribución por lo que es recomendable realizar un estudio como el propuesto para el Nearest Neighbor.

Todos los algoritmos demostraron tomar un mayor tiempo de cómputo a medida que las instancias iban aumentando en puntos de distribución, igualmente este fenómeno se hizo presente al momento de observar la calidad de las respuestas que iban disminuyendo, llegando a tener casos con variaciones exorbitantes.

Por esos factores es preciso contar siempre con un hardware de gran capacidad que debe ser acompañarlo con un algoritmo de gran intensidad, de tal forma que permita encontrar respuestas adecuada para la toma de decisión de las distintas empresas.

Debido a que el mejor algoritmo encontrado en este estudio comparativo es el ***Greedy Algorithm***, se estará tomando como referencia para el desarrollo de la propuesta de ruteo de la empresa “*Antojitos Leoneses*”, igualmente se realizará un manual para resolver problemas de TSP por este método a partir de complementos para Excel2013.

## CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL SISTEMA ACTUAL

El análisis para la empresa “Antojitos Leoneses” fue basado en el cálculo de distancias entre los puntos de entrega, a partir de ahí se deduce que a menor distancia recorrida menor el costo en el que incurre la empresa.

Actualmente la empresa cuenta con 15 puntos de entrega, los cuales se muestra en la **Tabla 23 - Puntos de distribución de la empresa Antojitos Leoneses**, igualmente se hace referencia a la ubicación de la empresa debido a que es el punto de partida y el punto de retorno en cada uno de las entregas que hace el camión de distribución de la empresa.

*Tabla 23 - Puntos de distribución de la empresa Antojitos Leoneses*

Puntos de Distribución				
N°	Punto	Dirección	Latitud	Longitud
1	Centro de acopio La Colonia	Sucursal Rubenia	12.130108	-86.224428
2	La Colonia 1	Sucursal Plaza España	12.067353	-86.283160
3	La Colonia 2	Veracruz	12.067353	-86.213564
4	Farmacia Familiar	Costado Este Edificio BAC	12.122534	-86.283160
5	La Finquita	Km 14 Carretera Masaya	12.055240	-86.201313
6	Accedo Technology	Km 14.5 Carretera Masaya	12.051833	-86.199214
7	Mini Super Pacheco	Km 14 Carretera Masaya	12.056142	-86.199586
8	Super Porta's	Villa Fontana Norte	12.104361	-86.265035
9	AM:PM 1	Km 9 Carretera Masaya	12.092556	-86.236730
10	AM:PM 2	Sucursal Rotonda Universitaria	12.113767	-86.271904
11	AM:PM 3	Costado Sur Edificio BAC	12.120602	-86.261428
12	AM:PM 4	Plaza España	12.134421	-86.281560
13	AM:PM 5	Rotonda Bello Horizonte	12.145709	-86.233148
14	Mini Super El Cruce	Entrada Snt. Domingo	12.088154	-86.242754
15	Gasolinera Puma	Carretera Sur, Nejapa	12.106822	-86.317915
16	Antojitos Leoneses	Villa Fontana Norte	12.105531	-86.263720

*Elaboración Propia*

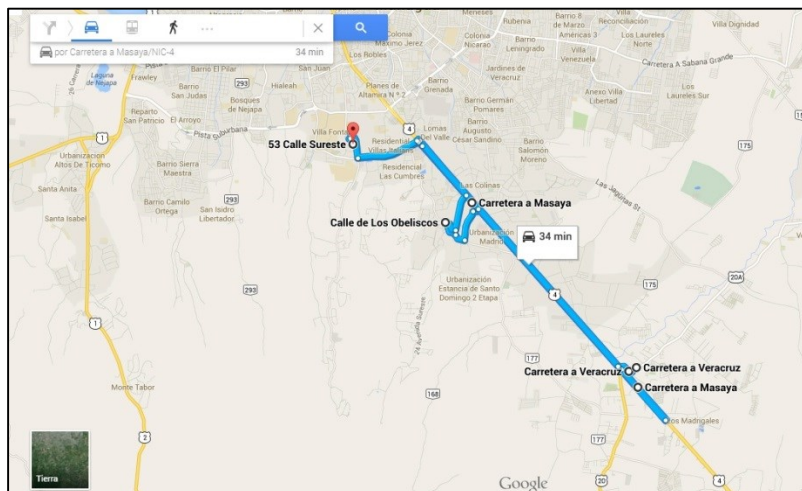
La empresa ha creado cuatro rutas principales para abarcar estos puntos de distribución, los cuales son visitados una vez a la semana en un día previamente establecido. En la **Tabla 23 – Rutas de distribución de la empresa Antojitos Leoneses** se exponen las rutas mencionadas con anterioridad e igualmente se muestra la distancia recorrida para cubrir esa ruta.

*Tabla 24 - Rutas de distribución de la empresa Antojitos Leoneses*

Rutas de Distribución						
Rutas	Puntos de Distribución					Distancia (km)
<b>Rutas 1</b>	9	14	6	5	7	19.73
<b>Rutas 2</b>	8	10	11	4	***	5.00
<b>Rutas 3</b>	15	12	13	***	***	21.74
<b>Rutas 4</b>	1	2	3	***	***	28.82

*Elaboración Propia*

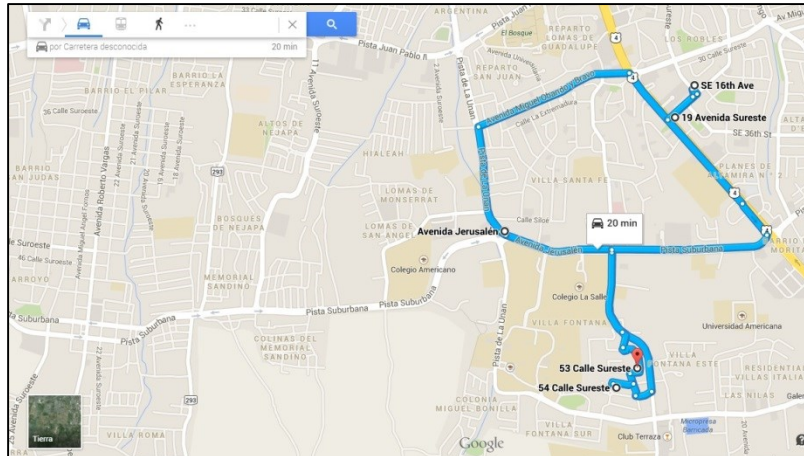
La **Ruta 1** está compuesta por cinco puntos de distribución, es la ruta que más puntos abarca respecto a las demás, esta está caracterizada por ser puntos de entrega ubicados en la zona de Carretera a Masaya, representa una distancia de 19.73 km llevar a cabo todo su recorrido.



**Ilustración 5 - Ruta 1 Antojitos Leoneses**

Elaboración: Google Maps

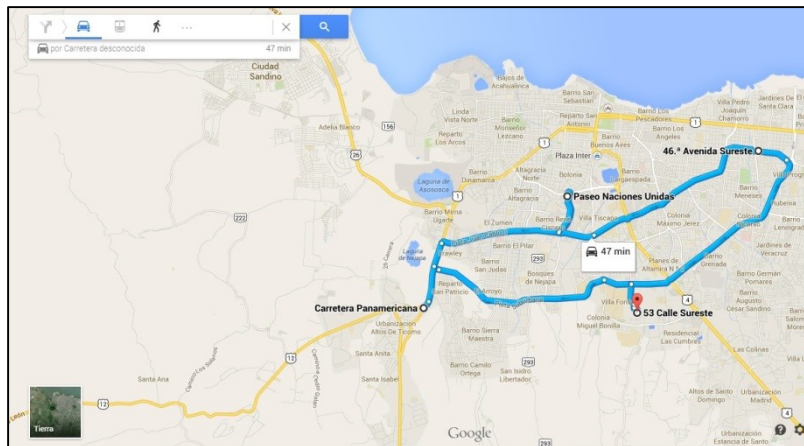
La **Ruta 2** está conformada por cuatro puntos de distribución, es la segunda más grande y abarca todos aquellos puntos que se encuentran en la zona más cercana a la empresa “*Antojitos Leoneses*”, su recorrido tiene una distancia de 3.35km.



**Ilustración 6 - Ruta 2 Antojitos Leoneses**

Elaboración: Google Maps

La **Ruta 3** tiene un total de tres puntos de distribución, a pesar de eso presenta un recorrido de 21.74km siendo el segundo más largo de toda la empresa, los puntos que conforman este punto se encuentran en la parte más céntrica del municipio de Managua.

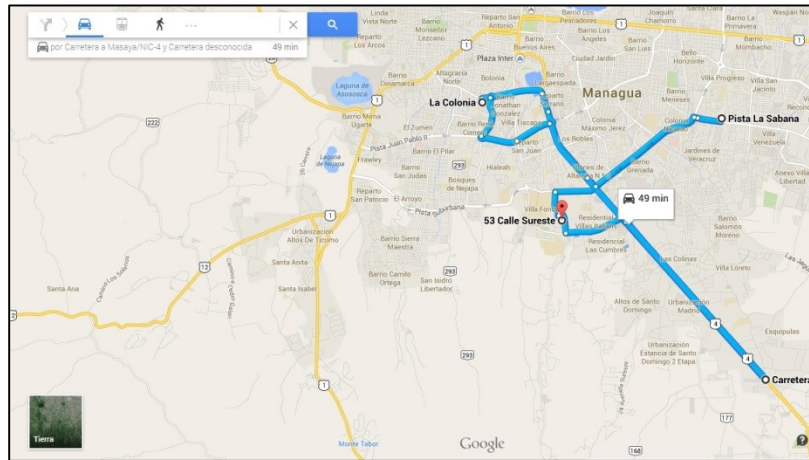


**Ilustración 7 - Ruta 3 Antojitos Leoneses**

Elaboración: Google Maps



La **Ruta 4** al igual que la anterior consta de tres puntos de distribución, los cuales son únicamente sucursales del Supermercado La Colonia, acá incluye el Centro de Acopio ubicado en la sucursal de Rubenia, el cual se encarga de distribuir los productos al resto de Supermercados que no son atendidos por la empresa “Antojitos Leoneses”, este recorrido suma un total de 28.82km.



**Ilustración 8 - Ruta 4 Antojitos Leoneses**

Elaboración: Google Maps

Los puntos de distribución están ubicados en **Tabla 23 – Puntos de distribución de la empresa Antojitos Leoneses** según el orden en que el camión de distribución visita cada uno de los locales, cabe recordar que el punto de origen y final es el **Punto 16 (Empresa Antojitos Leoneses)**, toda la operación de distribución para la empresa representa un total de 73.21km recorridos.

## CAPÍTULO V. PROPUESTA DE RUTEO

En el capítulo anterior se definió las cuatro rutas que ha creado la empresa para su distribución en este capítulo se mostrará la mejor manera de cómo distribuir estas rutas, de manera que se haga más rápida y se ahorre kilómetros recorridos.

Las rutas actuales están definidas según la **Tabla 24 – Rutas de distribución de la empresa Antojitos Leoneses**, como se podrá notar la **Ruta 1** tiene una distancia de 19.73 Km, la **Ruta 2** tiene 5 Km de distancia, la **Ruta 3** 21.74 Km y la **Ruta 4** posee 28.82 Km, sumando todas las rutas nos da un total de 75.29 Km de distancia. Al correr cada una de estas rutas con los complementos de Excel obtenemos que el total de las rutas se pueden hacer recorriendo 69.41 Km, reduciendo en 5.88 Km la distancia Total recorrida por la empresa.

Para esta sección la propuesta se basó únicamente en cambiar el orden de los puntos de distribución en las rutas previamente establecidas por la empresa, ya que esta cuenta con un calendario previamente establecido para la entrega de productos a cada uno de los clientes.

La **Tabla 25 –Ruta de distribución propuesta** nos muestra los datos descritos en el capítulo anterior versus la propuesta que se plantea para cada ruta.

*Tabla 25 - Ruta de distribución propuesta*

Rutas de Distribución													
Rutas	Puntos de Distribución Actual					Puntos de Distribución Propuesto					Distancia (km) Actual	Distancia (km) Propuesto	Diferencia
	<b>Rutas 1</b>	9	14	6	5	7	9	7	6	5			
<b>Rutas 2</b>	8	10	11	4	***	8	10	4	11	***	5	5	<b>0</b>
<b>Rutas 3</b>	15	12	13	***	***	15	12	13	***	***	21.74	21.74	<b>0</b>
<b>Rutas 4</b>	1	2	3	***	***	2	1	3	***	***	28.82	24.07	<b>4.75</b>
												<b>Distancia (Km) Ahorrada</b>	<b>5.88</b>

*Elaboración propia*

A continuación se detallará como se deben de recorrer cada una de las rutas según los complementos de Excel utilizados, los cuales permiten resolver el TSP a partir del Greedy Algorithm.

### 5.1. Ruta 1

*Tabla 26 - Propuesta para Ruta 1*

Actual	Distancia (Km)	Propuesto	Distancia (Km)
origen	0	origen	0
AM:PM 1	3.25	AM:PM 1	3.25
minisuper el cruce	0.81	Super Pacheco	5.69
Accedo Technology	6.19	La Finquita	0.44
La Finquita	0.44	Accedo Technology	0.48
Super Pacheco	0.21	minisuper el cruce	5.77
origen	8.83	origen	2.97
<b>Total</b>	<b>19.73</b>	<b>Total</b>	<b>18.6</b>

*Elaboración propia*

Actualmente esta ruta representa una distancia de 19.73km, en el análisis que se realizó se elaboraron pequeños cambios, consistente en lo siguiente:

Posteriormente a visitar el AM:PM (1), procedemos a visitar los locales ubicados en la entrada de Veracruz para posteriormente subir medio kilómetro más sobre Carretera a Masaya para visitar Accedo Technology y en el viaje de vuelta a Managua entrar a Santo Domingo a visitar el Mini Super Pacheco, con esta distribución propuesta el recorrido se vuelve de 18.6km, lo que representa un ahorro de 1.13km para la empresa.

### 5.2. Ruta 2

La ruta 2 no representa mucho cambio, comparando el modelo actual con el modelo propuesto, debido a que el cambio se hizo únicamente en un punto con otro, esto pasa debido a que la ruta posee pocos puntos lo que hace que la empresa se acerque mucho al óptimo, de hecho este cambio no representa ningún ahorro, pero aun así, se propone la ruta siguiente:

Tabla 27 - Propuesta para Ruta 2

Actual	Distancia (Km)	Propuesto	Distancia (Km)
origen	0	origen	0
Super Portas	0.19	Super Portas	0.19
AM:PM (2)	1.28	AM:PM (2)	1.28
AM:PM (3)	1.36	Farmacia La Familiar	1.59
Farmacia La Familiar	0.25	AM:PM (3)	0.25
origen	1.92	Origen	1.69
<b>Total</b>	<b>5</b>	<b>Total</b>	<b>5</b>

*Elaboración propia*

Esta Ruta empieza visitando al cliente Súper Portas, después al minisúper AM:PM (2) y luego AM:PM (3) para finalizar con la Farmacia Familiar, dando como resultado 5 Km de distancia recorrida.

Para la propuesta simplemente se debe de invertir los últimos dos lugares visitados, esto quiere decir que después de visitar AM:PM (2), se tiene que visitar Farmacia Familiar, para finalizar la ruta con AM:PM (3), y aunque dé como resultado también 5 Km como se muestra en la tabla, esta es la manera óptima de realizar el recorrido, ya que si tomamos en cuenta los puntos decimales en realidad si se ahorraría un poco.

### 5.3. Ruta 3

Debido a que es la ruta con menos puntos de distribución de las cuatro que hace la empresa “Antojitos Leoneses” es sencillo encontrar al óptimo incluso usando métodos empíricos y de poco análisis. Por eso, a partir del Greedy Algorithm no se ha propuesto ningún cambio en la ruta manteniendo el sistema actual de distribución para este caso.

Tabla 28 - Propuesta para Ruta 3

Actual/Propuesto	Distancia (Km)
origen	0
Gasolinera Puma	5.86
AM:PM (4)	4.98
AM:PM (5)	5.37
Origen	5.53
<b>Total</b>	<b>21.74</b>

Elaboración propia

Para esta ruta se visita primero a la Gasolinera Puma, después pasa por AM:PM (4), luego visita AM:PM (5) para terminar la ruta, recorriendo 21.74 Km, siendo esta la ruta Optima y de la que menor distancia se puede obtener.

#### 5.4. Ruta 4

Esta ruta fue en la que se pudo reducir más la distancia recorrida, debido a que la ruta óptima nos dio como resultado 24.08 Km, mientras que la ruta actual tiene como distancia 28.82 km, dando como diferencia 4.74 Km:

Tabla 29 - Propuesta para Ruta 4

Actual	Distancia (Km)	Propuesto	Distancia (Km)
origen	0	origen	0
Centro de Acopio La Colonia	5.05	La Colonia (1)	3.79
La Colonia (1)	6.37	Centro de Acopio La Colonia	6.37
La Colonia (2)	10.53	La Colonia (2)	7.05
Origen	6.87	origen	6.87
<b>Total</b>	<b>28.82</b>	<b>Total</b>	<b>24.08</b>

Elaboración propia

A pesar de tener pocos puntos que visitar para esta ruta, la empresa no está utilizando el recorrido óptimo, y esto genera una gran diferencia. Actualmente la empresa visita primeramente el Centro de Acopio La Colonia, luego visita

Supermercado La Colonia (1) y finaliza la ruta visitando Supermercado La Colonia (2). La propuesta que se hace es que visite Primero Supermercado La Colonia (1) y luego visitar El Centro de Acopio La Colonia y finalizar siempre con La Colonia (2).

Sumando todas las propuestas nos da como resultado que se mejora la ruta notablemente, realizando el recorrido con una distancia de 69.41 Km, dando una diferencia de 5.88 Km semanalmente, esto si lo multiplicamos por cuatro semanas del mes, nos que se pueden ahorrar 23.52 Km, lo que representa menos tiempo y menos gastos de transporte, significando una disminución gastos para la empresa y por ende más utilidades que pueden utilizarse para otras mejoras.

Sin embargo esto se realiza obviando las diferentes dificultades que pueden presentarse en las calles, como el tráfico, calles en mal estado, accidentes, semáforos en rojo, etc. Que representan atrasos y gasto de combustible y posiblemente nuevo manera de recorrer la ruta.

## CAPÍTULO VI: MANUAL DE SELECCIÓN DE RUTA

El presente manual tiene como objetivo encontrar una ruta de distribución utilizando una Hoja de Cálculo en Excel.

Las empresas que lo pueden utilizar deben de presentar las siguientes características:

- Disponer de una cantidad de clientes definida.
- Los clientes pueden ser atendidos por un solo distribuidor.
- Los materiales a distribuir pueden ser entregados por un solo distribuidor.

### 6.1. Elaboración de la matriz de distancias

#### Coordenadas Geodésicas

Las coordenadas Geodésicas se utilizan para referenciar a puntos sobre la superficie terrestre. Las coordenadas contienen dos componentes la longitud y la latitud.

Para encontrar las coordenadas de un punto en el espacio utilizaremos la página web de Google: [www.maps.google.com](http://www.maps.google.com)

El procedimiento para obtener las coordenadas de una ubicación es diferente según la versión de Google Maps que se utilice.<sup>10</sup>

#### Nuevo Google Maps

1. Haz clic con el botón derecho en una ubicación del mapa.
2. Selecciona **¿Qué hay aquí?**.
3. Debajo del cuadro de búsqueda, aparecerá una tarjeta de información con las coordenadas.

---

<sup>10</sup> Ver enlace [http://bit.ly/Coordenadas\\_Geodésicas](http://bit.ly/Coordenadas_Geodésicas)

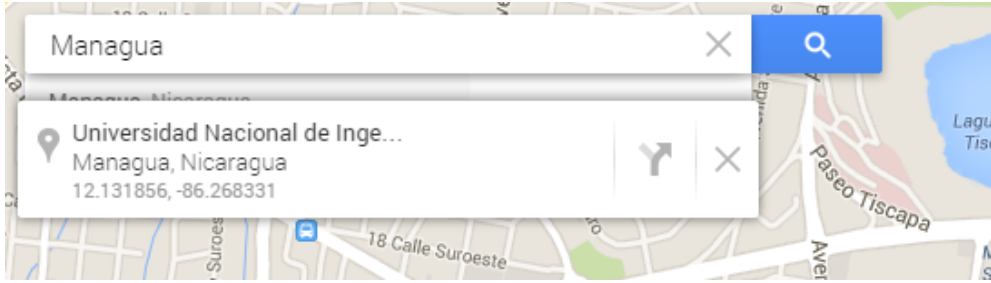


Ilustración 9 - Coordenadas Geodésicas, Universidad Nacional de Ingeniería

Fuente: Google Maps.

### Versión clásica de Google Maps

1. Abre la versión clásica de Google Maps.
2. Haz clic con el botón derecho en una ubicación del mapa.
3. Selecciona **¿Qué hay aquí?**.
4. Las coordenadas se mostrarán en el cuadro de búsqueda de la parte superior de la página.

### Matriz de Coordenadas

La matriz de coordenadas servirá para poder calcular posteriormente la Matriz de Distancias. Convertimos las coordenadas que están en grados a radianes.

Tabla 30 - Conversión de Grados a Radianes

	D	E	F	G
2	Latitud (Grados)	Longitud (Grados)	Latitud (Radianes)	Longitud (Radianes)
3	38.24	20.42	=RADIANES(D3)	=RADIANES(E3)
4	39.57	26.15	=RADIANES(D4)	=RADIANES(E4)

Fuente: Elaboración Propia

La única razón para realizar esto es para evitar complicaciones a la aplicación de la siguiente fórmula.



## Fórmula de Haversine

Para encontrar la distancia entre dos puntos dadas las coordenadas geodésicas utilizaremos la conocida como fórmula de Haversine:

$$a = \sin^2\left(\frac{lat_2 - lat_1}{2}\right) + \cos(lat_1) \cdot \cos(lat_2) \cdot \sin^2\left(\frac{lon_2 - lon_1}{2}\right)$$

$$b = 2 \cdot \sin^{-1} \sqrt{a}$$

$$D = R \cdot b$$

$$R = 110.61$$

En donde  $R$  es la medida aproximada de los kilómetros por grado.

## Matriz de Distancias

Latitud	Longitud	From/To	1	2	3
=RADIANES(D3)	=RADIANES(E3)	1	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF3-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG3-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF4-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG4-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF5-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG5-SG3)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D4)	=RADIANES(E4)	2	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF4-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG4-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF4-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG4-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF5-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG5-SG4)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D5)	=RADIANES(E5)	3	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF5-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG5-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF5-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG5-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF5-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG5-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D6)	=RADIANES(E6)	4	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF6-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG6-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF6-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG6-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF6-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG6-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D7)	=RADIANES(E7)	5	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF7-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG7-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF7-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG7-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF7-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG7-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D8)	=RADIANES(E8)	6	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF8-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG8-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF8-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG8-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF8-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG8-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D9)	=RADIANES(E9)	7	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF9-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG9-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF9-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG9-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF9-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG9-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D10)	=RADIANES(E10)	8	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF10-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG10-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF10-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG10-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF10-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG10-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D11)	=RADIANES(E11)	9	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF11-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG11-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF11-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG11-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF11-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG11-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D12)	=RADIANES(E12)	10	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF12-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG12-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF12-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG12-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF12-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG12-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D13)	=RADIANES(E13)	11	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF13-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG13-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF13-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG13-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF13-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG13-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D14)	=RADIANES(E14)	12	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF14-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG14-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF14-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG14-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF14-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG14-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D15)	=RADIANES(E15)	13	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF15-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG15-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF15-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG15-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF15-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG15-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D16)	=RADIANES(E16)	14	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF16-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG16-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF16-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG16-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF16-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG16-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D17)	=RADIANES(E17)	15	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF17-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG17-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF17-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG17-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF17-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG17-SG5)/2))^2)^0.5))
=RADIANES(D18)	=RADIANES(E18)	16	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF18-SF3)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG18-SG3)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF18-SF4)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG18-SG4)/2))^2)^0.5))	=110.61*2*GRADOS(ASENO(((SENO((SF18-SF5)/2))^2+COS(SF3)*COS(SF3)*(SENO((SG18-SG5)/2))^2)^0.5))

Ilustración 10 - Matriz de Distancias

Elaboración Propia

Ahora lo que continúa es realizar la Matriz de Distancias en donde la fórmula será utilizada para obtener las distancias de un punto a otro. Adjuntamos la Tabla 31, para ilustrarnos:



3. Haz clic en cualquier punto del mapa para crear la ruta que quieras calcular.  
Haz clic para añadir puntos de medida adicionales.
4. [Opcional] Arrastra un punto para moverlo o haz clic en un punto para eliminarlo.
5. Mira en el mapa y debajo del cuadro de búsqueda para ver la distancia total.

Cuando hayas terminado, haz clic en la "X" de la tarjeta de debajo del cuadro de búsqueda o haz clic con el botón derecho en el mapa y selecciona Eliminar medición.

## **6.2. Elaboración de la Hoja de Cálculo para la Selección de Ruta**

Para esta Hoja de Cálculo necesitamos primeramente instalar los complementos en Excel. Luego crear una hoja en donde introduciremos la Matriz de Distancias, junto con los parámetros de corrida según sea el caso. Y finalmente calcular la distancia del recorrido y la configuración de la Ruta.

### Instalación de complementos en Excel

Utilizaremos dos complementos para la selección de la ruta: OPTIMIZE.XLA y COMBINATORICS.XLA.<sup>12</sup> Para instalarlos necesitamos hacer lo siguiente.

1. Haga clic en la pestaña Archivo, seleccione Opciones y después haga clic en la categoría Complementos.
2. En el cuadro Administrar, haga clic en Complementos de Excel y después en Ir. Aparecerá el cuadro de diálogo Complementos.
3. En el cuadro de diálogo Complementos, haga clic en Examinar. Aparecerá un cuadro de diálogo en el que seleccionará los complementos OPTIMIZE.XLA y COMBINATORICS.XLA.
4. Active la casilla situada junto al complemento que desea activar y luego haga clic en Aceptar.

---

<sup>12</sup> Ver enlace: [http://bit.ly/Complementos\\_Excel](http://bit.ly/Complementos_Excel)

Ahora aparece en la barra de herramientas de Excel la pestaña Complementos y con ella una Opción de nombre: OR\_MM

### Creación de Hoja de Cálculo

A continuación en una hoja en blanco de Excel, procedemos crear la Hoja de Cálculo, para esto realizamos lo siguiente:

1. Haga clic en la pestaña COMPLEMENTOS
2. Seleccione OR\_MM
3. Y después haga clic en TSP

Aparece un cuadro de diálogo (Ver Ilustración 11) que se completara dependiendo de los parámetros especificados.

The image shows a dialog box titled "Network Form" with a close button (X) in the top right corner. The dialog contains the following elements:

- A text area labeled "Traveling Salesman Problem".
- Buttons for "OK" and "Cancel" in the top right.
- A "Name" field containing "TSP\_1".
- A "Number of Cities" field containing "16".
- An "Arc Lengths" section with four radio button options: "Arbitrary" (selected), "Symmetric", "Euclidean", and "Eucl. Formula".
- An "Optimization" section with two radio button options: "Maximize" and "Minimize" (selected).
- Checkboxes for "Random" and "Integer".
- A "Density (%)" field containing "100".

*Ilustración 11 - Creación de Hoja de Cálculo: Selección de Parámetros Iniciales*


*Fuente: Elaboración Propia*

Por ejemplo, completaremos la creación de la Hoja de Cálculo para la instancia ULYSSES16, Ver Ilustración 11.

**Parámetros para la creación**

1. Cantidad de destinos: Escribimos la cantidad de puntos que contiene la ruta a evaluar.
2. Tipo de Problema: Dependiendo del tipo de datos que se tengan se seleccionara entre los cuatro tipos de problema.
  - a. Arbitrary: Si las distancias no cumplen ningún patrón en específico.
  - b. Symmetric: Si la distancia para ir del punto A al punto B es igual a la distancia para ir del punto B al punto A.
  - c. Euclidean: Si se desea graficar los puntos, ubicando las coordenadas.
  - d. Eucl. Formula: Si las distancias serán calculadas por medio de la fórmula de distancia entre dos puntos euclidianos.
3. Optimización: La función objetivo será siempre minimizar.
4. Otros parámetros: Solo sirven para tipos de formatos de los datos.

Al finalizar damos clic en OK y aparece una hoja como la siguiente (ver figura 12).

Traveling Salesman Problem																		
 Search	<b>Optimize</b>	<b>Objective</b>			<b>Feasible</b>													
	Name	TSP_1	Dir.	Min	State	#####												
	Search Method		Value	0	Value	0												
	Problem	TSP	Algorithm	None														
	From Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Name	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17-ret.
	To Node	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	1
	Sequence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Obj. Terms	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C(To,From)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	0
	2	0	***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***
	3	0	0	***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***
	4	0	0	0	***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***
	5	0	0	0	0	***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***
	6	0	0	0	0	0	***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***
	7	0	0	0	0	0	0	***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***
	8	0	0	0	0	0	0	0	***	0	0	0	0	0	0	0	0	***
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	***	0	0	0	0	0	0	0	***
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***	0	0	0	0	0	0	***
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***	0	0	0	0	0	***
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***	0	0	0	0	***
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***	0	0	0	***
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***	0	0	***
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***	0	***
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***	***
	17	***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	***

**Ilustración 12 - Creación de Hoja de Cálculo, Ejemplo 16 Nodos**

*Fuente: Elaboración Propia*

## Matriz de Distancias y Hoja de Cálculo

### Matriz de Distancias

Si contamos con una Matriz de Distancias, si es el caso en el que se calculó las distancias por separado. Entonces lo que debemos hacer es copiar y pegar los valores adecuadamente. Siempre que se elabore seleccione una cantidad N de puntos la tabla ubicará N+1 puntos en la Matriz de Optimización, esto último porque agrega un nodo para el origen. Éste debe de estar incluido en la Matriz de Distancias. Pero lo que se debe hacer es ubicarlo en la última fila. Y además el primer nodo en la Matriz de Optimización debe de estar vacío.

### Eucl. Formula

Si se seleccionó el Tipo de problema Fórmula Euclidiana, entonces en las últimas dos columnas de la Matriz de Optimización se deben de ubicar las coordenadas cartesianas de los nodos. Recordando que el nodo 1 y el último deben de tener la misma coordenada. Las distancias serán automáticamente calculadas en la Matriz de Optimización.

Por ejemplo en la Ilustración 13, en las filas K y L se ubican las coordenadas cartesianas de los 6 nodos, observe que la coordenada del nodo 1 y nodo 7 son las mismas.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Traveling Salesman Problem											
2												
3			Search									
4												
5												
6			Map									
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												

Ilustración 13 - Utilización de la Hoja de Cálculo dadas las Coordenadas Cartesianas

Elaboración Propia

### 6.3. Parámetros para corrida

Una vez presentes las distancias de los puntos en la Matriz de Optimización se hará clic en el Botón rojo de nombre Search (Ver Ilustración 13), y aparece un cuadro de diálogo (Ver Ilustración 14).

#### Parámetros

1. Search Method: Se selecciona el método de búsqueda, según los resultados del Estudio Comparativo se utilizara el Algoritmo Greedy.
  - a. Exhaustive: Cuando se desee encontrar la solución óptima por fuerza bruta. No se recomienda cuando se tienen más de 8 ciudades.
  - b. Random: Genera una solución aleatoria.
  - c. Current Solution: Busca una solución a partir de una solución dada.
  - d. Greedy Solution: Algoritmo que garantiza una buena solución en un tiempo razonable.
2. Time Limit (Sec): Se establecerá en 100 segundos.
3. Improve

- a. n\_change: Éste dato se modificará cuando se seleccione el Algoritmo Greedy. Se establecerá en 2.

The image shows a dialog box titled "Search Method" with a close button (X) in the top right corner. The dialog contains the following fields and controls:

- Name:** A text box containing "TSP\_1".
- Search Method:** A list box with five radio button options: Exhaustive, Fibonnaci, Random, Current Solution, and Greedy Solution (which is selected).
- Show Number:** A text box containing "20".
- Sort Solutions:** A checked checkbox.
- Time Limit (Sec):** A text box containing "100".
- Infeas. Weight:** A text box containing "10".
- Improve:** A checked checkbox.
- Greedy Solutions:** A text box containing "1".
- Optimization:** A list box with two radio button options: Maximize and Minimize (which is selected).
- n\_change:** A text box containing "2".
- Change:** A text box containing "1".
- Buttons:** "Next", "OK", and "Cancel".

*Ilustración 14 - Parámetros para la Corrida*

*Fuente: Elaboración Propia.*

Una vez completados los Parámetros de Corrida se hace clic en OK. El Algoritmo empieza a correrse y posteriormente obtendremos la solución y ruta propuesta.

En algunos casos a veces aparece un mensaje de confirmación al cual se le debe de dar clic en Aceptar.



## 6.4. Resultados

### Solución

El Valor del recorrido está dado en la Casilla F5, Ilustración 14 es la distancia recorrida para completar el viaje. Para el caso ilustrado nos da 6803.67 unidades métricas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Traveling Salesman Problem																			
2																				
3		Search	Optimize	Objective		Feasible														
4			Name	TSP_1	Dir.	Min	State	#####												
5			Search Method	Greedy	Value	6803.67	Value	0												
6			Problem	TSP	Algorithm	None														
7			From Node:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
8			Name	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x1-ret.
9			To Node	3	4	2	8	11	15	6	14	10	16	9	7	12	13	5	17	1
10			Sequence	1	3	2	4	8	14	13	12	7	6	15	5	11	9	10	16	17
11			Obj. Terms	491.06	451.545	130.105	274.997	1457.75	297.081	124.42	462.305	328.776	584.613	1358.76	175.077	40.217	72.5159	410.071	144.369	0
12																				
13																				

Ilustración 15 - Resultados de Corrida

Elaboración Propia

### Ruta

La Ruta encontrada es la que aparece al comparar la fila "From Node" (Fila 7) con la fila "To Node" (Fila 9), ver la Ilustración 13. De modo que en el caso ilustrado el recorrido nos lleva a la siguiente configuración:

Tabla 32 - Resultados - Configuración de la Ruta

Del Nodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Al Nodo	3	4	2	8	11	5	6	15	10	12	9	13	16	7	14	17	1

Elaboración Propia

### Otras soluciones

También se presentan otras soluciones que se acercan a la propuesta y que pueden ser motivo de interés. Además se presentan estadísticas como el tiempo de corrida en segundos. Ver Ilustración 16.

**Creación de un manual para la selección de una ruta de distribución usando el Problema del Agente Viajero mediante una hoja de cálculo en Excel tomando como referencia la empresa Antojitos Leoneses**

<b>Best Obj.:</b>	6804	Greedy Sol. with Improvements																		
<b>Search time:</b>	0.441	seconds																		
<b>Runs:</b>	5157	num.:	243	Imp.:	4914															
<b>Complete:</b>	100%																			
<b>Stop Interval:</b>	10																			
<b>Sorted Feasible Solutions</b>																				
	Run	Obj.	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x1-ret.	
	2380	6804	3	4	2	8	11	15	6	14	10	16	9	7	12	13	5	17	1	
	5157	6804	3	4	2	8	11	15	6	14	10	16	9	7	12	13	5	17	1	
	2373	6940	10	3	16	2	15	7	12	4	11	9	5	13	14	8	6	17	1	
	547	7040	7	3	16	2	11	15	6	4	10	12	9	13	14	8	5	17	1	
	350	7134	15	3	16	2	11	5	6	4	10	12	9	13	14	8	7	17	1	
	313	7376	15	3	16	2	6	7	11	4	10	12	9	13	14	8	5	17	1	
	306	7430	15	3	16	2	6	7	11	4	10	12	9	14	8	13	5	17	1	
	280	7494	15	3	16	2	6	7	11	4	10	14	9	13	8	12	5	17	1	
	271	7533	15	3	16	2	6	7	10	4	11	9	14	13	8	12	5	17	1	
	259	7700	15	3	16	2	6	14	12	4	11	9	7	13	8	10	5	17	1	
	230	7849	15	3	16	2	11	7	12	4	6	9	14	13	8	10	5	17	1	
	221	7922	11	3	16	2	15	7	12	4	6	9	5	13	8	10	14	17	1	
	207	8013	11	3	8	2	15	7	12	17	6	9	5	13	16	10	14	4	1	
	200	8041	11	3	8	2	15	7	13	17	6	9	5	16	12	10	14	4	1	
	193	8335	11	3	8	2	15	13	12	17	6	9	5	16	7	10	14	4	1	
	192	8412	11	3	8	2	15	12	13	17	7	9	5	16	6	10	14	4	1	
	186	8424	11	3	8	2	15	12	6	17	13	9	5	16	7	10	14	4	1	
	178	8572	11	3	8	2	15	9	6	17	16	12	5	13	7	10	14	4	1	
	174	8591	11	3	8	2	15	9	6	17	10	4	5	13	7	16	14	12	1	
	173	8599	11	3	8	2	15	9	6	17	10	4	5	16	12	13	14	7	1	

**Ilustración 16 – Otras Soluciones de la Instancia ULYSSES16**

Elaboración Propia

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

Una vez concluido el estudio comparativo y haber realizado la descripción del sistema de distribución de la empresa “*Antojitos Leoneses*” se han alcanzado las siguientes conclusiones:

Se comprobó la dificultad que tiene el TSP a medida que el problema en estudio presenta mayor número de puntos de distribución, esto es notorio básicamente en dos variables que controlamos a lo largo del estudio, calidad y tiempo de cómputo.

En cuanto a la calidad de la respuesta se puede decir con suma certeza que es inversamente proporcional al aumento de puntos de distribución, debido a que se perdía calidad en las respuestas a medida que los puntos aumentaban.

Sin embargo, el tiempo de cómputo es directamente proporcional a la cantidad de puntos de distribución, puesto que a medida que las instancias suman mayor cantidad de puntos de distribución este también aumenta.

Entre los algoritmos de estudio el que se presenta como una mejor alternativa ante estos dos factores es el *Greedy Algorithm*, el cual es recomendado para instancias de gran tamaño siempre y cuando se desee manejar un nivel de confianza del 93% que es el que se ha utilizado para este estudio.

El algoritmo *Two-Way Inchange Improvement* puede ser utilizado para instancias pequeñas siempre y cuando se desee un nivel de confianza de 90% en el nivel de calidad de las respuestas. El resto de algoritmos demostraron ser moderadamente buenos siempre y cuando se maneje un nivel de confianza bajo y las instancias cuenten con pocos puntos de distribución.

Para este estudio se ha logrado georreferenciar los puntos de distribución de la empresa “*Antojitos Leoneses*” trabajo alcanzado a partir de la herramienta de Google Maps, se logró armar una tabla de latitud y longitud para cada uno de los

puntos de distribución, insumo que sería utilizado tanto para la tipificación de la empresa como para la elaboración de la propuesta realizada para la empresa.

Hemos hecho un estudio del sistema de distribución que presenta la empresa “*Antojitos Leoneses*”, mostrando que las características presentes que deben considerarse para replicar esta investigación en otra empresa son: un solo vehículo de distribución, tener más de un punto de distribución, puede entregar a gran cantidad de clientes en un día, clientes en la ruta previamente seleccionados.

Igualmente a partir de este estudio se encontró una mejora del 7.8% al sistema actual de distribución de la empresa, porcentaje relativamente bajo pero al mismo tiempo es significativo debido a que al haber pocas rutas con pocos puntos de distribución es fácil alcanzar el óptimo a partir de método empíricos, por eso esta mejora representa un logro para la empresa.

Las distancias propuestas por el Greedy Algorithm a través de los complementos de Excel son distancias euclidianas por lo que no toman en cuenta la distribución de las calles, tráfico y otros factores que hay que tomar en cuenta para elegir la ruta más apropiada.

Por último se ha elaborado un *Manual de Selección de Ruta* el cual está destinado para todas las empresas que estén dentro de una tipificación parecida a la de la empresa “*Antojitos Leoneses*”, en él se explica los siguientes detalles:

- Elaboración de la matriz de distancias.
- Elaboración de hoja de cálculo para selección de ruta.
- Parámetros para la corrida.
- Resultados.

Con estos capítulos queda claro el procedimiento para poder resolver el problema del TSP a partir de complementos de Excel que permiten la utilización del Greedy Algorithm e igualmente es una guía para una correcta interpretación de los resultados.

## 7.2 Recomendaciones

A partir de estas conclusiones alcanzadas en este estudio se realizan las siguientes recomendaciones:

- Recomendamos el Greedy Algorithm, presente en los complementos *optimize* y *combinatorics* de Excel, para la resolución del TSP en instancias menores a 50 puntos de distribución, ya que una instancia mayor disminuye los niveles de calidad de la respuesta brindada por el algoritmo.
- Se sabe que la situación presente en la empresa “Antojitos Leoneses” no es igual en muchas empresas, por eso se considera necesario crear herramientas que faciliten el diseño de rutas para microempresas con gran cantidad de puntos de distribución, por lo cual hemos diseñado un **Manual de selección de ruta** que muestra el procedimiento apropiado para hacer uso de los complementos de Excel (*optimize*, *combinatorics*).
- Se recomienda que las rutas diseñadas a partir de los complementos de Excel sean evaluadas posteriormente con un GPS o alguna otra herramienta como Google Maps, esto debido a que las rutas planteadas están basadas en distancias euclidianas y no toman en cuenta factores externos que deben ser incluidos en la toma de decisiones.

## CAPÍTULO VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Banco Mundial. (8 de Febrero de 2013). *Logística y transporte: gran camino por recorrer en Centroamérica*. Obtenido de Banco Mundial: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2013/02/07/logistica-transporte-en-centroamerica>
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2001). *Introduction to Algorithms*. Massachusetts: The Massachusetts Institute Technology.
- Davendra, D. (Diciembre de 2010). *Traveling Salesman Problem, Theory and Applications*. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia: InTech.
- Flores, A. F. (2009). *Estudio Comparativo de Algoritmos Genéticos y Algoritmos de Búsqueda Tabú para la resolución del Flow Shop Problem*.
- Martí, R. (2001). *Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria*. Valencia, España.
- Taha, H. A. (2004). *Investigación de Operaciones, 7a. edición*. Mexico: Pearson Educación.

## ANEXOS

### ***Anexo 1 - Lista de Archivos anexos al disco***

- Los datos de cada punto de distribución (latitud, longitud), junto con la Matriz de Distancia y resolución de cada una de las cuatro rutas de la Empresa Antojitos Leoneses, ha sido añadidos a anexos disco, en la carpeta: “*Antojitos Leoneses*”.
- Los datos para llevar a cabo el estudio comparativo, junto con los reportes generados por los optimizadores para cada una de las Instancias internacionales, ha sido añadido a anexos disco, en dos carpetas: “*Instances\_distanciasEuclidianas*” y “*Instances\_posicionGeografica*”.
- Los complementos de Excel necesarios para la resolución de los problemas, han sido añadidos a anexos disco, carpeta: “*Complementos*”.
- Alguna parte de la bibliografía digital para realizar éste trabajo también ha sido añadida a anexos disco, carpeta: “*Bibliografía*”.

## Anexo 2 - Camión de distribución de la empresa Antojitos Leoneses





### Anexo 3 - Productos de la empresa Antojitos Leoneses

