



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE BOGOTÁ

FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE POSGRADOS

## PRESENTACIÓN PROPUESTA

TESIS DE MAESTRÍA:  TRABAJO FINAL DE ESPECIALIZACIÓN:

1. PROPONENTE: Gabriela Alfonsina Salamanca Fajardo

CÓDIGO: 299625

2. PROGRAMA: Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación

3. DIRECTOR PROPUESTO: Luis Fernando Niño, Ph.D.

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Sistemas

ASESORES:

4. TÍTULO: Modelo de Planeación de Rutas Vehiculares para Recolección de Desechos utilizando Técnicas Híbridas de Inteligencia Computacional

ÁREA: Ciencias de la computación

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Sistemas Inteligentes

5. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN:

La recolección de desechos involucra una serie de elementos que cumplen una función primordial en este problema. Éste servicio debe ser proporcionado en un área de población específica distribuida geográficamente a través de unas rutas de recolección, que deben ser planteadas de acuerdo a los tipos de clientes, para ello los clientes deben ser agrupados teniendo en cuenta el itinerario de cada uno de ellos. Los tipos de clientes se establecen de acuerdo a la cantidad y el tipo de desechos que producen. Actualmente se están aplicando algunas soluciones que no son muy eficientes, debido a que las rutas generadas no son balanceadas para cada vehículo recolector, motivo por el cual algunos clientes no son

atendidos dentro del tiempo establecido, el tiempo de respuesta del sistema no es eficiente, entre otros inconvenientes.

Es por ello que desde hace algunos años, desde el área de transporte la planeación de Rutas ha sido un problema de gran interés en diversas áreas, debido a la complejidad que éste presenta. Las investigaciones en éste ámbito, se deben fundamentalmente a los costos generados en la recolección o entrega de artículos a clientes desde un depósito o almacén [1][2][3] esto implica costos en el área logística, tales como la inversión en la flota de transporte, el mantenimiento de ésta, la amortización, el combustible, seguros de los vehículos, contratación de conductores, para lo cual se han proporcionado diversas soluciones que permitan la minimización de costos.

Los estudios realizados en ésta área se han centrado básicamente en dos problemas principales, como lo son el Problema del Agente Viajero (TSP por sus siglas en inglés "Traveling Salesman Problem") y el Problema de Planeación de Rutas Vehiculares (VRP por sus siglas en inglés "Vehicle Routing Problem"). El primero de ellos es el problema del Agente viajero (TSP), el cual ha sido catalogado como un problema NP-completo debido a que el esfuerzo computacional que se debe realizar para encontrar una solución óptima crece de forma exponencial con el tamaño del problema. Este problema puede ser expresado así: dado un grafo etiquetado de  $N$  vértices (ciudades) se debe encontrar el camino o ruta más corta (o de menor peso), que partiendo desde un vértice origen, pase por todos los vértices y lo haga sólo una vez. Para poder evaluar cuál será el camino más corto, todas las aristas existentes entre los vértices tendrán un valor que indicará, por ejemplo, la longitud (peso) entre dos ciudades (Ver Figura 1).



Fig. 1. Representación gráfica del TSP

El TSP ha sido visto desde diversas perspectivas [4] que han surgido teniendo en cuenta algunas restricciones, tales como que cada cliente debe ser atendido dentro de un determinado intervalo de tiempo (ventana de tiempo), que los puntos de suministro o depósitos sean varios (problema VRP con múltiples depósitos), que los clientes sean abastecidos por varios vehículos, que algunos datos del problema sean aleatorios tales como el número de clientes, sus demandas, etc.; que las entregas se realicen en determinados días. Bajo éstas restricciones se tienen algunas de las variantes de éste problema, las cuáles han sido objeto de algunos trabajos tales como el TSP Nómada en línea (NOLTSP), TSP Homing en línea (H-OLTSP), el TSP con tiempo de finalización (Deadline-TSP), el TSP de k-entregas. Por otro lado, el problema de rutas vehiculares también ha sido bastante estudiado y sobre este también se han desarrollado trabajos como el problema de rutas de vehículos capacitados (CVRP), los problemas de rutas vehiculares con ventanas de tiempo (VRPTW). Para el TSP se han propuesto múltiples soluciones [5].

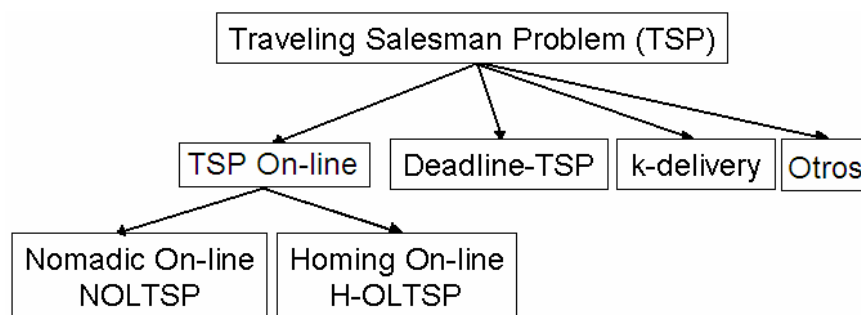


Fig. 2. Variaciones del TSP

En la figura 2 se muestran las diferentes variantes del TSP, las cuales trabajan el mismo problema pero teniendo en cuenta diferentes restricciones.

Un modelo para el problema del agente viajero en línea "OLTSP" [6] es presentado, donde se consideran dos versiones del problema, el Nomadic On-line Travelling Salesman Problem (NOLTSP) que es definido como el tiempo de finalización requerido para atender todas las solicitudes presentadas, y el Homing On-line Travelling Salesman Problem - (H-OLTSP), definido como la minimización de tiempo de finalización requerido para servir todas las peticiones presentadas y retornar al origen. Los algoritmos On-line para los problemas N-OLTSP y H-OLTSP determinan el

comportamiento del servidor en un momento determinado como una función de todas las peticiones.

Por otro lado, la versión del problema del Agente Viajero con tiempo límite "Deadline-TSP" implica que existe un número de ubicaciones que se deben visitar, pero esta visita sólo puede ser realizada dentro del tiempo que tiene cada punto a ser visitado. Este problema en forma general también es llamado problema de rutas de vehículos con ventana de tiempo. Se expone una aproximación en [7] para el caso general con terminación o ventanas de tiempo arbitrarias. Algunos algoritmos de aproximación basados en el problema de orientación, son propuestos para la solución de los problemas anteriormente descritos.

En contraste, otra variación del problema consiste en el transporte de un artículo desde un conjunto de distribuidores a un conjunto de puntos de demanda, usando un vehículo de capacidad limitada y calculando una ruta de longitud mínima, empezando y terminando en un lugar fijo. Una generalización del Problema del Agente Viajero (TSP) es el k-delivery TSP, el cual es referido en [8], donde si un carro puede tomar siempre la ruta más corta entre dos puntos cualquiera satisface la desigualdad triangular.

Otros trabajos realizados acerca de este problema son por ejemplo el k-traveling repairman problem [9] donde la meta es encontrar las rutas o viajes sobre los cuales se envía al técnico que minimice el promedio de tiempo que un cliente tiene que esperar para que el técnico llegue, asegurando que todos los clientes se atiendan. Un trabajo desarrollado para las bibliotecas ambulantes [10], vehículos especialmente diseñados para poder transportar material bibliográfico a lugares donde no es posible acceder a ello, para el cual se desarrolló un modelo basado en programación entera estándar. Estas bibliotecas contienen variedad de material tal como libros impresos, periódicos, audiolibros y música.

En el ámbito de planeación otro de los problemas más tratados es el de rutas vehiculares o VRP que al igual que el TSP también tiene algunas variaciones con respecto a las restricciones [11]. El objetivo principal del VRP es atender un conjunto de clientes con una demanda por servicio a un costo mínimo a través de rutas que tienen un origen y un término en un depósito central. Este problema típicamente considera una flota de vehículos ubicados en un depósito central que pueden ser programados con el fin de proveer algún tipo de servicio a clientes geográficamente dispersos en una región a

atender. Así, estos problemas consideran el diseño de rutas de atención (distribución o recolección) desde uno o más depósitos centrales a un conjunto de clientes dispersos. Se pueden definir varias versiones del problema, dependiendo del número de factores, restricciones y objetivos, donde se dispone de situaciones donde: El problema puede ser de distribución, recolección o ambos, la distribución se lleva a cabo desde uno o varios depósitos y los clientes se deben atender dentro de una ventana de tiempo.

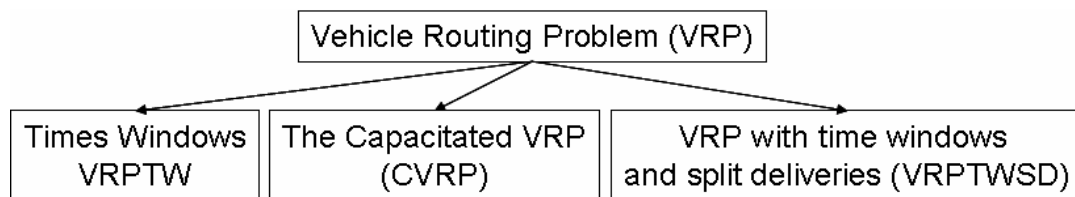


Fig. 3. Variaciones del VRP

En la figura 3 se muestra un esquema de las relaciones entre las variantes de este problema de planeación con base en un análisis de la literatura consultada al respecto.

El problema de Planeación de Rutas con ventanas de tiempo implica la existencia de un límite o intervalo de tiempo dentro del cual un cliente debe ser atendido. Una aproximación heurística robusta es propuesta en [12] para el problema de rutas de vehículos con ventanas de tiempo, usando un algoritmo genético. El principal objetivo es minimizar la distancia. En los resultados presentados, el comportamiento de métodos heurísticos fue comparado con métodos exactos en términos de encontrar un óptimo global, robustez y esfuerzo computacional, usando las mismas suposiciones para la precisión del cálculo y la definición de la función objetivo.

Desde el problema clásico del Problema del Agente Viajero (TSP) se consideraron dos variaciones, una de ellas se caracteriza porque los objetos deben ser entregados desde un punto fuente hasta su destino por un vehículo de capacidad finita, y los puntos que serán visitados, podrían estar en movimiento con una velocidad conocida. Algunos de los trabajos relacionados son por ejemplo, El problema de Rutas de Vehículos con Capacidad limitada (CVRP por sus siglas en inglés "*Capacitated VRP*") [13]; en este problema se tiene un conjunto de puntos en un espacio métrico, un

grupo de vehículos de cierta capacidad y una colección de rutas de vehículos empezando en un origen, que deben ser recorridas por cada vehículo.

De otro lado, se tiene una variación que incluye ventanas de tiempo y entregas divididas (VRPTWSD por sus siglas en inglés "*VRP with time windows and split deliveries*"), para una escuadra de vehículos homogéneos estacionados en un almacén central y un conjunto de clientes requiriendo que sus demandas sean satisfechas, se deben encontrar las rutas de los vehículos empezando y terminando en el almacén cuando cada cliente sea visitado. Para la solución de este problema [15] proponen una búsqueda heurística tabú con cuatro diferentes estructuras de vecindad. Este problema también es abordado con el estudio del poliedro asociado al Problema de Rutas de Vehículos con Demanda Compartida [16], problema de distribución que surge cuando hay que repartir mercancías a un conjunto de clientes utilizando una flota fija de vehículos de capacidad limitada. El objetivo es diseñar las rutas de forma que se minimice la distancia total recorrida. Se diferencia de otros problemas más conocidos de rutas con capacidades en que se permite abastecer la demanda de cada cliente utilizando más de un vehículo.

También se considera el Multi-depot VRP, para el cual se tienen diversos depósitos desde donde los vehículos pueden partir y regresar. En [17] se enfoca principalmente en la asignación (agrupamiento) de los clientes a los almacenes, y compara los resultados obtenidos por seis heurísticas con asignación (asignación a través de urgencias, asignación paralela, asignación simplificada y barrido de asignación) obtenidos para resolver un problema de transporte para los mismos casos.

Las investigaciones en éste ámbito continúan, debido a la necesidad de obtener mejores soluciones; por tal razón, percibiendo las necesidades actuales para el problema mencionado anteriormente, no existe una solución definitiva. Por consiguiente, se tomará como caso de estudio la ciudad de Bogotá, pero se espera que la metodología y el enfoque puedan ser empleados para dar solución a este problema en otras ciudades del mundo.

Para obtener la información correspondiente, se contará con la colaboración de la empresa desarrolladora de software Maintask, que desarrolló una aplicación que actualmente se encuentra en producción para la empresa Ciudad Limpia, que proporciona un servicio de recolección de desechos, y en la actualidad cuenta con 7000 clientes (cantidad que puede incrementar) y con 10 camiones recolectores.

## 6. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA:

El problema fundamental radica, entonces, en la generación de las rutas de recolección de desechos, debido a que aunque la planeación de rutas ha sido un problema ampliamente desarrollado a nivel de investigación, en algunas de sus variaciones aun persisten problemas por resolver.

Actualmente, la empresa Ciudad Limpia cuenta con un Sistema de Información Geográfico que contiene los datos espaciales de la ubicación de los clientes. Los camiones recolectores tienen un dispositivo GPS que les permite enviar a la estación base la cantidad de desechos recolectados, la hora de llegada y la hora de partida, para tener un control de cada uno de los camiones, que dentro del sistema son estaciones móviles que interactúan con la estación base, quien monitorea los vehículos y proporciona una ruta de recolección. Las rutas de recolección se pueden ver afectadas por usuarios nuevos o por usuarios temporales o transitorios. Existe la posibilidad que por falta de tiempo no se alcance a abastecer a todos los clientes, por tanto, estos clientes quedan pendientes y se deben atender al día siguiente. La capacidad de cada vehículo no es contemplada en este problema debido a que la carga diaria no sobrepasa la capacidad del vehículo.

Por consiguiente, existen dos tipos de restricciones contempladas en el problema, las de tipo temporal están relacionadas con el horario de las visitas a los usuarios, debido a que algunos tienen una hora fija establecida y en la cual se les tiene que realizar el servicio, y otros permiten un rango de horario más amplio. Adicionalmente, las rutas se deben calcular cada quince días y ser informadas a los clientes por escrito. Los días festivos deben ser previstos en la planeación, debido a que para clientes pequeños se puede presentar desfase, para ello se pueden reprogramar clientes pequeños para su recolección en los días anteriores o posteriores al festivo.

Los usuarios se encuentran ubicados en un área geográfica extensa, como lo es la ciudad de Bogotá, para lo cual el sistema debe agrupar los clientes que se encuentren más cerca, con el fin de que se puedan abastecer a los usuarios en su fecha y horario predefinido. Las vías principales están siendo usadas como límites naturales para generar zonas donde se realiza un agrupamiento por periodicidad de recolección, este agrupamiento se efectúa actualmente con el algoritmo K-means y la generación de rutas con el algoritmo de Dijkstra.

Los problemas de planeación expuestos anteriormente, y sus variaciones, permiten encajar este problema de investigación como un Problema del Agente viajero con tiempo de finalización, que en otras palabras, es un Problema de Rutas de Vehiculares con ventanas de tiempo, aclarando que existen algunas restricciones adicionales mencionadas inicialmente, de tal manera que se deben encontrar rutas con costo mínimo, de tal manera que la demanda de cada cliente debe ser satisfecha, cada cliente debe ser visitado por un vehículo y cada cliente debe ser visitado dentro de la ventana de tiempo asignada, minimizando la distancia total recorrida, generando rutas diarias balanceadas para cada vehículo y el tiempo de respuesta del sistema.

## 7. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

### *Objetivo General:*

Desarrollar un modelo de rutas de recolección de desechos usando técnicas híbridas de inteligencia computacional.

### *Objetivos Específicos:*

1. Definir un modelo que permita la generación de rutas para el problema de recolección de desechos en una ciudad.
2. Implementar un Prototipo del sistema para la generación de rutas vehiculares en el problema de recolección de desechos para una ciudad.

## 8. METODOLOGÍA

En la primera etapa se realizará una revisión del estado del arte en Planificación de Rutas para identificar tanto los diferentes subproblemas asociados, como las técnicas y enfoques con que se han abordado. También se revisará la literatura de temas relacionados que proporcionen herramientas para el diseño de la solución. Se realizará un análisis de los enfoques usados y del problema a resolver antes de proponer un modelo. Luego se procederá a crear el diseño de la solución como tal.

El problema principal a resolver es el agrupamiento de clientes de acuerdo a la cercanía en cuanto a ubicación geográfica y teniendo en cuenta las

restricciones de tipo temporal y espacial, para ello inicialmente se explorarán algunas técnicas de agrupamiento (clustering) existentes, con el fin de ver el rendimiento y eficiencia. Además, se revisarán temas adicionales de computación evolutiva como algoritmos genéticos y redes inmunes. Para el desarrollo de pruebas experimentales se emplearán conjuntos de datos reales proporcionados por la empresa.

Para implementar el sistema para la generación de rutas vehiculares se utilizará una metodología basada en prototipos, de tal manera que para el desarrollo de cada prototipo se realizará análisis de requerimientos, diseño, implementación y pruebas.

## 9. ACTIVIDADES A DESARROLLAR

1. Revisión del estado del arte de Planeación de Rutas.
2. Revisión de las técnicas de agrupamiento.
3. Análisis y subdivisión del problema - análisis de alternativas.
4. Diseño del modelo de Planeación de Rutas de Recolección de Desechos.
5. Diseño del sistema para el agrupamiento.
6. Diseño de la planeación por grupos.
7. Diseño de las Rutas de Recolección.
8. Desarrollo de un prototipo de software.
9. Selección de los conjuntos de datos para la realización de las pruebas experimentales.
10. Diseño de pruebas experimentales.
11. Realización de pruebas experimentales.
12. Análisis de los resultados.
13. Desarrollo del prototipo final.
14. Realización de Pruebas experimentales prototipo final.
15. Análisis de los resultados del prototipo final
16. Elaboración del documento.

## 10. CRONOGRAMA

Actividades / Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Revisión del estado del arte de Planeación de Rutas																				
Revisión de las técnicas de agrupamiento																				
Análisis y subdivisión del problema																				



- [7] N. Bansal, A. Blum, S. Chawla, and A. Meyerson. Approximation algorithms for deadline-tsp and vehicle routing with time-windows, 2004, STOC 2004: 166-174.
- [8] M. Charikar, S. Khuller, and B. Raghavachari. Algorithms for capacitated vehicle routing, SIAM Journal on computing, Volume 31, Number 3, pages 665 - 682, 2001.
- [9] Jittat Fakcharoenphol, Chris Harrelson, and Satish Rao. The k-traveling repairman problem. Symposium on Discrete Algorithms, Proceedings of the fourteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, Maryland, p. 655 - 664, 2003.
- [10] Les Foulds, Stein W. Wallace, John Wilson, and Liv Sagvolden. Bookmobile routing and scheduling in Buskerud county, Norway. Proceedings of Twenty Naught One, the 36th annual meeting of the New Zealand Operational Research Society, Christchurch, New Zealand, November, 2001.
- [11] Alejandro Garcia del Valle. Optimización de rutas, seguridad en el transporte y sistemas GIS. SEMAOL, Noviembre 2004.
- [12] G. de Tomi G. B. Alvarenga, G. R. Mateus. Finding near optimal solutions for vehicle routing problems with time windows using hybrid genetic algorithm. In: Second International Workshop on Freight Transportation - ODYSSEUS 2003, 2003, Mondello. Second International Workshop on Freight Transportation - ODYSSEUS 2003, 2003. v. CD. p. 1-13.
- [13] Prasad Chalasani and Rajeev Motwani. Approximating capacitated routing and delivery problems. SIAM Journal on Computing, 28(6):2133-2149, 1999.
- [14] L. Bianco, A. Mingozzi, S. Riccardelli, and M. Spadoni. Exact and heuristic procedures for the traveling salesman problem with precedence constraints, based on dynamic programming. INFOR, 32(1):19-32, 1994.
- [15] Sin C. Ho and Dag Haugland. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and split deliveries. Department of Informatics, University of Bergen, 5020 Bergen, Norway.
- [16] E. Mota C. Martinez. Del poliedro del agente viajero grafico al de rutas de vehículos con demanda compartida. SORT - QUESTII 'O (ISSN 0210-8054), 24:34, 2000.

[17] Libertad Tansini, Maria Urquhart, and Omar Viera. Comparing assignment algorithms for the multi-depot vrp.

12. RECURSOS FÍSICOS:

1. Computador Pentium M 1.6Ghz, suministrado por el proponente.
2. Conexión a Internet banda ancha 300Kbs suministrado por el proponente.

13. COSTOS DEL TRABAJO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN:

*Costo Equipos y Software*

Concepto	Unidades	Valor	Costo Total	Financiación
Computador	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	Proponente
Software*	0	0	0	
<b>TOTAL COSTO EQUIPOS Y SOFTWARE</b>			<b>\$ 2.000.000</b>	

\* Se usará software libre

*Costo Personal*

Concepto	Horas/profesor	Valor/hora	Costo Total	Financiación
Dirección del proyecto	30	\$50.000	\$ 1.500.000	Unal
Trabajo del proponente	400	\$20.000	\$8.000.000	
<b>TOTAL COSTO PERSONAL</b>			<b>\$ 9.500.000</b>	

*Costo otros Recursos*

Concepto	Unidades	Valor	Costo Total	Financiación
Fotocopias	500	\$ 30.000	\$ 1.500.000	Proponente
Papelería	500	\$ 50.000	\$ 500.000	Proponente
Internet	400(horas)	\$ 1.000	\$ 400.000	Proponente
<b>TOTAL COSTO OTROS RECURSOS</b>			<b>\$ 2.400.000</b>	

**Costo Total del Proyecto: \$ 13.900.000**

14. COMENTARIO CON VISTO BUENO DEL DIRECTOR: (calificar los siguientes aspectos: organización, pertinencia, relevancia y originalidad).

Se propone plantear un problema importante en transporte y recolección, cuya solución no solamente puede ser usada en la situación particular de recolección de desechos, sino que puede ser aplicado en muchas otras situaciones, por lo cual los resultados obtenidos tienen gran aplicación. Dado el grado de complejidad del problema es pertinente que sea elaborado como tesis de maestría, y se propone que en el planteamiento de la solución se empleen técnicas de inteligencia computacional.

15. FIRMA DEL PROPONENTE

---

16. FIRMA DEL DIRECTOR (ASESORES)

---

17. FECHA: 2/11/2006