

SISTEMA DE SOPORTE A DECISIONES PARA EL DISEÑO DE RUTAS ESCOLARES EN COMULCLAVER LTDA

Javier Arias-Osorio
Profesor Escuela de estudios industriales y empresariales
Universidad Industrial de Santander
jearias@uis.edu.co

Carlos Eduardo Díaz Bohórquez
Profesor Escuela de estudios industriales y empresariales
Universidad Industrial de Santander
cediazbo@uis.edu.co

Henry Lamos Díaz
Profesor Escuela de estudios industriales y empresariales
Universidad Industrial de Santander
hamos@uis.edu.co

RESUMEN

A partir del diseño de un algoritmo de optimización híbrido (usando una heurística constructiva y una de inserción propia del CVRP) y su implementación en un módulo de software utilizando una aplicación GIS (Geographic Information System) y un lenguaje de programación orientado a objetos, se resuelve el problema de ruteo de vehículos aplicado al diseño de rutas escolares (SBRP por su sigla en inglés) en la empresa de transporte asociado Comulclaver Ltda.

El resultado de la ejecución del algoritmo sobre 64 instancias diferentes arroja resultados donde como mínimo un 82% de las rutas que se generan, se implementan, optimizando el uso de los vehículos y a la vez la cantidad de asientos al interior de ellos. El porcentaje restante son las rutas que alimentan a los cupos sobrantes en las rutas inicialmente implementadas.

PALABRAS CLAVES: VRP, SBRP, GIS, transporte, algoritmo híbrido.

AREAS PRINCIPALES: LT – Logística y transporte.

ABSTRACT

Once designed a hybrid optimization algorithm (using a constructive heuristic and a self insertion of CVRP) and its implementation in a software module application using a GIS (Geographic Information System) and programming language object-oriented, is solve the vehicle routing problem applied to the design of school routes (SBRP for its acronym in English) on the associated transport enterprise Comulclaver Ltd.

The result of running the algorithm on 64 different instances gives results where at least 82% of the routes that are generated later are implemented, optimizing both the use of vehicles and the number of seats within them. The remainder percentage is the routes that feed the leftover seats on routes initially implemented.

PALABRAS CLAVES: VRP, SBRP, GIS, transportation, hybrid algorithm.

AREAS PRINCIPALES: L – Logistics and Transport.

1. Introducción

COMULCLAVER Ltda, empresa dedicada a brindar el servicio de transporte escolar a colegios ubicados en la ciudad de Bucaramanga y Floridablanca, realiza la programación de las rutas para el recorrido de sus buses para trasladar a los niños, con los cuales tiene contrato, al colegio y viceversa. Al comienzo del año se recolecta la información de la ubicación de los niños (clientes) mediante la inscripción del servicio en los contratos firmados por el padre de familia en el colegio. De esta manera el cliente está sujeto a las condiciones del contrato que allí firma. Esta información se almacena en la base de datos que es manipulada por el coordinador de transporte donde se digita toda la información contenida en los formularios.

Una vez digitada la información y almacenados los formularios impresos, se procede a sectorizar o segmentar los clientes con el fin de elaborar las rutas para cada uno de los colegios. El proceso de sectorizar se realiza de manera manual y puede tardar varios días ya que el coordinador de transporte, debe dividir continuamente cada grupo de inscripciones de la siguiente manera:

1. Por escolaridad (Preescolar, primaria, bachillerato)
2. Por jornadas (Mañana o tarde)
3. Por área geográfica
4. Por barrios o vecindarios
5. Por conjuntos residenciales
6. Conformar clústeres (Uniando sectores aledaños)

Este proceso se debe realizar para cada colegio con el cual la empresa tiene contrato, pues en las rutas no se pueden mezclar estudiantes de diferentes colegios, tampoco de diferente escolaridad así pertenezcan al mismo colegio (preescolar con bachillerato, por ejemplo), esto último se permite únicamente en el caso de que sean hermanos y bajo la autorización expresa de los padres, aunque es una situación que muy esporádicamente se presenta.

Para cubrir las rutas se utilizan los vehículos transportadores, que son propiedad de los socios de la empresa, razón por la cual se procura asignar rutas balanceadas en cuanto a cantidad de clientes y distancias persiguiendo con esto que los ingresos sean similares entre los socios.

El objetivo del coordinador de transporte es asignar a una ruta todos los clientes que solicitan el servicio y es por esto que él se vale de su conocimiento y experiencia para conformar los clústeres de tal forma que el número de estudiantes sin ruta sea mínimo.

Comulclaver Ltda dentro de su planeación estratégica contempla consolidarse como una empresa competitiva e innovadora en la prestación de servicios y para lograrlo requiere de la implementación de estrategias efectivas, de la mano de la automatización de sus procesos de ruteo, esto con el fin de que se vean plasmados en el proceso de toma de decisiones.

2. Revisión de la Literatura

El diseño de rutas y asignación de vehículos son dos de las funciones más críticas del transporte y más si la empresa tiene como objeto social el transporte de pasajeros ya que el óptimo diseño de sus rutas garantizará la minimización en costos y/o satisfacción del cliente.

El problema de diseño y asignación de rutas aplicado involucra, para la cuantificación de sus parámetros iniciales como la determinación de las distancias entre cada par de nodos, una buena información cartográfica de la región sobre la que se planean las operaciones de transporte.

El modelo aquí construido se estructura sobre la consideración del problema de ruteo de vehículos aplicado a rutas escolares (SBRP por su sigla en inglés), sin embargo también se puede considerar como un problema de ruteo de vehículos con capacidad homogénea (inicialmente), con demanda conocida (asumiendo que en cada punto o nodo hay un cliente en la mayoría de los casos, pues se considera como política de la empresa que cada cliente se recoge y se deja en la puerta de su casa) y tiempo máximo en ruta (restringido por el marco legal colombiano sobre transporte escolar).

2.1 Planeación de rutas de transporte

Según Robusté y Galván[1], el ruteo o especificación de recorridos (routing) comprende seis problemas básicos dentro de los que se encuentran el problema del vendedor viajero (Travelling salesman problema ó TSP por su sigla en inglés), el problema del cartero chino o CPP (Chinese postman problem) y el problema de múltiples agentes viajeros (m-TSP). Los autores clasifican estos problemas en una taxonomía de logística urbana particular y ubican al CPP en lo que ellos denominan “cobertura de arcos”, mientras que el problema del TSP y en general el problema de ruteo de vehículos (Vehicle routing problem ó VRP por su sigla en inglés) los engloban dentro la clasificación que denominan “cobertura por nodos”.

Según Yepes[2], el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP por su sigla en inglés) es una generalización del m-TSP, el cual a su vez parte del conocimiento y estudio del problema del agente viajero (TSP por su sigla en inglés).

Según Sandoya[2], el objetivo del TSP, desde la concepción de la teoría de grafos, es equivalente a encontrar el ciclo Hamiltoniano de costo mínimo. Siendo éste último un ciclo simple que pasa por todos los vértices del grafo, es decir, no utiliza el mismo vértice más de una vez. Y el problema se puede enunciar, según Punnen[4], de la siguiente manera: Sea un grafo $G = (N; A)$, donde N es el conjunto de vértices, nodos, o dependencias y A son las aristas o arcos que tienen un peso C_{ij} que puede representar el costo, el tiempo o la distancia en que se incurre en ir de un nodo i a un nodo j .

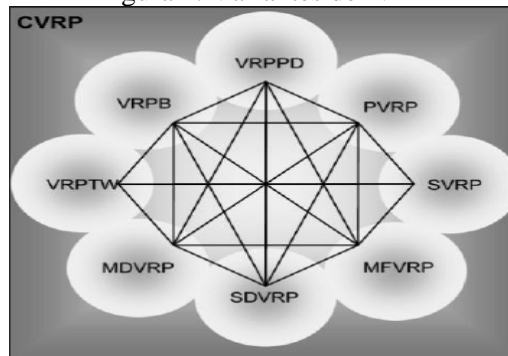
El TSP en sí es fácil de formular. Sin embargo, no siempre es fácil de resolver, ya que se considera un problema NP-Hard debido a que el tiempo de cómputo empleado para encontrar una solución óptima crece exponencialmente con respecto al tamaño de los datos del problema. Por tanto, surge la necesidad de emplear métodos aproximados (heurísticas) que, aunque no garantizan una solución óptima al problema, ofrecen soluciones factibles a éste.[5]

Ahora, el m-TSP o Multiple Traveling Salesmen Problem es una generalización del TSP en la cual se tiene un depósito y m vehículos o agentes. El objetivo de la solución de este problema es minimizar el costo, distancia o tiempo total para visitar todas las ciudades, contemplando no uno sino varios agentes o vendedores viajeros cuya cantidad puede ser fija o una variable de decisión.

Y a su vez, VRP es una generalización del m-TSP donde existe una demanda asociada a cada ciudad y una capacidad determinada para cada uno de los vehículos. En este caso, la función objetivo puede buscar minimizar la distancia recorrida por todas las rutas, el número de vehículos, o ambos. Y se pueden agregar limitaciones adicionales al problema como la limitación del tiempo de recorrido del vehículo en la ruta, etc.

Dentro de esta definición, el problema se ubica en un amplio conjunto de variantes, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Variantes del VRP



Fuente: González, G., González, F.[6]

Según Toth y Vigo[7], los objetivos típicos que pueden alcanzarse en la optimización VRP son:

- La minimización de los costos de transporte global, dependiendo de la distancia global recorrida y de los costos fijos asociados al utilizar los vehículos.
- La reducción al mínimo del número de vehículos (o drivers) necesarios para atender a todos los clientes.
- El equilibrio de las rutas, por tiempo de viaje y por carga del vehículo.
- La reducción al mínimo de las sanciones asociadas con el servicio parcial de los clientes.
- Cualquier combinación de estos objetivos

Es así, que este problema se puede formular para ser resuelto por algún método exacto, como Branch and bound, planos de corte de Gomory, etc., mediante un modelo de programación lineal entera con variables binarias. Sin embargo, dada la complejidad mencionada en el anterior párrafo, con frecuencia el TSP presenta problemas relacionados con los subtours y no permite encontrar un ciclo hamiltoniano que llegue a todos los vértices, comenzando desde un nodo “origen” y volviendo a él, pasando una sola vez por cada nodo[5], en tiempo polinomial, por lo cual se recurren a procedimientos heurísticos propios del problema y metaheurísticos que permiten evaluar no sólo óptimos locales.

Según Melián[8] se define heurística como un procedimiento que trata de descubrir una solución factible muy buena, pero no necesariamente una solución óptima para un problema específico bajo consideración. Usando estos procedimientos se tiene un alto grado de confianza en que se encuentren soluciones de alta calidad y en un tiempo computacional razonable (aunque no se garantice una solución óptima). En los métodos heurísticos, la rapidez del proceso es tan importante como la calidad de la solución obtenida.

2.1.1 Planificación de rutas de transporte ESCOLAR

Desde la década de los '70 del siglo pasado, se han publicado artículos relacionados con este tema, y aunque el SBRP puede ser considerado como una variación del VRP, existe toda una corriente de investigación paralela donde se consideran elementos diferenciadores al anterior, donde el primer aspecto clave es que en este problema de rutas escolares el objeto del transporte siempre son personas sobre las cuales hay que establecer consideraciones adicionales relacionadas con el servicio durante la ruta.

Es así que Gavish, B. y Shlifer, E.[9], plantearon un modelo de programación lineal binaria donde los buses están centralizados y luego de recoger los escolares a través de recorrer n puntos de recogida, van al colegio. Este modelamiento considera demandas conocidas, capacidad de los

buses homogénea y en la función objetivo involucra costos fijos y variables asociados con los vehículos en las rutas.

Posteriormente, Bowerman, R. et al. [10] plantearon un modelo donde en primera instancia se agrupan los estudiantes en clusters usando un algoritmo multiobjetivo y posteriormente a cada cluster se le asigna una parada de bus usando una combinación de un algoritmo de set covering y otro propio del TSP. En este trabajo se integra al objetivo, además de los costos, el concepto de equidad, relacionado con el balance de las distancias recorridas en las rutas que se trazan para cada grupo de estudiantes. Además se hace diferencia entre el SBRP aplicado a áreas urbanas y rurales.

En el año 2002, se encuentra una primera revisión (recopilación de trabajos) sobre el problema del SBRP realizada por Lyo Li and Z. Fu. [11] donde se listan los autores mencionados en los párrafos anteriores y otros más, clasificando los aspectos relacionados con el problema según si se considera una sólo colegio/escuela o varios, y según el criterio objetivo.

La última revisión conocida sobre el problema en particular es la de Junhyuk Park y Byung-In Kim[12] en el 2010. Este artículo provee una entendible revisión del problema definiendo los pasos a considerar en una buena planeación y programación de rutas mientras satisface varias restricciones tales como máxima capacidad de los buses, máximo tiempo del estudiante en ruta y la ventana de tiempo del colegio.

La planeación de la programación de rutas según estos autores consiste de diferentes subproblemas que involucran: Preparación de los datos, selección de las paradas, generación de las rutas, ajuste del tiempo de entrada de los colegios y secuenciación de los buses. Específicamente en el primer subproblema la red de transporte es especificada, donde existen cuatro tipos de datos, dentro de la que está la matriz origen-destino.

Paralelamente al avance sobre el problema en las formas de abordarlo y resolverlo de manera teórica, se encuentran trabajos aplicados del problema de ruteo de rutas escolares, como la publicación del proyecto de investigación de M.Fatih DEMİRAL, İbrahim GÜNGÖR y Kenan Oğuzhan ORUÇ, sobre la optimización del ruteo de vehículos en la ciudad de Isparta, Turquía en 2007. Este trabajo consistió en el diseño de rutas para el Isparta Milli Piyango Anadolu High School para el año lectivo 2005-2006. El objetivo era encontrar las rutas usando algoritmo de ahorros sobre matriz de tiempos y considerando restricciones como las siguientes:

- a. Tiempo aproximado de viaje 40 minutos.
- b. Velocidad de los vehículos para tráfico normal de 30km/h.
- c. Capacidad y otras características de los vehículos
- d. Número de estudiantes en paradas
- e. Ubicación de los estudiantes

Las consideraciones mencionadas por este último trabajo mencionado y los subproblemas planteados en el anterior son tenidos en cuenta para el desarrollo del presente trabajo.

3. Metodología

El modelo a implementar, conceptualmente se puede concebir como un modelo ajustado a un problema de ruteo de vehículos con capacidad y restricciones de distancias que se representa como un grafo dirigido, completo y simétrico, lo que significa que la matriz asociada a las

distancias entre los puntos de ubicación tanto de niños como del colegio presenta valores similares en posiciones simétricas y correspondientes en ella. Además, el alcance del modelo plantea la solución del problema para una jornada donde los vehículos se consideran que salen del colegio, recogen a los niños y vuelven a él.

Este modelo está estructurado en dos fases y utiliza como parámetros de entrada:

- a. La demanda de clientes o niños a recoger (el cual asume que cada niño corresponde a una ubicación en el mapa y a su vez un nodo en el grafo que se puede conectar con todos y cada uno de los nodos restantes).
- b. La matriz de distancias entre las ubicaciones de los nodos en la red. Obtenida a partir de la ubicación de los clientes en el mapa georeferenciado y del código generado en ArcGis.
- c. La capacidad de los vehículos, Que de acuerdo a lo mencionado anteriormente es una flota heterogénea en tipo y capacidad individual.
- d. Velocidad de los vehículos en la ruta, que se considera constante y que se obtiene de la normatividad vigente.

Las dos fases del modelo se configuran de la siguiente forma:

1) La primera fase consiste en la aplicación de la heurística constructiva del vecino más cercano, aplicable al problema del VRP, acogida por su facilidad de comprender y de implementar en un lenguaje cualquiera.

Para abordar esta fase se considera un valor para la capacidad del vehículo que corresponde a la capacidad máxima del vehículo más pequeño de la cooperativa, en el sentido de tratar de optimizar al máximo la utilización de la flota.

Al concluir la primera fase se encuentran rutas con nodos aislados por la particularidad misma de la heurística utilizada. Para enmendar lo anterior, se implementa una segunda fase.

2) Esta segunda fase consiste en la utilización de una modificación de la heurística de inserción de k-opt, pues en sí el modelo contempla que a partir de la solución de la primera fase, se considera la inserción en alguna de las rutas generadas de los clientes no incluidos en la ruta, teniendo como objetivo y priorizándolos de acuerdo a las menores distancias que presentaba cada uno de ellos con respecto a alguno de los nodos ya incluidos en la solución inicial.

El proceso de inserción es además iterativo, pues a medida que se inserta un nodo o cliente se recalculan valores de distancias y valores para determinar si el nodo se inserta antes o después de otro en la ruta seleccionada.

Cabe mencionar que en esta segunda fase, al ser el objetivo asignar a todos los nodos a una ruta específica, las condiciones de tiempo y capacidad se flexibilizan o, como se denomina en la literatura de optimización, se vuelven débiles. Sin embargo en las instancias probadas para el problema en particular, ninguna de las dos en realidad fue violada.

4. Resultados

Se implementa el modelo ejecutando el algoritmo diseñado para 16 matrices de distancias, porque los estudiantes se agrupan por ciudad, colegio y/o por jornada (de la mañana o de la tarde), y porque vale recordar que por consideraciones de la empresa no se pueden trazar rutas con mezclas de estudiantes de diferentes colegios o jornadas. En este modelamiento se consideraron cuatro tipos de capacidades de los vehículos (12, 14, 16 y 19 asientos) dando como

resultado en total de 64 variaciones que se consideraron para la implementación. En la Figura No. 2, se puede observar la visualización de la herramienta desarrollada con sus parámetros de entrada y una solución generada, la cual muestra por columna cada ruta generada, correspondiente a un vehículo cada una, donde el nodo origen y destino de cada una es el mismo colegio, y el orden descendente en cada columna describe el orden de realizar el recorrido. Esta solución por último es trasladada a ArcView, realizando fácilmente un join sobre la tabla de Excel y se coloca sobre el mapa de la ciudad para revisar y comparar los resultados.

Figura No. 2. Visualización ejecución del algoritmo y solución a una instancia

Parámetros del Software			
Velocidad promedio	40	Kmh	
Tiempo máximo	30	minutos	
Capacidad mínima	18	niños	
Número de niños	151	niños	Debe colocar como último nodo el colegio
Nodo Origen	152		
Nodo Destino	153		

Solución				Flota 1	Flota 2	Flota 3	Flota 4	Flota 5	Flota 6	Flota 7	Flota 8	Flota 9
Máximo tiempo en ruta	38	minutos	0.62860175	2111111	2111111	2111111	2111111	2111111	2111111	2111111	2111111	2111111
1	0747.67	17		2030592367	2030500741	2030507604	2030500569	2030800637	2032100034	2030400747	2030500733	2030500676
2	3476.8	17		2030400249	2030800711	2030800765	2030501734	2030800020	2032200037	2030801440	2030500540	2030500023
3	5420.75	17		2030500581	2030800503	2030800389	2030802579	2030500542	2030700888	2030800313	2030501010	2030700367
4	5709.29	17		2030800686	2030702228	2030802776	2032100248	2030401333	2030600520	2030800581	2030801041	2030700281
5	5741.24	17		2032100066	2030802910	2030202453	2030400532	2030800701	2030400681	2030800316	2030700328	203030101
6	25144.07	21		2030502327	2030202422	2030300229	2030401017	2030700555	2030704329	2030400261	2030200426	2030301561
7	10540.09	17		2030407634	2030500771	2030300071	2030400463	2030800269	2030705660	2030401254	2030800217	2030602025
8	7655.69	20		2030700527	2030800369	2030702458	2030500458	2030803356	2030300128	2030701983	2030800218	2030700218
9	6652.13	8		2030802085	2030800685	2030803411	2030302183	2030800126	2030800676	2030701847	2030200885	2111111

Fuente: Elaboración propia

La solución informática connotada en este trabajo con un módulo para toma de decisiones, tiene como parámetro de entrada la matriz de origen-destino (o de distancias) generada por la programación sobre el software ArcView considerando los mapas del área urbana de las ciudades de Bucaramanga y Floridablanca. Ver Figura No.3.

Figura No. 3. Script para elaboración de trayectoria

```

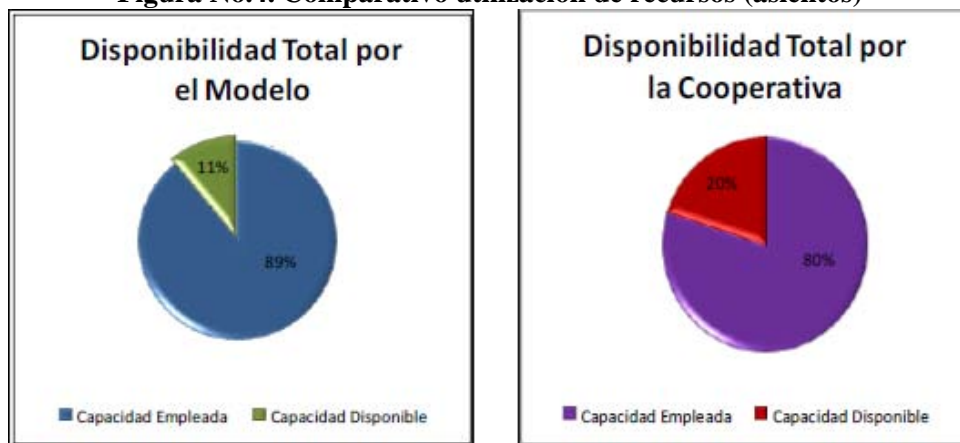
ArcView GIS Version 3.1
File Edit Script Window Help
-----
00.nts
Seleccionar el tema de puntos
-----
atheme=thview.getactivethemes.get(0)
aftab=atheme.getftab
shpofield=aftab.findfield("shape")
codigopfield=aftab.findfield("codigo")
-----
Seleccionar el tema de la red
-----
redtheme=thview.findtheme("red")
redftab=redtheme.getftab
shredfield=redftab.findfield("shape")
lonfield=redftab.findfield("long")
-----
Obtener el punto inicial
-----
r=1
apoint=aftab.returnvalue(shpofield,r)
codigopoint=aftab.returnvalue(codigopfield,r)
msgbox.info(codigopoint.asstring,"")
-----
seleccionar la linea del punto inicial
-----
redftab.SelectByPoint(apoint,1,#VTAB_SELTYPE_NEW)
redbitap=redftab.getselection
-----
Obtener el punto final de la linea para tener
la primera distancia
-----
for each r in redbitap
lon=redftab.returnvalue(lonfield,r)
aline=redftab.returnvalue(shredfield,r)
msgbox.info(r.asstring,"")
endpoint=aline.esline.returnstart
end
    
```

Fuente: Elaboración propia

Esta solución es desarrollada en Excel debido a su facilidad de utilización en la empresa (no incurre en compra de software adicional), para aprovechar las funcionalidades de hoja de cálculo y de programación de objetos.

En los resultados es común ver que existe una gran similitud entre las rutas trazadas manualmente y las trazadas por el modelo, sin embargo un elemento importante aportado por el último es la reducción en la cantidad de asientos vacíos por vehículo sin generar sobrecupo. Esto se puede apreciar en la Figura No.4, donde con la utilización de una capacidad inferior obtenida como solución del algoritmo propuesto, se recoge también el 100% de los estudiantes listados.

Figura No.4. Comparativo utilización de recursos (asientos)

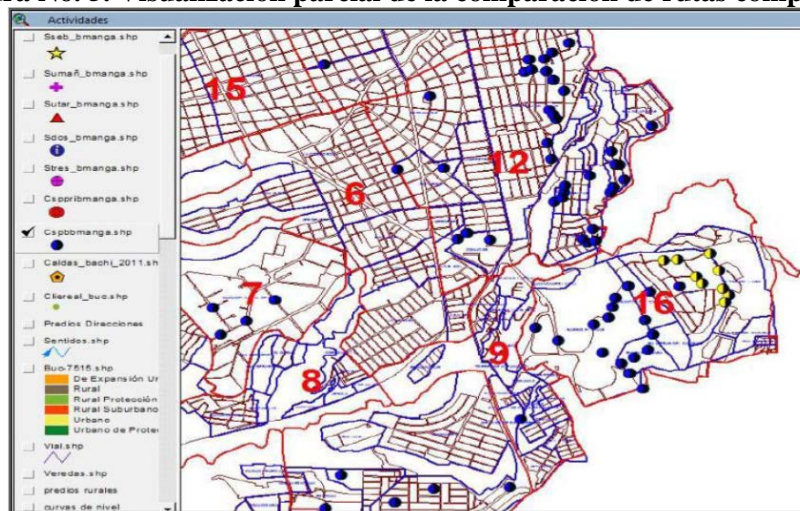


Fuente: Elaboración propia

Al analizar las rutas generadas por el algoritmo en cada una de las variaciones propuestas, se pueden considerar tres categorías de rutas, a saber:

1. Rutas compactas: Rutas que pueden ser implementadas tal como fueron generadas por el algoritmo. Ver Figura No. 5.

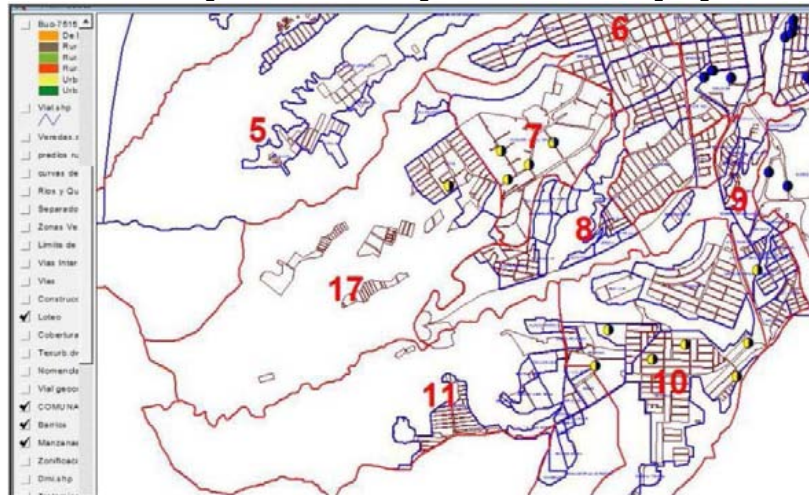
Figura No. 5. Visualización parcial de la comparación de rutas compactas.



Fuente: Elaboración propia

2. Rutas que permiten ser divididas: Rutas que abarcan dos sectores y fácilmente pueden ser divididas. Ver Figura No. 6. Se pueden dividir formando pequeños clusters identificados de manera visual.

Figura No. 6. Visualización parcial de la comparación de rutas que pueden ser divididas.



Fuente: Elaboración propia

3. Rutas Dispersas: Rutas que por la característica de la heurística utilizada en la primera fase del algoritmo genera puntos lejanos en la ejecución.

Luego de valorar y cuantificar los resultados obtenidos se pudo constatar que cerca al 82% de las rutas están en la categoría 1 y 2, siendo estas fácilmente implementadas por la empresa. Así mismo el otro 18% de las rutas puede ser asignado a las rutas divididas y así completar el cupo de los vehículos de las rutas de las categorías 1 y 2.

5. Discusiones/Conclusiones

La mayor dificultad para desarrollar este tipo de herramientas de soporte a decisiones, es la obtención de los parámetros del modelo, principalmente de las matrices de distancias, pues en primera instancia aún en Colombia no se cuenta con mapas digitales específicos de todas las ciudades del territorio nacional con ubicaciones de calles, carreras y vías. Y en segunda instancia, sobre estos hay que ubicar los puntos donde se encuentran los clientes, las orientaciones de las vías y programar los scripts que permitan capturar las distancias reales sobre estos elementos. Gracias a la integración en el manejo de herramientas GIS y software donde se pueda desarrollar un algoritmo de optimización conocido se pueden brindar soluciones empresariales realmente importantes.

Lo anterior muestra una gran oportunidad de desarrollo de productos orientados a la georeferenciación local y regional con miras a soportar estos procesos investigativos aplicados.

También muestra una gran oportunidad de apertura de caso a nivel industrial porque la aplicación del algoritmo es una herramienta de toma de decisiones para la empresa que le permite agilidad en la ejecución versus la aplicación manual; y permite al coordinador de transporte tener un documento sobre la cual considerar en el proceso las eventualidades que surgen durante el transcurso del año.

6. Referencias

- [1] Robusté, Francesc y Galván, Dante. E-logistics. Springer 2011.
- [2] Yepes, V., Medina, J. Optimización económica de redes de transporte del tipo VRPTW, Revista de obras públicas, Septiembre 2003/Nº 3.436, p. 31-33.
- [3] Sandoya, F. Métodos Exactos y Heurísticos para resolver el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP). ESPL, 2007, p. 10-14.
- [4] Punnen, A. The Traveling salesman problem, applications, formulations and variations. Kluwer academic publishers. Chapter One. pp. 1-24.
- [5] Ríos, R., Gonzalez, J., Investigación de operaciones en acción: heurísticas para la solución del TSP, Ingenierías, Octubre-Diciembre 2000, Vol. III, No.9, p. 15-16.
- [6] González, G., González, F., Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos. Un caso de estudio. Parte 1: formulación del problema. Ingeniería e Investigación, diciembre, año/Vol. 26, Número 003. Universidad Nacional de Colombia, p. 150.
- [7] Toth, P., Vigo, D., The Vehicle Routing Problem, SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications, p. 27-49.
- [8] Melián, B. Perez, J. Metaheurísticas: una visión global. Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. N.19 p. 7-28
- [9] Gavish, B. and Shlifer, E. An approach for solving a class of transportation scheduling problems. European Journal of Operational Research, Vol. 3, No. 2. pp.122-134. 1979.
- [10] Bowerman, R. et al. A multi-objective optimization approach to urban school bus routing: formulation and solution method. Transpn. Res.-A. Vol. 29A, No. 2, pp. 107-123, 1995.
- [11] LYO, Li and Z. Fu. The school bus routing problem: a case study. Journal of the Operational Research Society Vol. 53, pp. 552–558. 2002.
- [12] Junhyuk Park, Byung-In Kim. The school bus routing problem: A review. European Journal of Operational Research. Vol. 202. pp. 311–319. 2010.
- [13] Zong Woo Geem, Kang Seok Lee and Yongjin Park. Application of Harmony Search to Vehicle Routing. American Journal of Applied Sciences, Vol. 2. No. 12. pp.1552-1557. 2005.
- [14] Schittekat, Patrick et al. A metaheuristic for solving large instances of the School Bus Routing Problem. MIC 2007: The Seventh Metaheuristics International Conference. Montreal, Canada, June 25–29, 2007.
- [15] Armin Fugenschuh. Solving a school bus scheduling problem with integer programming. European Journal of Operational Research Vol. 193. pp. 867–884. 2009.