

Solución del problema de ruteo de vehículos dependientes del tiempo, usando un algoritmo genético híbrido con gerenciamiento de población

Fredy Alexander Guasmayan-Guasmayan ^a, Eliana Mirledy Toro-Ocampo ^b María Janeth Bravo Montenegro^c
Diego Hernan Peluffo Ordoñez^d

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Mariana, Pasto, Colombia. fguasmayan@umariana.edu.co

^b Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. elianatoro@gmail.com

^c Facultad de Ingeniería, Universidad Mariana, Pasto, Colombia. mabravo@umariana.edu.co

^d Facultad de Ingeniería y ciencias aplicadas, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador. dhpeluffo@utn.edu.ec

Abstract

In the operation of logistics service companies and distribution, traffic congestion becomes a problem to be considered, because of their effect on arrival times to meet to end users, in addition to routing costs. These costs may decrease making travel plans, where traffic congestion in urban centers are avoided. This paper proposes an experimental design to estimate congestion costs as input to solve the vehicle routing problem with time dependent (TDVRP). As strategy solution, it intends a genetic algorithm hybrid with population management. The data validation is performed considering a Dairy company making the distribution of its products in the store channel in Pasto, obtaining a 35% reduction in logistics costs of distribution of final product.

Keywords: manuscript formatting; camera-ready manuscript.

Resumen

En la operación de empresas de servicios logísticos como empresas de distribución la congestión del tráfico se constituye en un problema a considerar, debido a su efecto en los tiempos de llegada para atender a los usuarios finales, además de costos de ruteo. Esos costos pueden disminuir realizando planes de viajes donde se eviten las congestiones de tráfico de los centros urbanos. En este trabajo se propone un diseño experimental que permite estimar los costos por congestión como parámetro de entrada para resolver el problema de ruteo de vehículos dependiente del tiempo, (TDVRP). Como estrategia de solución se propone un algoritmo genético híbrido con gerenciamiento de la población. La validación se realiza considerando datos de una empresa de Lácteos que realiza la distribución de sus productos en el canal tienda de la ciudad de Pasto, obteniendo un 35% de reducción en los costos logísticos de distribución de producto final.

Palabras clave: Ruteo, algoritmo genético, diseño experimental.

1 Introducción

El problema denominado ruteo de vehículos dependientes del tiempo, (TDVRP), consiste en optimizar las rutas de una flota de vehículos con capacidad fija cuando los tiempos de viaje son dependientes del horario, la velocidad de cada viaje puede ser calculada como un dato conocido al inicio de la optimización, el cálculo de las velocidades se puede definir mediante observaciones de las calles de la ciudad en diferentes intervalos de tiempo. La consideración de los tiempos de viaje dependiendo de la hora del día se constituye en una herramienta valiosa en el momento de realizar la planificación del ruteo, puesto que se puede mejorar la calidad de las respuestas obtenidas, disminuyendo el costo de operaciones en el transporte y distribución de productos en una ciudad.

En el año 2008 Donati, et al. [1] solucionan el TDVRP usando colonia de hormigas, las restricciones de tiempo se hacen con base en información tomada de casos reales, y adicionan restricciones de contaminación, tráfico y velocidad vehicular para obtener las penalizaciones correspondientes al tiempo de cada ruta, generando soluciones a 30 clientes. En el año 2012 Kok, Hans y Schutten [2] trabajan el TDVRP

evitando usar rutas con mayor congestión vehicular, la solución se realiza por medio del algoritmo de Dijkstra y la heurística de programación dinámica restringida. Se muestra que el 99% de llegadas tarde en la visita a los clientes se puede evitar sacando las rutas que presentan mayor congestión estratégicamente, logrando mejorar el tiempo de llegada a un 70%.

En el artículo publicado por Chen, Hsueh y Chang en el 2006, [3] se toma el TDVRP en tiempo real, como un modelo de programación entero mixto para 25 clientes. Según el artículo de Jaime y Palacios [4] en el 2005 se toma el problema del ruteo de vehículos dinámico con ventanas de tiempo en tiempo real con respecto a las condiciones de oferta y demanda, cuantificando los beneficios del uso de tiempos de viaje dependientes del tiempo en la construcción de rutas de despacho vehiculares.

En este trabajo se resuelve el TDVRP, por medio de algoritmos genéticos [5], apoyados por heurísticas que generen la población inicial de soluciones, las cuales iterativamente se mejoran hasta llegar a una solución confiable aplicada al caso particular de los sectores a los que visitan los vehículos de la empresa, para lo cual se establecen parámetros y clasificación de calles en la ciudad y se define

sectores por coordenadas de latitud y longitud, [6] lo cual permite calcular el costo de distancias entre sectores [7] afectadas por la clasificación de las calles con mayor o menor congestión de acuerdo al horario en el que se cumple la ruta por los vehículos [8].

2 Formulación del problema

A partir del modelo de programación lineal entera para el CVRP, se ajusta la función objetivo de dicho modelo con el fin de considerar el tiempo u horario de salida de los vehículos como un factor que de acuerdo a la hora del día afecte el costo del recorrido en cada ruta Che, -et al. [9] con la suma de todos los costos al ir de un punto a otro más un factor β que afecta al costo del tiempo por causa del horario, estableciendo como objetivo la minimización del costo por distancia y horario, [10]. Los índices y variables del problema son:

- i: nodo de partida del vehículo.
- j: nodo de llegada del vehículo.
- k: Vehículo a utilizar (1,2,3,...k)
- d: Demanda del cliente.

x_{ijk} : Si es igual a 1, el vehículo k es asignado para recorrer el arco desde el nodo i al nodo j. Es igual a 0 en caso contrario.

Y_{ij} : 1 si se realiza el recorrido desde el nodo i, hasta el nodo j. 0 en caso contrario.

- Se pueden definir otros elementos como parámetros así:
- c_{ij} = Costo de transporte del nodo i al nodo j
- d_i = Demanda en el nodo j
- u = Capacidad del recurso k
- n = Cantidad de clientes
- β = Factor de sobre costo por horario de recorrido

El Modelo matemático de ruteo según los aportes de Ahuja et al. [9] y Olivera [11], se lista con las ecuaciones siguientes [5]:

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} y_{ij} + \beta \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} y_{ij} \quad (1)$$

Sujeto A:

$$\sum_{1 \leq k \leq K} x_{ij}^k = y_{ij}; \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_{1 \leq j \leq n} y_{ij} = 1; \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{1 \leq i \leq n} y_{ij} = 1; \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{1 \leq j \leq n} y_{0j} = k \quad (5)$$

$$\sum_{1 \leq j \leq n} y_{i0} = k \quad (6)$$

$$\sum_{1 \leq i \leq n} \sum_{1 \leq j \leq n} d_i * x_{ij}^k \leq u; \forall k \quad (7)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} y_{ij} \leq |Q| - 1; \forall \text{ subconjunto de } Q \text{ de } \{1, 2, \dots, n\}$$

$$k \leq K \quad (9)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}; \forall (i, j) \in A \quad (10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}; \forall (i, j) \in A, \forall k \quad (11)$$

3 Metodología de solución

3.1 Diseño Experimental para estimar la congestión vehicular.

Para determinar un valor de sobre costo, dado por las condiciones de la ciudad de San Juan de Pasto, se opta por realizar un diseño experimental para encontrar una clasificación de tres elementos importantes que caractericen dicho sobre costo. Estos elementos son: En primer lugar, la hora en la que los vehículos salen a su recorrido para indicar las diferencias en horas pico y valle.

Un segundo elemento es el día, este permite determinar si existe o no diferencia del flujo vehicular en un día entre lunes y viernes en los cuales existe restricción vehicular con el día sábado en el que no existe dicha restricción. Además, se considera el día domingo como referencia de un día feriado.

El tercer elemento, es la categoría de la calle, es decir si existe una congestión alta, media o baja.

Tabla 1.

Factor y niveles del diseño experimental.

Factor	Niveles
Hora	Mañana
	Tarde
	Noche
Día	Sábado
	Domingo
	Jueves
	Jueves
Categoría	Alta
	Media
	Baja

3.2 Proceso de recolección de información

De acuerdo con las categorías establecidas anteriormente, se procede a realizar conteos de vehículos en los días jueves, sábado y domingo en las horas de la mañana, medio día y en

la noche en las 17 calles seleccionadas, usando 3 de ellas como referencia de congestión vehicular alta, media y baja.

Tabla 2.
Densidad vehicular en la ciudad de Pasto, calle Lorenzo.

Categoría	Hora	Densidad (Vehículos/Km)
Mañana	07:00 am	46,65
	08:00 am	61,57
	09:00 am	57,95
Tarde	12:00 m	62,40
	01:00 pm	55,88
	02:00 pm	73,73
Noche	06:00 pm	67,17
	07:00 pm	65,20
	08:00 pm	45,02

La tabla 2, muestra la densidad vehicular por aforo directo en la Ciudad de San Juan de Pasto.

3.3 Proceso de clasificación de la información por análisis de varianza

El proceso de análisis de varianza se realiza de acuerdo a las respuestas de los datos usando un nivel de confianza del 95%, con verificación de supuestos de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene, las pruebas de normalidad de los residuos y los datos usando la prueba estadística de Kolmogorov Smirnov con la corrección de Lilliefors y la prueba de Shapiro- Wilk. [13] y la generación de rangos como lo recomienda Montgomery[14], en caso de existir diferencia significativa entre los tratamientos se usa la prueba estadística de Tukey. [15], se observa las gráficas de perfil con el fin de encontrar la existencia o no de interacción entre los factores. [16] y se concluye el ANOVA [17].

Con respecto a la ejecución del análisis de varianza del diseño experimental planteado, se encuentra que no existe diferencia significativa entre las horas pico en las categorías mañana y tarde, concluyendo que el sobrecosto a las rutas se debe aplicar en horas pico (7 a 9 am, 12 a 2 pm), en horas diferentes a estas no se aplica el sobrecosto.

Del mismo modo se encuentra que los días de la semana y el sábado son estadísticamente iguales, excepto el día domingo en el que no se realiza recorridos.

Para el caso de las calles, se encuentra que si existe diferencia significativa en las categorías de calle (alta, media, baja), con esto se realiza una clasificación usando diferencia de medias estadísticas con la prueba T de Student, de este modo se establece un valor de sobrecosto por congestión vehicular de acuerdo a la categoría alta y media.

3.4 Algoritmo genético híbrido

Se genera una población inicial de forma aleatoria (200 individuos), se realiza partición de vectores de acuerdo con la demanda y se procede a seleccionar dos padres por el método de la ruleta, dando mayor probabilidad a los individuos con mejor función objetivo, se cruzan los hijos usando PMX, posteriormente al 5% de la población se realiza

una mutación con el método de búsqueda en entornos variables y se ingresa a la población aunque desmejore la función objetivo, el individuo que no ingresa a la población se deshecha de acuerdo a un criterio de aspiración. Para obtener una población mejorada se procede a incluir 30 individuos obtenidos por medio de heurísticas [18]:

- Heurística de intercambio 2 OPT.
- Heurística de inserción del más barato.
- Heurística del vecino más cercano
- Heurística del ahorro
- Heurística del barrido.

Una vez cumplidas las generaciones se procede a realizar una etapa de mejoramiento con 2 OPT y VNS, garantizando la secuencia del algoritmo genético de Chu – Beasley el cual permite conformar una población con individuos diferentes para un rendimiento y mejora del costo computacional [19].

4. Resultados

Con respecto a los resultados del ANOVA se realiza una clasificación de las calles como se muestra en la tabla 3, para esto se usa la prueba estadística “T Student” [20].

Tabla 3.
Relación de velocidad media con velocidad crítica por categoría.

Velocidad media según googlemaps Km/h	Velocidad media por cada categoría Km/h	Factor de relación por categoría
13,93	6,14	2,27
13,93	7,15	1,95
13,93	9,93	1,4

5.1 Resultados en Algoritmo genético

Inicialmente se toma 154 sectores que agrupan a los clientes de la empresa, para garantizar el funcionamiento del algoritmo se realiza una sintonización de parámetros como, generaciones, porcentaje de mutación, puntos de cruce, entre otros; en una siguiente etapa se comprueba los resultados de las instancias publicadas en la literatura especializada, para lo cual se consigue resultados iguales y en otros casos mejores, lo que permite pasar a correr el algoritmo con los valores de la caracterización dados por la matriz de costos por distancia y congestión vehicular según el horario, generando un ruteo que se ingresa a Google maps y se dan las rutas a los conductores de la empresa.

El nombre de la instancia se caracteriza por llevar el número de ciudades y el número de rutas, así como ejemplo la instancia AUGERAT39K5 indica un problema de ruteo para 39 clientes y 5 rutas.

Tabla 5. Resultados para las corridas del algoritmo genético para diferentes instancias.

Instancia	Valor óptimo	Función objetivo mínima encontrada	% error mínimo	Tiempo de ejecución seg.
Augerat33k6	742	751,86	1,33	149

Augerat34k5	778	789,9	1,53	252
Augerat38k5	730	737,56	1,04	303
Augerat60k9	1408	1401	-0,4	391

Para lograr visualizar las rutas obtenidas se introduce a la web en la API de googlemaps el valor de las coordenadas de latitud y longitud de acuerdo con la secuencia de cada ruta encontrada.

6. Conclusiones

- Se presentó un diseño experimental que permite determinar los aforos vehiculares en las diferentes calles de una ciudad para cuantificar el comportamiento de la densidad vehicular y por ende la congestión de la red vial.
- Se presenta una metodología para resolver el TDVRP donde se considera la congestión vehicular de las vías, considerando distintos escenarios basados en la congestión vehicular en horas pico en los días no feriados.
- La metodología se valida en un caso de prueba de la empresa Colácteos de la ciudad de San Juan de Pasto.
- Los resultados obtenidos en la metodología propuesta presentan un ahorro del 34% del costo de las rutas contrastados con el ruteo actual de empresa, el cual es realizado de forma empírica.

Referencias

- [1] A. V. Donati, R. Montemanni, N. Casagrande, A. E. Rizzoli, and L. M. Gambardella, "Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 185, no. 3, pp. 1174–1191, Mar. 2008.
- [2] D. Tas, N. Dellaert, T. Van Woensel, and T. De Kok, "The Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times The Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows and Stochastic Travel Times," vol. 413, no. March, 2013.
- [3] H.-K. Chen, C.-F. Hsueh, and M.-S. Chang, "The real-time time-dependent vehicle routing problem," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 42, no. 5, pp. 383–408, Sep. 2006.
- [4] M. J. E. Palacios, "Una formulación para el problema de ruteo de vehículos con tiempos de viaje dependientes del tiempo para la actualización de rutas con información en tiempo real," Pontificia universidad Católica de Chile, Escuela de ingeniería, 2009.
- [5] Y. V. Piqueras, "tesis doctoral Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW," Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- [6] S. THANGIAH, "Vehicle routing with time windows using genetic algorithms.," *Appl. Handb. Genet. Algorithms New Front. Vol. II 253-277. CRC Press. Boca Raton.*
- [7] E. T. O. , R. Gallego R, A Escobar Z, *Técnicas metaheurísticas de optimización*, Segunda ed. Pereira, 2007.
- [8] B. M. Baker and M. a. Ayechev, "A genetic algorithm for the vehicle routing problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 30, no. 5, pp. 787–800, Apr. 2003.
- [9] K. C. Tan, Y. H. Chew, and L. H. Lee, "A hybrid multi-objective evolutionary algorithm for solving truck and trailer vehicle routing problems," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 172, no. 3, pp. 855–885, Aug. 2006.
- [10] J. P. O. CARDOZO, "Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada 'cvrp' a través de la heurística de barrido y la implementación del algoritmo genético de chu-beasley," Universidad Tecnológica de Pereira, 2013.
- [11] A. OLIVERA, "Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos," *Inst. Comput. Fac. Ing. Univ. la República, Montevideo, Uruguay.*, 2004.
- [12] Y. Li, L. Zhang, T. Zheng, and Y. Li, "Lattice hydrodynamic model based delay feedback control of vehicular traffic flow considering the effects of density change rate difference," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 29, no. 1–3, pp. 224–232, 2015.
- [13] M. Neuhäuser and L. Hothorn, "Parametric location-scale and scale trend tests based on Levene's transformation," *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 33, pp. 189–200, 2000.
- [14] Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, Segunda. New York, 2004.
- [15] V. Sreedevi, M. Hemaprasad, G. Sandhyadevi, and P. Pardhanandana Reddy, "Induction of sister chromatid exchanges in traffic policemen exposed to vehicular exhaust," *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.*, vol. 606, no. 1–2, pp. 80–84, 2006.
- [16] F. Marini, D. de Beer, E. Joubert, and B. Walczak, "Analysis of variance of designed chromatographic data sets: The analysis of variance-target projection approach," *J. Chromatogr. A*, vol. 1405, pp. 94–102, 2015.
- [17] L. Wang and X. Xu, "Global testing method for clustering means in ANOVA," *J. Korean Stat. Soc.*, vol. 43, no. 3, pp. 381–392, 2014.
- [18] A. Olivera, "Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos," Universidad de la república. Montevideo, Uruguay, 2004.
- [19] P. Issn, "SECUENCIAMIENTO DE TAREAS EN SISTEMAS DE PRODUCCION LINEAL – FLOW," no. 30, pp. 285–290, 2006.
- [20] N. E. Thomas, "Multi-state and multi-sensor incident detection systems for arterial streets," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 6, no. 5–6, pp. 337–357, 1998.