

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Propuesta de un Calendario de Abastecimiento y Ruteo Óptimo:
Para una Empresa de Reparto de Electrodomésticos.**

**Diego Esteban Granda Muñoz
Geovanny David Espinel Alvear
Christian Eduardo Villagómez Ramírez**

Ingeniería Industrial

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
INGENIERO INDUSTRIAL

Quito, 11 de mayo de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Propuesta de un Calendario de Abastecimiento y Ruteo Óptimo:
Para una Empresa de Reparto de Electrodomésticos.**

Diego Esteban Granda Muñoz

Geovanny David Espinel Alvear

Christian Eduardo Villagómez Ramírez

Nombre del profesor, Título académico

Sonia Valeria Avilés, Sacoto, D.Sc.

Quito, 11 de mayo de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Diego Esteban Granda Muñoz

Código: 00125081

Cédula de identidad: 0604409375

Nombres y apellidos: Geovanny David Espinel Alvear

Código: 00116838

Cédula de identidad: 1718940792

Nombres y apellidos: Christian Eduardo Villagómez Ramírez

Código: 00130157

Cédula de identidad: 1725269656

Lugar y fecha: Quito, 11 de mayo de 2020.

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

La industria de electrodomésticos ha tenido un fuerte auge en los últimos años. La creciente demanda de estos productos constituye un desafío en la planificación operacional y la solvencia de pedidos para las empresas dedicadas a su manufactura, logística o comercialización. En el área de logística, la planeación de su distribución, incrementa su complejidad al considerar varios factores, como la localización geográfica de los clientes, la capacidad de camiones, condiciones especiales de servicio y restricciones de horario. Dentro de este contexto, se estudia el caso de una empresa ecuatoriana de distribución de electrodomésticos que presenta altos costos logísticos debido a una ineficiente planificación y ejecución de los envíos. Se propone la aplicación de herramientas de optimización y mejoramiento para minimizar el costo de transporte en las operaciones logísticas. Esto requiere, en primer lugar de la agrupación de clientes con base en características similares para delimitar el número de zonas a distribuir en el país, a continuación, el determinar las rutas más óptimas de distribución, para finalmente desarrollar un plan de entregas acorde al comportamiento de la demanda. Estas herramientas se desarrollan bajo la adaptación de una metodología para la aproximación de modelos de investigación de operaciones, con el fin de proponer una planificación de abastecimiento y la definición de rutas óptimas minimizando los costos.

Palabras clave: Calendario de abastecimiento, problema de ruteo, optimización, estabilizar flujo, minimizar costos de transporte, agrupamiento, ventanas de tiempo.

ABSTRACT

The home appliance industry has had a strong development in recent years. The growing demand for these products is challenging operational planning and solvency of orders for companies engaged in their manufacturing, logistics or marketing. order reliability. In the area of logistics, the planning of its distribution, becomes more complex when considering various factors, such as the geographical location of customers, truck capacity, special service conditions and time restrictions. Within this context, we study the case of an Ecuadorian home appliance distribution company that presents high logistics costs due to inefficient planning and execution of shipments. The application of optimization and improvement tools is proposed to minimize transportation costs in logistics operations. This requires, first of all, the grouping of customers based on similar characteristics to delimit the number of areas to be distributed in the country, then, the determination of the most optimal distribution routes, in order to develop a delivery plan according to the behavior of the demand. These tools are developed under the adaptation of a methodology for the approximation of operations research models, in order to propose a supply planning and the definition of optimal routes minimizing costs.

Key words: Supply schedule, routing problem, optimization, flow stabilization, minimize transportation costs, clustering, time windows.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	10
Desarrollo del Tema.....	12
Revisión literaria	12
Mercado de electrodomésticos.....	12
Costos de transporte.....	13
Problema de ruteo de vehículos (VRP).....	14
Métodos de agrupamiento – clustering.....	15
Algoritmos para resolver el problema de ruteo de vehículos (VRP).....	16
Metodología	17
Definición del problema y recopilación de datos.....	18
Formulación de un modelo matemático que representa al problema.....	18
Uso de algoritmos computacionales para encontrar una solución.....	19
Pruebas del modelo, mejoramiento y resultados.....	19
Aplicación a EcuReparto	19
Definir el problema y recolectar información importante.....	19
Formulación de un modelo matemático que representa al problema.....	23
Uso de algoritmos computacionales para encontrar una solución.....	28
Pruebas del modelo, mejoramiento y resultados.....	30
Conclusiones	33
Limitaciones.....	34
Estudios futuros.....	34
Referencias bibliográficas	35
Anexo A: código en ampl para VRP	41
Anexo B: código en ampl para modelo de calendarización.....	41
Anexo C: Rutas Resultantes del VRP	41
Anexo D: Resultados del modelo de calendarización.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variaciones del Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP).....	14
Tabla 2. Métodos de Agrupamiento.....	16
Tabla 3. Algoritmos para el Problema de Ruteo de Vehículo (VRP).....	19
Tabla 4. Parte de las Rutas resultantes del VRP.....	28
Tabla 5. Extracto del Modelo de Calendarización.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Margen de Utilidad de electrodomésticos desde el 2011 al 2019.....	13
Figura 2. Pasos de la Metodología Adaptada.....	18
Figura 3. Frecuencia Diaria Actual de EcuReparto.....	20
Figura 4. Flujo Diario de Dinero Despachado por EcuReparto.....	21
Figura 5. Localización de clientes de EcuReparto en Ecuador.....	22
Figura 6. Agrupamiento de los clientes de EcuReparto con K-Means.....	23
Figura 7. Frecuencia Semanal de Visitas a Clientes de EcuReparto.....	31
Figura 8. Comparación del Flujo Diario de Dinero Despachado.....	31

INTRODUCCIÓN

La distribución de electrodomésticos mundialmente ha tenido relevantes transformaciones debido a los avances tecnológicos y el interés por ser más eficientes. Los electrodomésticos comprenden una gran gama de productos, abarcan desde hornos, refrigeradoras, aires acondicionados hasta computadoras, radios, televisiones, entre otros. Este mercado a nivel mundial genera elevadas ganancias año tras año. Así, en el año 2013, la demanda de estos productos generó 225000 millones de dólares en ingresos, su mayor parte en países en desarrollo. A su vez, el crecimiento en mercados emergentes viene acompañado con una tasa de crecimiento del 4% a partir del 2018 para los próximos 5 años con base en su proyección industrial (Zhao, 2019).

El mercado de electrodomésticos tiene una fuerte participación y un crecimiento continuo. Este mercado busca cada vez ser más innovador, enfocado en el rendimiento, en la calidad y la conexión que buscan satisfacer las necesidades de los consumidores. En el Ecuador, generó ganancias de \$290.9 millones alcanzadas en el año 2015, lo que representó un crecimiento del 29.7% con relación al año 2014. Cifra que remarca la alta participación de este mercado en el país (Bonilla & Paguay, 2017). Esta oportunidad ha incitado a la investigación de las actividades logísticas desde el punto de vista de minoristas y mayoristas. Con el objetivo de determinar una distribución efectiva de los electrodomésticos que permita satisfacer las demandas de sus consumidores. Las actividades logísticas representan un reto cuando son desarrolladas ineficientemente ya que desencadenan dificultades operativas y elevados costos de distribución. La empresa ecuatoriana EcuReparto recae dentro de este marco, debido a que actualmente tiene problemas en sus operaciones logísticas al momento de determinar su calendario de abastecimiento lo que genera altos costos asociados a la distribución.

Por ello, es necesario el planteamiento de un calendario de abastecimiento que permita optimizar y reducir los costos de las operaciones logísticas de EcuReparto. Éste debe contemplar factores como la ubicación de sus clientes, la frecuencia de visita, los costos y las capacidades de transporte. La metodología presentada pretende agilizar y flexibilizar las actividades logísticas, optimizando los recursos para la distribución de sus productos y satisfaciendo las demandas de sus clientes. Adicionalmente, éste debe incluir los requerimientos de la empresa y de sus clientes para mejorar su modo de distribución a nivel nacional.

En los apartados siguientes se describe una nueva metodología para resolver el problema relacionado con la calendarización del abastecimiento de pedidos, además se expone una propuesta de las rutas de visita óptimas. En la sección 2 se detalla la revisión literaria que apoya la metodología propuesta en este estudio. En la sección 3 se describe la modificación del modelo tradicional para el suministro en la empresa de distribución de electrodomésticos. La sección 4 ilustra la aplicación de esta nueva metodología. En la sección 5 aparecen las conclusiones.

DESARROLLO DEL TEMA

Revisión literaria

Esta sección incluye temas como: el mercado mundial y ecuatoriano de electrodomésticos, el costo del transporte asociado a la distribución, el análisis de conglomerados, el problema del ruteo de vehículos y los posibles algoritmos de solución. Abarcando estos conceptos para sustentar el desarrollo de la propuesta metodológica para EcuReparto.

Mercado de electrodomésticos.

Los electrodomésticos son definidos como productos eléctricos, aprovechados por los consumidores principalmente para las funciones de conservación y preparación de comida, comodidad, limpieza y entretenimiento. Algunos de los productos más conocidos son refrigeradoras, secadoras, radios, cocinas, celulares, televisiones, radios, entre otros que tienen una alta tasa de consumo. A nivel mundial, las grandes empresas manufactureras de éstos, con mayor presencia en este mercado son: Samsung Electronics, LG Corp, Haier Group, Electrolux AB y Whirlpool Coportation (GrandViewResearch, 2019).

Este mercado puede ser segmentado en mercados en crecimiento y en núcleos de mercados. Los mercados en crecimiento comprenden las grandes potencias como es Norte América, Europa del Oeste – Australia y Nueva Zelanda – Japón que tienen un aumento estimado en el producto interno bruto del 2.5%, 1.9%, y 2.3% respectivamente en el año 2018. De la misma manera, en mercados en crecimiento como es América Latina, Asia del Sur – China y África – Europa Central y del Este, con un incremento estimado en el producto interno bruto generado por la presencia de este mercado en el 2018 con 0.6%, 6.3% y 1.7% respectivamente (Electrolux, 2018).

Mundialmente, este mercado fue valorado en 964.400 millones de dólares con una proyección del 7.2% desde el año 2015 al 2017 de la tasa de crecimiento anual compuesta. La explicación de este crecimiento es derivada del aumento por el consumo tecnológico, la modernidad y la interconectividad entre productos. Además, del incremento de comercio electrónico, la digitalización de servicios de ventas y la demanda de economías emergentes (GrandViewResearch, 2019).

En Ecuador, el mercado de electrodomésticos en general ha tenido un margen de beneficio bruto del 15,88% de 2011 a 2019 (SRI, 2020). Con un gran incremento en el año 2015 y una recuperación en 2019 del 8,39% con respecto al 2018. Esto se puede ver en la Figura 1. EcuReparto, se encuentra en los primeros lugares de participación en el mercado ecuatoriano según datos de la SuperCIAS recuperados en el año 2020.

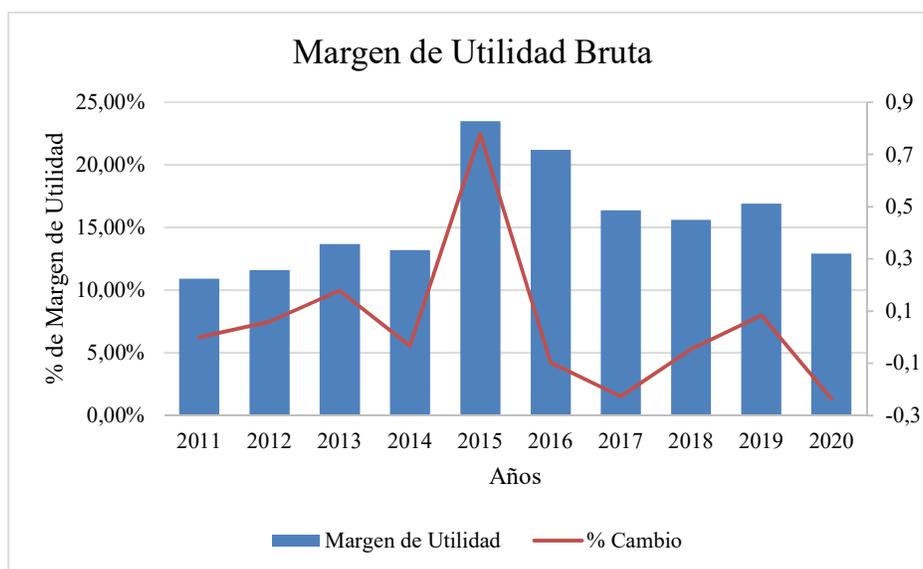


Figura 1. Margen de Utilidad de electrodomésticos desde el 2011 al 2019.

Costos de transporte.

Las actividades logísticas involucran grandes costos, los cuales se debe tratar de disminuirlos, sin perder la calidad del servicio y maximizando el nivel de servicio de los

clientes. Sin duda, esto constituye un desafío retador para las empresas, pero que es necesario si se quiere abarcar sectores de mercado mucho más grandes (Li & Yang, 2017). Los diversos factores que incrementan estos costos incluyen la distancia recorrida para satisfacer la demanda de un cliente en específico, los peajes en las autopistas, características especiales de las carreteras (tipo de carretera, clima) y muchas otras que son necesarias al momento de calcular costos de transporte con un enfoque real de la situación (Crainic et al., 2012). Por otro lado, también se deben considerar costos de mantenimiento de la flota de transporte y capacitaciones de los conductores, enfatizando siempre en mejorar la satisfacción del cliente (Song & Chen, 2007). Este es un desafío para todas las empresas que realizan entregas a sus clientes, ya que deben identificar dichos costos y minimizarlos. Muchas compañías aplican modelos de optimización de investigación de operaciones en los que encuentran soluciones óptimas de rutas, cantidades de pedido y días en los que se deben realizar las distribuciones, entre otras variables (Wang et al., 2018).

Problema de ruteo de vehículos (VRP).

El VRP es un problema de complejidad no polinomial (NP-hard), es decir su tiempo de resolución está definido por tiempos no polinomiales, los que son bastante altos. (Agrawal, Kayal & Saxena, 2004). Una clasificación de VRP se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. *Variaciones del Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP)*

Modelo	Descripción	Referencias
Problema de ruta del vehículo de reparto dividido (SDVRP).	La demanda de un cliente puede ser dividida y entregada por diferentes vehículos.	(Archetti & Speranza, 2012; Sharma et al., 2018).

Problema de ruteo de vehículos de doble escalón (2E-VRP).	Este modelo se desarrolla en 2 fases. La primera fase es la distribución del depósito principal a depósitos satélites. La segunda fase es el transporte de los depósitos satélites a los clientes.	(Butty et al., 2016; Eitzen et al., 2017; Perboli et al., 2017)
Problema de ruteo de vehículos abiertos (OVRP).	Entrega para un conjunto de clientes que utilizan una flota homogénea de vehículos capacitados de retorno sin depósito. Con base en distancias hamiltonianas. Generalmente se utilizan proveedores de logística de terciarizada.	(Repoussis et al., 2007, 2010; Sariklis & Powell, 2000).
Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos (MDVRP).	Los clientes son abastecidos por varios depósitos. Se enfoca en minimizar la distancia total recorrida y el número de vehículos utilizados para la operación.	(De Oliveira et al., 2016; Opoku-Amankwaah & Ombuki-Berman, 2018; Ray et al., 2014)
Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW).	Se toma en cuenta el tiempo de transporte total en la flota de vehículos además de las consideraciones iniciales.	(El-Sherbeny, 2010; Ren, Wang & Sun, 2006)
Problema de Ruteo de Vehículos Capacitados (CVRP)	Se asume que los vehículos de una flota tienen capacidad uniforme y parten desde una misma bodega. Estos satisfacen la demanda de los clientes en varias rutas. Elimina sub-tours.	(Hannan et al., 2018, Zulfiqar, Isnanto & Nurhayati, 2018)

Métodos de agrupamiento – clustering.

La planeación de las actividades logísticas en las empresas depende de una gran cantidad de datos de los clientes, como localizaciones, direcciones, horas de entrega y datos en relación al producto. Desafortunadamente, trabajar con grandes cantidades y variedad de datos complica mucho la implementación y los tiempos de resolución de los modelos matemáticos. Por ese motivo se utilizan métodos de agrupamiento que dividen al problema completo en sub-problemas que son más sencillos de resolver (Renjith et al., 2019). El detalle de los 5 métodos más utilizados para agrupamiento de datos, se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. *Métodos de Agrupamiento*

Métodos	Descripción	Referencias
Métodos de Partición	Agrupación de los datos en k grupos de una forma iterativa. Algoritmos principales: K-Means, K-Medoids, K-Modes.	(Benabdellah et al., 2019; Nagpal et al., 2013; Saxena et al., 2017)
Agrupamiento Jerárquico	Agrupamiento en forma de árbol de jerarquía. Los clusters se conocen como dendogramas. Algoritmos principales: Birch, Cure, Rock.	(Benabdellah et al., 2019; Nagpal et al., 2013; Nisha & Kaur, 2016)
Agrupamiento basado en grillas	Se forman mallas o grillas a partir de los datos, luego se realizan agrupamientos en cada malla. Algoritmos principales: Clique, Sting.	(Benabdellah et al., 2019; Nagpal et al., 2013)
Agrupamiento basado en densidad	Se agrupan los datos según la densidad de los datos en alguna región. Algoritmo principal: DBSCAN.	(Benabdellah et al., 2019; Halkidi et al., 2001)
Agrupamiento basado en modelos	Agrupación de los datos con modelos matemáticos. Algoritmo principal: COBWEB, EM (Expectation Maximization Clustering).	(Benabdellah et al., 2019; Nagpal et al., 2013)

Algoritmos para resolver el problema de ruteo de vehículos (VRP).

El resultado de resolver este problema es establecer rutas entre un centro de distribución y varios puntos de venta. Este problema ha experimentado modificaciones a través del tiempo dependiendo del contexto de cada situación que recae en la formulación respectiva (Güneri, 2006). Las heurísticas y metaheurísticas son algoritmos usados para tener una respuesta viable en un tiempo razonable de resolución por muchos investigadores. La Tabla 3 muestra algoritmos para este problema.

Tabla 3. *Algoritmos para el Problema de Ruteo de Vehículo (VRP)*

Método	Descripción	Referencia
---------------	--------------------	-------------------

Metaheurística: Tabu Search	Resuelve problemas complejos. Algoritmo principal: Tabu Search.	(Zare, 2015)
VRP Capacitado (CVRP) con Tabu Search y Algoritmos Genéticos	Crea una solución inicial y se mejora. Algoritmos principales: Tabu Search (Construction) y Algoritmos Genéticos (Mejoramiento).	(Garzón et. al, 2016)
Metaheurística: Colonia de Hormigas	Con hormigas artificiales mejora las rutas individuales. Algoritmo principal: Optimización por Pareto de Colonia de Hormigas (PACO).	(Zare, 2015)
Metaheurística: Algoritmo Híbrido	Combina algoritmos. Algoritmo principal: Algoritmo Híbrido.	(Zare, 2015)
Metaheurística: Algoritmos Evolucionarios	Incluyen un Pareto para ver espacios para posibles soluciones. Algoritmo principal: Evolucionario.	(Zare, 2015)
Método de Ahorro y Barrido	Define métodos para algunas variaciones de VRP. Algoritmo principal: Método de Ahorro y Barrido.	(Güneri, 2006)
Heurísticas casi óptimas y no óptimas	Uso de métricas para ambos tipos de Heurísticas. Algoritmos principales: Heurísticas casi óptimas y no óptimas.	(Arnold, 2019)

Metodología

Este proyecto considera la ineficiencia en la creación, programación y frecuencia de rutas de despacho que trae consigo elevados costos innecesarios al momento de realizar entregas. Para esto se toma en cuenta la metodología propuesta por Hillier y Lieberman para resolver este problema (2015). Como resultado se tendrá un calendario de abastecimiento y un detalle de las rutas que se realizarán en dicho calendario. Para este caso se adaptó la metodología tomando en cuenta el contexto del desarrollo de este problema que se muestra en la Figura 2.

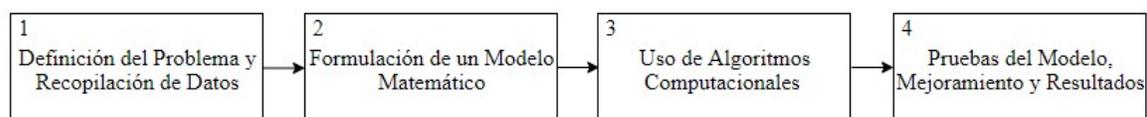


Figura 2. Pasos de la Metodología Adaptada (Hecho por los autores).

Definición del problema y recopilación de datos.

Se toma en cuenta la totalidad del sistema para definir el problema. Un enunciado debe constar de objetivos, restricciones, interrelaciones, plazos para tomar decisiones y posibles alternativas. Hay que considerar lo que les interesa a empleados, clientes, partes relacionadas, proveedores y gobierno, de ser necesario, al momento de definir el problema. Todo esto tomando en cuenta a donde se quiere llegar, que beneficios se obtienen y la disminución de costos (Hillier & Lieberman, 2015).

Formulación de un modelo matemático que representa al problema.

El modelo estará formado por un conjunto de ecuaciones en las que consten variables de decisión, parámetros, restricciones y lo más importante, un objetivo. Este modelo debe ser una idealización abstracta que puedan dar resultados que tengan relevancia en la vida real (Hillier & Lieberman, 2015).

Uso de algoritmos computacionales para encontrar una solución.

Se necesita de algoritmos computacionales para resolver el problema. Estos deben reflejar una buena estrategia de resolución y brindar buenas soluciones contemplando la complejidad computacional (Hillier & Lieberman, 2015).

Pruebas del modelo, mejoramiento y resultados.

Es necesario probar el modelo, con un cambio de parámetros y verificar que no existan defectos o de erradicarlos (Hillier & Lieberman, 2015). En caso de cambios, EcuReparto debe juzgar que todo cambio se apegue a la realidad de la empresa y sea viable.

Aplicación a EcuReparto

La adaptación de la metodología detallada con anterioridad, permite determinar el enrutamiento óptimo y la eficiente calendarización de abastecimiento para empresas de distribución. En los apartados siguientes se aplica cada paso de la metodología a EcuReparto para poder encontrar un calendario de abastecimiento óptimo y las rutas más eficientes de distribución.

Definir el problema y recolectar información importante.

El primer paso de esta metodología para incrementar su comprensión es dividido en cuatro pasos.

Definir la situación actual y el problema.

La situación actual de EcuReparto puede ser catalogada como ineficiente. El principal motivo es debido al mal manejo en la planificación semanal de abastecimiento con relación al

nivel de ventas de cada cliente. Este considera, la cantidad de visitas semanal y el flujo de dinero despachado diario a cada cliente. Como se puede ver en la Figura 3, es posible evidenciar que actualmente existe una inestabilidad en la visita diaria a los clientes a lo largo de la semana, con bajas los días martes y jueves, en tanto que, con altos picos los días miércoles, con alrededor de 500 visitas realizadas por semana.

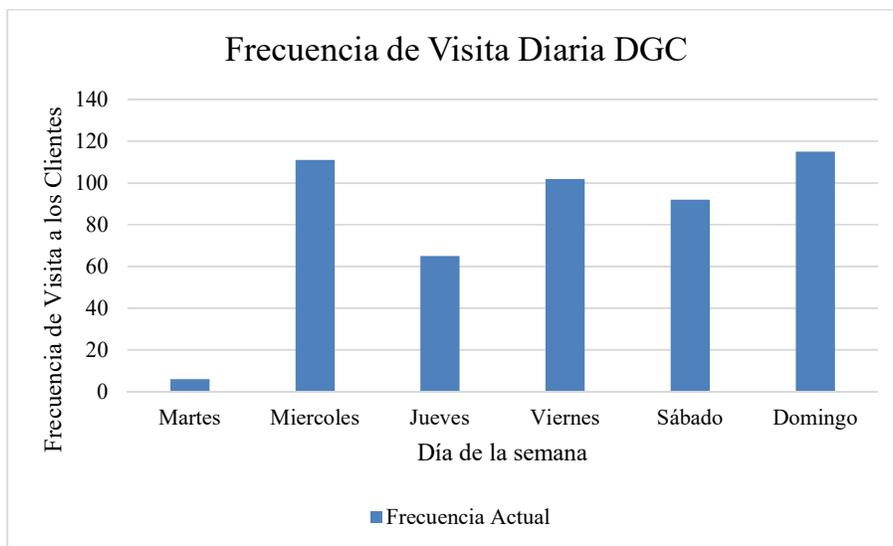


Figura 3. Frecuencia Diaria Actual de EcuReparto (Hecho por los autores).

Además, el flujo de dinero despachado semanalmente por EcuReparto es inestable. Provocado por el calendario de abastecimiento que manejan actualmente lo que deriva en inestabilidad en el transporte que utilizan. Esto ocasiona altos costos de distribución y desperdicios de recursos durante días bajos de actividades logísticas. Véase la Figura 4.

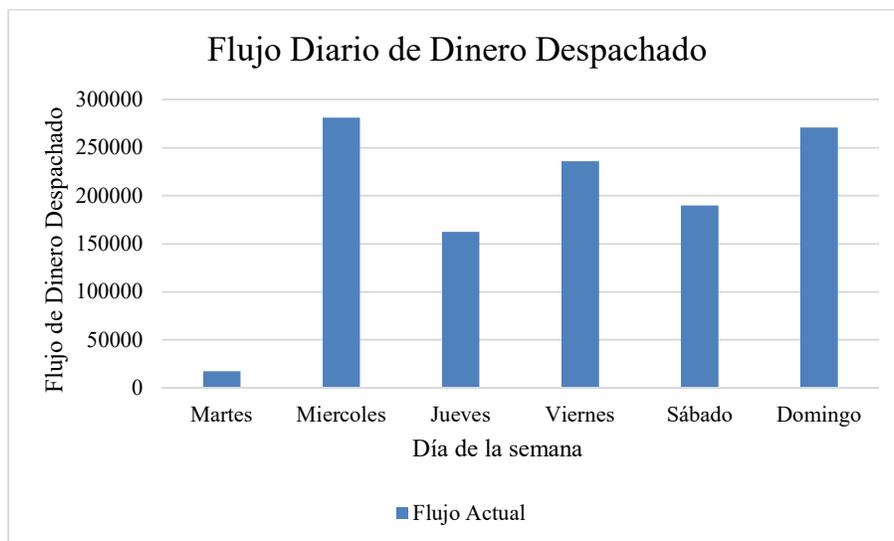


Figura 4. Flujo Diario de Dinero Despachado por EcuReperto. (Hecho por los autores).

Objetivos y alcance.

EcuReperto tiene problemas relacionados a la distribución de productos, con costos logísticos de transporte muy altos, debido al calendario de abastecimiento actual que manejan y las rutas de visita no óptimas. Acompañado de picos a lo largo de la semana que incurrian en costos de distribución elevados. Entonces, el objetivo es minimizar los costos de transporte de EcuReperto al determinar un calendario de abastecimiento y rutas óptimas que establezcan el flujo de dinero enviado.

Por este motivo, fue necesario definir una propuesta para la problemática de EcuReperto. En primer lugar, a través de las direcciones geográficas identificar la ubicación de los clientes en el país. A continuación, realizar un análisis K-Means de conglomerados con base en la distancia entre ellos. Después, plantear y resolver el problema de ruteo de vehículos para encontrar rutas óptimas de distribución. Finalmente, plantear una propuesta para la determinación de un calendario de abastecimiento que cumpla con los requerimientos de EcuReperto, satisfaciendo las demandas de todos sus clientes y respetando las capacidades de

envío del centro de distribución y de los camiones, reduciendo la complejidad computacional para la obtención de una respuesta óptima.

Geocodificación de clientes.

El proceso de geocodificación o geolocalización se basa en obtener las coordenadas geográficas (longitud, latitud) de un lugar en específico a partir de su dirección. Estos datos son esenciales para calcular la distancia y los tiempos de viajes entre cada cliente y los centros de distribución, que son parámetros necesarios para implementar el VRP. La geocodificación se logró con la interacción con la API de Google Maps a la que se accedió con el lenguaje de programación de Python. Una visualización de la distribución de los clientes de EcuReparto, se muestra en la Figura 5.

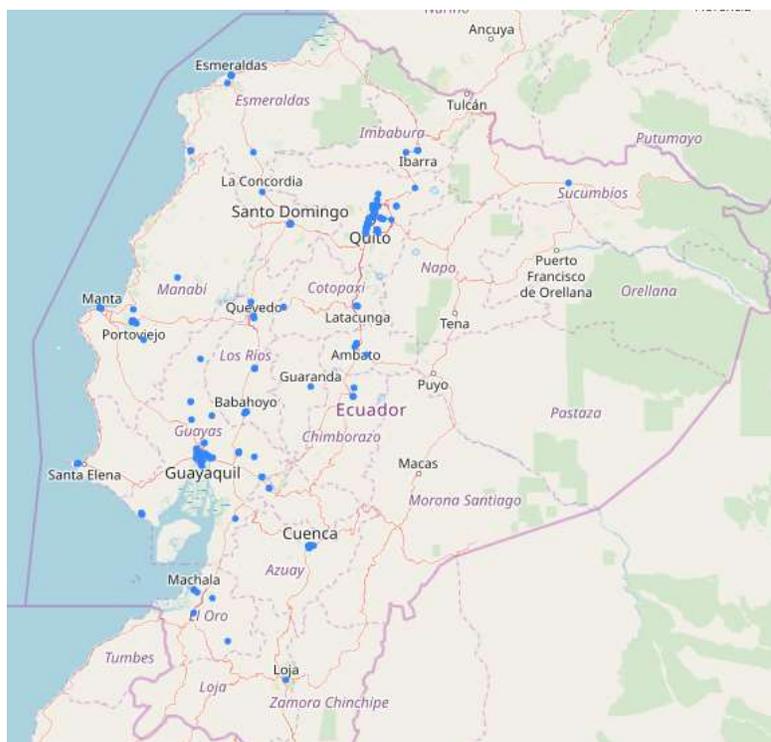


Figura 5. Localización de clientes de EcuReparto en Ecuador (Hecho por los autores).

Agrupamiento - clustering.

Con la finalidad de reducir la complejidad del problema de VRP, se agrupó a los clientes en clusters de acuerdo a su ubicación geográfica. Esto permitió enfocarse en cada uno de los grupos por separado y así evitar trabajar con todos los puntos del territorio ecuatoriano. El agrupamiento se logró con el algoritmo K-Means que es uno de los más utilizados para este problema. Esto se debe a su fácil implementación, su rapidez y eficiencia con grandes conjuntos de datos (Benabdellah et al., 2019). Como característica principal de este algoritmo, los clusters son circulares y los agrupa en K número de grupos. Este algoritmo minimiza la suma de los cuadrados de las distancias entre los puntos y el centroide de cada grupo respectivamente (Nagpal et al., 2013). En el caso de EcuReparto, los clientes fueron repartidos en 16 clusters, número que se estableció con los directivos de la empresa, tratando de ajustarse a la situación y capacidad de respuesta real de la empresa. Una visualización de las agrupaciones se muestra en la Figura 6.

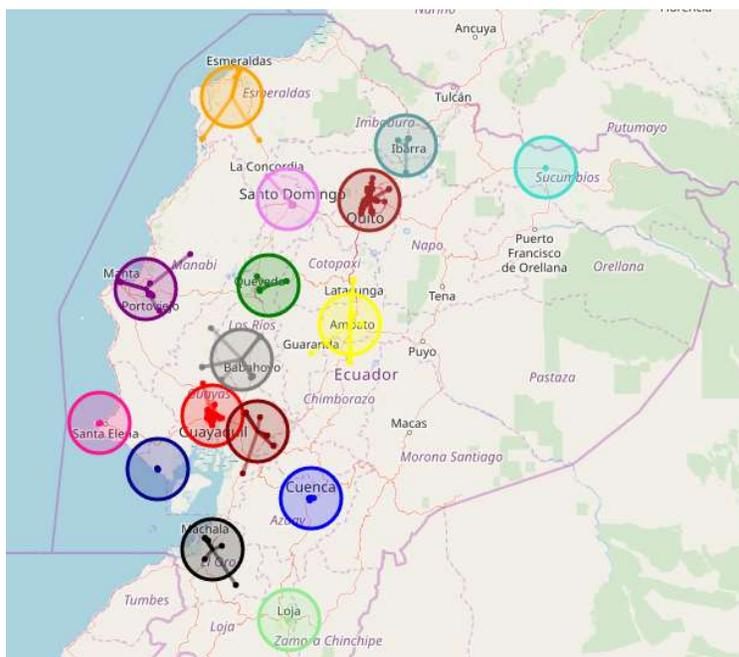


Figura 6. Agrupamiento de los clientes de EcuReparto con K-Means (Hecho por los autores).

Formulación de un modelo matemático que representa al problema.

Una vez realizada la agrupación de clientes por ubicación geográfica, el siguiente paso es obtener las rutas óptimas dentro de cada grupo y finalmente desarrollar un calendario de abastecimiento semanal para EcuReparto. Debido a que se redujo la complejidad del problema con el algoritmo K-Means, se implementó el VRP Completo para obtener soluciones óptimas. No existe la necesidad de la implementación de heurísticas ni metaheurísticas.

Modelo de ruteo de vehículos – VRP.

El modelo de Ruteo de Vehículos o VRP es un problema de optimización matemático que permite encontrar las rutas óptimas de visitas a los clientes, satisfaciendo su demanda y con una flota de vehículos limitada (Hu et al., 2018). Este es un problema complejo que necesita información como la capacidad de los vehículos, demanda de clientes, distancias y tiempos en ruta entre los clientes y los puntos de distribución (Hu et al., 2018).

La función objetivo se enfoca en minimizar la distancia total recorrida por la flota de vehículos visitando a los clientes solo una vez. El modelo se desarrolla en el grafo $G = (N, A)$, donde los nodos están representados por $N = \{0, 1, \dots, n, n + 1\}$ y el conjunto de arcos entre los nodos por arcos $A = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$. El conjunto de clientes está representado por $N_c = \{1, \dots, n\}$ y el conjunto de vehículos homogéneos con una capacidad máxima $capcam$ está denotado por $K = \{1, \dots, m\}$. El centro de distribución de dónde inician y terminan las rutas está representado por dos nodos 0 y $n + 1$. Cada cliente $i \in N_c$ tiene una demanda no negativa q_i . La distancia entre nodos es denotada por d_{ij} , donde $(i, j) \in A$. La variable binaria de decisión x_{ij} es 1 si el arco (i, j) es asignado al vehículo k , y 0 en caso contrario. El código implementado en AMPL se encuentra en el Anexo A.

El VRP está formulado de la siguiente manera:

$$\text{Min} \sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j \\ i \neq |C|+1}} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq 0}} \sum_{k \in V} d_{ij} * x_{ijk} \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{k \in V} \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j \\ j \neq 0}} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in C \quad (2)$$

$$\sum_{i \in C} \left(q_i * \sum_{\substack{j \in N \\ i \neq j \\ j \neq 0}} x_{ijk} \right) \leq \text{capcam} \quad \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq 0}} x_{0j} = 1 \quad \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq h \\ i \neq |C|+1}} x_{ihk} - \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq h \\ j \neq 0}} x_{hjk} = 0 \quad \forall k \in V, h \in C \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq |C|+1}} x_{i |C|+1 k} = 1 \quad \forall k \in V \quad (6)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, j \in N, k \in V \quad (7)$$

La función objetivo (1) minimiza la distancia recorrida en ruta. La restricción (2) establece que cada cliente debe ser visitado solamente una vez. La restricción (3) se encarga de que el flujo entre los nodos, no sobrepase la capacidad máxima de los camiones. Las restricciones (4), (5) y (6) se aseguran que cada ruta empiece en el depósito, realice la visita a los puntos dentro de la ruta y finalmente que acabe en el depósito (nodo $|C|+1$). Finalmente, la restricción (7), describe la naturaleza de la variable binaria.

Modelo de calendarización.

Un calendario de abastecimiento consiste en determinar cuál o cuáles clientes deben ser abastecidos, especificando el día en que son visitados y con la cantidad de productos distribuida desde el centro de distribución hasta el punto de venta. Según los requerimientos de EcuReparto, una vez que son definidas las rutas óptimas de visita es necesario satisfacer la demanda semanal de cada cliente, respetar la capacidad de envío del centro de distribución, no es posible enviar en días consecutivos y que el flujo enviado debe ser estabilizado. Es así que se desarrolló un modelo matemático para diseñar una propuesta para el calendario de abastecimiento de EcuReparto.

El objetivo de este modelo es minimizar el costo de distribución desde el depósito hasta cada cliente satisfaciendo su demanda y respetando la capacidad de transporte, a la vez que busca estabilizar el flujo enviado. Un calendario de abastecimiento puede ser definido en un gráfico $H = (Pv, Días)$, donde Pv incluye el depósito 0, es el conjunto de todos los puntos de venta $Pv = \{0, \dots, n\}$. $Días$ es el conjunto con los días disponibles para enviar los productos $Días = \{2, \dots, n\}$, empezando desde el dos debido a que el inicio de los días de operación es el segundo día de la semana, es decir el martes, y representados por el arco N que va desde los clientes y días $N = \{i, j\}$ y $N = \{i, k\}$. Así cada cliente está asociado a un costo no negativo $costo_i$ que designa el costo de viaje para visitar al cliente i , ya que no hay variación en el costo de entrega del día j . $demanda_i$ representa la demanda semanal de cada cliente i . $dempar_{ij}$ denota la demanda parcial enviada por la empresa EcuReparto al punto de venta i en el día j . ad_j es definida para medir la cantidad de demanda enviada cada día j . ad_k se define para medir la cantidad de demanda entregada cada día k . $limite$ que es utilizada para designar el rango de diferencia aceptable entre las entregas para estabilizar el flujo enviado en los diferentes días j y k donde $j \neq k$. $capmax$ se define como la capacidad máxima de entrega de EcuReparto definida sobre el flujo de dólares. $transporte$ representa la capacidad máxima de transporte

definida sobre el flujo de dólares de acuerdo a EcuReparto. a_i denota una cuantificación de la cantidad de flujo de dólares entregada para cada camión. b_i cuantifica el número semanal de visitas de suministro por cliente i . La variable de decisión x_{ij} se utiliza para asignar una combinación de flujo diario a cada nodo de clientes, donde es 1 cuando el cliente i es suministrado el día j y 0 si no es visitado ese día. El código implementado en AMPL se encuentra en el Anexo B.

El problema puede ser planteado de la siguiente manera:

$$\text{Min} \sum_{i \in Pv} \left(\text{costo}_i * \sum_{j \in Dias} x_{ij} \right) \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{j \in Dias} \text{dempar}_{ij} = \text{demanda}_i \quad \forall i \in Pv \quad (2)$$

$$\sum_{i \in Pv} \text{dempar}_{ij} = \text{ad}_j \quad \forall j \in Dias \quad (3)$$

$$-\text{limite} \leq \text{ad}_j - \text{ad}_k \leq \text{limite} \quad \forall j \in Dias, j \neq k, k \in Dias \quad (4)$$

$$\sum_{i \in Pv} \text{dempar}_{ij} \leq \text{capmax} \quad \forall j \in Dias \quad (5)$$

$$\text{dempar}_{ij} \leq \text{transporte} * x_{ij} \quad \forall i \in Pv, j \in Dias \quad (6)$$

$$(1 - a_i) * \text{demanda}_i - \text{dempar}_{ij} \leq \text{transporte} * (1 - x_{ij}) \quad \forall i \in Pv, j \in Dias \quad (7)$$

$$\sum_{j \in Dias} x_{ij} = b_i \quad \forall i \in Pv \quad (8)$$

$$x_{ij} + x_{i,j+1} \leq 1 \quad \forall i \in Pv, j \in Dias_{i \neq 2} \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in Pv, j \in Dias \quad (10)$$

$$\text{dempar}_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in Pv, j \in Dias \quad (11)$$

$$\text{ad}_j \geq 0 \quad \forall j \in Dias \quad (12)$$

La función objetivo (1) busca minimizar el costo de despachar a cada cliente su demanda semanal. En cuanto a las restricciones se toma en cuenta (2) que la demanda todo lo que se envía cubre la demanda semanal, (3) y (4) delimitan la diferencia de los envíos diarios estén dentro de un límite. (5) establece una capacidad de envío diario. Las restricciones (6) y (7) ayudan a saber qué cantidad de dinero se enviará diariamente a cada cliente respetando la capacidad del vehículo y la clasificación de la demanda determinada por la demanda semanal. La restricción (8) toma en cuenta los días de despacho para cada cliente en una semana mientras que la restricción (9) respeta que no se debe enviar dos días seguidos. Finalmente, las restricciones (10), (11) y (12) hace que se respete la naturaleza de las variables.

Uso de algoritmos computacionales para encontrar una solución.

Tomando en cuenta los objetivos planteados, se utiliza el software para resolución de modelos de optimización AMPL. En este se implementa el modelo para el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) en el que se obtuvo primero las rutas óptimas por agrupamiento.

Tabla 4. El resto se Encuentra en el Anexo C.

Parte de las Rutas resultantes del VRP

Resultados de las Rutas	
Clientes	Carga
0-145-89-149-88-0	10528.83
0-183-179-185-184-0	5014.84
0-177-171-182-178-186-0	9958.18
0-173-175-181-176-0	5223.55
0-76-78-77-79-0	8956.43
0-115-0	10531

0-118-0	8850.20
0-117-112-136-139-0	8985.05
0-113-0	6929.45
0-151-105-146-0	10458.44

En la Tabla 4, la columna de clientes tiene el orden de la ruta respecto a una codificación de clientes que se usó durante el desarrollo del problema. La columna de carga tiene el total de dinero despachado en cada ruta. La columna de carga menciona cuánto dinero lleva cada ruta. Estos resultados son una base para el modelo de calendarización.

Para el modelo de calendarización, la demanda se clasificó teniendo en cuenta si el cliente demanda más de un camión a la semana. Según los datos y conversando dentro de la empresa, un camión estándar puede llevar alrededor de \$10531 USD para despachar. Al agrupar y asignar rutas considerando los agrupamientos, demandas semanales y capacidades, se logra reducir la complejidad en el modelo de calendarización. Como resultado se estabiliza el reparto diario, la planificación ya no tiene que ser tan compleja y por lo tanto la preparación de pedidos igual. La Tabla 5 muestra un extracto de los resultados del modelo de calendarización.

Tabla 5. El resto se Encuentra en el Anexo D.

Extracto del Modelo de Calendarización

Cliente	Días de Despacho					
	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1	0	0	0	0	1	0
2	1	1	0	1	1	0
3	1	0	0	1	0	1

4	1	0	0	1	0	1
5	0	1	0	1	0	1
6	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0
8	1	0	0	1	0	1
9	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0
11	0	1	0	1	0	1
12	0	1	0	1	0	1
13	0	0	1	0	1	0

En este calendario, uno representa los días de envío y cero los días de no envío.

Pruebas del modelo, mejoramiento y resultados.

Se acordaron reuniones para obtener retroalimentación por parte de EcuReparto y que el modelo tenga implicaciones en la vida real. Se codifica los días de entrega de martes a domingo, lo cual se expresa con un conjunto de días $D = \{2, \dots, n\}$ en el modelo de calendarización. Los límites para las holguras en el flujo de dinero se fijan con los directivos de la empresa y que no se puede enviar dos días seguido al mismo cliente, además de que máximo puede enviarse un camión diario.

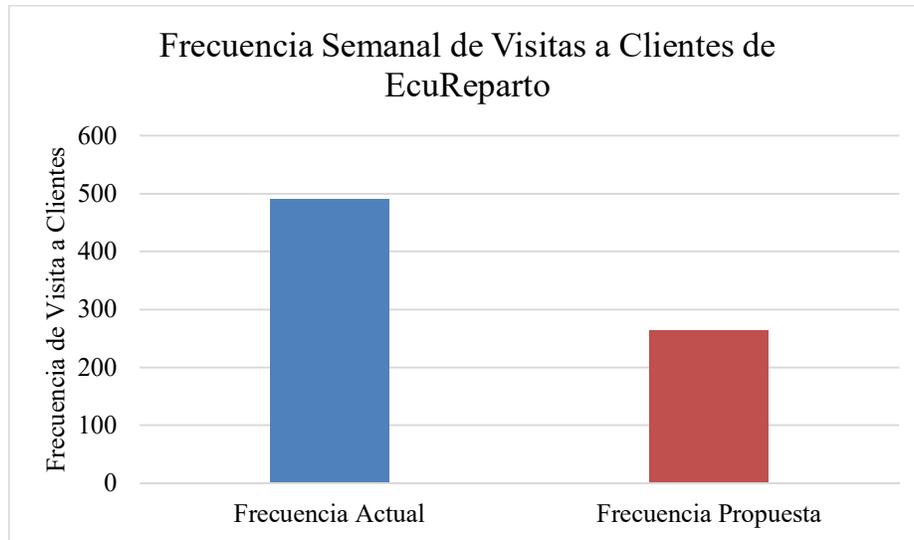


Figura 7. Frecuencia Semanal de Visitas a Clientes de EcuReparto (Hecha por los autores).

La Figura 7 detalla la frecuencia propuesta para el número de visitas semanales, así se reduciría a la mitad de la actual y la desviación estándar presenta una reducción del 91% con base a la actual frecuencia.

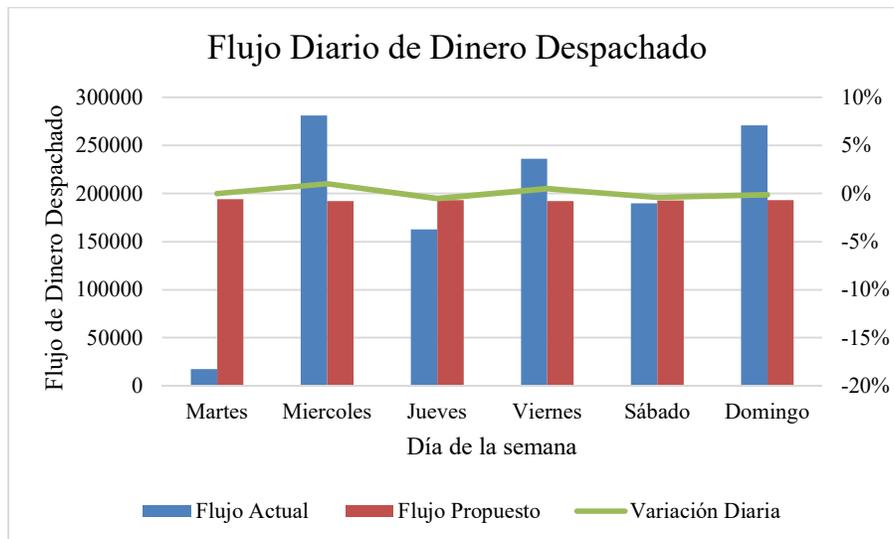


Figura 8. Comparación del Flujo Diario de Dinero Despachado (Hecha por los autores).

La Figura 8 demuestra que el flujo de dinero despachado se estabiliza, lo cual permite no incurrir en costos adicionales por una programación con mucha variabilidad. Como resultado se reduce en un 99% la desviación estándar tomando como base los datos actuales.

CONCLUSIONES

Este proyecto toma en cuenta el problema de la empresa EcuReparto sobre los costos adicionales que incurren con una planificación no tan estructurada sobre sus actividades logísticas. Se ve que tanto la frecuencia de visitas diaria como la cantidad de dinero despachado no son uniformes actualmente y se puede apreciar picos en los días miércoles y domingo. Por esto se desarrolló una metodología que permita cumplir con los objetivos planteados y atacar al problema.

Se utiliza el algoritmo K-Means para poder agrupar los puntos de venta y de esta forma poder reducir la complejidad del problema en la aplicación de modelos. De esta manera fue posible obtener, en tiempos razonables de resolución, resultados exactos para las rutas armadas por el VRP. Se determinó la cantidad y día de distribución a los clientes para EcuReparto, por lo que, no se usó heurísticas y las posibles desventajas que puedan traer consigo.

En el caso que no se hubieran realizado rutas por cluster, el tiempo de resolución de un VRP hubiera sido irracional si no se hubiera seguido la estrategia propuesta. Se determinaron 16 clusters o agrupaciones tomando en cuenta la proximidad geográfica y como resultado se obtuvieron 123 rutas óptimas a lo largo de la semana. Obtenidos de la aplicación de los dos modelos e implementándolos en el software AMPL. Se logró asignar un máximo de 5 puntos de venta por ruta y satisfacer los requisitos de la empresa para el calendario de abastecimiento de martes a domingo cumpliendo con los días hábiles que la empresa realiza el abastecimiento. Se pudo estabilizar tanto la frecuencia de visita como los dólares despachados diariamente con una disminución de la desviación estándar de un 91% y 99%, respectivamente. Con el calendario propuesto, el número de visitas a los puntos de venta se redujo significativamente. Los costos de transporte, que son directamente proporcionales a la distancia recorrida por la

ruta, se minimizaron gracias a la aplicación de los modelos. Esto permite no incurrir en planificaciones de última hora y costos extras.

LIMITACIONES

Las limitaciones encontradas en este proyecto se relacionan a los datos brindados. EcuReparto solo compartió datos no limpios y de pocos meses, por lo que no fue posible estudiar la demanda anual. Hubo errores con respecto a las direcciones de clientes, lo cual causó inconvenientes en la búsqueda automatizada de coordenadas y se la tuvo que realizar manualmente para evitar errores. La estimación de parámetros afecta todo el modelo, ya que intentan reflejar la situación real del problema.

ESTUDIOS FUTUROS

Por la cantidad de clientes en algunos cúmulos, se puede exigir de una gran cantidad de iteraciones para determinar las rutas de abastecimiento. Por lo que se podría utilizar metaheurísticas para resolver el problema. Esto no asegura encontrar soluciones óptimas pero, se puede comparar con los resultados de la metodología detallada. También, se propone un análisis de sensibilidad sobre los parámetros usados en los modelos para implementar esta estrategia en EcuReparto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, M., Kayal, N., & Saxena, N. (2004). PRIMES is in P. *Annals of Mathematics*, 160(2), 781–793. <https://doi.org/10.4007/annals.2004.160.781>
- Archetti, C., & Speranza, M. G. (2012). Vehicle routing problems with split deliveries. *International Transactions in Operational Research*, 19(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2011.00811.x>
- Arnold, F., & Sörensen, K. (2019). What makes a VRP solution good? The generation of problem-specific knowledge for heuristics. *Computers & Operations Research*, 106, 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.02.007>
- Benabdellah, A. C., Benghabrit, A., & Bouhaddou, I. (2019). A survey of clustering algorithms for an industrial context. *Procedia Computer Science*, 148, 291–302. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.022>
- Bonilla, M. & Paguay, L. (2017). *Estudio de competitividad de la industria ecuatoriana de electrodomésticos de línea blanca* (Tesis Magistral). Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador.
- Butty, X., Stuber, T., Hanne, T., & Dornberger, R. (2016). A heuristic comparison framework for solving the Two-Echelon Vehicle Routing Problem. *2016 4th International Symposium on Computational and Business Intelligence, ISCBI 2016*, 59–65. <https://doi.org/10.1109/ISCBI.2016.7743259>
- Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., & Tadei, R. (2012). Impact of Generalized Travel Costs on Satellite Location in the Two-Echelon Vehicle Routing Problem. *Procedia -*

Social and Behavioral Sciences, 39, 195–204.

<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.101>

De Oliveira, F. B., Enayatifar, R., Sadaei, H. J., Guimarães, F. G., & Potvin, J. Y. (2016). A cooperative coevolutionary algorithm for the Multi-Depot Vehicle Routing Problem. *Expert Systems with Applications*, 43, 117–130.

<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.08.030>

Eitzen, H., Lopez-Pires, F., Baran, B., Sandoya, F., & Chicaiza, J. L. (2017). A multi-objective two-echelon vehicle routing problem. An urban goods movement approach for smart city logistics. *2017 43rd Latin American Computer Conference, CLEI 2017*, 2017-January, 1–10. <https://doi.org/10.1109/CLEI.2017.8226454>

Electrolux. (2018). Annual Report. Market Overview. The Appliance Market. Electrolux. Recuperado de <https://www.electroluxgroup.com/en/latest-annual-report-24418/>

El-Sherbeny, N. A. (2010). Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University - Science*, 22(3), 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2010.03.002>

Garzón, E. (2016). Solution Approach for a Large-Scale Personnel Transport System for a Large Company in Latin America. *JJEM*, 2017 – 10(4): 623-645
<https://doi.org/10.3926/jiem.2116>

Grand View Research. (2019). Appliances Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product, (Personal Care, Home Appliances, Smartphones), By Region (North America, Central & South America, APAC, MEA), And Segment Forecasts, 2019 – 2025. *Global industry Report, 2019-2015*.

- Güneri, A. (2006). *Physical distribution activities and vehicle routing problems in logistics management: a case study*. DOI: 10.1243/09544054JEM560
- Halkidi, M., Batistakis, Y., & Vazirgiannis, M. (2001). On clustering validation techniques. *Journal of Intelligent Information Systems*, 17(2–3), 107–145.
<https://doi.org/10.1023/A:1012801612483>
- Hannan, M., Akhtar, M., Begum, R., Basri, H., Hussain, A., & Scavino, E. (2018). Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. *Waste Management*, 71, 31–41.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.019>
- Hillier, S., & Lieberman, G. (2015). *Introduction to Operations Research* (10^a ed.). México, México: Mc Graw Hill.
- Hu, C., Lu, J., Liu, X., & Zhang, G. (2018). Robust vehicle routing problem with hard time windows under demand and travel time uncertainty. *Computers and Operations Research*, 94, 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.02.006>
- Li, P., & Yang, J. Q. (2017). Optimizing the vehicles allocation of multi-modal freight transportation considering the transshipment delay risk. *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety, ICTIS 2017 - Proceedings*, 818–824. <https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047862>
- Nagpal, A., Jatain, A., & Gaur, D. (2013). Review based on data clustering algorithms. *2013 IEEE Conference on Information and Communication Technologies, ICT 2013, Ict*, 298–303. <https://doi.org/10.1109/CICT.2013.6558109>

- Nisha, & Kaur, P. J. (2016). Cluster quality based performance evaluation of hierarchical clustering method. *Proceedings on 2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies*, NGCT 2015, September, 649–653.
<https://doi.org/10.1109/NGCT.2015.7375201>
- Opoku-Amankwaah, A., & Ombuki-Berman, B. (2018). An age layered population structure genetic algorithm for the multi-depot vehicle problem. *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence*, SSCI 2017 - Proceedings, 2018-January, 1–8.
<https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285385>
- Perboli, G., Tadei, R., Vigo, D., Perboli, G., Tadei, R., & Vigo, D. (2017). Linked references are available on JSTOR for this article : The Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem : *Models and Math-Based Heuristics*. 45(3), 364–380.
<https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0368>
- Ray, S., Soeanu, A., Berger, J., & Debbabi, M. (2014). The multi-depot split-delivery vehicle routing problem: Model and solution algorithm. *Knowledge-Based Systems*, 71, 238–265. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.08.006>
- Ren, C., Wang, X., & Sun, J. (2006). Research on VRP of Optimizing Based on Fuzzy C-Means Clustering and Iga Under Electronic Commerce. *2006 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*,
<https://doi.org/10.1109/icmlc.2006.258780>
- Renjith, S., Sreekumar, A., & Jathavedan, M. (2019). Performance Evaluation of Clustering Algorithms for Varying Cardinality and Dimensionality of Data Sets. 2019 *International Conference on Advances in Electrical and Computing Technologies (ICAECT 2019)*, xxxx, 1–7.

- Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., Bräysy, O., & Ioannou, G. (2010). A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 37(3), 443–455. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.11.003>
- Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., & Ioannou, G. (2007). The open vehicle routing problem with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 58(3), 355–367. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602143>
- Sharma, S. K., Routroy, S., & Yadav, U. (2018). Vehicle routing problem: Recent literature review of its variants. *International Journal of Operational Research*, 33(1), 1–31. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2018.094229>
- Saxena, A., Prasad, M., Gupta, A., Bharill, N., & Prakash, O. (2017). *Neurocomputing*, 267, 664–681.
- Sariklis, D., & Powell, S. (2000). A heuristic method for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 51(5), 564–573. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600924>
- Song, H., & Chen, G. (2007). Minimum cost delivery problem in intermodal transportation networks. *IEEM 2007: 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1502–1506. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2007.4419443>
- Servicio de Rentas Internas. (2020). *Estadísticas Multidimensionales*. Quito: SRI. Recuperado de: <https://srienlinea.sri.gob.ec/saiku-ui/>
- Superintendencias de Compañías, Valores y Seguros. (2020). *Estado Financiero por Rama*. Quito: SUPERCIAS. Recuperado de:

https://appscvsmovil.supercias.gob.ec/portaldeinformacion/consulta_cia_menu.zul?expediente=4294&tipo=1

- Wang, Y., Peng, S., Xu, C., Assogba, K., Wang, H., Xu, M., & Wang, Y. (2018). Two-echelon logistics delivery and pickup network optimization based on integrated cooperation and transportation fleet sharing. *Expert Systems with Applications*, 113, 44–65. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.037>
- Zare Mehrjerdi, Y. (2015). Multiple Criteria Decision Making Combined with VRP: A Categorized Bibliographic Study. *International Journal of Supply and Operations Management*, <https://doi.org/10.22034/2015.2.07>
- Zhao, J. (2019). Haier's acquisition of GE appliances. *The Journal of Business Diversity*, 19(4), 111-119. Recuperado de <https://search.proquest.com.ezbiblio.usfq.edu.ec/docview/2336297056?accountid=36555>
- Zulfiqar, L. O. M., Isnanto, R. R., & Nurhayati, O. D. (2018). Using CVRP model in designing decision support system for optimizing distribution route and amounts of utilized vehicles. *2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*. <https://doi.org/10.1109/icoiact.2018.8350799>

ANEXO A: CÓDIGO EN AMPL PARA VRP

```

set V;
set N;
set C;

param capcam;
param Q {i in C};
param d{i in N,j in N};

var x {i in N, j in N, k in V:i!=j & j!=0 & i!=card(C)+1} binary;

minimize Z: sum{i in N,j in N, k in K:i!=j & j!=0 & i!=card(C)+1}(d[i,j]*x[i,j,k]);
s.t.

r1{i in C}:sum{k in K,j in N:i!=j & j!=0}x[i,j,k]=1;
r2{k in V}:sum{i in Nc}(Q[i]*sum{j in N:i!=j & j!=0}(x[i,j,k]))<=capcam;
r3{k in V}: sum{j in N:j!=0}x[0,j,k]=1;
r4{k in V, h in Nc}: (sum{i in N:i!=h & i!=card(C)+1}x[i,h,k])-(sum{j in N:h!=j & j!=0}x[h,j,k])=0;
r5{k in V}: sum{i in N:i!=card(C)+1}x[i,card(C)+1,k]=1;

```

ANEXO B: CÓDIGO EN AMPL PARA MODELO DE CALENDARIZACIÓN

```

set CLI;
set DIA;

param demanda{i in CLI};
param a{i in CLI};
param b{i in CLI};
param capmax;
param limite;
param costo{i in CLI};
param transporte;

var x{i in CLI, j in DIA} binary;
var dempar{i in CLI, j in DIA}>=0;
var ad{j in DIA}>=0;

minimize Costo: sum{i in CLI}(costo[i]*(sum{j in DIA}x[i,j]));
s.t.

r1{i in Pv}:sum{j in DIA}dempar[i,j]=demanda[i];
r2{j in Dias}:sum{i in CLI}dempar[i,j]=ad[j];
r3{j in Dias, k in Dias:j!=k}: -limite<=(ad[j]-ad[k])<=limite;
r4{j in Dias}:sum{i in Pv}dempar[i,j]<=capmax;
r5{i in Pv, j in Dias}:dempar[i,j]<=transporte*x[i,j];
r6{i in Pv, j in Dias}:((1-a[i])*demanda[i])-(dempar[i,j])<=transporte*(1-x[i,j]);
r7{i in Pv}:sum{j in Dias}x[i,j]=b[i];
r8{i in Pv,j in Dias:j!=2}:x[i,j+1]+x[i,j]<=1;

```

ANEXO C: RUTAS RESULTANTES DEL VRP

Resultados de las Rutas

Clientes

Carga

0-112-0	10469.80
0-113-0	10531
0-114-0	10531
0-117-0	10531
0-118-0	10531
0-119-0	10531
0-120-0	10531
0-121-0	10531
0-122-0	10531
0-125-135-0	9302.26
0-129-57-0	8946.03
0-124-138-0	9709.65
0-126-0	6996.50
0-123-0	9550.57
0-145-89-149-88-0	10528.83
0-183-179-185-184-0	5014.84
0-177-171-182-178-186-0	9958.18
0-173-175-181-176-0	5223.55
0-76-78-77-79-0	8956.43
0-115-0	10531
0-118-0	8850.20
0-117-112-136-139-0	8985.05
0-113-0	6929.45
0-151-105-146-0	10458.44
0-58-53-0	9473.80
0-142-153-0	9718.10
0-180-174-0	7935.14
0-60-68-0	8205.63
0-114-0	10531
0-116-0	10531
0-115-137-0	10092.62
0-57-0	8780.44
0-122-120-172-131-0	9876.80
0-134-133-169-121-0	9596.65
0-147-148	9705.93
0-31-54-0	4968.85
0-152-166-167-165-0	9892.99
0-164-0	8213.47
0-168-163-159-162-0	10318.61
0-101-0	9880.84
0-99-0	2757.12
0-113-0	9761.54
0-114-170-0	9202.76

0-119-0	2781.03
0-132-140-116-0	10511.95
0-130-127-0	8443.27
0-104-102-110-0	9361.33
0-80-81-85-150-0	10358.92
0-82-161-160-0	10367.50
0-97-94-0	10298.54
0-112-0	10531
0-49-154-8-0	9085.73
0-14-0	7657.91
0-15-0	9901.17
0-29-0	9981.95
0-108-0	7304.2857
0-2-0	10531
0-3-0	10531
0-4-0	10531
0-5-0	10531
0-11-0	10531
0-12-0	10531
0-13-0	10531
0-20-0	10531
0-24-0	10531
0-38-40-0	9357.53
0-96-106-0	9192.87
0-21-0	7987.62
0-42-39-0	10423.45
0-18-37-0	9282.13
0-36-0	7272.13
0-35-0	8918.17
0-52-90-0	9857.505
0-59-0	7140.3973
0-64-86-92-0	9808.4373
0-74-107-0	9666.0097
0-72-156-0	8210.7977
0-2-0	10531
0-23-0	10531
0-32-0	10531
0-24-17-0	9324.05
0-47-28-9-0	8251.25
0-56-0	7975.85
0-7-30-26-0	9547.21
0-87-16-3-1-0	10455.848
0-111-103-0	7907.8263

0-2-0	10531
0-4-0	10531
0-5-0	10531
0-8-0	10531
0-11-0	10531
0-12-0	10531
0-20-0	10531
0-33-0	10531
0-50-45-0	6250.78
0-65-43-44-41-0	10423.81
0-55-10-0	9656.55
0-21-0	10411
0-23-25-0	9953.35
0-143-67-0	10507.45
0-98-100-91-95-0	9764.92
0-63-75-84-0	10073.888
0-93-0	6960.8073
0-69-66-83-0	10490.434
0-128-109-0	10260.686
0-70-144-73-0	9337.7307
0-155-0	5532.4823
0-157-158-0	8555.1843
0-14-0	10531
0-13-0	10116.9
0-2-141-11-20-0	10257.387
0-33-4-6-12-0	10265.54
0-19-48-46-32-0	9869.08
0-29-5-0	7421.26
0-34-0	9673.09
0-62-56-0	10028.03
0-71-52-0	10379.66
0-61-0	7044.092
0-3-0	10531
0-8-0	10531
0-15-0	10531
0-87-0	10531
0-90-0	10531

ANEXO D: RESULTADOS DEL MODELO DE CALENDARIZACIÓN

Días de Despacho

ID	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
1	0	0	0	0	1	0
2	1	1	0	1	1	0
3	1	0	0	1	0	1
4	1	0	0	1	0	1
5	0	1	0	1	0	1
6	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	1	0
8	1	0	0	1	0	1
9	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0
11	0	1	0	1	0	1
12	0	1	0	1	0	1
13	0	0	1	0	1	0
14	1	0	0	0	1	0
15	0	0	1	0	1	0
16	0	1	0	0	0	0
17	0	0	0	1	0	0
18	0	0	0	1	0	0
19	0	1	0	0	0	0
20	1	0	1	0	0	1
21	1	0	0	0	0	1
22	0	0	0	0	0	0
23	1	0	0	0	0	1
24	1	0	0	0	0	1
25	0	0	0	1	0	0
26	0	0	1	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0
28	1	0	0	0	0	0
29	1	0	0	0	0	1
30	0	0	0	1	0	0
31	0	0	0	0	1	0
32	1	0	0	0	0	1
33	0	0	1	0	0	1
34	0	1	0	0	0	0
35	0	1	0	0	0	0
36	0	0	0	1	0	0
37	1	0	0	0	0	0
38	0	1	0	0	0	0
39	0	0	0	0	1	0
40	0	0	1	0	0	0
41	0	0	0	1	0	0
42	0	1	0	0	0	0

43	0	0	1	0	0	0
44	1	0	0	0	0	0
45	0	1	0	0	0	0
46	1	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	1	0
48	0	0	0	1	0	0
49	0	1	0	0	0	0
50	0	1	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0
52	1	0	1	0	0	0
53	0	0	1	0	0	0
54	0	0	0	0	1	0
55	0	1	0	0	0	0
56	1	0	1	0	0	0
57	0	1	0	0	1	0
58	0	0	1	0	0	0
59	0	1	0	0	0	0
60	0	0	0	1	0	0
61	0	0	0	1	0	0
62	1	0	0	0	0	0
63	0	0	1	0	0	0
64	1	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	1	0
66	0	0	0	0	1	0
67	0	0	0	0	1	0
68	0	0	0	1	0	0
69	0	0	0	0	1	0
70	0	0	1	0	0	0
71	0	1	0	0	0	0
72	0	0	0	0	1	0
73	0	0	1	0	0	0
74	0	0	0	0	1	0
75	0	0	1	0	0	0
76	0	0	0	0	1	0
77	0	0	0	0	1	0
78	0	0	0	0	1	0
79	0	0	0	0	1	0
80	0	0	0	0	1	0
81	0	0	0	0	1	0
82	0	0	0	0	0	1
83	0	0	0	0	1	0
84	0	0	1	0	0	0
85	0	0	0	0	1	0

86	1	0	0	0	0	0
87	0	1	0	0	0	1
88	0	1	0	0	0	0
89	0	1	0	0	0	0
90	1	0	0	1	0	0
91	0	0	1	0	0	0
92	1	0	0	0	0	0
93	0	0	1	0	0	0
94	0	0	0	1	0	0
95	0	0	1	0	0	0
96	0	0	0	0	1	0
97	0	0	0	1	0	0
98	0	0	1	0	0	0
99	0	0	0	0	0	1
100	0	0	1	0	0	0
101	0	0	1	0	0	0
102	0	0	0	1	0	0
103	0	0	1	0	0	0
104	0	0	0	1	0	0
105	0	0	1	0	0	0
106	0	1	0	0	0	0
107	0	0	0	0	1	0
108	0	0	0	0	1	0
109	0	0	1	0	0	0
110	0	0	0	1	0	0
111	0	0	1	0	0	0
112	1	0	1	0	1	0
113	0	1	0	1	0	1
114	0	1	0	1	0	1
115	1	0	0	0	1	0
116	1	0	1	0	0	0
117	1	0	0	0	0	1
118	0	0	0	1	0	1
119	0	1	0	0	0	1
120	1	0	0	0	0	1
121	0	1	0	0	0	1
122	1	0	0	0	0	1
123	0	0	0	0	1	0
124	0	0	1	0	0	0
125	0	0	0	1	0	0
126	0	1	0	0	0	0
127	1	0	0	0	0	0
128	0	0	1	0	0	0

129	0	0	0	1	0	0
130	0	0	0	0	1	0
131	0	0	0	1	0	0
132	0	0	0	0	0	1
133	0	0	1	0	0	0
134	0	0	1	0	0	0
135	0	0	0	0	1	0
136	1	0	0	0	0	0
137	0	0	1	0	0	0
138	1	0	0	0	0	0
139	0	0	0	1	0	0
140	0	0	0	0	1	0
141	0	0	0	0	1	0
142	0	0	1	0	0	0
143	0	0	0	0	1	0
144	0	0	1	0	0	0
145	0	1	0	0	0	0
146	0	0	1	0	0	0
147	1	0	0	0	0	0
148	1	0	0	0	0	0
149	0	1	0	0	0	0
150	0	0	0	0	1	0
151	0	0	1	0	0	0
152	0	0	0	1	0	0
153	0	0	1	0	0	0
154	0	0	0	1	0	0
155	0	0	0	0	1	0
156	0	0	0	0	1	0
157	0	1	0	0	0	0
158	0	1	0	0	0	0
159	1	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	1
161	0	0	0	0	0	1
162	1	0	0	0	0	0
163	1	0	0	0	0	0
164	0	0	0	0	1	0
165	0	0	0	1	0	0
166	0	0	0	1	0	0
167	0	0	0	1	0	0
168	1	0	0	0	0	0
169	0	0	0	0	0	1
170	0	0	0	1	0	0
171	0	1	0	0	0	0

172	0	0	1	0	0	0
173	0	0	0	0	0	1
174	0	0	1	0	0	0
175	0	0	0	0	0	1
176	0	0	0	0	0	1
177	0	1	0	0	0	0
178	0	1	0	0	0	0
179	0	1	0	0	0	0
180	0	0	1	0	0	0
181	0	0	0	0	0	1
182	0	1	0	0	0	0
183	0	1	0	0	0	0
184	0	1	0	0	0	0
185	0	1	0	0	0	0
186	0	1	0	0	0	0
