

APLICACIÓN DE LA HEURÍSTICA DE SPACEFILLING CURVES EN PROBLEMAS DE RUTEO DE VEHÍCULOS (VRP)

Trabajo de Tesis
Presentado al
Departamento de Ingeniería Industrial

por

Guisselle Adriana García Llinás

Para optar al Título de
Maestro en Ingeniería Industrial

Ingeniería Industrial
Universidad de los Andes
February 2005

**APLICACIÓN DE LA HEURÍSTICA DE
SPACEFILLING CURVES EN PROBLEMAS
DE RUTEO DE VEHÍCULOS (VRP)**

Aprobado por:

Germán Riaño, Asesor

Andrés Medaglia, Coasesor

Fecha de Aprobación _____

*A mis madres, mi padre, mis hermanos,
mi familia y amigos,
por su gran apoyo y amor durante toda mi vida.*

PREFACIO

De un momento a otro la vida cambia y comienza a ser difícil. Afortunadamente tengo la suerte de contar con personas tan especiales que facilitan mi existir y me brindan aquellas ganas de ser cada día mejor. Todos ellos ocupan un lugar especial en mi vida y se han convertido en mi mayor inspiración para alcanzar esta meta. Lograrlo hoy me llena de emoción y me lleva a soñar todavía más lejos.

RECONOCIMIENTOS

Son muchas las personas que tienen cabida en este pequeño pero significativo lugar. A todas ellas miles y miles de gracias por sus palabras de apoyo, comprensión e incluso regaño, que concluyeron en este sueño hecho realidad.

Germán Riaño, por su paciencia, colaboración y por supuesto por todos sus conocimientos en la materia.

Andrés Medaglia, por sus aportes, su atención y colaboración.

Carlos Paternina, por su apoyo y consejos incluso después de dejar de ser su alumna. Su enorme disposición para dedicar una parte de su tiempo a atender este proyecto.

Cada uno de los profesores de la maestría, que son expertos cada uno en su tema y que nos tratan de guiar por el interesante camino de la investigación.

Cada uno de los profesores de mi pregrado, que impulsaron en mí el cariño por la carrera y las ganas de realizar un estudio posterior.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	III
PREFACIO	IV
RECONOCIMIENTOS	V
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
III. MARCO TEÓRICO	5
3.1. Sistemas de Logística	5
3.2. Sistemas de Ruteo de Vehículos	8
3.2.1. Métodos Tradicionales de Resolución de Problemas de Sistemas de Ruteo de Vehículos	12
3.2.2. Métodos Alternativos para la Resolución de los Problemas de Sistemas de Ruteo de Vehículos	13
3.3. Ampliación de la Técnica de Spacefilling Curves para la Resolución de Problemas de Sistemas de Ruteo de Vehículos	18
3.3.1. Definición de las Spacefilling Curves	19
3.3.2. Implementación de la técnica	20
3.3.3. Ventajas de la técnica	23
3.3.4. Desventajas de la técnica	25
3.4. Aplicaciones en la literatura	25

IV. APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE SPACEFILLING CURVES PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE SISTEMAS DE RUTEO DE VEHÍCULOS	30
4.1. Descripción del Sistema de Transporte de un Colegio de la Ciudad de Bogotá	33
4.2. Descripción de la Metodología de Evaluación de la Técnica de Spa- cefilling Curves	35
4.3. Descripción de la Implementación de las Técnicas requeridas	39
V. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	44
5.1. Presentación de los Resultados Obtenidos	44
5.2. Análisis de los Resultados Obtenidos	45
VI. CONCLUSIONES	48
VII. TRABAJO FUTURO	51
Apéndice A. — FORMATO DE LOS ARCHIVOS	52
REFERENCIAS	58
VITA	61

LISTA DE TABLAS

LISTA DE FIGURAS

1.	Spacefilling Curve de Sierpinski. Tomada de [3]	20
2.	Ejemplo de ruta hallada a través de la Spacefilling Curve de Sierpinski. Tomada de [3]	21
3.	Ejemplo de aplicación de la Spacefilling Curve de Sierpinski en la ciudad de Atlanta. Tomada de [3]	28
4.	Denominaciones en la ciudad de Bogotá	31
5.	Divisiones en la ciudad de Bogotá	32
6.	Normalización de los valores de las coordenadas	42
7.	Ejemplo de visualización de resultados en la implementación	43

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

Los problemas de ruteo de vehículos (VRP) pueden ser descritos a través de la tradicional formulación matemática, como la mayoría de problemas del área de Logística. Dicha formulación puede ser apoyada por un paquete optimizador para obtener la solución óptima para la instancia particular que se trate. Sin embargo, por tratarse de un problema del tipo combinatorio caracterizado por tener un espacio de solución bastante amplio para instancias de tamaño real, muchos problemas de la industria se tornan inmanejables por las técnicas tradicionales de optimización.

El problema de ruteo de vehículos es típico en empresas que realicen distribución desde un centro, realicen recolección de basuras, realicen entregas a domicilio o definición de rutas de buses escolares. El objetivo es encontrar la secuencia en que se deben visitar los lugares de manera que se minimice el tiempo o la distancia total de viaje. Sin embargo para este problema la determinación de la ruta óptima en instancias de tamaño real no es práctico pues el tiempo computacionales ha sido muy largo incluso en computadores muy rápidos, tal es que la clasificación en que ingresa este tipo de problema es NP-Hard.

Un enfoque diferente es utilizado por las técnicas metaheurísticas y heurísticas que permiten obtener soluciones razonablemente buenas utilizando un esfuerzo reducido. La metaheurística más prestigiosa para el VRP es Búsqueda Tabú (Tabu Search), mientras que la heurística es Clarke and Wright.

Para este proyecto se propone el uso de una ya antigua pero poco conocida heurística, Spacefilling Curves, para el problema de ruteo de vehículos. Esta técnica es innovadora, de bajo costo computacional y de poco tiempo de respuesta. Además, en comparación con las técnicas tradicionales, permite resolver un problema al introducir, mover o excluir puntos dentro de la red considerada. Se da a conocer la técnica, sus ventajas, su sencilla aplicación a Pymes colombianas, después de haber realizado una adecuación a las características de este entorno.

Se implementa la técnica Spacefilling Curves para resolver el problema en un sistema de transporte escolar localizado en la ciudad de Bogotá. Adicionalmente, se propone una modificación sobre la técnica original para verificar su aplicabilidad en ciudades que posean morfología similar a la de Bogotá. La principal ventaja que parece ofrecer esta ciudad es que está organizada en calles y carreras que en teoría son paralelas entre si y perpendiculares las unas a las otras, por lo que se propone que en vez de usar coordenadas se usen directamente los componente de calle y carrera como coordenadas.

Tras implementar la técnica y comparar los resultados obtenidos utilizando como medida del desempeño a la longitud total recorrida contrastada con la ofrecida por la heurística de Clarke and Wright, se evidencia la veracidad de las afirmaciones, en cuanto a desempeño, realizadas por uno de sus proponentes que habla de un error del 25 %. Respecto a la modificación propuesta se encuentra que para las instancias evaluadas se produce un efecto bastante negativo que deteriora la solución en cerca de un 25 % adicional.

Se concluye que la técnica Spacefilling Curves no tiene la capacidad de competir con aquellas más elaboradas que tienen la ventaja de ofrecer la solución óptima para el tipo de problemas revisado, sino que tiene gran aplicación en pequeñas y medianas empresas en las que ofrece soluciones aceptables a un costo sumamente pequeño. El costo es bajo gracias a a que ni siquiera es obligatorio un esfuerzo computacional para solucionar ni resolver, es bastante rápida y no requiere el manejo de un

gran conocimiento para utilizarla. Se deja en claro que aquellas empresas que posean los recursos físicos e intelectuales deberían optar por utilizar técnicas de superior desempeño como Clarke and Wright.

Se trabaja partiendo inicialmente del conocimiento general que existe en la literatura de la Heurística de Spacefilling Curves para aplicarlo en instancias particulares en las que se buscará además comprobar la validez de las afirmaciones hechas por sus autores. Por lo tanto se presenta una revisión bibliográfica que ahonda en los temas que fueron de mayor interés y soporte para el proyecto. Se continua haciendo una descripción del problema de ruteo del sistema escolar y una descripción de la manera en que se aborda el problema. Las bases de la implementación son descritas después. Finalmente se presentan los resultados, su análisis y las conclusiones del proyecto.

Capítulo II

OBJETIVOS

Los objetivos de este proyecto son:

- Definir el estado del arte en la técnica a estudiar.
- Aplicar la técnica de la heurística de Spacefilling Curves para un problema de ruteo en la ciudad de Bogotá de manera que se verifique la validez de la misma utilizando estrictamente la información contenida en la definición de la dirección.
- Aplicar la técnica de la heurística de Spacefilling Curves para un problema de ruteo en la ciudad de Bogotá de manera que se verifique la validez de la misma utilizando información más precisa que la contenida en la definición de la dirección para medir la mejora lograda.
- Medir la potencialidad en ciudades que poseen características de planificación urbana similares a las de la ciudad de Bogotá.
- Medir los beneficios del uso de las técnicas heurísticas revisadas en un sistema de transporte.
- Medir la calidad de resultados entregados por la heurística de Spacefilling Curves contra otra heurística reconocida de la literatura, Clarke and Wright.

Capítulo III

MARCO TEÓRICO

A continuación se realiza una revisión de la literatura de interés partiendo del contexto general del tema hasta llegar al método que se ha propuesto revisar. El área de logística es bastante amplio, entonces se hace un mayor énfasis en el tema central del trabajo: Problema de Ruteo de Vehículos resuelto utilizando la técnica heurística Spacefilling Curves.

3.1. Sistemas de Logística

Los sistemas de logística comprenden una gran variedad de elementos que deben ser coordinados para obtener el mayor beneficio de la operación de los mismos. Ballou en [1] identifica como los componentes típicos de un sistema de logística a:

- Servicio al Cliente
- Pronóstico de la Demanda
- Comunicaciones de la Distribución
- Control del Inventario
- Manejo del Material
- Procesamiento de las Órdenes
- Soporte de las Partes y Servicios

- Selección de la Planta y Bodegas (Análisis de las ubicaciones)
- Compras
- Empaques
- Manejo de bienes que retornan
- Manejo de desechos
- Tráfico y Transporte
- Almacenamiento

Cada uno de estos temas ha sido ampliamente estudiado en la literatura con el objetivo de determinar técnicas eficaces que permitan aprovecharlo al máximo y alinearlo con la meta general de la logística que es definida en [1] como generar el más alto retorno a la inversión en el tiempo a través del desarrollo de una mezcla de actividades logísticas.

Dependiendo del negocio y la operación de cada sistema es posible identificar algunos componentes como los fundamentales para el negocio mientras que a los otros se les resta importancia.

Normalmente los componentes a los que se les asigna una mayor importancia y consecuentemente los que han sido más trabajados para lograr una planeación correcta según [1] son:

Metas de Servicio al Cliente Que incluye la definición del nivel de servicio al cliente en logística que debe ser provisto, porque es el factor que más influye sobre el diseño del sistema. Bajos niveles dan paso a inventarios centralizados en pocas localizaciones y el uso de los más económicos medios de transporte. Altos niveles de servicio requieren lo opuesto normalmente. Sin embargo, cuando los niveles de servicio son llevados a su límite superior los costos en logística se tornan desproporcionados respecto al nivel de servicio.

Estrategia de Ubicación de las Facilidades La ubicación geográfica de los puntos de distribución y abastecimiento son un tema en el plan de logística. Fijar el número, la ubicación y el tamaño de las facilidades y asignar la demanda del mercado a ellos determinan el camino por el cual los productos son dirigidos al mercado. La esencia de la ubicación de facilidades es encontrar las asignaciones de más bajo costo o alternativamente las de máxima ganancia.

Decisiones de Inventario Estas se refieren a la manera en que los inventarios son administrados. Dos estrategias son: **jalar** el inventario y **empujarlo** según reglas de abastecimiento. Seleccionar la ubicación de los items en la línea de producción en la planta, mantener niveles de inventarios a través de varios métodos y control perpetuo del inventario son otros.

Estrategia de Transporte Las decisiones de transporte incluyen la selección del medio, el tamaño de los envíos, ruteo y programación. Estas decisiones son influenciadas por la proximidad de las bodegas a los clientes que a su vez influyen la ubicación de las bodegas. Los niveles de inventario también responden a las decisiones de transporte a través del tamaño de envío.

Los niveles de servicio del cliente, la ubicación de las facilidades, el inventario y el transporte son las más importantes áreas de planeación en logística debido al alto impacto que tienen en la rentabilidad, flujo de caja y retorno de la inversión de las compañías. Cada area de decisión está interrelacionada con las otras y no debería planearse sin considerar los efectos que causa en las demás.

El transporte en una compañía es usualmente uno de los temas individuales de mayor relevancia como consecuencia de los costos que genera, que se estima se encuentran entre un tercio y dos tercios de los costos totales de logística según menciona Ballou en [1].

Una de las primeras decisiones a tomar en esta área es definir el modo o mezcla de modos de transporte a usar para lo cual es necesario revisar las ventajas y desventajas de cada uno de ellos (agua, tren, camiones, aire y tuberías) frente a las

necesidades de transporte de la compañía y sus productos.

Es necesario también definir las diferentes características que conforman el costo: variable y fijo, común o compartido, relativos al modo de transporte. La definición adecuada de cada uno de estos componentes permite a un analista en logística estimar los costos y finalmente la conveniencia de una medida que se desee aplicar antes de ser aplicada.

En el área de transporte siempre se deseará reducir los costos a través de un aprovechamiento máximo de los recursos disponibles, entre los que se encuentran los medios (camiones, aviones, barcos, trenes, etc). Una de las maneras eficaces de reducir costos de transporte y mejorar el nivel de servicio de los clientes es construir rutas de entrega que minimicen el tiempo o la distancia. Dependiendo del sistema se puede determinar la complejidad de este tipo de decisiones que se sabe que de ninguna manera son triviales.

3.2. Sistemas de Ruteo de Vehículos

Dentro de los problemas que le competen al área de Sistemas de Logística en su componente de Transporte encontramos los Problemas de Ruteo de Vehículos (VRP) que fueron inicialmente descritos por Dantzig y Ramser en 1959. Bowerman en [7] indica que los VRP tienen como objetivo diseñar un conjunto de rutas de entrega para una flota de vehículos desde una bodega central a un conjunto de puntos de demanda teniendo cada uno requerimientos de servicios conocidos de manera que se minimiza la distancia total recorrida por la flota. Todos los vehículos tienen capacidad fija y deben partir y terminar sus rutas en la bodega central. Cada cliente es servido por sólo un vehículo que debe satisfacer por completo la demanda del cliente en una sola visita.

Bartholdi en [3] reconoce como el problema básico de ruteo de vehículos el de coordinar una flota de vehículos para entregar bienes en su destino. Adicionalmente

identifica que algunos de los objetivos que tradicionalmente acompañan al problema son:

- Ubicar los bienes en los vehículos de manera que no sean requeridos muchos camiones.
- Rutear cada camión para reducir el tiempo de viaje.
- Un camión sólo puede llevar un cantidad limitada de volumen de carga.
- El peso de la carga que lleva un camión debe respetar límites especificados por la ley.
- Puede ser posible que la entrega a un cliente se pueda dar únicamente entre un espacio de tiempo definido, que se conoce técnicamente como Ventana de Tiempo.
- Los conductores pueden trabajar por un tiempo limitado.

Adicionalmente en [1] se mencionan otras restricciones que pueden incluirse en el VRP y que le añaden dificultad para su solución:

- Los camiones pueden llevar cargas y volúmenes diferentes entre sí.
- Diferentes velocidades de recorridos.
- Barreras en el recorrido como montañas, ríos, lagos, desvíos.

Ballou [1] tiene la opinión de que hay muchas variaciones que pueden incluirse en un problema de ruteo de vehículos pero que a la larga pueden ser reducidos a unos pocos tipos básicos, que define como:

Origen y destino separados y simples Es el típico problema de rutear un vehículo a través de una red, ha sido resuelto por métodos diseñados especialmente para él. El más simple y conocido es tal vez el Método de la Ruta más Corta (conocido en la literatura como Shortest Path, SP). Este método es descrito

como: Se tiene una red representada por enlaces y nodos donde los nodos son puntos conectores entre los enlaces, y los enlaces son los costos (distancias, tiempos o una combinación de ambos) por viajar entre los nodos.

Orígenes y puntos de destino múltiples Cuando hay varios puntos fuente que deben servir varios puntos de destino es un problema de asignar los destinos a las fuentes así como definir la mejor ruta entre ellos. Es común cuando hay varias bodegas o distribuidores que pueden atender a los clientes. Se puede complicar un poco mas cuando las fuentes tienen un límite de clientes que pueden atender. Un método de solución que es frecuentemente usado es una clase especial del Método de Transporte que es un algoritmo de programación lineal (Ballou, [1]).

Origen y destino coincidentes Es un problema que se presenta típicamente cuando los vehículos para el transporte son propiedad de la compañía por lo que al repartir deben volver. Los ejemplos mas comunes son: reabastecimiento de almacenes de comida o drogas desde un centro de distribución, problema de repartir los periódicos, camiones de recolección de basura, entregas de comidas a domicilio y el ruteo de buses escolares. El objetivo es encontrar la secuencia en que se deben visitar los lugares para que se minimice el tiempo o la distancia total de viaje.

Este problema es generalmente conocido como el Problema del Agente Viajero (Traveling Salesman Problem, TSP) para el que se han propuesto numerosos métodos. Encontrar la ruta óptima para instancias reales no es práctico pues el tiempo computacional en los computadores más rápidos ha sido muy largo. Son más aplicables los procedimientos heurísticos.

Para los puntos que pueden ser espacialmente relacionados, es decir, que se les pueden definir las coordenadas sobre un plano que reduzcan la información requerida para representar un problema, es posible aplicar patrones con la capacidad de reconocimiento de las buenas prácticas que puede hacer la mente humana. Los procedimientos computacionales que tratan de imitar la

operación de la mente humana desarrollan soluciones rápidamente que son muy cercanas a la óptima.

Es muy común encontrar que los problemas de ruteo van incrementando su complejidad a medida que se añaden condiciones o restricciones. Uno de los problemas en ruteo más conocidos en la literatura es el TSP que a pesar de que puede ser descrito de manera muy sencilla, su solución es de alta complejidad por lo que demanda un esfuerzo computacional grande en problemas de tamaño real.

El TSP es formalizado en [3] como: “Dadas n ubicaciones, encuentre un tour de mínima longitud total”. Se aclara que se entiende como un tour como un camino que visita todas las ubicaciones y regresa al origen. Este es una particularización del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP). Una descripción concisa del VRP es presentada por Bowerman en [7] indicando:

Dada una red no dirigida $G(N, A)$ donde N es el conjunto de nodos y A es el conjunto de arcos de la red y con el nodo 0 elegido como el nodo de la bodega. Sea K el conjunto de vehículos, W la capacidad de los vehículos, q_i sea la demanda en el nodo i (donde $0 < q_i < W$) y c_{ij} sea el costo de viajar del nodo i al nodo j . Se define:

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la demanda en el nodo } i \text{ es satisfecha por el vehículo } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } k \text{ viaja desde el nodo } i \text{ al nodo } j, i \neq j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Bowerman indica en [7] que como el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) requiere la solución de varios problemas del agente viajero el problema es de tipo NP-Hard, que según [11] en teoría de la complejidad computacional significa que es “intrínsecamente más difícil que aquellos

que pueden ser resueltos por una Máquina Turing No Determinística en tiempo polinomial”. En una interpretación más sencilla de [24] se menciona que NP-Hard significa “al menos tan difícil de resolver como cualquier problema NP, de hecho podría ser más difícil”.

3.2.1. Métodos Tradicionales de Resolución de Problemas de Sistemas de Ruteo de Vehículos

Los métodos tradicionales se enfocan en utilizar formulaciones matemáticas que incluyen todas las variables y restricciones que representen adecuadamente el problema y resolverlas a través del uso de optimizadores como GAMS, AMPL y EXPRESS.

Una formulación de programación entera para el problema de ruteo de vehículos puede se puede dar así [6]:

$$\text{Minimizar } \sum_{i,j \in N} c_{ij} \left(\sum_{k \in K} x_{ijk} \right) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in N} q_i y_{ik} \leq W, \quad k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = \begin{cases} |K| & i = 0 \\ 1 & i \neq 0, i \in N \end{cases} \quad (3)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i \in N, \quad k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = y_{jk}, \quad j \in N, \quad k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = y_{ik}, \quad i \in N, \quad k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \text{ para todo } S \subseteq \{1, \dots, n\}, \quad k \in K \quad (7)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad k \in K \quad (8)$$

Las restricciones (2) a (4) asignan los nodos a rutas específicas o vehículos mientras que las restricciones (5) a (8) especifican el problema del agente viajero (TSP) para cada ruta. La restricción (3) garantiza que cada nodo es servido por un vehículo excepto para la bodega que es servida por todos los vehículos. La restricción (2) es de la capacidad de los vehículos. Las restricciones (5) y (6) garantizan que un vehículo que visita un nodo también lo deja y que un vehículo no visita un nodo a menos que satisfaga su demanda. La restricción (7) es de eliminación de subtours para el problema del agente viajero (TSP).

Ya se mencionó antes que este tipo de solución resulta ser muy lenta además de que la complejidad de las restricciones que maneja requiere la recopilación de una gran cantidad de información. Su gran ventaja es que permite obtener la solución óptima de los problemas en términos de los valores que han sido incluidos en los parámetros. Esta información puede ser aproximada lo que en ocasiones genera indeseables efectos al ser aplicadas las soluciones en la realidad.

3.2.2. Métodos Alternativos para la Resolución de los Problemas de Sistemas de Ruteo de Vehículos

Debido a la clasificación del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) como un problema NP-Hard se realiza constantemente gran cantidad de investigación con el objetivo de encontrar métodos alternativos que brinden buenas soluciones. Dentro de los métodos alternativos sobresalen dos grupos, las Metaheurísticas y las Heurísticas.

Las metaheurísticas, según [13], son procedimientos generales de solución que exploran el espacio de solución para identificar buenas soluciones. Estas han sido propuestas para su aplicación en el VRP, siendo las de mayor relevancia: Enfriamiento Simulado (Simulated Annealing), Enfriamiento Determinístico (Deterministic Annealing), Búsqueda Tabú (Tabu Search), Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms), Colonia de Hormigas (Ant Colony) y Redes Neuronales (Neural Networks).

Para la aplicación de las metaheurísticas en VRP son usualmente utilizadas heurísticas de construcción y mejora de rutas que serán mostradas más adelante.

La metaheurística que encuentra soluciones mas cercanas a la óptima y en ocasiones la óptima para problemas que incluyen varios cientos de clientes es la Búsqueda Tabú; Algoritmos Genéticos y Redes Neuronales funcionan bien, mientras que Enfriamiento Simulado, Enfriamiento Determinístico y Colonia de Hormigas no fueron competitivas, según afirman Gendreau, Laporte y Potvin en [13]. También comentan que las metaheurísticas que han sido desarrolladas para VRP normalmente encuentran mejores soluciones que las heurísticas, pero tienen la desventaja de requerir más tiempo de procesamiento.

Las heurísticas son métodos que realizan búsquedas en espacios más reducidos que las metaheurísticas y que típicamente han producido soluciones de calidad en tiempos de cómputo modestos, según Laporte y Semet en [14]. Adicionalmente, las metaheurísticas normalmente requieren el cuidadoso ajuste de parámetros para que el método funcione como se espera, parámetros que cambian con facilidad ante minúsculas variaciones del problema.

El grupo de las heurísticas que han sido creadas con el objetivo de resolver el VRP son clasificadas y descritas por Bodin y Golden en [6]:

Agrupar - Rutear. Son métodos que primero asignan los nodos de demanda en grupos y posteriormente son ruteados usando un procedimiento para el TSP.

Los métodos más conocidos de esta clase son los de Chapleau, Ferland y Rousseau y el procedimiento de Barrido.

Rutear - Agrupar. Este método trabaja en el establecimiento de un gran tour TSP que visite todos los nodos de demanda. Posteriormente este es fraccionado en rutas que satisfacen las restricciones de capacidad de los vehículos. Esta aproximación fue usada por Newton y Thomas en [18]) y Bodin y Berman en [5]) en el ruteo de buses de colegio. Además, el método utilizado en este proyecto corresponde a una técnica que utiliza esta aproximación.

Ahorros - Inserción. Estos procedimientos operan creando una configuración inicial de nodos, que es potencialmente no factible. En cada paso, el costo de la configuración es comparado con configuraciones alternativas y aquella que genere el mayor ahorro en la función objetivo establecida es escogida como la nueva solución provisional. El procedimiento concluye con una configuración factible. El mejor y más famoso método de ahorros es el definido por Clarke and Wright, por quienes recibe su nombre. Entre los métodos de inserción se encuentran la heurística de inserción secuencial de Mole y Jameson [14], la heurística de inserción secuencial de Christofides, Mingozzi y Toth.

Mejoramiento - Intercambio. Estos procedimientos incluyen los procedimientos 2-opt y 3-opt introducidos por Lin en [15] y el procedimiento k-opt introducido por Lin y Kernighan en [16], que fueron diseñados para el TSP. El funcionamiento de estos procesos consiste en operar con una solución inicial e intentar mejorarla a través del intercambio de arcos.

Programación matemática. Estos métodos están basados en resolver óptimamente una formulación relajada de VRP. Una de las aproximaciones más exitosas es el método de Fisher y Jaikumar que primero resuelve de manera óptima la asignación de los puntos de demanda a la rutas usando una función objetivo aproximada y después realiza el ruteo. Este tipo de técnicas toman mas tiempo que las heurísticas típicas pero en general producen mejores soluciones.

Como ya se mencionó, varios métodos de solución del VRP se basan en utilizar los métodos de solución del TSP mezclados con otra técnica. Algunas heurísticas para solucionar el problema TSP estándar son:

El vecino más cercano (Nearest Neighbor) Que consiste en comenzar por una locación cualquiera y viajar hasta la más cercana que no haya sido visitada todavía y finalmente retornar a la locación desde la cual se partió (Bartholdi, [3]).

El algoritmo goloso (Greedy Algorithm) Que indica que se debe organizar todos los pares de locaciones en orden de distancia creciente. Se debe recorrer la lista añadiendo al tour el borde que no cierre prematuramente el recorrido ni vuelva a visitar una locación (Bartholdi, [3]).

Inserción más cercana (Nearest Insertion) Que consiste en comenzar por un tour degenerado conformado por las dos locaciones más cercanas, repetidamente escoger un locación que no esté en el tour pero que esté mas cerca. Insertar la locación entre dos locaciones que pertenezcan ya al tour de manera que cause el menor incremento de la longitud total (Bartholdi, [3]).

Strip (Strip) Que indica que debe dividirse el mapa en \sqrt{n} strips de igual ancho y entonces iniciar por el strip que se encuentre más hacia la izquierda, comenzar a visitar las locaciones en cada strip en orden de latitud (altura) alternativamente descendiente y ascendentemente. Finalmente conectar la última locación en la strip más hacia la derecha con la primera locación en la strip más hacia la izquierda (Bartholdi, [3]).

Curvas de Spacefilling (Spacefilling Curves) Que sugiere recorrer los sitios que se desea visitar en un orden preestablecido por la Spacefilling curve utilizada. Consiste entonces en ubicar cada sitio en la curva para definir el orden (Bartholdi, [3]).

A continuación se presenta un resumen de métodos heurísticos para solucionar el VRP:

El método de Barrido (Sweep Method) Que puede resumirse en ubicar todas localizaciones (incluyendo la bodega) en un mapa o cuadrícula, trazar líneas desde la bodega hasta todos los puntos, iniciar desde cualquiera de los puntos y comenzar a rotar utilizando como eje la bodega mientras se va copando la capacidad de cada vehículo. Los vehículos se usan en orden desde el de mayor capacidad. Una vez se han asignado las localizaciones a los vehículos se realiza una mejora de la solución resolviendo el TSP de cada vehículo. Este método logra soluciones que en promedio presentan un error de un 10 % según [2]. Una descripción detallada de este método puede encontrarse en [14].

El método de Clarke and Wright Que ha mostrado entregar soluciones que en promedio están un 2 % por encima del óptimo en problemas de tamaño moderado. En [14] Laporte y Semet indican que se trata de la heurística para VRP más conocida. Es capaz de incluir varias restricciones prácticas puesto que construye rutas y secuencias al tiempo. El objetivo de este método es minimizar la distancia total recorrida por todos los vehículos al tiempo que se minimiza la cantidad de vehículos utilizados, que se convierte en una variable de decisión.

La lógica de este método es descrita por Ballou en [1] como iniciar con un grupo de vehículos imaginarios que sirven cada uno a una localización. Esta solución indica la máxima distancia para el problema que se trata. Después se combinan dos rutas en una sola de manera que un vehículo sea eliminado y la distancia sea reducida. Para determinar las rutas a unir se calcula la distancia ahorrada de cada par posible y se escoge el par que genere el ahorro más grande que no implique la violación de ninguna de las restricciones como capacidad o ventanas de tiempo.

Se continua iterativamente uniendo rutas hasta que ya no sea factible unir ninguna más. En [14] puede encontrar una descripción completa de esta técnica y de cómo implementarla. En donde además se hace mención de que uno

de los inconvenientes del uso de esta técnica en problemas de gran tamaño y con matriz de distancia no simétrica es que en cada iteración deben calcularse, almacenarse y ordenarse todos los ahorros.

Este método combinado con la técnica de mejoramiento 3-opt ha brindado, para problemas reconocidos de la literatura, soluciones que se encuentran un 7% debajo de los mejores resultados conocidos.

3.3. Ampliación de la Técnica de Spacefilling Curves para la Resolución de Problemas de Sistemas de Ruteo de Vehículos

Bartholdi y Platzman [21] proponen el uso de Spacefilling Curves para llegar a soluciones aceptables, o razonablemente cortas, para problemas de ruteo en tiempos supremamente pequeños mientras se emplea un esfuerzo computacional mínimo.

Esta heurística puede ser resumida como un método que consiste en recorrer los sitios que se desea visitar en un orden preestablecido por la Spacefilling Curve utilizada. Entonces para su implementación requiere sencillamente ubicar cada sitio en un punto dentro de la curva, es decir, convertir una ubicación (coordenadas x-y o direcciones) de dos dimensiones en una de una sola dimensión (sobre una línea). Los sitios serán visitados en el orden en que aparecen en la curva.

En [23] se menciona que el procedimiento de mapear los puntos a un espacio de una sola dimensión, que es la curva de Spacefilling, es la manera en que el problema multidimensional se reduce al caso más simple de la búsqueda del vecino más cercano en una dimensión.

3.3.1. Definición de las Spacefilling Curves

Las Spacefilling Curves pueden entenderse según [3] como curvas continuas que permiten mapear un espacio de alta dimensión en uno de baja dimensión. Estas curvas fueron descritas hace más de un siglo por reconocidos matemáticos entre ellos Peano, Sierpinski y Hilbert, quienes comenta Bowerman en [7] que se referían a ellas como monstruos topológicos porque tenían la propiedad intuitiva de proveer un mapeo continuo uno a uno de un espacio de baja dimensión a uno de una dimensión superior.

Bowerman en [7] indica que una de las propiedades más importantes de las Spacefilling Curves es que son preservadoras de la cercanía. Esto significa que dos puntos cercanos en la curva estarán cercanos en el plano. En el sentido contrario, si dos puntos están cerca entre ellos en el plano, probablemente estarán cerca en la curva. Bowerman explica que esto es una consecuencia del hecho de que se trate de curvas que son altamente convolucionadas y que tienden a visitar los puntos de una región antes de saltar hacia la siguiente.

Las Spacefilling Curves clásicas, como las de Peano, Sierpinski y Hilbert, son preservadoras de la medida Lebesgue que significa que fracciones de igual longitud en la curva cubren regiones multidimensionales de igual volumen según [22], lo que implica que imitan la densidad de los datos. Información detallada sobre la curva de Hilbert puede encontrarse en [20].

Las aplicaciones de las Spacefilling Curves incluyen escaneo y codificación de imágenes, generación por computador de funciones de valor real con dominios multidimensionales, optimización combinatoria y reconocimiento de patrones. Información ampliada de las aplicaciones diferentes a optimización combinatoria pueden encontrarse en [22].

Inicialmente toda la atención se dio a las curvas planas pero en 1980 Milne [17]

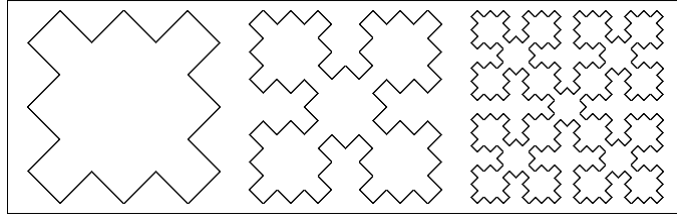


Figura 1: Spacefilling Curve de Sierpinski. Tomada de [3]

mostró como la curva de Peano puede generalizarse al caso multidimensional.

En [3] Bartholdi y Platzman proponen el uso de la Spacefilling Curve de Sierpinski que tiene la propiedad de ser construida a través de una copia o repetición del mismo patrón. Esta curva es presentada en la Figura 1 donde puede verse de manera individual y reproducida hacia lo ancho y largo. Esta particularidad prácticamente garantiza la ventaja natural de visitar todos los puntos de una región en la que ha entrado antes de visitar la siguiente, entonces los puntos que están cerca en una región del plano tenderán a estar mas cercanos a lo largo de la curva.

3.3.2. Implementación de la técnica

La implementación de la técnica estudiada es bastante sencilla y puede simplificarse a realizar una visita de los sitios requeridos en la misma secuencia en que lo haría la Spacefilling Curve escogida. Se presenta el siguiente algoritmo que describe la técnica.

Paso 1 Para cada ubicación (x, y) calcule su posición relativa θ a lo largo de la Spacefilling Curve. La posición relativa corresponde a un número entre 0 y 1.

Paso 2 Ordene las ubicaciones desde el menor al mayor θ .

Según la descripción el trabajo a realizar consiste en ubicar cada sitio requerido en un punto dentro de la curva, acción conocida como mapeo ya que se toma la representación en dos (o mas) dimensiones de la ubicación y se transforma en una de una sola dimensión. Esta única dimensión corresponde a la descrita por la línea

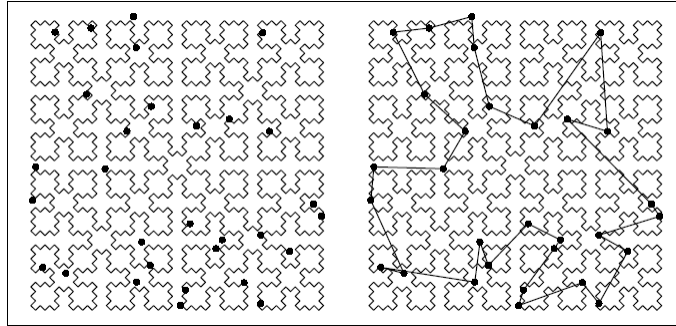


Figura 2: Ejemplo de ruta hallada a través de la Spacefilling Curve de Sierpinski. Tomada de [3]

de la Spacefilling Curve. Se sugiere otorgar una posición relativa debido a que de esta manera el número asociado a cada ubicación se mantiene indiferente ante la adición o eliminación de ubicaciones.

Una vez se ha logrado mapear cada ubicación el siguiente paso es realizar el ordenamiento de las mismas utilizando el criterio ascendente (menor a mayor) del valor en una dimensión de la ubicación, que se denomina Punto en la Spacefilling Curve (Spacefilling Curve Point). Esta operación permite listar las ubicaciones en el orden en que las visitaría la Spacefilling Curve de manera similar a la presentada en la Figura 2.

El proceso de realizar el mapeo a estas curvas depende de la curva que se elija. Para este trabajo se ha utilizado la Spacefilling Curve de Sierpinski (de dos a una dimensión) que fue usada por Bartholdi y Platzman según se describe en [3]. Para determinar el Punto en la Spacefilling Curve conocido como θ en la curva de Sierpinski se puede seguir el siguiente algoritmo (tomado de [3]):

Algoritmo de cálculo de θ en la curva de Sierpinski

Parámetros :

- maxEntrada:* límite superior de las coordenadas x y y.
- x:* coordenada en el eje x del punto a mapear.
- y:* coordenada en el eje y del punto a mapear.

Salida :

- θ : valor del punto en la curva.

```

Procedimiento :
    indiceCiclo := maxEntrada
     $\theta := 0$ 

    Si ( $x > y$ ) entonces
         $\theta := \theta + 1$ 
         $x := maxEntrada - x$ 
         $y := maxEntrada - y$ 

    Fin

    Mientras ( $indiceCiclo > precision$ ) entonces
         $\theta := 2\theta$ 

        Si ( $x + y > maxEntrada$ ) entonces
             $\theta := \theta + 1$ 
             $viejox := x$ 
             $x := maxEntrada - y$ 
             $y := viejox$ 

        Fin

         $x := 2x$ 
         $y := 2y$ 
         $\theta := 2\theta$ 

        Si ( $y > maxEntrada$ ) entonces
             $\theta := \theta + 1$ 
             $viejox := x$ 
             $x := y - maxEntrada$ 
             $y := maxEntrada - viejox$ 

        Fin

         $indiceCiclo := maxEntrada/2$ 

    Fin

    retorne  $\theta$ 

```

Bartholdi y Platzman hacen la salvedad de que este algoritmo entrega números decimales en vez de posiciones relativas pero recuerdan que al ser organizados cumplen la misma función.

Hasta este punto se tiene una solución para el problema como si se tratara de un TSP, pero como en realidad se quiere trabajar un VRP se hace necesario el uso de un método para particionar la ruta y asignarle a cada vehículo su recorrido sugerido. Este método, como indica Bowerman en [7], es en si un problema que tiene como objetivo encontrar la mejor manera de partir un tour TSP en rutas. La principal restricción a considerar es la capacidad de los vehículos. Bowerman propone el uso de una aproximación de programación dinámica para resolver el problema de partición que el mismo denominó el Algoritmo de Partición Óptima (SFC OP). Una descripción detallada la puede encontrar en [7]. En este trabajo se desea probar la

heurística de Spacefilling Curves tal y como fue propuesta por Bartholdi, es decir, no se quiere abandonar la idea de mantener la simplicidad de la técnica heurística utilizando métodos tan elaborados como la programación dinámica.

En la aplicación presentada por Bartholdi en [3] se realizó la partición más sencilla posible que consiste en tomar cada vehículo y asignarle una fracción de la ruta hasta que su capacidad o restricción de costo llegue al límite permitido, esta aproximación es conocida como la Partición Naive. Bowerman en [7] la describe así: Comenzar la primera ruta en el primer punto de demanda que visita de primero el tour TSP construido después del mapeo usando la Spacefilling Curve. Entonces se añaden puntos progresivamente a la ruta hasta cuando se determine que el siguiente punto sobrecargaría el vehículo. La próxima ruta inicia en ese punto y el proceso es repetido hasta que todos los puntos de demanda son ruteados.

3.3.3. Ventajas de la técnica

En [4] son presentadas por Bartholdi varias de las ventajas que presenta esta heurística sobre técnicas tradicionales como optimización y sobre técnicas del mismo tipo. Dentro de este listado de ventajas lograron llamar especial atención las siguientes:

- La rapidez del algoritmo, porque se requiere solamente un esfuerzo $O(l \log n)$ para construir un tour con n sitios por visitar. Adicionalmente sólo se requiere un esfuerzo de $O(\log n)$ para actualizar la solución al añadir o remover un sitio pues no es necesario resolver nuevamente todo el sistema.
- La extensibilidad de la heurística, porque puede ser extendida para usarse en problemas de VRP de manera sencilla teniendo en cuenta que la utilización de este tipo de curvas garantiza que se visitarán todos los puntos de una región antes de visitar la siguiente. Entonces, la ruta TSP puede determinarse y posteriormente fraccionarse.

- La simplicidad de la base de datos, pues no se requiere incluir en esta las distancias que separan a cada punto del conjunto conformado por el resto de sitios que deben ser visitados como si lo requiere la mayoría de técnicas para resolver este problema. Únicamente se requieren las coordenadas (x y y) de cada punto.
- Es paralelizable, porque consiste principalmente en la realización del cálculo de un número θ que ubica a cada sitio en la curva y finalmente organizarlos de menor a mayor, por lo tanto se puede paralelizar en varias máquinas los cálculos iniciales y finalmente realizar la organización.
- Puede ser aplicado sin el uso de un computador, ha sido aplicado de manera completamente manual.
- No incluye condiciones de difícil modelamiento, porque la descripción que hace del sistema no determina rutas exactas pues deja a criterio del operador la mejor manera de transportarse entre dos sitios dependiendo del día o la hora, sólo define la secuencia.
- Es comprobable, según afirma Bartholdi en [3], que en distribuciones uniformes de las ubicaciones el mapeo entrega distribuciones uniformes sobre la curva por lo tanto particiones (para un VRP) de igual número de ubicaciones obtendrán rutas de longitudes semejantes.
- Adicionalmente, Bowerman en [7] resalta que una de las ventajas de esta técnica es la simpleza y facilidad del cálculo de la posición en la curva de un punto dado. Esta afirmación puede ser confirmada al revisar el sencillo algoritmo que se presentó para el cálculo de la posición de un punto en la curva de Sierpinski.
- Bowerman en [7] reporta resultados que comprueban que al duplicar el tamaño de un problema, la solución con Spacefilling Curves es obtenida en el doble de tiempo mientras que con la heurística Clarke and Wright se cuadruplica.

Estas ventajas hacen atractiva la utilización de la heurística de Spacefilling Curves en problemas de ruteo de vehículos en especial en las pequeñas y medianas empresas (Pymes) que requieren soluciones aceptables pero poco elaboradas, que sean fácil y rápidamente modificables, pues esto las exime de utilizar costosas técnicas que no pueden pagar.

3.3.4. Desventajas de la técnica

Esta heurística presenta ventajas que traen como consecuencia su punto más débil. Para el uso de esta heurística se tiene que estar dispuesto a aceptar soluciones un 25 % más largas que las óptimas, según lo afirma Bartholdi en [3]. Sin embargo, también realiza la aclaración de que trabajar con ubicaciones que se encuentran repartidas en el espacio a manera de clusters mejora las soluciones haciéndolas más cercanas a las óptimas.

Adicionalmente, el escaso requerimiento de información con que opera ocasiona que información relevante y con la que se cuenta no sea incluida de manera que se logre un mayor acercamiento a la realidad.

3.4. Aplicaciones en la literatura

La técnica de ruteo con Spacefilling Curves fue probada por Goldsman en el escenario no trivial mas grande conocido para TSP. En comparación con el paquete más comercial para resolución del TSP (desarrollado por Applegate, D.; Bixby, R.; Chvatal, V.; y Cook, W.) la heurística de Spacefilling encontró una solución medianamente regular en comparación con la posiblemente óptima. Se perdió optimalidad pero se obtuvo un beneficio inalcanzable por el paquete comercial; usando la heurística de Spacefilling Curve la solución es encontrada de manera inmediata mientras que el segundo necesita mas de 22 años de cómputo (en un procesador de 500 MHz), según afirma el mismo Applegate.

Para dar una idea de las opiniones al respecto se presenta la descripción de Applegate de los recursos computacionales que requirió el paquete:

El cálculo fue realizado en una red de 110 procesadores ubicados en las universidades Rice y Princeton. El tiempo de computador total usado en el cálculo fue de 22.6 años escalados a un procesador Compaq EV6 Alpha corriendo a 500 MHz. La longitud del tour óptimo es de 1'573.084 en las unidades usadas en TSPLIB; se traduce en aproximadamente 66.000 kilómetros a través de Alemania.

Con el propósito de comparar Goldsman usó la heurística de Spacefilling, comenta Bartholdi en [3] para resolver la misma instancia. Le tomó menos de unos cuantos segundos en una computadora barata. La solución que obtuvo estuvo un 34% por debajo de la supuesta óptima.

En [3] Bartholdi presenta la aplicación de esta técnica heurística en un problema de ruteo comercial que recibió el nombre de Alimentos en Ruedas (Meals on Wheels). Para este caso la empresa Senior Citizen Services de la ciudad de Atlanta (USA) presentaba la necesidad de definir rutas para la escasa cantidad de vehículos con que contaba de manera que pudiera hacer la entrega satisfactoria de los bienes que repartían. Uno de los elementos que exigía buenas rutas era el tipo de bien que manejaba, comida para ancianos desamparados. Adicionalmente, el presupuesto variable e insuficiente no ofrecía la oportunidad de adquirir algún paquete sofisticado (ni siquiera equipo computacional). Para dar una idea del tamaño del problema se puede anotar que se visitaban entre 30 y 40 sitios a diario.

Otro aspecto para resaltar es que el sistema maneja un cambio de clientes cercano a un 14% cada mes como consecuencia del tipo de clientes que atiende.

Este problema fue tratado como un TSP debido a que la capacidad no se constituye como una restricción (por el tamaño y peso de los bienes) y no hay restricciones asociadas a la longitud de los viajes, sin embargo, no se olvidó que no se trataba

de un sólo vehículo y que se deseaba minimizar el tiempo de viaje y no la distancia como si lo plantea el TSP.

Una vez se obtenía la ruta para el TSP se realizaba una partición en partes iguales para los vehículos con que se contara cada día. Esta tarea no le demandaba sino unos instantes a la administradora de la empresa, comenta Bartholdi en [3], quien además podía realizar ajustes que su experiencia avalaba. En ocasiones la administradora comentó que la partición de la ruta parecía ser injusta para algunos conductores de vehículos pues los lugares de inicio de su recorrido parecían más lejanos que los de otros conductores. Sin embargo, fue posible mostrarle que el recorrido inicial y final (de regreso) resultaban ser insignificantes en comparación al recorrido total. Adicionalmente, las imperfecciones de la partición podían ser compensadas con las notables mejoras en las rutas.

Los resultados obtenidos hablan de la obtención de rutas que medidas en tiempo fueron sólo entre un 30 y 40 % de las que se usaban con anterioridad y en distancia se obtuvieron reducciones de un 13 % medidas en distancia euclidiana.

Es necesario comentar que la aplicación de esta heurística para este caso particular la hace única y sin competencia por las mejoras que logra cuando la inversión no incluyó ni siquiera el costo de un computador puesto que fue implementado con un par de archivos de tarjetas Rolodex. Uno de ellos almacenaba las tarjetas en el orden establecido por la heurística, mientras que el otro lo hacía en orden alfabético. Al incluir un nuevo sitio se buscaba en una tabla de ubicaciones previamente calculadas y se creaban las tarjetas que eran introducidas según el orden de cada Rolodex. Para eliminar un sitio se buscaba en el Rolodex que contenía las tarjetas en orden alfabético y al observar el número que le corresponde era posible eliminarlo del segundo Rolodex.

En esta aplicación en la ciudad de Atlanta puede realizarse también sobre un mapa como el de la Figura 3 al que se le dibuje una curva encima. Al ubicar las

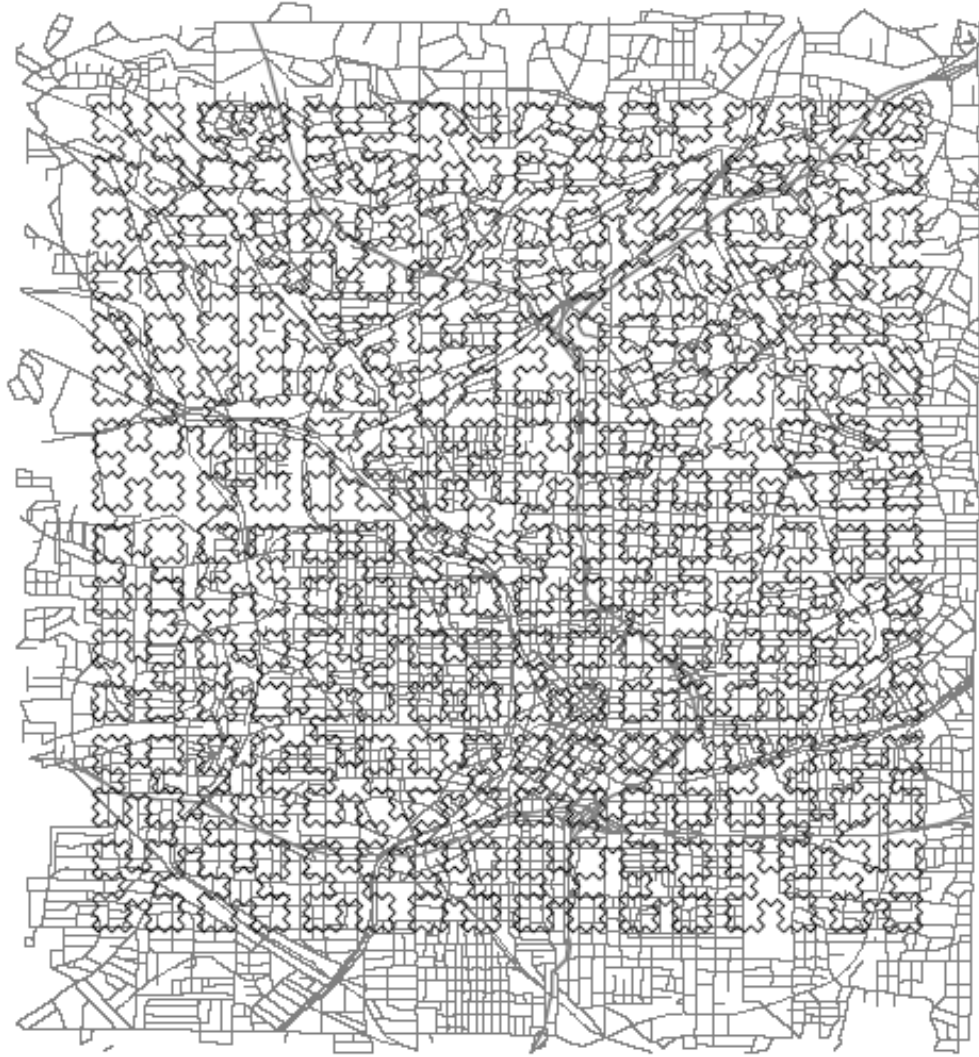


Figura 3: Ejemplo de aplicación de la Spacefilling Curve de Sierpinski en la ciudad de Atlanta. Tomada de [3]

localizaciones es posible mapear visualmente las localizaciones sobre la curva y entonces definir las rutas.

Otra aplicación presentada por Bartholdi en [3] se refiere al uso de la heurística de Spacefilling Curves para un sistema de destrucción de misiles nucleares en caso de ataque para la Iniciativa Estratégica del Departamento de Defensa de Estados Unidos. Se comenta que el apuntamiento puede verse como un TSP porque el apuntador del laser se mueve más rápido que sus objetivos. Es posible visualizar los objetivos en un plano de dos dimensiones. El problema entonces consiste en definir la secuencia para minimizar el tiempo de apuntamiento. En este caso se presentaron unas condiciones adicionales:

- La técnica de solución debe ser capaz de brindar la secuencia de 1000 a 30000 objetivos en tiempo real.
- La técnica de solución debe ser paralelizable para aprovechar la disponibilidad de otras miles de CPU's disponibles.

Estas condiciones facilitaron la escogencia de Spacefilling Curves por encima de otras técnicas.

Bartholdi también hace referencia en [3] a que esta técnica ha sido usada en el ruteo para el sistema de entrega de la Cruz Roja Americana a los hospitales del área metropolitana de Atlanta.

Capítulo IV

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE SPACEFILLING CURVES PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE SISTEMAS DE RUTEO DE VEHÍCULOS

El interés de realizar una aplicación de la técnica revisada en el sistema urbanístico de la ciudad de Bogotá llevó a contactar a un colegio. Es usual que dentro de los temas que competen a un colegio se encuentre el administrar el sistema de transporte de los estudiantes, el cual tiene entre varios puntos a tratar el ruteo de vehículos. Mas adelante revisaremos sus características.

En el momento del contacto con el colegio se logró captar los detalles que definen este sistema, así como validar que involucra un problema que puede ser modelado como un VRP.

Para este trabajo se ha realizado un desarrollo en Java que implementa la heurística de Spacefilling Curves para resolver un problema de ruteo de vehículos, de especial interés es el sistema de ruteo del colegio que nos provee los datos requeridos.

También se ha realizado un desarrollo que permite trabajar en el objetivo de realizar una medición de la calidad de las respuestas arrojadas por la heurística de Spacefilling Curves.

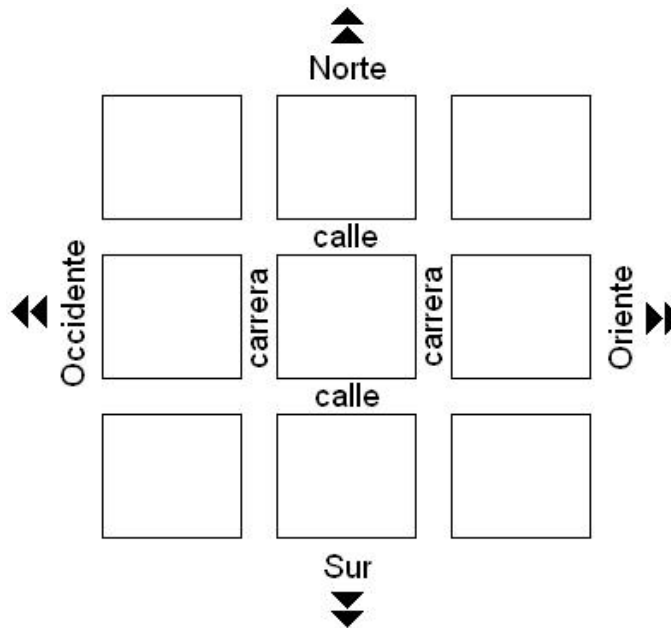


Figura 4: Denominaciones en la ciudad de Bogotá

El colegio queda ubicado en la zona norte de la ciudad de Bogotá. Existe especial interés en trabajar con un sistema de transporte de esta ciudad porque se ha identificado una posible ventaja comparativa sobre otras ciudades del mundo: la administración desde sus inicios se ha preocupado por definir las vías de los automotores de manera que se logre una configuración casi cuadrada. Si bien la ciudad posee muchas excepciones que ocasionan un deterioro de este objetivo, recientes esfuerzos administrativos han llevado a la modificación de la numeración.

En la ciudad de Bogotá la numeración de los inmuebles se realiza considerando calles y carreras tal y como puede verse en la Figura 4 en donde las calles corresponden a aquellas vías que van de occidente a oriente (o al revés) y las carreras van de norte a sur (o al revés).

Una particularidad de la ciudad de Bogotá, entre las demás ciudades de Colombia, es que ha sido fraccionada en 4 cuadrantes como se ve en la Figura 5 debido a que se extendió en todas las direcciones y sentidos. Para denominar las direcciones

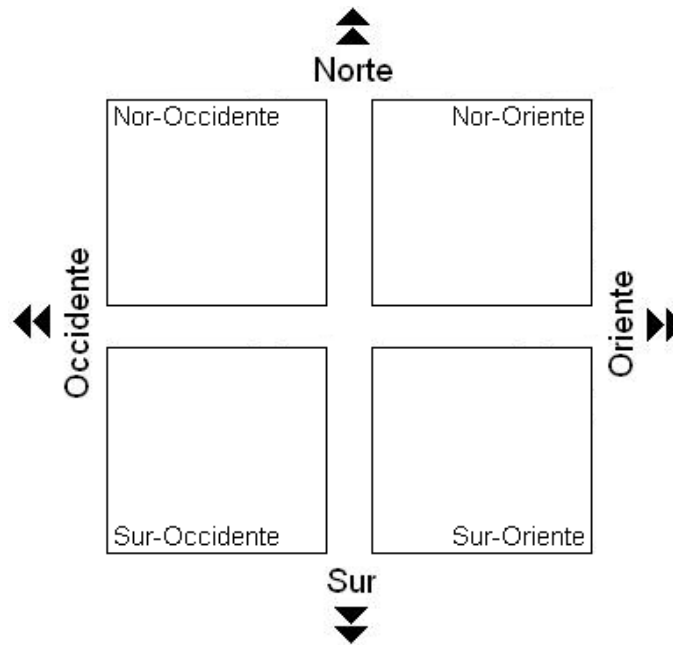


Figura 5: Divisiones en la ciudad de Bogotá

de los inmuebles en la ciudad se hace referencia a los cuadrantes únicamente cuando se encuentra en el Sur o en el Oriente. Para estos casos se refiere a Sur o Este, respectivamente. Mientras no se haga referencia se supone Norte y Occidente.

Otra característica relevante es que muchas de las vías se extienden de manera que no corresponden a calles ni carreras, éstas son denominadas diagonales o transversales. También, hay vías que no son conocidas ni ubicadas a partir del número que les corresponde sino que fueron bautizadas en ocasiones especiales, para dar un ejemplo, Avenida Caracas, Avenida Suba y Autopista Norte.

Varias ciudades del país también manejan una configuración similar a la de Bogotá por lo que el trabajo aquí presentado podría extenderse hasta los sistemas de transporte de esas localizaciones.

4.1. Descripción del Sistema de Transporte de un Colegio de la Ciudad de Bogotá

En la actualidad el sistema de transporte de alumnos del colegio en cuestión incluye más de 400 estudiantes. Este servicio está compuesto por dos fases: la recolección, en la mañana y la entrega, en la tarde.

En cada fase el objetivo es recoger, o entregar, a los estudiantes en sus hogares en el menor tiempo posible.

El servicio es brindado haciendo uso de dos tipos de medios que denominaremos buses y camionetas. Los buses tienen en promedio una capacidad de 26 personas mientras que las camionetas pueden transportar en promedio 12 personas. Entre las razones expuestas por los padres de familia para la selección del medio de transporte en camionetas, es el gran aprecio por el trato y confianza que reciben sus hijos como consecuencia del contacto personalizado que se genera en esta modalidad; de igual forma han expuesto el interés por la rapidez de los recorridos y la facilidad de salida y llegada de los estudiantes a sus casas. En total se cuenta con los servicios de 15 camionetas y 11 buses.

El colegio mostró interés en realizar un trabajo que permita:

1. Rediseñar las rutas. En primera instancia redistribuir los estudiantes de cada vehículo puesto que se tiene conocimiento de que existen vehículos que recorren rutas ineficientes como consecuencia de que los padres de familia tienen la potestad de escoger el vehículo para el transporte de sus hijos. Incluso se presenta que varios vehículos visitan las mismas ubicaciones. Adicionalmente se debe establecer la ruta a seguir por cada vehículo de manera que se logren los objetivos.

También se requiere que el sistema de transporte pueda ser fácilmente reorganizado debido a que normalmente se presentan cambios ocasionados por

permisos a los estudiantes.

2. Objetivo: Minimizar el tiempo del recorrido y las distancias recorridas. La minimización del tiempo se traduciría en la mejora del indicador de desempeño más evidente para los estudiantes y para sus padres. La disminución en las distancias ocasionaría una disminución de los costos de operación del sistema de transporte vía disminución de la cantidad de combustible consumido.

Es necesario considerar también que en general la decisión relacionada con tomar uno u otro medio de transporte (bus o camioneta) depende de la elección del padre de familia o de las características de la ubicación misma. El primer aspecto había sido mencionado ya, el segundo se basa en el hecho de que varias de las ubicaciones de la ciudad de Bogotá (sobretudo en nuestra zona de interés) se encuentran elevadas, como consecuencia de que la ciudad se localiza cerca de la cordillera oriental de los Andes. Hacia estas ubicaciones es necesario mencionar que los vehículos tipo bus no poseen la potencia suficiente para llegar.

Algunas ubicaciones de los estudiantes se encuentran bastante lejanas del colegio, estas son evitadas por algunos conductores de camionetas porque tienen la percepción de que no son económicamente viables.

Se conoce también que los conductores y dueños de las camionetas realizan esta labor como una actividad que les genera un ingreso adicional, es decir, su trabajo como transportadores se limita a operar para este sistema de transporte. Para estas personas toma relevancia la última ubicación que visiten al repartir niños y la primera al recogerlos ya que desde o hasta este lugar realizan un recorrido desde sus hogares.

Para utilizar y evaluar la técnica heurística Spacefilling Curves se realizó la consecución de los datos de las localizaciones de los alumnos del colegio, gracias a la colaboración de las directivas del mismo.

4.2. Descripción de la Metodología de Evaluación de la Técnica de Spacefilling Curves

Para la evaluación de la técnica Spacefilling Curves se hizo necesario no sólo trabajar con esta heurística sino encontrar otra que proporcionará información respecto a la calidad de las respuestas que se encontraban. Es bastante conocida en la literatura y aprobada por investigadores del tema que la heurística de Clarke and Wright para VRP brinda soluciones bastante cercanas al óptimo. La idea de este trabajo no era desarrollar la manera de hallar la solución óptima al problema de VRP sino encontrar medios alternativos.

Trabajaremos comparando los resultados obtenidos con la técnica heurística de Spacefilling Curves con los que brinda la heurística de Clarke and Wright de la manera en que se describe en adelante.

Es necesario mencionar que se optó por no incluir dentro de la formulación el requerimiento de optimizar las rutas teniendo en cuenta la ubicación desde la cual partían o a la cual llegaba cada vehículo, porque esta no hace parte del original VRP y por lo tanto no es manejada por ninguna de las heurísticas revisadas. Solucionar este punto corresponde a otro problema diferente que no fue abordado.

Adicionalmente se aclara que el objetivo de minimizar el tiempo de recorrido de las rutas no es tratado por la heurística Spacefilling Curves por lo que se decidió trabajar exclusivamente con la variable distancia. Es también conocido que la toma de tiempos de recorrido entre la gran cantidad de ubicaciones es bastante tediosa, además de que depende de una cantidad de factores que dificultan su cálculo. Sería posible trabajar con una estimación partiendo de la distancia pero esta sería directamente proporcional a la misma por lo que no aportaría información. Sin embargo, la implementación permite utilizar este criterio con la heurística Clarke and Wright en caso de que se logre determinar los datos requeridos, ya sea tiempo o cualquier otro criterio de costos.

El problema completo es fraccionado en 4 instancias teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las rutas de la mañana y la tarde, es decir, recogida y entrega se realizan en momentos del tiempo muy separados por lo que a pesar de referirse al mismo sistema, no conforman una sola instancia del mismo.
- Las ubicaciones (alumnos) trabajadas por camionetas y buses son determinados por los padres de familia y por las características de la ubicación misma, como fue expuesto antes.

Nos referiremos entonces a 4 instancias que denominaremos como sigue. Se incluye al lado y entre paréntesis la cantidad de ubicaciones que la componen.

Mañana - Buses: (168) Realizada en las mañanas por los buses.

Mañana - Camionetas: (146) Realizada en las mañanas por las camionetas.

Tarde - Buses: (171) Cubierta por los buses en la tarde.

Tarde - Camionetas: (150) Cubierta por las camionetas en la tarde.

La información que fue suministrada corresponde a la dirección de cada estudiante que debe ser transportado por los diferentes tipos de vehículo en cada fase (mañana y tarde). Al decir dirección aclaramos que corresponde a la denominación en función de calles y carreras que ha sido otorgada al inmueble obviamente incluyendo las variantes antes descritas.

Para este trabajo se identificaron las siguientes tres maneras de definir las ubicaciones, cada una de ellas recibe un tratamiento especial.

Calles y Carreras. En este caso se obtienen dos valores de la dirección que ubica al inmueble, uno que corresponde a la calle y otro a la carrera. Consiste en tomar la dirección y hacer un mapeo hacia un sistema imaginario de calles y

carreras perfectamente paralelas entre si, entonces es asignado un número de calle y un número de carrera. La idea es lograr que este mapeo mantenga un equilibrio entre la simplicidad y la realidad. De la definición de la dirección es tomado la calle y la carrera siempre que sea posible. Los casos especiales son tratados así:

- Las diagonales son entendidas como calles.
- Las transversales se entienden como carreras.
- Las avenidas y las autopistas como reciben nombres especiales requieren un conocimiento de la ciudad para identificar la carrera o calle hacia la que pueden ser mapeadas. Para esto es necesario contar con una base de datos.
- Las carreras ubicadas en el oriente se consideran carreras con valor negativo al igual que las calles que se ubiquen en el sur.

Coordenadas X y Y. Partiendo de las direcciones es posible ubicar en un mapa (plano) de la ciudad cada una de ellas y obtener unas coordenadas X y Y que localicen a la dirección en el plano. Los valores otorgados en el sentido X y Y son obtenidos directamente del plano. Para el trabajo de este proyecto se consideró el eje X a aquel paralelo a las carreras, mientras que el eje Y corresponderá a las calles.

Longitudes y Latitudes. A cada punto dentro del globo terráqueo le corresponde un par de coordenadas, geocoordenadas (longitud y latitud) que pueden ser determinadas partiendo de la dirección siempre y cuando se tenga acceso a una base de datos de información geográfica. Para el trabajo en este proyecto fue posible tener acceso a la información geográfica de las direcciones entregadas por el colegio, gracias a la colaboración de Ph.D. Andrés Medaglia. Al tener un punto definido en función de su longitud y latitud es posible conocer la ubicación del mismo sobre un plano, debido a las técnicas que permiten hacer esta conversión disponen los medios. Si se posee la longitud y latitud exacta de una ubicación se puede obtener las coordenadas x y que lo definen con más

precisión que si se midiera sobre un plano.

Se utiliza la técnica Mercator de proyección de geocoordenadas sobre el plano debido a que es la recomendada para este tipo de trabajo que puede verse como medición de distancias para puntos que se encuentran cercanos a la línea del Ecuador (Latitud 0).

Si la medición realizada sobre un plano de la ciudad se realizará de la manera más precisa concordaría con la que entregue una proyección de la geocoordenada correspondiente sobre el plano, siempre que el plano haya sido construido utilizando la misma técnica de proyección. Consecuentemente en este proyecto al contar con información de geocoordenadas de todos los puntos es posible obviar, por lo menos operativamente, el trabajo con coordenadas X y Y. Incluso es claro que el trabajo con geocoordenadas se limita a realizar la proyección sobre un plano y en adelante continuar como si se tratara de coordenadas X y Y. Sin importar estas anotaciones, la implementación soportará introducir la información de las ubicaciones utilizando cualquiera de las tres maneras de describirlas pensando en los casos en que no se tenga acceso a un sistema de información geográfica.

Es fácil concluir que el más acertado sistema de definición de las ubicaciones es el de Longitudes y Latitudes, y que por lo tanto es de esperar que los resultados obtenidos a través de estos sean superiores a los del sistema de direcciones puras, independientemente del método de solución, pero como uno de los objetivos en este trabajo es identificar que tan grande es la brecha ocasionada por esta información adicional o más precisa, se realiza el trabajo con los tres sistemas.

Se utiliza como técnicas de solución la mencionada técnica Heurística de Spacefilling Curves para medir sus beneficios y para contrastar con esta, la técnica también Heurística de Clarke and Wright.

Para la heurística Spacefilling Curves, en correspondencia con los objetivos planteados en el trabajo, se evalúa la calidad de las soluciones obtenidas a través de la descripción de las ubicaciones por medio de direcciones y geocoordenadas. Para la

heurística de Clarke and Wright se evalúan resultados obtenidos usando las mismas dos manera de describir las ubicaciones (direcciones y geocoordenadas), y dos maneras de medir la distancia (distancia euclidiana y distancia según la métrica del taxista) porque esta heurística para su funcionamiento necesita poseer una medición de la distancia entre todos los puntos.

Para realizar la comparación de los métodos utilizados se hace referencia al total de las longitudes de las rutas obtenidas usando como longitud la distancia medida según la Métrica del Taxista pues se considera que es más ajustada a la realidad que la distancia euclidiana, que sin embargo es utilizada en algunas de las instancias corridas para el método Clarke and Wright.

Finalmente describimos los métodos de solución así:

Heurística de Spacefilling Curves. Que es abordada partiendo de los métodos direcciones y geocoordenadas como métodos de definición de las ubicaciones y a la que debe ser posible medirle su calidad a través de una matriz de costos.

Heurística de Clarke and Wright. Que es abordada partiendo de la información brindada por los métodos direcciones y geocoordenadas como métodos de definición de las ubicaciones. También debe ser posible medirle la calidad a la respuesta usando el mismo criterio del caso anterior.

La matriz de costos que se incluya puede corresponder a distancia, tiempo o cualquier otra variable de interés. Para este trabajo se utilizó la variable distancia medida a través de la métrica del taxista.

4.3. Descripción de la Implementación de las Técnicas requeridas

Teniendo en claro que se trataba de realizar la implementación de dos técnicas se realizó la descripción de las variables que se deben definir para cada una de ellas.

Se consideró que la información relacionada con ubicaciones sería tomada por la aplicación desde un archivo de datos, para evitar la transcripción una a una de los mismos. Se prefirió el formato txt por su universalidad.

Se aclara que la implementación soporta más casos que los que se presentan en este trabajo.

Para el caso de ambas técnicas heurísticas se encuentran las siguientes variables:

- Tipo de Ubicación: que hace referencia al sistema de descripción de la dirección por lo que puede ser Calles y Carreras, Coordenadas X y Y o Longitud y Latitud.
- Ruta de Archivo de Ubicaciones: de donde se tomarán las ubicaciones en el formato adecuado dependiendo del tipo de ubicación que sea definido, si se definió Coordenadas X y Y o Longitud y Latitud es necesario brindar los valores correspondientes.
- Ruta de Archivo de Conversiones: de donde se tomará la base de datos que se había mencionado era requerida para poder mapear aquellas direcciones que incluyan descripciones diferentes a calles, carreras, transversales y diagonales.
- Ruta de Archivo de los Vehículos: es la ruta donde se encuentra el archivo que contiene la información de todos los vehículos destinados para la instancia que se evalúa. Se suministra la capacidad de cada vehículo la cual tendrá relevancia para la solución con la heurística Spacefilling Curves pues para el caso de Clarke and Wright la capacidad debe ser uniforme por lo que se toma la del primer vehículo.
- Tipo de Recorrido: para indicar el sentido del recorrido, es decir, si se trata de rutas que salen o llegan a la bodega.
- Ruta de Archivo de Costos: que es la ruta en la cual se encuentra el archivo que define el costo de los recorridos entre todas las ubicaciones. Este costo

puede estar medido en función de la distancia o cualquier otra variable. Generalmente se usa la distancia. No es obligatorio brindar esta ruta pues si no se posee la información se resuelve sin medir los costos de las rutas.

En el caso particular de la heurística de Spacefilling Curves se hace necesario manejar las siguientes variables:

- Normalización en el eje X y en el eje Y: es una consecuencia de que la técnica requiere que las coordenadas a ubicar sean todas positivas y en algunos casos es posible que se tomen valores negativos, según sea escogido el origen del sistema de coordenadas. Para el caso particular del sistema de descripción de las ubicaciones a partir de Calles y Carreras ya se había hecho explícito que a través del mapeo algunos valores de calles y carreras iban a ser negativos. Lo mismo puede suceder con las coordenadas según se escoja el origen. El valor de normalización en cada eje debe ser aquel que permita convertir los valores de manera que todos los valores en ese eje que eran negativos sean positivos. Para un mayor entendimiento se presenta el gráfico de la Figura 6. En esta es posible ver dos ejes, el X y el X', que aparecen en línea discontinua y continua respectivamente, estos están separados por una distancia x' el uno del otro. Un punto que estuviera ubicado a una distancia x hacia el sentido negativo del origen en el eje X estaría ubicado a una distancia $-x + x'$ hacia el sentido positivo del origen en el eje X'. Si el valor x' es bien escogido todos los nuevos valores medidos en el eje X' serían positivos. El valor que se debe introducir como Normalización en un eje corresponde a ese valor x' .
- Máxima entrada: es el valor más grande que tomará cualquiera de las coordenadas para los dos ejes después de haber realizado la normalización de los valores.

Para la heurística de Clarke and Wright se necesitan las siguientes variables:

- Tipo de Medición de la Distancia: que corresponde a la manera en que el algoritmo de Clarke and Wright realizará la medición de los ahorros. Estos ahorros

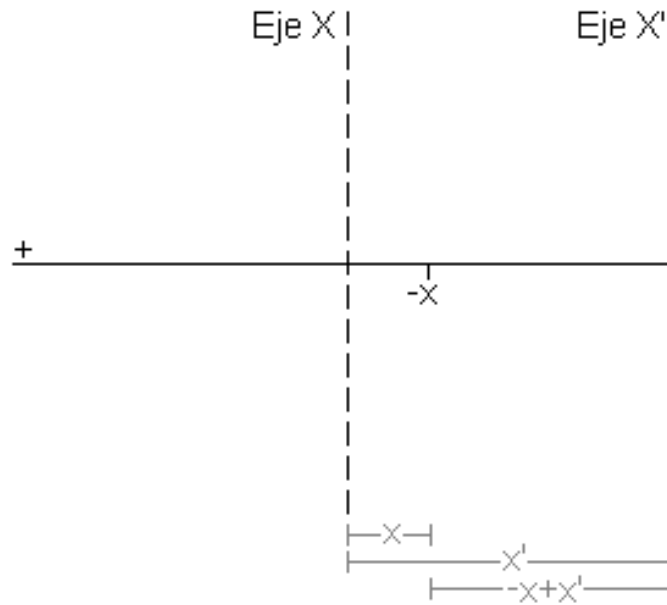


Figura 6: Normalización de los valores de las coordenadas

serán medidos en función de la distancia para la que se ofrecerán 3 métodos para calcularla: distancia euclidiana, métrica del taxista y la considerada distancia real que es tomada de la matriz de costos que ha sido suministrada.

Será posible entonces resolver con el algoritmo de Clarke and Wright usando ahorros medidos en función de cualquier variable que haya sido incluida en esta matriz de costos.

Cada archivo tiene un formato particular que es descrito en el Apéndice A.

El desarrollo fue realizado en Java para el beneficio de los posibles usuarios. Se maneja con la misma interfaz gráfica la solución con el método Spacefilling Curves y Clarke and Wright. Al ejecutarse se presenta de manera gráfica la solución y un resumen escrito de la misma.

La aplicación es provista a manera de ejecutable para facilitar su uso. La heurística Spacefilling Curves fue completamente implementada, mientras que para Clarke

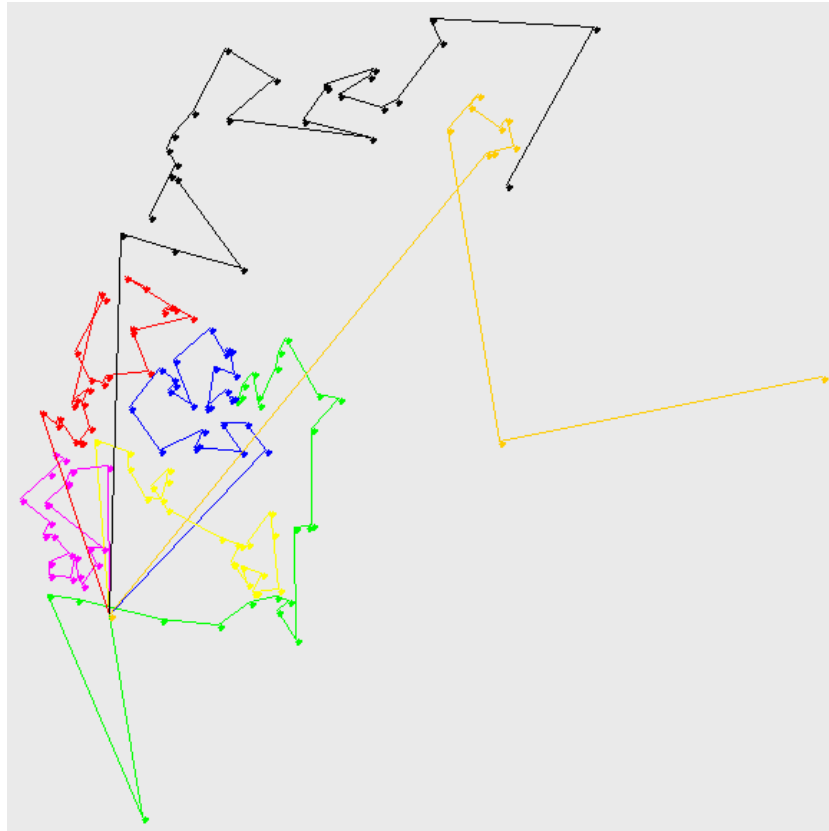


Figura 7: Ejemplo de visualización de resultados en la implementación

and Wright se utilizó el paquete OR-Objects ofrecido en [19]. Este paquete fue estudiado y extendido de manera adecuada para poder aplicar la heurística. Cabe resaltar que la implementación de la heurística de Clarke and Wright fue mas complicada a pesar de contar con el poderoso paquete OR-Objects.

Se provee la documentación estándar de Java de toda la implementación realizada para facilitar futuras extensiones de la misma.

Los resultados que se generan para cualquiera de los métodos son graficados de manera similar a la que se presenta en la Figura 7. En cada ocasión en que se presenta un cambio de vehículo se visualiza como un cambio de color.

Capítulo V

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. *Presentación de los Resultados Obtenidos*

Los resultados obtenidos para realizar la comparación de las técnicas utilizadas se resumen en la tabla a continuación que muestra las mediciones de la longitud de las rutas planteadas por cada método utilizado. Las longitudes de las rutas están medidas según la métrica del taxista.

Técnica Usada	Ruta AM Buses	Ruta AM Camionetas	Ruta PM Buses	Ruta PM Camionetas
Actual	190.104	204.935	229.039	219.872
Spacefilling Curves Direcciones	188.985	228.765	229.978	210.490
Spacefilling Curves Geocoordenadas	163.746	180.528	178.890	206.241
C&W Direcciones operando con Distancia Euclidiana	169.607	168.409	143.063	167.273
C&W Direcciones operando con Distancia Taxista	167.333	154.309	188.823	171.808
C&W Geocoordenadas operando con Distancia Euclidiana	133.876	155.706	136.795	152.556
C&W Geocoordenadas operando con Distancia Taxista	128.842	155.575	136.371	153.505

Los resultados fueron obtenidos haciendo uso de un computador con procesador Pentium 4 de 2GHz con 256MB en memoria RAM, usando la versión 1.5.0-beta2 de la máquina virtual de Java. Se notó una diferencia entre los tiempos de corrida de los métodos. Clarke and Wright demoró en promedio 26,5 veces más tiempo en correr que Spacefilling Curves que corrió en promedio en 0,4 segundos. Sin embargo, el tiempo que demoró Clarke and Wright (en promedio 10,5 segundos) no alcanzó a ser tan grande como para que la técnica se hiciera no utilizable. Este tiempo fue medido en la aplicación haciendo uso de la hora del sistema y en unidades de milisegundos para mayor precisión.

5.2. Análisis de los Resultados Obtenidos

Los resultados que fueron obtenidos indican que la mejor solución, o por lo menos la más corta en todas las instancias, fue encontrada al usar la técnica heurística de Clarke and Wright con la definición de las ubicaciones por medio de geocoordenadas y utilizando como distancia la calculada usando la métrica del taxista, técnica denominada **Clarke and Wright Geocoordenadas operando con Distancia Taxista**. Esto era lo esperado puesto que Clarke and Wright es aprobado por la comunidad científica como uno de los mejores métodos, las geocoordenadas realizan una definición más precisa de las ubicaciones que las direcciones y la distancia es calculada de la misma manera en que se mide para la comparación de las técnicas.

Ahora para medir la calidad de las demás soluciones se usa como referencia para cada instancia la que es ofrecida por el método **Clarke and Wright Geocoordenadas operando con Distancia Taxista**. Para esto se calculó la información que se presenta en la siguiente tabla que corresponde a las diferencias porcentuales entre la longitud de las rutas de cada solución y la brindada por el método escogido como referencia.

Técnica Heurística	Ruta AM Buses	Ruta AM Camionetas	Ruta PM Buses	Ruta PM Camionetas
Actual	47,55 %	31,73 %	67,95 %	43,23 %
Spacefilling Curves Direcciones	46,68 %	47,04 %	68,64 %	37,12 %
Spacefilling Curves Geocoordenadas	27,09 %	16,04 %	31,18 %	34,35 %
C&W Direcciones operando con Distancia Euclidiana	31,64 %	8,25 %	4,91 %	8,97 %
C&W Direcciones operando con Distancia Taxista	29,87 %	-0,81 %	38,46 %	11,92 %
C&W Geocoordenadas operando con Distancia Euclidiana	3,91 %	0,08 %	0,31 %	-0,62 %
C&W Geocoordenadas operando con Distancia Taxista	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %

Es posible indicar que Spacefilling Curves se comporta mejor cuando la descripción de las ubicaciones es hecha a través de geocoordenadas. Esta diferencia es notoria si revisamos que con geocoordenadas las diferencias respecto a **Clarke and Wright Geocoordenadas operando con Distancia Taxista** fluctúan entre 16,04 % y 34,35 %, mientras que al usar las direcciones estas aumentan hasta 37,12 % y 68,64 %. La longitud de las soluciones es bastante deteriorada al usar direcciones en vez de geocoordenadas para definir las ubicaciones.

Algo similar ocurre con la técnica Clarke and Wright porque es notoria la diferencia ocasionada por el uso de ubicaciones como direcciones en vez de geocoordenadas. Con geocoordenadas se obtuvo la mejor solución en un caso y errores entre 0,08 % y 3,91 %, mientras que con direcciones estos fueron entre 4,91 % y 38,46 %. Se considera que las soluciones obtenidas con los métodos **Clarke and Wright Direcciones operando con Distancia Taxista** y **Clarke and Wright Geocoordenadas operando con Distancia Euclidiana** para la cuarta y segunda instancias presentadas, que fueron incluso ligeramente inferiores a las obtenidas por **Clarke and Wright Geocoordenadas operando con Distancia Taxista**, corresponden a valores atípicos ocasionados por el azar.

El tipo de medición de la distancia usado en el método Clarke and Wright tiene efectos sobre la longitud de las soluciones obtenidas en su mayoría debido a que la longitud de las rutas se realiza usando una de las maneras presentadas, la métrica del taxista.

Otro tema interesante para revisar es la diferencia en las longitudes de las rutas, medidas como la longitud recorrida para instancia, entre la situación actual y los métodos heurísticos presentados. Encontramos que respecto al identificado como mejor método la situación actual se encuentra en promedio con un error del 47,62 %, que es bastante alto, encontrando casos puntuales en que llega a ser del 67,95 %.

Ahora al referirnos a la heurística de Spacefilling Curves encontramos que no se detecta diferencia importante al usar el método **Actual** o **Spacefilling Curves Direcciones**. Por otra parte es visible que al utilizar la técnica descrita como **Spacefilling Curves Geocoordenadas** en el sistema de transporte del colegio se esperaría encontrar reducciones importantes en las longitudes de las rutas. En promedio se podría hablar de un 14 %, y encontrando casos de hasta 21,90 %.

Los tiempos de corridas entre métodos y sus comparaciones nos permiten ver que el esfuerzo computacional realizado por la técnica heurística Spacefilling Curves es

mucho menor que para Clarke and Wright. Se espera que al incrementar el tamaño del problema esta brecha se amplíe debido a la manera de operar de Clarke and Wright respecto a Spacefilling Curves.

Capítulo VI

CONCLUSIONES

Con la realización de este proyecto es posible concluir que la técnica heurística de Spacefilling Curves tal y como es enunciada por Bartholdi ofreció soluciones cuya medida de desempeño, en este caso longitud total de la ruta, superaban entre el 16 y 35 % a las obtenidas utilizando la técnica de Clarke and Wright. Este desempeño cumple con regularidad con lo que antes se mencionó que era esperado, en promedio se acerca a un 25 %. La heurística Spacefilling Curves ofreció soluciones promedio superiores a las mejores encontradas en cerca de un 25 % que son aceptables para algunos sistemas y para algunas compañías que carecen de recursos de una implementación más elaborada.

Otro punto a tener en cuenta es que es bien conocido que al incrementar el tamaño de la instancia del problema la heurística de Clarke and Wright incrementa de manera no lineal el esfuerzo computacional requerido, por lo que con problemas grandes su tiempo de ejecución se incrementará notablemente. Esto abre lugar para la aplicación de Spacefilling Curves en instancias bastante grandes.

Es innegable que el desempeño de la heurística de Clarke and Wright justifica el esfuerzo de realizar la implementación de la misma. Se han confirmado las bondades de esta heurística respecto al esfuerzo que implica.

El gran mercado de Spacefilling Curves se localiza en las compañías que no poseen recursos para realizar la implementación de ninguna técnica en computador y que

por lo tanto pueden recurrir a la implementación de la misma como lo mostró Bartholdi con el caso de Meals on Wheels en [3], con el uso de un par de Rolodex y una hoja de posiciones precalculadas en la Spacefilling Curve. En estos casos la técnica permite que sea recalculada una solución con el mínimo esfuerzo posible (cálculo de un valor a través de un sencillo algoritmo u omisión de un punto), lo que es inalcanzable por la técnica heurística de Clarke and Wright.

Se logró medir la potencialidad de la utilización de las técnicas heurísticas revisadas. Se esperaba que al usar Spacefilling Curves se logren reducciones en cuanto a distancia recorrida de cerca de un 14 %, mientras que al usar Clarke and Wright se esperarían reducciones de cerca de un 32 %.

Sobre la propuesta de Bartholdi se realizó una variación que quiso ponerse a prueba. Consistió en describir las ubicaciones únicamente con la dirección en función de calle y carrera otorgada al inmueble. Los errores encontrados bajo estas circunstancias se ubican entre el 37 y 69 % respecto al considerado el mejor método trabajado en este proyecto. Al trabajar con direcciones en vez de coordenadas las soluciones obtenidas tuvieron un desempeño de cerca de un 25 % en promedio menos favorable.

Este error es bastante alto y releva el beneficioso esfuerzo de realizar la descripción de las ubicaciones a través de coordenadas y de ser posible de geocoordenadas. Se hace evidente que la morfología de la ciudad, a pesar de los ajustes realizados con la base de datos de componentes especiales de las direcciones, no puede reemplazar las descripción por coordenadas o geocoordenadas de las ubicaciones. Tampoco se descarta que nuevas y futuras medidas que pretendan corregir errores en la numeración de los inmuebles permitan que las soluciones obtenidas usando direcciones estén más cerca de las obtenidas con coordenadas.

Spacefilling Curves encuentra campo como heurística en compañías que no puedan costear la implementación de técnicas más sofisticadas que ofrecen esfuerzos medianos, como lo es la heurística de Clarke and Wright, por lo que se convierte en

una técnica ideal para ser usada en pequeñas y medianas empresas (Pymes).

Capítulo VII

TRABAJO FUTURO

Dentro de los temas que se han identificado como fuente de trabajos futuros encontramos:

- Ampliar el problema hasta incluir un planteamiento que permita trabajar el requerimiento de considerar el origen o destino de cada vehículo por separado.
- Trabajar con otras Spacefilling Curves para encontrar las condiciones bajo las cuales cada una de ellas ofrece ventajas.
- Implementar la técnica con un procedimiento de partición de rutas más elaborado para determinar su beneficio en cuanto a las soluciones que sean encontradas.

Apéndice A

FORMATO DE LOS ARCHIVOS

Para todos los archivos se ha definido como convención que las líneas que inicien con el caracter # serán entendidas como comentarios.

Archivo de Ubicaciones como Direcciones:

Este archivo deberá incluir un listado de cadenas de caracteres, una en cada línea. La cadena de caracteres debe incluir la dirección tal y como es denominada por el sistema urbanístico de la ciudad.

Para una lectura correcta de las direcciones tenga en cuenta que:

- La dirección está compuesta por varios elementos. Para que sean correctamente leídas es necesario que se incluyan por lo menos 3 elementos: el principal o primero, el secundario y un número.
- La información adicional que se entregue después del tercer elemento ya mencionado será ignorada.
- La primera dirección incluida será considerada la dirección de la bodega.
- Considere también los detalles incluidos a continuación para el archivo de conversiones.

Un ejemplo del contenido de este archivo es:

```
#Este es el archivo de direcciones  
CALLE 22A #50-49 APTO 805  
CALLE 22B # 65-28 APTO 707  
CALLE 36 NO 9-16 APTO 518
```

Archivo de Ubicaciones como Coordenadas X y Y:

Este archivo deberá incluir un listado de ubicaciones, una en cada línea. Cada línea debe incluir separado por comas los elementos: identificador de la ubicación, coordenada x y coordenada y. Por tratarse de un identificador, este debe ser único. Los elementos deben ser de tipo cadena de caracteres, número y número, respectivamente

Para una lectura correcta de las ubicaciones tenga en cuenta que:

- La ubicación está descrita por 3 elementos. Las líneas no podrán contener ni más ni menos elementos.
- El identificador debe ser único entre todas las ubicaciones.
- La primera dirección incluida será considerada la dirección de la bodega.

Se brinda un ejemplo del contenido de este archivo a continuación:

```
#Este es el archivo de ubicaciones con coordenadas x y y  
carlos, 34, 45  
juan, 35, 43  
pedro, 34, 46
```

Archivo de Ubicaciones como Longitud y Latitud:

Este archivo deberá incluir un listado de ubicaciones, una en cada línea. Cada línea debe incluir separado por comas los elementos: identificador de la ubicación,

Longitud y Latitud. El identificador debe ser único. Los elementos deben ser de tipo cadena de caracteres, número y número, respectivamente

Para una lectura correcta de las ubicaciones tenga en cuenta:

- La ubicación está descrita por 3 elementos. Las líneas no podrán contener ni más ni menos elementos.
- El identificador debe ser único entre todas las ubicaciones.
- La primera dirección incluida será considerada la dirección de la bodega.
- Los elemento Longitud y Latitud deben tomar valores válidos.

Se brinda un ejemplo del contenido de este archivo a continuación:

```
#Este es el archivo de ubicaciones como Longitud y Latitud  
carlos, -74.0995071188333, 4.63714169712073  
juan, -74.1063254789268,4.6460326467933  
pedro, -74.1125217432016, 4.6544671593279
```

Archivo de Conversiones:

Este archivo deberá incluir un listado de conversiones, una en cada línea. Cada línea debe incluir separado por comas los elementos: elemento especial, elemento equivalente, límite inferior y límite superior en que aplica la conversión. Los elementos deben ser de tipo cadena de caracteres, cadena de caracteres, número y número, respectivamente

Para una lectura correcta de las ubicaciones tenga en cuenta:

- La conversión está descrita por 4 elementos. Las líneas no podrán contener ni más ni menos elementos.

- Debe incluir todos los componentes equivalentes por ejemplo autopista norte, autopista nte, autopista nte.
- Los componentes especiales deben comenzar con las palabras autopista o avenida.
- Se realiza la búsqueda de la correspondencia exacta con lo escrito en las direcciones.
- Serán ignoradas las diferencias ocasionadas por las mayúsculas y minúsculas.
- El elemento válido debe garantizarse que sea válido es decir que tenga los formatos carrera 15, calle 15, diagonal 15 o transversal 15.
- Si la conversión corresponde a carrera los límites superior e inferior se refieren a calles, lo contrario en el caso de calles.

Se brinda un ejemplo del contenido de este archivo a continuación:

```
#Este es el archivo de conversiones
AUTOPISTA NORTE, CARRERA 15, -150, 72
AUTOPISTA NORTE, CARRERA 30, 73, 100
AUTOPISTA NORTE, CARRERA 40, 101, 300
AUTOPISTA NTE, CARRERA 15, -150, 72
```

Archivo de Vehículos:

Este archivo deberá incluir un listado de los vehículos, uno en cada línea. Cada línea debe incluir separado por comas los elementos: identificador del vehículo y capacidad. Los elementos deben ser de tipo cadena de caracteres y número, respectivamente

Para una lectura correcta de los vehículos tenga en cuenta:

- El vehículo está descrito por 2 elementos. Las líneas no podrán contener ni más ni menos elementos.

Se brinda un ejemplo del contenido de este archivo a continuación:

```
#Este es el archivo de vehículos  
BGZ190, 5  
QCC858, 5  
QGG893, 5
```

Archivo de Costos:

Este archivo deberá incluir una matriz de costos asociados al recorrido entre dos pares de ubicaciones. Cada línea debe corresponder a una línea de la matriz en la que deberán indicarse los elementos identificador de la ubicación y costos. Los costos deberán ser indicados hasta cada una de las ubicaciones que se hayan listado. En el caso de las ubicaciones como direcciones el identificador es la misma cadena que describe la dirección. El archivo debe contener tantas líneas como ubicaciones se hayan establecido. Los elementos deben ser de tipo cadena de caracteres y números, respectivamente

Para una lectura correcta de los costos tenga en cuenta:

- Cada línea de la matriz está descrita por tantas ubicaciones como se hayan definido mas un elemento que define el origen.
- Los destinos se entenderán en el mismo orden en que están definidos los orígenes.
- Verifique que se han incluido todos los orígenes que se definieron como ubicaciones.
- Debe escribir todos los costos incluso cuando sean hacia el mismo origen o cuando sea nulos, caso en el que debe colocar cero (0).

Se brinda un ejemplo del contenido de este archivo a continuación:

#Este es el archivo de costos

CALLE 22A #50-49 APTO 805, 0, 4, 5, 4

CALLE 22B # 65-28 APTO 707, 4, 0, 8, 4

CALLE 36 NO 69-16 APTO 518, 5, 8, 0, 8

CARRERA 45 #22-14 BLOQUE 1E APTO 202, 4, 4, 8, 0

REFERENCIAS

- [1] BALLOU, R. Business Logistics Management. Prentice Hall. Cuarta Edición. (1998)

- [2] BALLOU, R. y AGARWAL, Y. A Performance Comparison of Several Popular Algorithms for Vehicle Routing and Scheduling. Journal of Business Logistics 9. 51-65. (1988)

- [3] BARTHOLDI, J. A Routing System based on Spacefilling Curves. http://www.isye.gatech.edu/people/faculty/John_Bartholdi/mow/mow.html. (1995)

- [4] BARTHOLDI, J. and PLATZMAN, L. Heuristics based on Spacefilling Curves for combinatorial problems in the plane. Management Science. 34(3):291-305. (1988)

- [5] BODIN, L. y BERMAN, L. Routing and scheduling of school buses by computer. Transportation Science B 13: 113 - 129. (1979)

- [6] BODIN, L. y GOLDEN, B. Classification in vehicle routing and scheduling. Networks 11. 97-108. (1981)

- [7] BOWERMAN, R., CALAMAI P. and BRENT, G. The Spacefilling Curve with Optimal Partitioning Heuristic for the Vehicle Routing Problem. European Journal of Operations Research, 76: 128 - 142. (1994)

- [8] BLUM, C. y ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimización: Overview and conceptual comparison. ACM Computational Survey. 35(3): 268 - 308.

(2003)

- [9] CAMPIONE, M., WALRATH, K. y HUML, A. The JAVATM TUTORIAL. Pearson Education. Tutorial en línea: <http://java.sun.com/docs/books/tutorial>. (2004)

- [10] DEITEL, H. and DEITEL P. Cómo programar en Java. Editorial Pearson Educación. (1995)

- [11] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, NIST. Dictionary of Algorithms and Data Structures. <http://www.nist.gov/dads/>. (2005)

- [12] FISHER, M. y JAIKUMAR, R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. Networks 11: 109 - 124. (1981)

- [13] GENDREAU, M., LAPORTE, G., POTVIN, J. Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem. Reporte Técnico CRT-963. Centre de Recherche sur les Transports. Universidad de Montreal. (1994)

- [14] LAPORTE, G. y SEMET, F. Classical Heuristics for the Vehicle Routing Problem. Les Cahiers du Gerad G98-54. Grupo de Investigación en Análisis de Decisión. Universidad de Montreal. (1998)

- [15] LIN, S. Computer solutions of the traveling salesman problem. Bell System Technical Journal. 44: 2245 - 2269. (1965)

- [16] LIN, S. y KERNIGHAN, B. An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem. Operations Research. 21: 498 - 516. (1973)

- [17] MILNE, S. Peano curves and smoothness of functions. Advances in Mathematics 35: 129 - 157. (1980)

- [18] NEWTON, R. y THOMAS, W. Bus routing in a multi-school system. Computers and Operations Research 1: 213-222. (1974)

- [19] Paquete OR-Objects y Tutorial en línea. <http://opsresearch.com/OR-Objects/>

- [20] PILKINGTON, J. y BADEN, S. Partitioning with Spacefilling Curves. CSE Technical Report Number CS94-349. Department of Computer Science and Engineering. Universidad de California. (1994)

- [21] PLATZMAN, L. and BARTHOLDI, J. Spacefilling Curves and the planar traveling salesman problem. Journal of the Association for Computing Machinery 36(4): 719-737. (1989)

- [22] SKUBALSKA-RAFAJLOWICZ, E. Applications of the Space-filling Curves with Data Driven Measure-Preserving Property. Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. Vol 30: 1305 - 1310. (1997)

- [23] SKUBALSKA-RAFAJLOWICZ, E. y KRZYZAK, A. Data Sorting Along a Space-filling Curve for Fast Pattern Recognition. Proc. of the Second Int. Symp. on Methods and Models in Automation and Robotics. 1: 339 - 344. (1995)

- [24] WOLFRAM RESEARCH INC. Complexity of Algorithms. <http://mathworld.wolfram.com/>. (2005)

VITA

Guisselle Adriana García Llinás nació en Barranquilla (Atlántico) en el año 1981. Después de cursar sus estudios primarios en el colegio de Nuestra Señora del Buen Consejo, asistió a la Universidad del Norte en donde después de 5 años obtuvo su título profesional en Ingeniería Industrial recibiendo la mención honorífica de la Excelencia Académica. Sus estudios de maestría los inició en la Universidad de los Andes antes de recibir su título profesional a través de las facilidades que le ofreció el prestigioso Programa Universidad Empresa que le abrió las puertas del sistema laboral en la ciudad de Bogotá. Logró ubicarse en una distinguida empresa de tecnología de información en donde actualmente ofrece sus servicios profesionales.