Nota de Aceptación:

Proyecto de Diseño Aprobado, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar el título de Ingeniero Industrial.

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias

JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO
Director Carrera Ingeniería Industrial

DANIEL MORILLO TORRES
Director(a) Proyecto de Diseño

Escriba el texto aquí

JULIO CÉSAR LONDOÑO ORTEGA
Jurado 1

JOHN WILMER ESCOBAR
Jurado 2

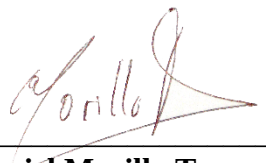
Estimado Profesor Álvaro Figueroa

Buen día.

Como director del proyecto de diseño identificado con el código 2020207 titulado "*Diseño de un modelo matemático para el ruteo de ayudas humanitarias aplicado al contexto Covid-19"*. Informo que doy aval del documento final de PD II.

Grupo de Estudiantes:
Kevin Mateo García Troncoso
Edier Yair Cajigas Narvaez
Alejandro Ordóñez Zamudio
Rossy Vanessa Sinisterra Pereira

Atentamente,



Daniel Morillo Torres, PhD
Profesor del Departamento de
Ingeniería Civil e Industrial.
Facultad de Ingeniería

Diseño de un modelo matemático para el ruteo de ayudas humanitarias aplicado al contexto Covid-19.

Edier Cajigas[a,c], Kevin García[a,c], Alejandro Ordoñez[a,c], Rossy Sinisterra[a,c]

Daniel Morillo Torres[b,c]

[a]*Estudiantes de Ingeniería Industrial*
[b]*Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial*
[c]*Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia*
[d]*Entidad y área donde realizó el estudio*

Resumen

En los últimos cuarenta años los desastres naturales y emergencias sanitarias han afectado a más de 705 millones de personas alrededor del mundo, impactándolos económicamente y por tanto nutricionalmente. En el 2019 surgió un nuevo virus llamado SARS-CoV-2 de la familia del coronavirus, siendo catalogado por la OMS como emergencia sanitaria mundial. Con respecto a esto, en Colombia se presentó un incremento en la tasa de desempleo de 9, 5% en el 2020. Referente a lo anterior, las organizaciones que brindan ayuda humanitaria se enfrentan a un problema de asignación y repartición de recursos; con base a esta problemática se abordará este proyecto, que se enfoca en el desarrollo de un sistema de apoyo para la toma de decisiones que permitirá mostrar cómo llegar a las familias más vulnerables con mercados, mediante un modelo logístico relacionado con el *problema del agente viajero generalizado* (GTSP), que contempla una limitada cantidad de auxilios alimenticios, además de un nivel de vulnerabilidad y demanda por cada nodo. Este problema radica en la creación de una ruta que parte de un almacén y visita por lo menos un nodo (familia) de cada clúster (barrio); la ruta termina en el almacén después de visitar todos los clústeres. El modelo tiene dos objetivos, minimizar el costo logístico relacionado con la distancia recorrida para realizar la ruta y maximizar el beneficio total acumulado que se obtiene después de visitar un nodo. El modelo propuesto resulto ser efectivo para los casos menores de 490 nodos, dado que se presentó una mejora en los costos entre 7,84% y 99,46%, y en beneficio acumulado entre 0% y 32% frente a la situación actual. Sin embargo, para instancias mayores a 500 nodos no se alcanza a obtener una solución eficiente, a causa del límite de tiempo y capacidad de procesamiento del computador.

Palabras claves: GTSP, Humanitario, Multiobjetivo, MIP, COVID-19, vulnerabilidad.

Abstract

In the last forty years, there had been natural disasters and health emergencies that have affected more than 705 million people worldwide, impacting them economically and nutritionally. In 2019, a new virus called SARS-CoV-2 emerged from the coronavirus family, was classified by the WHO as a global health emergency. Regarding this problematic, in Colombia the unemployment rate increased 9.5% in 2020. Concerning this, the organizations that provide humanitarian aid face a problem of allocation and distribution of resources; based on this problematic, the project will be approached by the developing of a support system for decision-making that will show how to reach the most vulnerable families with family baskets, through a logistics model related to the Generalized Traveling Salesman Problem (GTSP), which regard a limited amount of food aid, level of vulnerability and demand for each node. This problem lies in the creation of a route that starts from a warehouse and visits at least one node (family) of each cluster (neighborhood); the path ends at the warehouse after visiting all clusters. The model is Bi-objective, minimize the logistics cost related to the distance traveled to complete the route and maximize the total accumulated benefit obtained after visiting a node. The proposed model turned out to be effective for cases with less than 490 nodes, since there was an improvement in costs between 7.84% and 99.46%, and in accumulated benefit between 0% and 32% compared to the current situation. However, for instances greater than 500 nodes, it is not possible to obtain an efficient solution, due to the limited time and processing capacity of the computer.

Key words: GTSP, Humanitarian, Multiobjetive, MIP, COVID-19, vulnerability.

Tabla de contenido

I. PROJECT CHARTER 4
II. DEFINIR 6
A. Contexto y Justificación 6
B. Grupos de interés (¿Quiénes son los actores interesados?) 9
C. Requerimientos 10
III. MEDIR 11
A. Plan de recolección de datos 11
B. Exploración de mercado 13
C. KPI´S 16
IV. ANALIZAR 17
A. Análisis de Oportunidad 17
B. Revisión de literatura 18
C. Exploración de ideas y selección de alternativa 20
D. Objetivos 22
E. Plan de Trabajo (PdT) 22
V. DISEÑAR 24
A. Desarrollo del diseño de la solución 24
B. Validación del diseño propuesto 29
VI. VERIFICAR 31
A. Medición de los impactos y Resultados 31
B. Estandarización de la solución 37
C. Conclusiones 37
D. Recomendaciones 37
VII. GLOSARIO 38
VIII. REFERENCIAS 39
IX. ANEXOS 42

Índice de Tablas

TABLA I DESEMPLEO EN JULIO DE LOS ÚLTIMOS CINCO AÑOS *7*
TABLA II CLASIFICACIÓN DE LOS GRUPOS DE INTERÉS Y PONDERACIÓN DE IMPACTO E INFLUENCIA *9*
TABLA III REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS *11*
TABLA IV PROBLEMATICA ESTUDIADA EN CASOS REALES SIMILARES *12*
TABLA V PRECIO PROMEDIO DE PRODUCTOS DEL MERCADO HUMANITARIO *14*
TABLA VI INSTANCIAS DE GTSP *14*
TABLA VII RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO. *16*
TABLA VIII RUTA SOLUCIÓN ACTUAL Y SOLUCIÓN ALTERNATIVA. *17*
TABLA IX REVISIÓN DE LITERATURA. *18*
TABLA X LLUVIA DE IDEAS. *20*
TABLA XI MÉTODO VISUAL. *21*
TABLA XII RESULTADO DE LOS PORCENTAJES DE LOS CRITERIOS. *22*

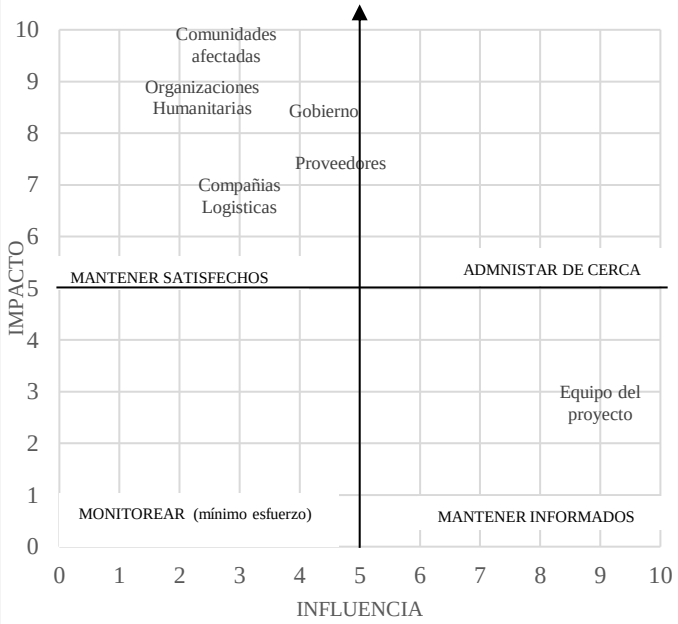
TABLA XIII RESULTADO DE LOS PORCENTAJES DE LAS ALTERNATIVAS. *22*
TABLA XIV PLAN DE TRABAJO. *23*
TABLA XV DIFERENTES PESOS PARA EL METODO DE PESOS APONDERADOS *25*
TABLA XVI ARCHIVOS Y DESCRIPCIONES. *28*
TABLA XVII RESUMEN ENTRADA Y SALIDA DE PROGRAMAS. *28*
TABLA XVIII PESOS Y VALORES DE LOS DIFERENTES OBJETIVOS DE 11BERLIN52_COVID. *30*
TABLA XIX RESULTADOS OBTENIDOS POR MÉTODO ACTUAL Y PROPUESTO. *32*
TABLA XX TABLA DE ANEXOS *42*

Índice de Figuras

Fig. 1. Número de infectados y muertes por Covid-19 por región hasta octubre.. 6
Fig. 2. Casos Acumulados de SARS–CoV–2 en Latinoamérica a 15/09/2020. 6
Fig. 3. Participación en programas del gobierno por deciles de ingreso. Total, nacional-2016. 7
Fig. 4. Ejemplo del problema de ruta del agente viajero clusterizado. 8
Fig. 5. Matriz Influencia – Impacto. 10
Fig. 6. Ilustración de la instancia 3burma14 modificada. 16
Fig. 7. Instancia 11berlin52_COVID. Solución método actual y solución método alternativo 17
Fig. 8.Representación de las soluciones no dominadas y dominadas 24
Fig. 9. Restricciones de salida y entrada 29
Fig. 10.Restricciones de clústeres 29
Fig.11.Esquema de restricción MTZ 30
Fig.12.Frontera de Pareto de 11berlin52_COVID. 31
Fig. 13. Costo de las instancias con el método actual y propuesto. 35
Fig. 14. Método Actual y Método Propuesto en la instancia 11berlin52_COVID. 36
Fig. 15. Mejora en la cantidad de familias atendidas. 36

I. PROJECT CHARTER

Descripción (*Business case*)	Planteamiento del problema (*Problem statement*)
En los últimos años los desastres naturales y emergencias sanitarias han afectado a millones de personas alrededor del mundo, impactándolos económicamente y por tanto nutricionalmente. Referente a esto las organizaciones que brindan ayuda humanitaria se enfrentan a un problema de asignación y repartición de recursos. Para la realización de una ruta de distribución de ayudas es necesario un modelo de logística que permitirá mostrar cómo llegar a las familias más vulnerables con mercados. En este proyecto, debido a su similitud, se tomó como base el problema del agente viajero generalizado (GTSP). El modelo propuesto contempla una limitada cantidad de auxilios alimenticios, además de un nivel de vulnerabilidad y demanda por cada nodo. Este problema busca una ruta que parta de un almacén y visite por lo menos un nodo (familia) de cada clúster (barrio); la ruta termina en el almacén después de visitar todos los clústeres. El modelo tiene como objetivo minimizar el costo logístico relacionado con la distancia recorrida para realizar la ruta, también maximizar el beneficio total acumulado que se obtiene después de visitar un nodo.	En el 2019 surgió un nuevo virus llamado SARS-CoV-2, este brote ha afectado negativamente a las personas de del territorio colombiano. Colombia es el cuarto país con más muertes por SARS– CoV–2 en Latino América, donde el 90% de los fallecidos son personas de escasos recursos. Además, se presentó un incremento en la tasa de desempleo de 9, 5%, es decir que aproximadamente 5 millones de personas perdieron su empleo en el 2020. Por esto el Gobierno por medio de ayudas alimenticias desea llegar a las personas más vulnerables. Para hacerlo, es necesario encontrar rutas eficientes mediante metodologías basadas en ingeniería que ayuden a resolver el problema de a quiénes asignar los recursos escasos. Buscando maximizar el beneficio y a la vez minimizando la distancia recorrida.

Impacto de los actores (*Stakeholder's business needs*)	Restricciones	Especificaciones	Marco legal
Matriz Impacto vs Influencias de los grupos de interes. 	Recursos limitados para abastecer todas las comunidades afectadas.	Lograr la cantidad propuesta de la totalidad de recursos a brindar.	-Decreto Ley 461 de 22 de marzo de 2020. -Decreto 1082 de 2015. -Decreto 559 de 2020. -Decreto 444 de 2020. -Decreto 571 de 2020.
		Alcanzar la cantidad de recursos en forma de ayuda propuestos por la organización que implemente el modelo.	-Normas y políticas establecidas por las organizaciones.
	Dificultad en realizar las tareas entre los integrantes del grupo en el tiempo establecido.	Realizar los objetivos y tareas propuestas en las fechas establecidas mostrando confiabilidad en el desarrollo del proyecto.	-Acuerdo No. 567 reglamento de estudiante.
	Demanda sobrepasa la oferta de recursos. Tiempo insuficiente para programar entregas eficientes	Mejorar la repartición de auxilios disminuyendo el tiempo de entrega a las familias.	Decreto 1082 de 2015.
	Distribuir de manera eficiente y eficaz.	Ejecutar las entregas de los auxilios a las familias en el tiempo adecuado, teniendo en cuenta que un único vehículo.	N/A
	Capacidad de los vehículos. Horas laborales permitidas.	Ejecutar las entregas de los auxilios a las familias por medio de vehículos terrestres, en el tiempo adecuado, a través de la ruta eficiente minimizando costos de la distancia total.	N/A

Indicadores de Desempeño (*KPI's*)		
Variable	**Actualidad**	**Meta**
Costo logístico.	Se toman valores obtenidos en las instancias, sobre las distancias recorridas de un nodo al otro. Promedio de las distancias = 1533,844 km C =$1492/km Costo por distancia recorrida= $2 288 495	Mejorar un 5%.

Nivel de vulnerabilidad.	Medición mediante, la regla lógica planteada (ir a los nodos con mayor vulnerabilidad) Promedio vulnerabilidad cubierta o beneficio= 536 puntos (niveles de vulnerabilidad).	Mejorar un 10%.

Objetivo general (*Goal statement*)

Diseñar un sistema de apoyo para la toma de decisiones frente a la distribución de ayudas alimentarias, por medio de un modelo enfocado a resolver el problema multiobjetivo del agente viajero generalizado (GTSP).

Objetivos específicos (*Project scope*)

- Caracterizar el sistema; asumiendo un programa de ruteo que considere la planificación de la ruta cubriendo las familias más vulnerables, teniendo en cuenta la condición de visitar por lo menos un nodo de cada clúster.
- Realizar una revisión de literatura sobre los métodos eficientes para resolver el GTSP, también teniendo en cuenta los modelos multiobjetivo; con la finalidad de obtener una guía para el desarrollo del proyecto.
- Diseñar un modelo determinista para la generación de una ruta eficiente conforme a la asignación de auxilios alimenticios con base a los criterios de vulnerabilidad y demanda.
- Validar la alternativa planteada utilizando casos de prueba, con el fin de conocer la variabilidad de los resultados alcanzados. De tal manera, se espera identificar si la propuesta logra producir una mejora en los indicadores de costo y beneficio acumulado.

Plan de Trabajo (*Project Plan*)				**Equipo de trabajo (*Team members*)**	
Actividad	**Fecha Inicio**	**Fecha Fin**	**Área IISE**	**Nombre**	**Rol**
Obtención de Instancias	10/10/2020	14/10/2020	Modeling approaches	Alejandro Ordoñez Zamudio.	Ejecutivo Gatekeeper
Definir regla lógica	10/10/2020	14/10/2020			
Diseñar programa	17/10/2020	19/10/2020			
Revisión de programa por parte de director.	20/10/2020	21/10/2020			
Correcciones.	22/10/2020	23/10/2020			
Establecer, graficar y resultados de la ruta.	26/10/2020	2/11/2020		Edier Yair Cajigas Narváez	Mediador Harmonizer
Búsqueda de artículos relacionados con el GTSP en fuentes confiables.	2/11/2020	13/11/2020	Operations Research & Analysis		
Revisión de los papers por parte del director.	16/11/2020	18/11/2020			
Análisis de los métodos utilizados en cada artículo.	24/11/2020	2/11/2020			
Definir Conjuntos y Variables.	1/02/2021	19/02/2021	Modeling approaches TSP and Solution Methods		
Definir Función Objetivo y Restricciones.	22/02/2021	12/03/2021		Kevin García Troncoso.	Defensor Encourager
Correcciones.	15/03/2021	25/03/2021			
Establecer modelo.	26/03/2021	6 /04/2021			
Validar el modelo usando instancias de prueba generadas.	25 /05/2021	26/05/2021	Operations Research & Analysis		
Comparar con el método actual.	27 /05/2021	31 /05/2021			
Graficar las rutas obtenidas	27 /05/2021	31 /05/2021		Rossy Sinisterra Pereira.	Comandante Observer / Commentator
Cierre	1 /06/2021				

II. DEFINIR

A. Contexto y Justificación

En los últimos 30 años, el mundo ha enfrentado cientos de desastres naturales, tales como, terremotos, tsunamis, incendios, inundaciones, sequías, pandemias, entre otros, que han afectado la sociedad. Entre los años 1980 y 2018 se reportaron más de 2 millones de muertes y más de 705 millones de afectados[1]. Estos desastres han causado cientos de miles de muertes, millones de afectados y más de 20 billones de dólares en pérdidas financieras [2]. En el 2019 surgió un nuevo virus de la familia de los coronavirus que tuvo origen en Wuhan, China. La OMS define el coronavirus como "una amplia familia de virus que pueden causar diversas afecciones, desde el resfriado común hasta enfermedades más graves, como ocurre con el coronavirus causante del síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS-CoV)"[3]. El brote de este nuevo virus, se catalogó como una emergencia sanitaria mundial por la extensión que ha tenido [4]. Una de las regiones que resultó más afectadas es América Latina y el Caribe, como se observa en la Fig. 1, se han reportado más de 11 millones de casos, hasta octubre del 2020, que corresponden a más de la cuarta parte de los casos globales y con respecto a los decesos, se convirtió en la región de mayor número de muertes con más de 395 mil[4].

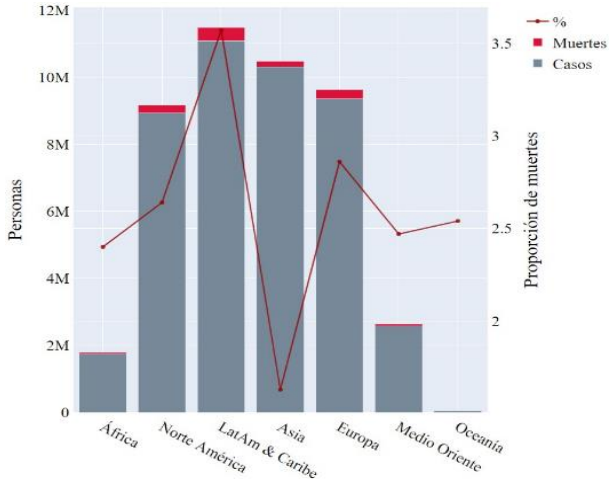


Fig. 1. Número de infectados y muertes por Covid-19 por región hasta octubre. Modificado de [4].

Dentro de América Latina y el Caribe, los países que resultaron más damnificados son Brasil, Perú, Colombia y México, esto se observa en la Fig. 2. Estos acumularon más del 75% de los casos totales de la región. Por otro lado, los decesos hasta la segunda semana de septiembre de 2020, Colombia fue el cuarto país de América Latina con mayor número de muertes (22 924), sólo por detrás de Brasil (131 625), México (70 821) y Perú (30 710) [5].

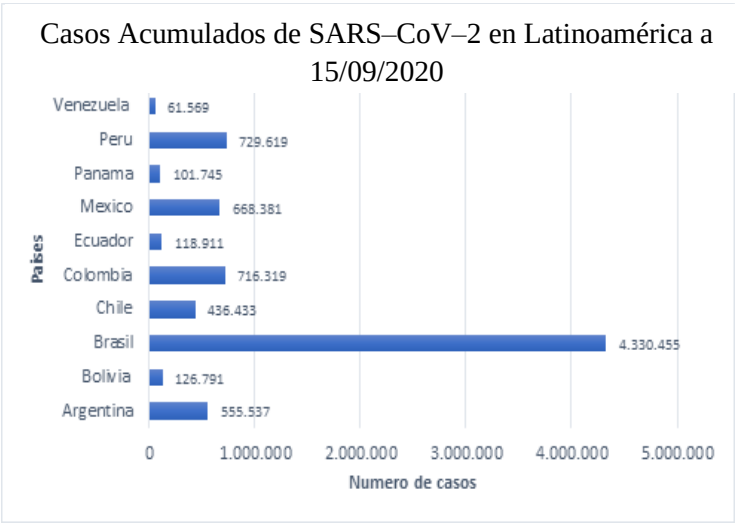


Fig. 2. Casos Acumulados de SARS–CoV–2 en Latinoamérica a 15/09/2020. Modificado de [6].

En Colombia, se espera que haya entre 200.000 y 400.000 decesos y más de 10 millones de infectados [6]. Entre el mes de marzo y agosto de 2020, los más afectados por la pandemia han sido las personas de bajos recursos, dado que, el 90,3% de las muertes causadas por el SARS–CoV–2, son personas de estratos socio económicos 1, 2 y 3 (Anexo 1) [7]. Después del confinamiento en todo el país, varios sectores económicos se vieron afectados, donde más de 9 millones de empleos se vieron paralizados por la medida optada [8]. Un indicador para tener en cuenta es el porcentaje de desempleo, según la TABLA I en julio entre 2016 y 2018 obtuvo un comportamiento similar, circulando el 9,8%, sin embargo, los dos últimos años ha incrementado el desempleo en Colombia. En especial en el 2020, aproximadamente se duplicó el número de personas desempleadas a comparación del año anterior; cerca de 10 millones de personas no tenían empleo.

TABLA I
DESEMPLEO EN JULIO DE LOS ÚLTIMOS CINCO AÑOS. MODIFICADO DE [9]

Año	% de Desempleo	% de Variación
2016	9,8	-
2017	9,7	-0,2
2018	9,7	0,0
2019	10,7	1,0
2020	20,2	9,5

Al finalizar el 2019 en Colombia, más de 14,5 millones de personas se encontraban en situación de *pobreza monetaria*, dado que tenían un ingreso mensual per cápita menor a $267 472 pesos colombianos[8]. Por esto, el Gobierno presentó varios programas de ayuda para disminuir este número. Algunos ejemplos de estos programas son Familias en Acción, Colombia Mayor, Jóvenes en Acción e Ingreso solidario, que en su mayoría son ayudas económicas donde se seleccionan a las personas beneficiarias según sus ingresos y puntaje del Sisbén, siendo este último es el más influyente[10]. Para el año 2020, no se contó con la Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH) por parte del DANE, por ende, se empleó como base de datos la encuesta de años anteriores. Se observa en la Fig. 3. el porcentaje de la población que recibió ayudas según el decil de ingreso en el 2016. Se evidencia que desde el decil de ingreso 5 al 10, son personas que están por encima de la *línea de pobreza* ($241 673), por esto, sumando el porcentaje de estos deciles, se obtuvo que alrededor del 33% de las ayudas entregadas se destinaron a personas que no están en situación de pobreza.

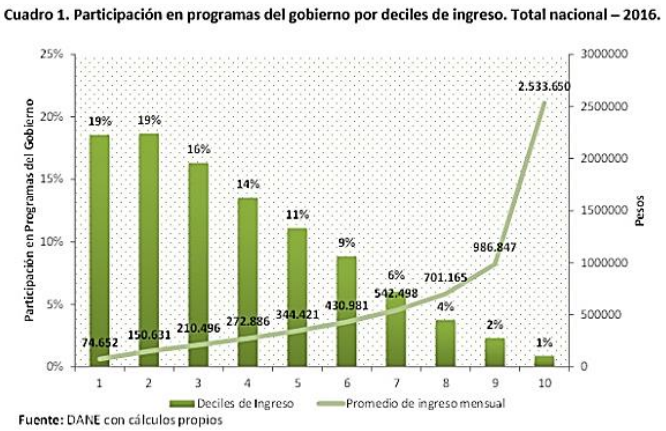


Fig. 3. Participación en programas del gobierno por deciles de ingreso. Total, nacional-2016. Tomado de [11].

Para el apoyo de las familias afectadas, se deben tener mecanismos de respuesta para la gestión de entrega de ayudas, para esto se emplea la *logística humanitaria*, que es similar a la logística comercial, pero el componente humanitario apunta a que se debe ir más allá de la rentabilidad [12]; con el propósito de llegar a los afectados lo más rápido posible y con recursos necesarios. El problema de la logística humanitaria se centra en ¿Cómo llegar? y ¿A quién? Este mecanismo se realiza por parte de organizaciones tanto gubernamentales como no-gubernamentales, locales e internacionales[13].

Por otra parte, se tiene el problema de la distribución de recursos; pues luego de un desastre o una crisis humanitaria, las comunidades no cuentan con los suficientes recursos para sobrevivir, por lo tanto, estas personas empiezan a depender de las

autoridades locales, fundaciones y fuerzas de gestión de desastres. Los fallos en las asignaciones de ayudas generan beneficios en un número reducido de familias que pueden no necesitarlos, debido a que no se está atendiendo a las comunidades o familias más necesitadas, causando una disminución de la capacidad de atención y de recuperación de la población afectada [14].

Este proyecto permite mostrar cómo llegar a las familias más necesitadas, según su nivel de vulnerabilidad [15], mediante un modelo de logística relacionado con el problema del agente viajero generalizado (GTSP) [16]. Este, es una extensión del problema del agente viajero (TSP), en donde el conjunto de nodos conforma clústeres y se tiene que visitar cada uno, teniendo en cuenta que se debe empezar y terminar en un mismo almacén. Este problema tiene dos versiones, una es encontrar la ruta de menor costo, visitando solo un nodo de cada clúster, y la segunda, es determinar el recorrido más económico, asegurando llegar a por lo menos un nodo [17],[18].

En el contexto del Covid-19, se aplica a la repartición de auxilios en forma de mercados, supliendo a las personas más vulnerables en las ciudades, por medio de un único vehículo sin restricción de capacidad. Posterior a un desastre, se presentan dificultades en la asignación eficiente de ayudas, sin lograr satisfacer a todos los ciudadanos afectados, debido a la limitación de los mercados [19].

Los clústeres representan los barrios de una ciudad, y se definen como "grupo de casas que constituyen parte de un conjunto urbano, diferenciado mediante límites (avenidas, línea férrea, canales, etc.), constituyendo un conjunto residencial de edificaciones bastante semejantes" [20]. Por ende, es fundamental la distribución demográfica, puesto que, existe una relación con los recursos limitados, debido a que se busca llegar a por lo menos a una familia de cada barrio, generando equidad en la distribución. En este caso el ruteo es muy relevante, de este depende qué nodos (familias) serán elegidos, si se debe visitar todos los clústeres (barrios) acorde con la restricción de auxilios limitados; en la Fig. 4, se observa un ejemplo gráfico de este problema. Se trata de una generalización del problema del agente viajero, este se encarga de seleccionar las familias más necesitadas con el fin de maximizar la cobertura de las personas con mayor indicador de necesidad, así maximizando el beneficio, y minimizar el tiempo de entrega [21]. Mientras un objetivo es atender el mayor número de familias más afectadas, paralelamente, el otro se centra en diseñar una ruta eficiente que genere el mínimo recorrido posible, por lo tanto, estos objetivos entran en conflicto. Al ser una generalización de un TSP, el problema se clasifica como NP-Hard [22], hace que sea difícil de resolver en instancias reales (grandes) y por ende hay varios enfoques para su resolución (exactos, que serían los limitados; y los heurísticos, que son los más eficientes pero un poco menos precisos), este enfoque se contempla en la etapa Analizar.

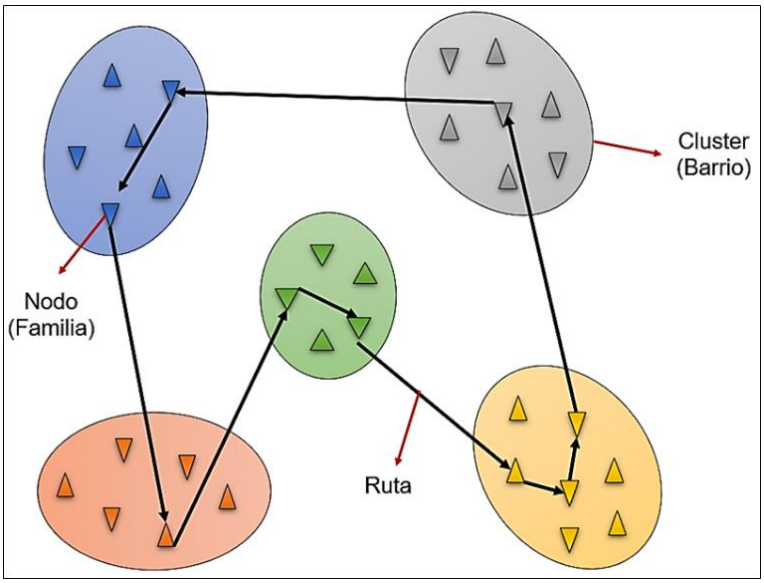


Fig. 4. Ejemplo del problema de ruta del agente viajero clusterizado.

Al aplicar la propuesta en el sector público, el Estado y las organizaciones humanitarias son los más interesados, por consiguiente el proyecto está enfocado a solucionar problemas de distribución de recursos, por esto el beneficio principal es el social, donde se busca la máxima satisfacción de necesidades de las familias que más lo requieran, fomentando beneficios como el económico, pretendiendo que los organismos utilicen este modelo para evitar problemas financieros por complicaciones como la mala logística, la pérdida de recursos; ayudando a controlar la gestión de costos logísticos, buscando una respuesta eficiente. Además, este modelo puede ser aplicable en diferentes circunstancias donde se presenten problemas de distribución de recursos

por escasez, como puede ser catástrofes naturales, biológicas, humanas, y emergencias complejas (hambruna, conflicto armado, poblaciones desplazadas, etc.).

B. Grupos de interés (¿Quiénes son los actores interesados?)

Los grupos de interés presentes en el proyecto son:

- El Gobierno.
- Organizaciones Humanitarias.
- Proveedores.
- Comunidad afectada.
- Equipo de trabajo PD.
- Compañía Logística.

Con la identificación de las partes interesadas se procede a presentar la TABLA II, la cual presenta la descripción detallada de las partes, el efecto de estas en el proyecto, una clasificación del impacto y la influencia de los interesados en el proyecto a realizar, los cuales se miden mediante los siguientes números donde 1 es muy bajo y 10 muy alto en la clasificación:

- 1-2 Muy bajo.
- 3-4 Bajo.
- 5-6 Medio.
- 7-8 Alto.
- 9-10 Muy alto.

TABLA II
CLASIFICACIÓN DE LOS GRUPOS DE INTERÉS Y PONDERACIÓN DE IMPACTO E INFLUENCIA

PARTE INTERESADAS	**DESCRIPCIÓN**	**EFECTO** (del proyecto a los grupos interesados)	**IMPACTO**	**INFLUENCIA**
Gobierno (central, departamental o municipal)	Organismo que se encarga de controlar y sustentar las ayudas a las comunidades vulnerables.	Generar una ayuda para la correcta distribución de recursos de manera equitativa y eficiente en tiempo de crisis.	8	4
Organizaciones Humanitarias (Cruz Roja, fundaciones, organizaciones, locales y regionales)	Organizaciones sin ánimo de lucro que tienen como objetivo ayudar a las familias vulnerables.	Generar una ayuda para la correcta distribución y asignación de recursos a las comunidades vulnerables.	8	3
Proveedores	Organizaciones que se encarga de suministrar productos de socorro (mercados).	Generan suministros para brindar ayuda a la comunidad afectada.	7	4
Equipo de trabajo PD	Estudiantes encargados del planteamiento y realización del proyecto.	Aprendizaje, experiencia.	2	9
Comunidad afectada	Personas afectadas por la crisis las cuales esperan una ayuda por las organizaciones públicas o privadas.	Generación de ayuda para que reciban los recursos de manera equitativa y segura.	10	4
Compañía Logística	Compañías que se encargan de la distribución y envió de las ayudas a los más vulnerables.	Generación de la ruta para realizar la distribución de los recursos, teniendo en cuenta factores logísticos.	6	3

A partir de los datos arrojados por el análisis de la TABLA II, se realizó una matriz de influencia vs impacto, Fig.5., la cual asocia a los interesados, con base a una participación y a una capacidad para efectuar cambios en la planificación o ejecución del proyecto.

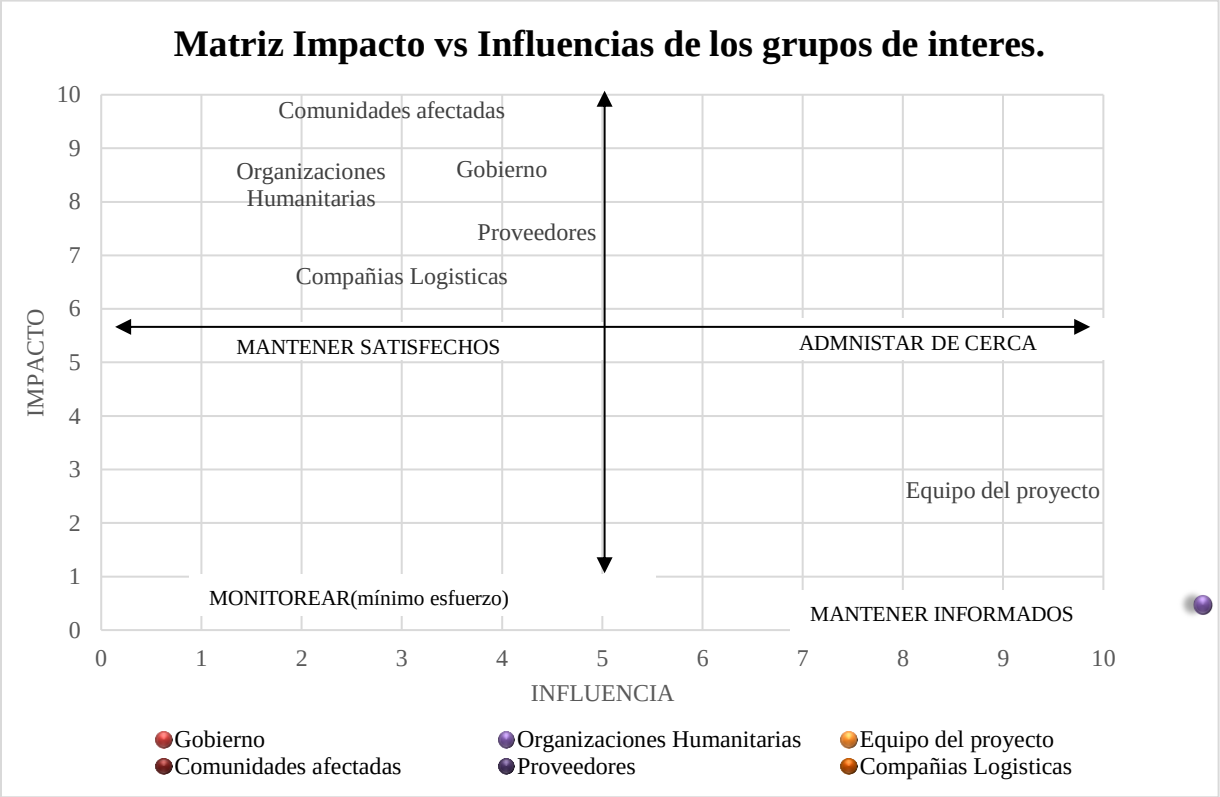


Fig. 5. Matriz Influencia – Impacto.

Con respecto a la Fig. 5. se determina que la mayoría de las partes interesadas, tienen poca influencia en el proyecto, ya que éstos no tienen poder para alterar la realización de este, pero con respecto al impacto se puede observar que el efecto que se producirá con respecto a la realización del proyecto es alto. Aunque el Gobierno tiene la influencia de finalizar estas ayudas sociales, es poco probable que se realice por la magnitud del impacto que ha tenido el desastre.

- **Mantener satisfechos:** Con la realización, planificación y cambios que se presenten dentro del proyecto, se debe tener en cuenta la satisfacción que este genere en las partes interesadas.

- **Mantener informados**: Cada uno de los integrantes del equipo de proyecto debe estar informado sobre la planificación, cambios, y control de lo que se está realizando en el proyecto.

C. Requerimientos

Para lograr satisfacer las necesidades y expectativas de las partes interesadas, es necesario identificar cada uno de los requerimientos de éstas en el proyecto, los cuales incluyen requerimientos como: requisitos, restricciones, especificaciones y normas que se deben de seguir para garantizar el éxito del proyecto. Se puede visualizar en la TABLA III los requisitos por cada grupo de interés.

TABLA III
REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS

GRUPO DE INTERÉS	REQUISITOS	RESTRICCIONES	ESPECIFICACIONES	LEYES NORMAS Y ESTÁNDARES	
				Legislación y requisitos aplicables.	**Importancia o efecto.**
Gobierno	Proporcionar de manera eficiente y equitativa las ayudas a las comunidades vulnerables.	Recursos limitados, para abastecer todas las comunidades afectadas.	Lograr la cantidad propuesta de la totalidad de recursos a brindar.	-Decreto Ley 461 de 22 de marzo de 2020.	Reorientación de las rentas destinadas a las comunidades.
				-Decreto 1082 de 2015. -Decreto 559 de 2020. -Decreto 444 de 2020. -Decreto 571 de 2020.	Aplicación de los criterios y mecanismos de distribución, la definición de recurso, que se destina a las comunidades más vulnerables. Creación y administración del fondo de mitigación de emergencias (FOME). Se adiciona el presupuesto general de la Nación de la vigencia fiscal de 2020 y se efectúa su correspondiente liquidación.
Organizaciones Humanitarias	Suministrar de manera eficiente y equitativa las ayudas a las comunidades vulnerables	Recursos limitados, para abastecer comunidades afectadas.	Alcanzar la cantidad de recursos en forma de ayuda propuestos por la organización.	-Normas y políticas establecidas por las organizaciones.	Conjunto de normas que establecen para la organización y asignación de los recursos.
Equipo de trabajo PD	Concluir de manera satisfactoria el proyecto, obteniendo un aprendizaje.	Dificultad de comunicación entre los integrantes del grupo.	Realizar los objetivos y tareas propuestas en las fechas establecidas mostrando confiabilidad en el desarrollo del proyecto.	-Acuerdo No. 567 reglamento de estudiante.	Los estudiantes del proyecto deben cumplir con el reglamento de la Universidad Javeriana Cali.
Comunidad afectada	Recibir la ayuda por parte de las organizaciones.	Demanda sobrepasa la oferta de recursos.	Mejorar el nivel de satisfacción y disminuir el tiempo de entrega de los auxilios a las familias.	Decreto 1082 de 2015.	Aplicación de los criterios y mecanismos de distribución, la definición de recurso, que se destina a las comunidades más vulnerables.
Compañías Logísticas	Distribuir los recursos de manera segura y en el tiempo indicado.	Distribuir de manera eficiente y eficaz.	Ejecutar las entregas de los auxilios a las familias en el tiempo adecuado, teniendo en cuenta que la flota homogénea.	Ley 142 de 1994	Se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones para el cumplimiento de demás Decretos
	Disminuir costos logísticos	Capacidad de los vehículos. Horas laborales permitidas.	Ejecutar las entregas de los auxilios a las familias por medio de vehículos terrestres, en el tiempo adecuado, a través de la ruta optima, minimizando costos de operación.	N/A	

III. MEDIR

A. Plan de recolección de datos

En este apartado se presenta la aplicabilidad del proyecto planteado y la determinación de variables a medir. Debido a la novedad de los efectos causados por esta pandemia, no fueron evidenciados muchos estudios en la literatura, pero su implementación puede conllevar a problemas logísticos ocasionados por desastres naturales, catástrofes y estados de emergencia sanitarias. Se deben considerar aspectos claros en el ruteo para la repartición de ayudas humanitarias, dado que se efectúa una disyuntiva sobre a quienes ayudar. En la TABLA IV se evidenciaron estudios de casos reales similares, estos artículos tuvieron como objetivo la minimización de tiempo de recorrido, la maximización de la cantidad de comida entregada, la maximización de

la demanda total satisfecha, la maximización de la población total cubierta, entre otras. Estas variables se emplearon para medir la problemática del ruteo de ayudas humanitarias aplicado al contexto del Covid-19 (Anexo 2).

TABLA IV
PROBLEMATICA ESTUDIADA EN CASOS REALES SIMILARES

Nombre	**Autores**	**Caso aplicado**	**Problema (qué se busca)**	**Resultados**
A multi-objective optimization model for shelter location-allocation in response to humanitarian relief logistics	Panchalee Praneetpholkran, Van Nam Huynh, , Sarunya Kanjanawattana [23] Año 2021	Modelo de logística humanitaria, basado en la optimización multiobjetivo de Pareto. Emplea un método a posteriori fundamentado en Epsilon Constraint method (EC). Y un método a priori centrado en Goal Programming. Aplicado a la inundación de Tha Uthae, Surat Thani, en Tailandia.	Propone un modelo de optimización que determina los refugios a abrir, con tres funciones objetivos. En primer lugar, minimizar los costos totales, incluidos los costos fijos de apertura de refugios, costos de transporte de víctimas y costos de servicio. También quiere minimizar el tiempo total para la evacuación de víctimas. Por último, minimizar el número de refugios abiertos. Evitando ponderar los objetivos.	Para EC: Se resuelven las tres funciones objetivas individualmente. Los costos totales quedaron 869 944 THB, un tiempo de evacuación de 207,03 horas y 4 refugios abiertos. Para GP: Se establece minimizar valores de preferencia de tres funciones objetivo. Esta desviación se toma como desviación porcentual por debajo del tiempo máximo de evacuación; resultando unos costos totales de 1 030 898 THB, 401,25 horas de tiempo de evacuación y 5 albergues. Plan actual contempla unos costos de 1 546 126, un tiempo de 198, 39 horas y 10 albergues.
The Multi-profit Orienteering Problem	Hyunjoon Kim, Byung-In Kim y Dong-jin Noh [24] Año 2020	Proponen una variante del Orienteering Problem (OP) denominada Multi-Beneficio OP (MPOP). Este caso fue aplicado en la República de Corea.	Pretende maximizar las ganancias obtenidas de los clientes en un período de tiempo limitado, donde no se pueda visitar a todos los clientes. Cada cliente tiene un beneficio que varía en función del tiempo de atención. Además, cada nodo tiene su tiempo (franja) en la que se podía visitar.	El algoritmo propuesto Recocido Simulado (SA) + Algoritmo de Optimización de Tiempo de Visita (VTOA) supero los algoritmos de referencia Max Ratio Insertion Algorithm (MRIA) y CPLEX, aunque tarda más el tiempo de cálculo, superó a estos algoritmos donde la mejor brecha fue de 12,7% y su brecha promedio de 10,6%.
A multi-period humanitarian logistics model considering limited resources and network availability	Ali Gul Qureshia y Eiichi Taniguchi [14] Año 2020	Estudio de caso basado en el distrito de Minato de la ciudad de Osaka, donde se ha pronosticado un terremoto a gran escala en Nankai en un futuro próximo.	Presenta un modelo de logística humanitaria que considera la disponibilidad limitada de recursos, equidad de distribución y capacidad residual disponible de la red de carreteras con multi-periodo de optimización. Además, tiene un componente de penalidad debido a la escasez. Se busca minimizar la suma de estas penalidades.	Se encontró que los mejores depósitos son D1 y D3 con un costo total promedio 490 094 y 493 477 yenes japonés, respectivamente. Mientras el depósito D4 obtiene un costo total promedio de 512 368 que está ubicado al otro lado del rio, ya que se ve afectado por las opciones limitadas que conectan a la zona afectada.
A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution	Begoña Vitoriano, M. Teresa Ortuño, Gregorio Tirado y Javier Montero [12] Año 2010	Modelo de logística humanitaria en el caso del catastrófico terremoto de Haití de 2010.	Se proponen varios criterios para un problema de distribución de ayudas y se desarrolla un modelo de optimización multicriterio que trata todos estos aspectos y apoya la toma de decisiones para ayudar a las organizaciones a cargo de la distribución de ayuda humanitaria. La red de transporte consta de 24 nodos y 42 enlaces disponibles entre ubicaciones. Los nodos se clasifican en 9 asentamientos que demandan un total de 250 toneladas de carga, 3 depósitos y 12 nodos intermedios.	Se logró el objetivo propuesto, atender el 60% de la demanda de todos los nodos, a través de un modelo de programación lineal, cuya función de optimización multi objetivo considera costo, tiempo, equidad, prioridad. Los resultados indican que los camiones más rápidos cubren los arcos más extensos llevando el tiempo de operación cerca al óptimo. Mientras que los camiones más lentos utilizados en arcos largos alejan el tiempo de operación del valor óptimo.

Nombre	Autores	Caso aplicado	Problema (qué se busca)	Resultados
Optimized forage harvester routes as solutions to a traveling salesman problem with clusters and time windows	Jessica Rodríguez Pereira, Elena Fernández Gilbert Laporte, Enrique Benavent, Antonio Martínez Sykorae [25] Año 2017	Un problema real de recolección de forrajes que se presenta dentro de una cooperativa agrícola ubicada en el noroeste de España.	Una variante del TSP con restricciones adicionales de clústeres, ventanas de tiempo y tiempos de procesamiento en las ciudades o localidades. También se diseñan planes de ruta óptimos para estas máquinas recolectoras y se pretende minimizar el tiempo de viaje.	Se demuestra que agregar restricciones relacionadas con ventanas de tiempo, clústeres y tiempos de procesamiento al TSP estándar, no es la más efectiva en el mundo real. Además, se emplearon dos métodos de solución, Recocido Simulado (SA) y Búsqueda Tabu, esta última fue utilizada en un trabajo predecesor a este. A pesar de que el SA en cuanto a tiempo tarda un poco más (el tiempo de procesamiento no es un factor crítico), su rendimiento es sólido incluso en complejas instancias; mientras Búsqueda Tabu emplea menos tiempo, su rendimiento y enfoque aumenta a medida que la complejidad se incrementa.
The food bank resource allocation problem	J. Álvaro Gómez-Pantoja, M. Angélica Salazar-Aguilar, José Luis González Velare [26] Año 2020	Asignación de Recursos del Banco de Alimentos, que toma en cuenta la gestión de inventarios, compras, compatibilidades producto-beneficio, nutrición balanceada y prioridad de los beneficiarios. Este caso fue aplicado en México.	La problemática de asignación de recursos de los bancos de alimento tiene una disyuntiva de elegir a quienes suministrar el alimento. Por lo tanto, se deben tomar decisiones difíciles para determinar a quién se servirá, qué tipo de productos y cuántos de ellos se suministrarán.	Se propone una formulación de Programación Linear Entera Mixta (MILP) y Búsqueda de Grandes Vecindarios Adaptivo (ALNS). Su función resuelve instancias de hasta 100 beneficiarios y 200 productos diferentes. La propuesta (ALNS hibrida) supera al CPLEX con hasta un 24,07% de GAP relativo y es capaz de encontrar soluciones casi óptimas con una brecha de 2,56 a 7,65%.
Multi-objective routing and scheduling for relief distribution with split delivery in post-disaster response	Fatemeh Sabouhi , Mehdi Heydari , Ali Bozorgi-Amiri [27] Año 2016	Modelo multi-objetivo, que considera una estructura una red de tres niveles (deposito-CDs-refugios), que consiste en el enrutamiento y la programación de vehículos de socorro para la distribución de recursos a los centros de distribución y refugios, desde un depósito. Este es un caso de estudio en la ciudad de Teherán.	Proponen un modelo MILP mediante el uso del método de Torabi y Hassini (TH) para minimizar el tiempo de arribo total de los vehículos a los centros de distribución y refugios, además, pretende minimiza el número de vehículos a usar.	Por medio del método de TH se obtuvo como resultados 336,4 minutos de tiempo total y 5 vehículos usados. En el análisis de sensibilidad se encontró que al aumentar la cantidad de recursos en el centro de distribución de 1155 a 1200, se reduce el tiempo en 67,7 minutos y solamente se usan 4 vehículos.

B. Exploración de mercado

Después de conocer situaciones similares a la de este proyecto, el equipo definió que las ayudas humanitarias debían ser mercados alimenticios, ya que, al efectuarse una crisis o catástrofe las personas quedan sin recursos y necesitan de comida para sobrevivir. Por ende, deberá iniciarse luego del desastre natural, la distribución de las ayudas a través del ruteo, para compensar el nivel de consumo de alimentos de las personas más necesitadas cuando ocurre una emergencia, con el fin de evitar el deterioro nutricional. La manipulación de estos alimentos por parte de los distribuidores debe ser adecuada, con el objetivo de que sus características no resultaran afectadas y así, no causar alteraciones a la salud de los beneficiarios. Todos los productos que integran el mercado (ayuda alimentaria) deben marcarse para una adecuada y rápida identificación, de la misma forma se especifica la

información básica, como el fabricante, el tipo de producto, la cantidad contenida en el empaque, la fecha de vencimiento y condiciones especiales de manejo y almacenamiento (Anexo 3). Este tipo de ayudas se consideraron estrategias a corto plazo, y por su composición tendrán una duración promedio de 8 a 10 días en un núcleo familiar no superior a 5 integrantes [28].

La Unidad de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), planteó una estandarización de los productos que conforman el mercado humanitario, mostrados en la TABLA V con sus respectivas especificaciones de cantidad. La cotización de los productos señalados se realizó en la cadena de supermercado Jumbo, como punto de referencia debido a que el gobierno no especificó la proveniencia de los mercados.

TABLA V
PRECIO PROMEDIO DE PRODUCTOS DEL MERCADO HUMANITARIO.MODIFICADO [28].

Producto	**Cantidad**	**Precio Promedio en pesos ($)**
Arroz	12 libras	15 990
Azúcar	2 libras	3290
Café	1 libra	8190
Frijol	2 libras	6580
Aceite Vegetal	1 litro	7390
Lentejas	4 libras	9160
Harina Maíz	1 libra	1390
Panela	4 unidades	5790
Lomo de Atún	3 latas	12 390
Chocolate	2 libras	11 980
Sal	1 libra	790
Harina de Trigo	1 libra	1050
Pasta	1 libra	3090
Total		87 080

A partir de los diferentes artículos y revistas científicas revisadas, se identificaron bases de datos científicas (instancias o casos de prueba) que podían ser aplicados a este proyecto. Estas instancias se tomaron de la librería de instancias de GTSP [29] disponible en http://www.cs.nott.ac.uk/~pszdk/gtsp.html, que contiene 88 instancias, con la información referente a la definición de un problema de GTSP con nodos, clústeres y distancia entre cada nodo, el autor generó la clusterización de los nodos a partir de la librería TSPLIM [30]. El tamaño de las instancias variaba entre 14 y 1084 nodos y 3 a 200 clústeres, por lo tanto, existía variedad en los casos de prueba para abarcar diferentes escenarios. Se puede visualizar en la TABLA VI las diferentes instancias con su nombre, número de clústeres y el número de nodos.

TABLA VI
INSTANCIAS DE GTSP

Instancia	**Clústeres**	**Nodos**	**Instancia**	**Clústeres**	**Nodos**	**Instancia**	**Clústeres**	**Nodos**
3burma14	3	14	22pr107	22	107	64lin318	64	318
4br17	4	17	24gr120	24	120	65rbg323	65	323
4gr17	4	17	25pr124	25	124	72rbg358	72	358
4ulysses16	4	16	26bier127	26	127	80rd400	80	400
5gr21	5	21	26ch130	26	130	81rbg403	81	403
5ulysses22	5	22	28gr137	28	137	84fl417	84	417
6fri26	6	26	28pr136	28	136	87gr431	87	431
8ftv36	8	36	29pr144	29	144	88pr439	88	439
9dantzig42	9	42	30ch150	30	150	89pcb442	89	442
10att48	10	48	30kroA150	30	150	89rbg443	89	443

Instancia	Clústeres	Nodos	Instancia	Clústeres	Nodos	Instancia	Clústeres	Nodos
10gr48	10	48	30kroB150	30	150	99d493	99	493
10hk48	10	48	31pr152	31	152	107ali535	107	535
11berlin52	11	52	32u159	32	159	107att532	107	532
11eil51	11	51	35si175	35	175	107si535	107	535
12brazil58	12	58	36brg180	36	180	113pa561	113	561
14st70	14	70	39rat195	39	195	115rat575	115	575
16eil76	16	76	40d198	40	198	115u574	115	574
16pr76	16	76	40kroa200	40	200	131p654	131	654
20gr96	20	96	40krob200	40	200	132d657	132	657
20kroA100	20	100	41gr202	41	202	134gr666	134	666
20kroB100	20	100	45ts225	45	225	145u724	145	724
20kroC100	20	100	45tsp225	45	225	157rat783	157	783
20kroD100	20	100	46gr229	46	229	200dsj1000	200	1000
20kroE100	20	100	46pr226	46	226	201pr1002	201	1002
20rat99	20	99	53gil262	53	262	207si1032	207	1032
20rd100	20	100	53pr264	53	264	212u1060	212	1060
21eil101	21	101	56a280	56	280	217vm1084	217	1084
21lin105	21	105	60pr299	60	299			

Como las instancias descritas no tenían toda la información requerida, se adaptó toda la librería complementando cada instancia con el nivel de vulnerabilidad y la demanda de cada nodo. Utilizando el lenguaje de programación C++ se creó un programa llamado “CrearDatos” el cual se desarrolló para la lectura y generación de vectores de demanda, nivel de vulnerabilidad de los nodos en las instancias y el número de mercados disponibles (Anexo 4). La generación de la demanda se estableció como un valor aleatorio uniforme entre 1 y 3 mercados, esto debido a que según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres-Colombia (UNGRD) por cada hogar menor a 5 integrantes se debía dar 1 mercado y si se supera este número de personas se debería entregar una ayuda humanitaria extra por cada 5 personas [28]. En el caso del nivel de vulnerabilidad es un valor aleatorio uniforme en el rango [1,5], es decir, 5 niveles (1=baja, 2=media-baja, 3=media, 4=media-alta y 5=alta) con base a la clasificación del DANE [15]. A causa de la inexistencia de una cantidad estándar de ayudas alimentarias por instancia; la cantidad disponible de mercados se generó por medio de una distribución uniforme, donde el mínimo era la suma de la cantidad mínima de demanda por cada clúster, mientras el máximo era la totalidad de la demanda de todos los nodos, esto con la finalidad de garantizar la factibilidad del proyecto. Cabe resaltar, que, si se contara con la información necesaria, tal como número de mercados, cantidad de nodos, numero de clústeres y la distribución de los nodos en los clústeres, para una determinada ciudad, el algoritmo de este proyecto se ajustará fácilmente y arrojará una respuesta eficiente para dar solución al problema.

Para determinar el método de distribución de referencia de la ruta (estado actual) se utilizó un programa creado en lenguaje C++ denominado “SolucionActual” (Anexo 5), el cual se encarga de la lectura de los datos obtenidos por el programa “CrearDatos”. Esta crea una secuencia ordenada de nodos que marca la ruta a seguir. Debido a que no se disponía de información sobre la metodología de entrega de mercados por parte del Gobierno, se empleó una regla lógica y usual en los problemas de asignación- ruteo, que comprende la entrega de un número de auxilios alimentarios acorde con el indicador de demanda de las familias (nodos); la prioridad de atención viene dada por el correspondiente nivel de vulnerabilidad de cada nodo. En caso de que los mercados no sean suficientes, el siguiente paso en el programa es buscar un nodo con demanda igual o menor al número de mercados aún disponibles y que además presente el nivel de vulnerabilidad más alto, por el contrario, al encontrar un nodo con el mismo nivel de vulnerabilidad en el mismo clúster, entonces este nodo será visitado antes de salir del clúster. El algoritmo se repite hasta que todos los clústeres sean visitados. Posteriormente, se obtiene la distancia total a recorrer y el beneficio acumulado (puntos: niveles de vulnerabilidad satisfechos) de la ruta que se creó previamente y se genera un archivo de extensión txt con los resultados obtenidos.

En la Fig. 6. se observa la representación gráfica de la instancia adaptada “3burma14” (Anexo 6, 7), donde se muestran los nodos 1-14, 3 clústeres y encima de cada nodo su demanda y nivel de vulnerabilidad, respectivamente.

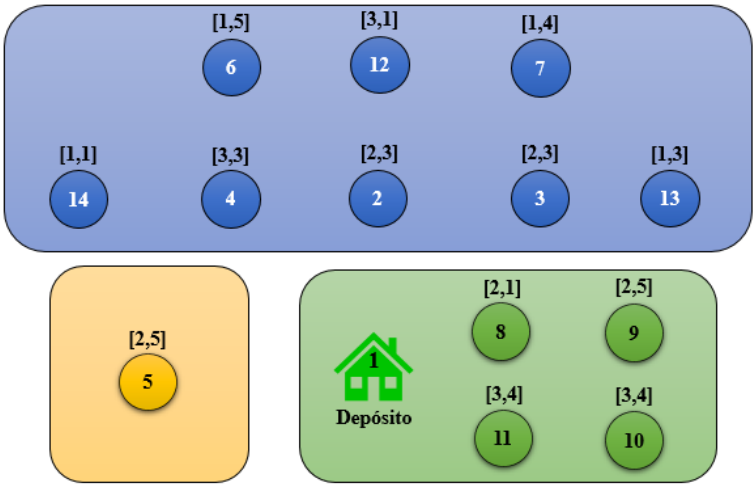


Fig. 6. Ilustración de la instancia 3burma14 modificada.

C. KPI´S

A continuación, en la TABLA VII se definieron los indicadores de desempeño KPI´s para la cuantificación de los resultados del proyecto, los cuales se seleccionaron de acuerdo con la información encontrada en el plan para recolección de datos (Anexo 2). Estos indicadores propuestos miden la solución actual del problema planteado, además, se presenta la actualidad de los indicadores, es decir, la metodología de referencia que se planteó y la meta tentativa que indica a dónde se pretende llegar con la ejecución del proyecto.

TABLA VII
RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO.

Variable	**Objetivo**	**Descripción**	**Indicador**	**Actualidad**	**Meta**
Costo logístico.	Provee la información necesaria sobre el costo que se obtiene al realizar la ruta de los mercados.	Se mide respecto a la distancia recorrida, de un nodo al otro.	C: Costo asociado a los km. di: Distancia al nodo seleccionado i. Costo por distancia recorrida=Σ C*di	Se toman valores obtenidos en las instancias, sobre las distancias recorridas de un nodo al otro. Promedio de las distancias = 1533,844 km C =$1492/km [31] Costo por distancia recorrida= $2 288 495	Mejorar un 5%.
Nivel de vulnerabilidad.	Suministra información sobre el beneficio que se obtiene al abastecer las familias con los mercados.	Se mide respecto a la cantidad de familias, la cuales se les entregara los mercados según el nivel de vulnerabilidad y el rango de demanda.	Vi: Vulnerabilidad cubierta por nodo i. Beneficio Acumulado=Σ Vi	Medición mediante, la regla lógica planteada (ir a los nodos con mayor vulnerabilidad) Promedio vulnerabilidad cubierta o beneficio= 536 puntos (niveles de vulnerabilidad).	Mejorar un 10%.

IV. ANALIZAR

A. *Análisis de Oportunidad*

En el TSP, o en el caso particular GTSP, existen un sin número de decisiones que dificultan la búsqueda de una solución óptima, más aún, teniendo en cuenta que este tipo de problema es clasificado como NP-Hard, por ende, hace que la solución sea difícil de obtener en instancias al incrementar el número de nodos [22]. Por este motivo, se han desarrollado algoritmos que encuentran una solución de alta calidad en un tiempo de cómputo que crece polinómicamente.

En general, se pueden obtener diferentes soluciones basándose en reglas lógicas determinadas en un algoritmo. En consecuencia, sí se cambian estas reglas, la solución varía, cambiando así el valor en la función objetivo (o los indicadores). Para ejemplificar esta situación se tomó, sin pérdida de generalidad, la instancia 11berlin52 ya adaptada con el programa "CrearDatos" (Anexo 4) y se resolvió a través del método de distribución de mercados actual y un método alternativo que no contempla una de las reglas, esta consiste en darles prioridad a los nodos del mismo clúster al momento de escoger un nodo según su nivel de vulnerabilidad. En la Fig.7, se observan las dos rutas realizadas con su distancia recorrida y el beneficio obtenido.

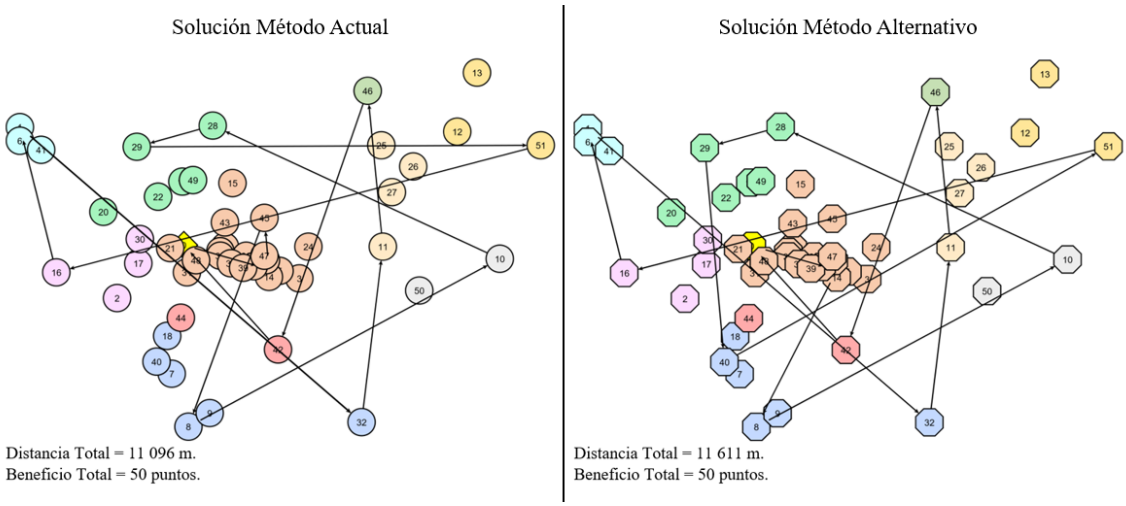


Fig. 7. Instancia 11berlin52_COVID. Solución método actual y solución método alternativo.

TABLA VIII
RUTA SOLUCIÓN ACTUAL Y SOLUCIÓN ALTERNATIVA.

Solución Método Actual		**Solución Método Alternativo**	
Nodo Inicio	**Nodo Llegada**	**Nodo Inicio**	**Nodo Llegada**
0	4	0	4
4	45	**4**	**8**
45	8	**8**	**10**

8	10	**10**	**28**
10	28	**28**	**29**
28	29	**29**	**40**
29	51	**40**	**51**
51	16	51	16
16	1	16	1
1	32	1	32
32	11	32	11
11	46	11	46
46	42	46	42
42	0	42	0

En la TABLA VIII se aprecia que la ruta de la solución actual es diferente a la ruta de la solución alterna (los nodos subrayados son los arcos que difieren con el método actual). Observando la Fig. 7, se aprecia que la solución del método actual recorre una distancia menor (11 096 m) y se obtiene un beneficio igual al de la solución del método alterno (50 niveles de vulnerabilidad) además, presenta una distancia de recorrido más grande (11 611 m); la diferencia es de 515 metros. De esta forma, a pesar de que el método alternativo sólo cambia ligeramente su criterio, se ha demostrado que se obtienen soluciones diferentes al cambiar el proceso de toma de decisiones.

B. Revisión de literatura

Considerando el problema de ruteo de ayudas humanitarias a las familias más vulnerables, es necesario encontrar una ruta que visite por lo menos un nodo de cada clúster, con el propósito de maximizar un beneficio obtenido en los nodos. Este se denomina GTSP y fue mencionado por primera vez en la literatura entre finales de los años sesenta y principios de los setenta por Henry-Labordere [32]. Es utilizado en muchos casos de optimización para encontrar la ruta que genere el menor costo. En la TABLA IX se evidencian casos del GTSP que presentan diferentes métodos para solucionar este problema y obtener mejores resultados. Algunos métodos son el Programación Entera Mixta basado en el Branch and Cut (MIP-CUT), Algoritmo hibrido que mezcla programación lineal y un algoritmo genético (LIP), Búsqueda de Vecindario Variable (VNS), Pareto Composicional-Heurística Algebraica (CPH) y el Algoritmo Metaheurístico Sistema de Colonia de Hormigas (ACS). Se estudió estos diferentes métodos para poder implementar uno como base en el proyecto.

TABLA IX
REVISIÓN DE LITERATURA.

Nombre del articulo	**Autores y año**	**Problema (objetivo)**	**Método**	**Resultados (Comentario del método)**	**Aporte al Proyecto**
Gotta (efficie ntly) catch them all: Pokemon GO meets Orient	Eduardo Alvarez-Miranda, Martin Luipersb eck,	Consiste en que una persona empieza su recorrido desde un punto específico (raíz), e intenta visitar tantas estaciones Pokemon´s como sea	Se realizan dos modelos Programación Entera Mixta (MIP), el primero, llamado MTZ, es un Tamaño Polinomial MIP basado en Branch and Bound (B&B) y en las restricciones de	Se comparó el MTZ y CUT y se encontró que en instancias menores a 30 nodos tienen resultados similares (Gap%), pero, a mayor cantidad de nodos	El CUT se implementó en el programa C++, lenguaje cual estamos manejando y presenta resultados con el TSPLIB el 71 % de los casos

-eering Pr-oblems.	Markus S innl [16] Año 2017	posible mientras se asegura de regresar al punto de partida dentro de un plazo determinado. Cada estación tiene un premio determinado por lo que el objetivo del competidor es maximizar el premio total recolectado. Combina características del Orienteering Problem (OP) y GTSP. Este problema se denominará Generalized Clustered Orienteering Problem (GCOP).	Miller Tucker-Zemlin (MTZ). El segundo, denominado CUT, es un exponential-sized basado en Branch and Cut (B&C) y en la eliminación generalizada de restricciones de subtours (GSECS). Además, ambos algoritmos emplean una heurística de construcción y otra de inicialización. Se implementó en C++ y se compiló usando GCC 4.9, CPLEX 12.6.3 se usó como un solucionador de MIP y OGDF se usó para estructuras de datos de gráficos.	obtiene un mejor resultado el CUT. Además, el MTZ se tardó 1240 segundos en encontrar la solución de todas las instancias con nodos menores a 101, por el otro lado, CUT tardó 145 segundos. Por otra parte, MTZ obtiene un GAP Promedio igual a 1,17%, mientras CUT obtiene 0,06%. Por lo tanto, se excluye el programa MTZ.	encuentro la solución óptima, beneficio uniforme (asignación del beneficio para cada nodo fue realizado uniformemente) 95% de las instancias, beneficio aleatorio, 88% de las instancias. Tiene gran capacidad ya que procesa más de 100 nodos y menos de 500 nodos. Acorde al tiempo de respuesta en una hora se resuelven aproximadamente el 90% de las TSPLIB.
A new approach for solving the generalized traveling salesman problem	Pop, P. C. Matei, O. Sabo, C. [18] Año 2010	Se pretende describir un nuevo enfoque del GTSP basado en distinguir entre conexiones entre clústeres y conexiones entre nodos de diferentes clústeres. Solamente se visita un nodo de cada uno de los clústeres.	Se plantea una nueva formulación de Programación Lineal Entera para el GTSP y en combinación con un algoritmo genético se da un algoritmo híbrido eficiente para resolver el problema. El algoritmo se desarrolló en Java, JDK 1.6.	Los resultados computacionales que obtuvieron para las instancias de TSPLIB euclidianas con el algoritmo híbrido se facilitan al reducir considerablemente el espacio de soluciones y una mejora a la exploración del espacio de búsqueda.	La implementación del algoritmo hibrido (LIP) es en java y presenta mejores resultados que el algoritmo genético (En Función objetivo y Brecha). Puede procesar de 198 a 442 nodos. Con 40 a 89 clústeres.
Online Heuristic for the Multi-objective Generalized Traveling Salesman Problem	Joostvan Pinxten, Marc Geilen, Twan Basten, Umar Waqas, Lou Somers [33] Año 2016	Consiste en el ordenamiento de trabajos (job) y configuración del sistema de fabricación para cada trabajo y tiene multiples objetivos. Estos pueden expresarse como un Multi- Objectivo GTSP (MO-GTSP), por lo tanto, su objetivo es optimizar la secuencia de trabajos en su conjunto.	Se utiliza para la solución del problema MO-GTS el Compositional Pareto-algebraic Heuristic (CPH) que está basado en Pareto Algebraico, el cual se ha aplicado previamente con éxito al Multi-dimensional Multiple- problema de la mochila (MMKP).	El CPH se compara con el Algoritmo Memético (MA) modificado para un MO-GTSP. Los resultados de los experimentos muestran que CPH-GTSP es entre 5 y 20 veces más rápido que Algoritmo Memético GTSP (MA-GTSP). Además, obtiene mejores soluciones en 25 de las 26 instancias. Sin embargo, el MA GTSP tiene ligeramente mejores fronteras de Pareto del CPH.	El CPH como método presenta los mejores resultados en casi la totalidad de sus instancias si se comparan con los otros métodos de este articulo y sus resultados son de alta calidad. En cuanto a su capacidad procesa de 100 hasta 200 nodos, con 20 a 40 clústeres en el TSPLIB. El tiempo de procesamiento es corto de 100 milisegundos para instancias medianas y varios segundos para instancias grandes
Effective Neighborhoo-d Structures for the Generalized Traveling Salesman Problem	Bin Hu and Guntherr R. Raidl [34] Año 2008	Se pretende describir un nuevo enfoque para la solución heurística del problema GTSP, donde el objetivo es identificar el viaje con un costo mínimo que visite exactamente un nodo de cada clúster.	En este artículo, presentan un enfoque general de Búsqueda de Vecindario Variable (VNS) para resolver este problema de manera heurística. Como mejora local dentro de VNS, utilizaron el Descenso de Vecindario Variable (VND) basado en dos tipos diferentes de vecindarios exponencialmente grandes, que pueden verse como duales entre sí. Uno es el generalized 2-opt y el otro es un nuevo enfoque	El VNS y varios Algoritmos Genéticos (GA) se comparan con el Algoritmo B&C. El VNS requiere más tiempo para obtener una solución comparado con random key GA (rk-GA) y hybrid chromosome GA (hc-GA), pero la heurística GI es muy inferior siendo el de mayor tiempo y menor buena solución. VNS en las instancias de más de 300	En cuanto a los resultados del método VNS, presenta en promedio brechas menores al resto de alternativas (GI,rk-GA, hc-GA). Puede procesar hasta 442 nodos con 89 clústeres con un tiempo máximo de 600 segundos.

			basado en el algoritmo heurístico de Lin-Kernighan.	nodos obtuvo mejores resultados que las otras alternativas. En 18 de las 28 instancias, VNS incluso pudo obtener soluciones óptimas en las 30 ejecuciones y así resultando con el menor Gap promedio (0,5%) entre todas las alternativas comparadas. Además, los Gaps de cada instancia estuvieron entre 0% y 0,75%.	
The generalized traveling salesman problem solved with ant algorithms.	Camelia-M. Pintea Petrică C. Pop. Camelia Chira. [35] Año 2017.	El objetivo de este artículo es proporcionar un algoritmo exacto para el GTSP, así como un algoritmo metaheurístico eficaz para el problema.	La metaheurística utilizada llamada Reforzando Sistema de Colonia de Hormigas (RACS), es una modificación de la observación de colonias de hormigas reales. Sistema de Colonia de Hormigas (ACS) se utiliza para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria.	Los resultados computacionales del algoritmo propuesto arrojaron que eran buenos y competitivos tanto en calidad de solución como en tiempo computacional con las heurísticas existentes. Los resultados se pueden mejorar con mejores valores de parámetros o utilizando algoritmos híbridos.	La Colonia de Hormigas como método es difícil de implementar y se debe tener una computadora muy sofisticada, en cuento sus resultados se presentan en promedio brechas muy bajitas y su tiempo de procesamiento es corto. Su capacidad es de 10 hasta 217 clúster y son las mismas instancias que las nuestras.

C. Exploración de ideas y selección de alternativa

Con el objetivo de determinar la alternativa a emplear es indispensable realizar una exploración de ideas, esto con la finalidad de seleccionar la solución que mejor se ajusta a este proyecto a través del método de Análisis de Jerarquía Analítica (AHP). De esta manera, se implementa una lluvia de ideas, basada en la revisión de literatura de la sección anterior, en la que el equipo expresó libremente criterios que debe poseer la solución para posteriormente analizar las ideas en la TABLA X con el fin de asegurar que están acorde con el objetivo del proyecto. A continuación, se presenta las diferentes ideas:

- Utilizar una heurística o varias para obtener una mejor solución.
- La capacidad de la solución permita como mínimo 100 nodos.
- Facilidad de modificarse usando C++.
- Una solución preexistente, ya sea un algoritmo o una heurística.
- Solo utilice un tipo de producto.
- Se obtenga una buena solución comparada con otras metodologías.
- Contenga una función multiobjetivo.
- El tiempo de obtención de la solución sea corto.

TABLA X
LLUVIA DE IDEAS.

Ideas	**Análisis**
Utilizar una heurística o varias para obtener una mejor solución.	Este factor es importante, debido que en los artículos consultados en la revisión de literatura se evidencia que los modelos se solucionaban por medio de heurísticas, ya que, son problemas complejos de resolver.

La capacidad de la alternativa permita como mínimo 100 nodos.	La capacidad de procesamiento de nodos es de gran importancia, dado que, en la práctica existe un número considerable de familias que necesitan ayudas humanitarias, por lo tanto, se acerca más a la realidad.
Facilidad de modificar usando C++.	Se plantea por medio del lenguaje de programación C++, dado que se posee un conocimiento previo, además cuando se realizaron los programas anteriores se obtuvieron buenos resultados.
Una solución preexistente para el GTSP ya sea un algoritmo o una heurística.	Se tienen en cuenta soluciones preexistentes por medio de algoritmos o heurísticas que plantean distintos modelos, los cuales se toman como guía para el planteamiento y la solución del trabajo.
Solo utilice un tipo de producto.	Es necesario que las posibles alternativas tengan solo un producto a distribuir, esto teniendo en cuenta que el proyecto solo distribuirá ayudas alimentarias (mercados).
Contenga una función multiobjetivo.	Es ideal que las alternativas tengan una función multiobjetivo, dado que, el proyecto busca minimizar la distancia recorrida y maximizar el beneficio obtenido.
El tiempo de obtención de la solución sea corto.	Por medio del lenguaje de programación C++ se espera que el tiempo de respuesta a la solución del método formulado y planteado sea corto.

Teniendo en cuenta el análisis realizado en la TABLA X se dispone a determinar las posibles alternativas para la solución de este proyecto. Las alternativas deben abarcar la mayoría de las ideas propuestas para que pueda ser aplicada. A continuación, se muestran las posibles alternativas:

- Programación entera mixta (MIP).
- Programación lineal entera, basado en un algoritmo hibrido (LIP).
- Algoritmo Heurístico (AH), por ejemplo, vecino más cercano, ahorros de Clarke & Wright, Algoritmo Genético [36][37].
- Heurística para optimización Multiobjetivo (AHMO).
- Algoritmo Metaheurístico Constructivo (AMH) como algoritmo de recocido simulado (SA), colonia de hormigas (Ant Colony), algoritmo evolutivo (EA), algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PA) [38].

Además, para definir la alternativa se utilizó el método de AHP, en este es necesario definir criterios para determinar la importancia que se la va a asignar a cada alternativa según estos criterios. Seguidamente se muestran los criterios más relevantes:

- **Implementación:** dificultad de los integrantes para poder realizar la solución considerando que son estudiantes de pregrado.
- **Tiempo:** es el tiempo de cómputo hasta la terminación de la ejecución de la alternativa.
- **Capacidad**: la cantidad de nodos y clústeres que se pueden ejecutar.
- **Resultado:** qué tan preciso son los resultados frente a la solución óptima.

Por medio del método visual se realizó la evaluación entre criterios para determinar la prioridad de estos. En la TABLA XI se observa la plantilla usada para la priorización de criterios y frente a cada uno se evalúa las cinco alternativas previamente mencionadas. En la TABLA XII se obtienen los resultados de los porcentajes de los criterios, observando que el de mayor porcentaje es el criterio "Resultado", ósea, es el que tiene más importancia al momento de evaluar las distintas alternativas (Anexo 8).

TABLA XI
MÉTODO VISUAL.

1/5	**1/4**	**1/3**	**1/2**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
	Resultado	Capacidad	Implementación	Tiempo				

TABLA XII
RESULTADO DE LOS PORCENTAJES DE LOS CRITERIOS.

Resultado	**Tiempo**	**Capacidad**	**Implementación**
47%	10%	28%	16%

Posteriormente a la obtención de porcentajes de los criterios, se realizó el mismo método para encontrar la alternativa a realizar en el proyecto, en la TABLA XIII se obtienen los resultados. Considerando los resultados obtenidos mediante el método AHP la alternativa a escoger es MIP, un modelo de Programación Entero Mixto. Sin embargo, si en la resolución de este tipo de modelo se determina que no es factible, debido a que el tiempo de solución es extenso, por consiguiente, se usará un modelo heurístico.

TABLA XIII
RESULTADO DE LOS PORCENTAJES DE LAS ALTERNATIVAS.

GRAN TOTAL	**ALTERNATIVA**
28,7%	MIP
21,9%	LIP
15,2%	AHMO
12,7%	AH
21,5%	AHM

D. Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema de apoyo para la toma de decisiones frente a la distribución de ayudas alimentarias, por medio de un modelo enfocado a resolver el problema multiobjetivo del agente viajero generalizado (GTSP).

Objetivos específicos

- Caracterizar el sistema; asumiendo un programa de ruteo que considere la planificación de la ruta cubriendo las familias más vulnerables, teniendo en cuenta la condición de visitar por lo menos un nodo de cada clúster.
- Realizar una revisión de literatura más profunda sobre los métodos más relevantes y eficientes propuestos para resolver el GTSP, también teniendo en cuenta los modelos multiobjetivo; con la finalidad de obtener una guía para el desarrollo del proyecto.
- Diseñar un modelo determinista para la generación de una ruta eficiente conforme a la asignación de auxilios alimenticios con base a los criterios de vulnerabilidad y demanda.
- Validar la alternativa planteada utilizando casos de prueba, con el fin de conocer la variabilidad de los resultados alcanzados. De tal manera, se espera identificar si la propuesta logra producir una mejora en el indicador establecido.

E. Plan de Trabajo (PdT)

Se definió el Plan de Trabajo (Anexo 9) a seguir en la realización del modelo propuesto. En la TABLA XIV se presenta el resumen del Plan de Trabajo que contiene los objetivos específicos con sus actividades, el área de la ingeniería que se está

usando, los hitos o entregables y finalmente, la fecha de inicio. Las fechas se presentan como tentativa, esto debido a que es posible que se deba cambiar el modelo entero por un modelo heurístico.

TABLA XIV
PLAN DE TRABAJO.

OBJETIVO GENERAL						
Diseñar un sistema de apoyo para la toma de decisiones frente a la distribución de ayudas alimentarias, por medio de un modelo enfocado a resolver el problema del agente viajero generalizado (GTSP).						
Objetivo específico	**Actividades**	**Área IISE**	**Herramienta**	**#**	**Entregable**	**Fecha**
Caracterizar el sistema; asumiendo un programa de ruteo que considere la planificación de la ruta cubriendo las familias más vulnerables, teniendo en cuenta la condición de visitar por lo menos un nodo de cada clúster.	-Obtención de Instancias - Definir regla lógica -Diseñar programa -Revisión de programa por parte de director. -Correcciones. -Establecer, graficar y resultados de la ruta.	-NA -NA -2 -NA -2 -NA	-NA -NA -Modeling approaches -NA -Modeling approaches -NA	-NA -NA -A -NA -A -NA	-Instancias txt -NA -Archivo C++ -NA -Archivo C++ -Etapa Medir, KPI´s.	10/10/2020 10/10/2020 17/10/2020 20/10/2020 22/10/2020 26/10/2020
Revisar los métodos eficientes propuestos en la literatura académica, que se puedan aplicar o aproximar al problema de la distribución de recursos asociados al GTSP, con la finalidad de obtener una guía para el desarrollo del proyecto.	-Búsqueda de papers con relación al GTSP en fuentes confiables. -Revisión de los papers por parte del director. -Análisis de los métodos utilizados en cada paper.	-NA -NA -NA	-NA -NA -NA	-NA -NA -NA	-Tabla de papers. -Tabla de papers. -Etapa Analizar, Revisión de literatura	2/11/2020 16/11/2020 24/11/2020
Diseñar un modelo matemático determinista para la generación de una ruta optima, conforme a la asignación de auxilios alimenticios con base a los criterios de vulnerabilidad y demanda.	-Definir Conjuntos y Variables. -Definir Función Objetivo y Restricciones. -Correcciones. -Establecer modelo.	-2 -2 -NA -2	-Modeling approaches -Modeling approaches -NA -TSP and Solution Methods	-A -A -NA -NA	-Documento con conjunto y variables - Documento con F.O y restricciones -Lista de correcciones -Modelo Lineal	1/02/2021 22/02/2021 15/03/2021 26/03/2021
Validar la alternativa planteada utilizando casos de prueba con el fin de conocer la variabilidad de los resultados alcanzados. De tal manera, se espera identificar si la propuesta logra producir una mejora en el indicador establecido.	-Validar el modelo usando instancias de prueba generadas. -Comparar con el método actual. -Graficar alguna ruta obtenida. -Cierre.	-NA -NA -NA	-NA -NA -NA	-NA -NA -NA	-Resultados de las instancias en txt. - Grafica de ruta -PD2	- 25 /05/2021 - 27 /05/2021 -1 /06/2021

V. DISEÑAR

A. *Desarrollo del diseño de la solución*

Como se mencionó en la anterior sección, la alternativa seleccionada para resolver el problema del ruteo de ayudas humanitarias aplicado al contexto Covid-19, fue la Programación Entera Mixta (MIP). La MIP es aplicable para todo tipo de diseño de rutas y por lo regular es utilizada para problemas de optimización que consideran variables binarias o enteras para modelarlos [39].

El enfoque multiobjetivo es importante para la realización de este proyecto, dado que por medio de este se puede ajustar un modelo a un escenario más relista, donde existen varios objetivos que presentan conflictos entre ellos. Los métodos de solución multiobjetivo identifican las mejores soluciones óptimas contemplando varios objetivos simultáneamente, generando un conjunto de soluciones, sobre las cuales no se puede elegir cual es mejor que las otras cuando se estiman todos los objetivos, estas son llamadas soluciones no dominadas [40]. El conjunto que contiene estas soluciones se denomina Frontera de Pareto Dominada, es decir que no existe otra solución la cual un objetivo pueda mejorar sin degradar al menos otro. Para seleccionar una solución de este conjunto, el decisor puede contemplar las diferentes soluciones. Como ejemplo, en la Fig.8, se observa una frontera de Pareto con sus soluciones, estas son O, A, B, C, D, G pertenecen al conjunto de soluciones no dominadas, mientras que F y E son soluciones dominadas, pues el punto E es dominado por B, al este tener igual valor en el objetivo Z_2 y mejor valor en el objetivo Z_1, asimismo el punto F es dominado por el punto C al tener igual resultado en el objetivo Z_1 y mejor valor que el objetivo Z_2 [40].

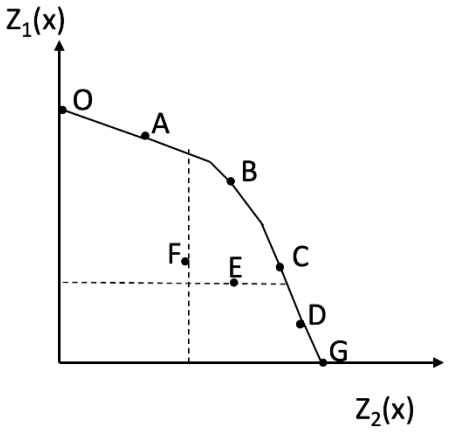


Fig. 8.Representación de las soluciones no dominadas y dominadas [40]

Existen diferentes aproximaciones para solucionar un problema multiobjetivo; una de ellas es la suma de pesos ponderados, la cual se basa en la transformación de un problema multiobjetivo a un único objetivo, asociando un peso a cada función objetivo, obteniendo como resultado una solución no dominada [41]. Otro método es la Restricción-ε, este mantiene un solo objetivo y restringe el resto de los objetivos a un valor ε el cual representa el *Upper bound* de cada objetivo, y así asignarlos como restricciones [41]. Por su parte la programación de metas, consiste en transformar una optimización multiobjetivo a una de un solo objetivo, minimizando la diferencia entre la meta y la función objetivo, teniendo en cuenta que las metas son establecidas por el decisor, además, este método puede dar como resultado una solución factible pero no optima de Pareto [42].

Este proyecto presenta conflicto entre dos objetivos: maximizar el beneficio acumulado y minimizar la distancia recorrida. Para incluir este componente multiobjetivo se realizó una revisión de literatura sobre el tema y se seleccionó el método de la suma ponderada de objetivos (Weighted Sum Method). Los principales criterios de selección fueron la simplicidad del método, la posibilidad de que el decisor pudiera intervenir en la importancia de los objetivos y que se pudiera encontrar soluciones no dominadas en una función convexa. En este método, se debe realizar la ponderación de cada uno de los objetivos con un peso, que está relacionado con la alternativa tomada por el decisor, es decir, este elige la importancia de cada función objetivo.

Al tener objetivos con diferentes unidades de medida (kilómetros y niveles de vulnerabilidad), es imperativo efectuar una normalización para transformar los valores dentro de un rango común de 0 al 1. Mediante la ecuación (1), la cual está compuesta por un valor ideal llamado *Utopia* y no-ideal llamado *Nadir*, es posible establecer la normalización. Para obtener estos valores, se realizó una relajación lineal a las restricciones de enteros, posteriormente se optimizó la función objetivo para llegar al mejor valor de la función que resulta en la Utopía. Por otro lado, los puntos Nadir se obtienen optimizando la función, pero invirtiendo el objetivo de la función objetivo (pasar de maximizar a minimizar o viceversa) buscando el peor valor posible [43][44].

$$0 \leq \frac{z_i^N - f_i(x)}{z_i^N - z_i^U} \leq 1 \tag{1}$$

z_i^N: $Valor\ Nadir\ \forall\ objetivo_{\ i}$

z_i^U: $Valor\ Utopia\ \forall\ objetivo_{\ i}$

$f_i(x)$: $Valor\ funcion\ objetivo$

Con respecto a los pesos que se aplicaron a la función objetivo, se escogieron diez alternativas diferentes representadas en la TABLA XV. La columna W1 corresponde a los pesos asignados para el costo de la distancia recorrida y W2 para el beneficio obtenido correspondiente a los niveles de vulnerabilidad.

TABLA XV
DIFERENTES PESOS PARA EL METODO DE PESOS PONDERADOS

Alternativa	W1	W2
1	1	0
2	0,9	0,1
3	0,8	0,2
4	0,7	0,3
5	0,6	0,4
6	0,5	0,5
7	0,4	0,6
8	0,3	0,7
9	0,2	0,8
10	0,1	0,9

Finalmente, puesto que el modelo MIP comparte similitud con los modelos de ruteo, se debe tener en cuenta las decisiones encadenadas, es decir, la decisión inicial se toma sobre la base de la consideración explícita de otras decisiones futuras ocasionando que las rutas generadas cumplan las restricciones, pero no se garantiza que la ruta termine en el lugar donde empezó; en el almacén. Es por esto por lo que se utilizaron las restricciones de eliminación de subtours. Las cuales logran la ejecución satisfactoria de rutas de atención a los nodos de los clústeres. Las principales restricciones en los modelos de ruteo para eliminar los subtours son las denominadas MTZ (Miller, Tucker y Zemlin) y DFJ (Dantzig, Fulkerson y Johnson)[45]. Basándose en estudios experimentales [39] [46], se determinó que el método de MTZ era el más apropiado para el modelo.

El modelo se formuló basado en el Problema Generalizado de Orientación Clusterizado (GCOP), adaptado de [16]. A continuación, se muestra la formulación del modelo, primero se harán unas definiciones básicas, luego se describen los conjuntos, parámetros y variables, para, finalmente, enunciar el modelo matemático.

Sea $G(Nodos, Edges)$ un grafo dirigido con un conjunto de nodos denominado $Nodos$ ($|Nodos| = N$) y el conjunto de arcos llamado $Edges$ ($|Edges| = m$). Además, el conjunto de clúster disjunto denotado como *Clúster* y el conjunto de nodos que pertenece a cada clúster k enunciado como $Nodo_Cluster_k$. Se dispone con un depósito ya establecido (nodo 1) que está ubicado en el Clúster A. Considerando los conjuntos establecidos anteriormente, se formula el GCOP Multi-Objetivo con el siguiente modelo de programación Lineal Entera Mixta:

Conjuntos

- $Nodos = \{1 \ldots N\}$ Conjunto de Nodos Ordenados.
- $Cluster = \{1 \ldots C\}$ Conjunto de Clústeres.
- $Nodo_Cluster_k$: Conjunto de Nodos según el Clúster $k \in Cluster$.
- $Edges = \{(i,j), i,j \in N, i \neq j\}$ Conjunto de Arcos factibles.

Parámetros

- N: Numero de nodos.
- A: Clúster en el que se encuentra el nodo número uno.
- C_{ij}: Costo asociado a la distancia desde el nodo i hasta el nodo j, $(i,j) \in Edges$. [Metros].
- D_i: Demanda del nodo $i \in Nodos$. [Mercados].
- $Merca$: Número de mercados disponibles.
- V_i: Nivel de Vulnerabilidad del nodo $i \in Nodos$. [Niveles de vulnerabilidad].
- $P1$: Peso ponderado asignado al objetivo de Costo.
- $UtopiaMax$: Valor ideal F.O Vulnerabilidad. [Niveles de vulnerabilidad].
- $NadirMax$: Valor no-ideal F.O Vulnerabilidad. [Niveles de vulnerabilidad].
- $UtopiaMin$: Valor ideal F.O Costo. [Metros].
- $NadirMin$: Valor no-ideal F.O Costo. [Metros].

Variables

- $X_{ij}: \begin{Bmatrix} 1, si\ el\ arco\ (i,j)\ Edges\ es\ usado \\ 0, De\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$
- $Y_i: \begin{Bmatrix} 1, si\ el\ nodo\ (i) \in Nodos\ es\ visitado \\ 0, De\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$
- U_i : Secuencia de visita del nodo i en el tour, $i \in Nodos$.
- $Z_i: \begin{Bmatrix} 1, si\ nodo\ i \in Nodo_Cluster_A\ es\ el\ nodo\ de\ inicio\ del\ recorrido \\ 0, De\ lo\ contrario \end{Bmatrix}$

Función Objetivo

$$Maximizar\ TotCost = P1 * \left(\frac{NadirMin - Costo}{NadirMin - UtopiaMin}\right) + (1 - P1) * \left(\frac{NadirMax - Vulne}{NadirMax - UtopiaMax}\right) \quad (2)$$

Sujeto a

$$\sum_{(i,j) \in Edges} X_{ij} = Y_i, \qquad \forall\, i \in Nodos \tag{3}$$

$$\sum_{(k,i) \in Edges} X_{ki} = Y_i, \qquad \forall\, i \in Nodos \tag{4}$$

$$\sum_{i \in Nodo_Cluster_k} Y_i \geq 1, \qquad \forall\, k \in Clúster \tag{5}$$

$$\sum_{i \in Nodo_Cluster_A} Y_i \geq 2 \tag{6}$$

$$\sum_{i \in Nodo:\, i \neq 1} D_i * Y_i \leq Merca \tag{7}$$

$$Z_1 = 1 \tag{8}$$

$$Z_i \leq Y_i, \qquad \forall\, i \in Nodo_Cluster_A \tag{9}$$

$$\sum_{i \in Nodo_Cluster_A} Z_i = 1 \tag{10}$$

$$u_i \leq (N-1) * (1 - Z_i), \qquad \forall\, i \in Nodo_Cluster_A \tag{11}$$

$$u_i \leq (N-1), \qquad \forall\, i \in Nodos \tag{12}$$

$$u_i - u_j + N * X_{ij} \leq (N-1), \qquad \forall\, (i,j) \in Edges \mid j \notin Nodo_Cluster_A \tag{13}$$

$$u_i - u_j + N * (X_{ij} - Z_j) \leq (N-1), \qquad \forall\, (i,j) \in Edges \mid j \in Nodo_Cluster_A \tag{14}$$

$$\text{Costo} = \sum_{i,j \in Edges} C_{ij} * X_{ij} \tag{15}$$

$$\text{Vulne} = \sum_{i \in Nodos} V_i * Y_i \tag{16}$$

La función objetivo (2) está compuesta por dos partes: una parte asociada al costo de la distancia recorrida, y otra asociada al nivel de vulnerabilidad, cada una con sus respectivos pesos y puntos Nadir y Utopía. Las restricciones (3)y (4) son las llamadas restricciones de grado de salida y de entrada respectivamente, estas aseguran que si un nodo i es parte del recorrido ($Y_i = 1$), entonces un arco entrante y uno saliente deben ser parte del recorrido. La restricción (5) garantiza que al menos un nodo de cada clúster sea visitado por la ruta. Sin embargo, la restricción (6) asegura que al menos dos nodos sean visitados en clúster A, debido a que en este clúster está el nodo número 1 que hace referencia al almacén. La restricción (7) asegura que la suma de las demandas de los nodos no sobrepase la cantidad de mercados disponibles. La restricción (8) garantiza que el nodo 1 sea el punto de partida del recorrido, es decir el almacén. La restricción (9) establece de que si el nodo $i \in clúster\ A$ se selecciona como nodo de inicio del recorrido ($Z_i = 1$), entonces debe ser parte de la ruta ($Y_i = 1$). La restricción (10) asegura que solo exista un punto de partida

del recorrido. La restricción (11) establece que la posición en la secuencia del nodo inicial tenga un valor de 0. Las restricciones (12), (13) y (14) aseguran la eliminación de subtours, es decir, la restricción (12) establece que las variables u_i sean menores al número de nodos. las restricciones (13) y (14) garantizan que parta y termine en el depósito (se detallarán en la siguiente sección). Las restricciones (15) y (16) corresponden al costo de la distancia recorrida y el beneficio obtenido correspondiente a los niveles de vulnerabilidad.

Es importante mencionar que la restricción (8) asume que el almacén se encuentra en el nodo 1, puesto que suele ser común que ya se cuente con la ubicación de esta instalación antes de hacer el ruteo. Sin embargo, en caso de que se requiera elegir una ubicación, se puede eliminar esta restricción y modelo ya se encargaría de determinar el nodo de depósito.

Para el desarrollo del modelo propuesto y su implementación para los casos de pruebas; desde lenguaje C++ se formularon tres programas que se encargan de crear los archivos .dat, determinar los parámetros Nadir y Utópicos y crear la ruta para cada una de las instancias. En la TABLA XVI se muestran los archivos con su descripción. Así también la TABLA XVII muestra un resumen de entrada y salida de los programas en C++.

TABLA XVI
ARCHIVOS Y DESCRIPCIONES.

No.	Archivo	Descripción
1	"nombre instancia".txt (ej. 3burma14.txt)	Archivo en formato .txt, con los parámetros: distancia (i,j), número de mercados, vulnerabilidad(i), demanda(i), conformación de los clústeres(k), ubicación del nodo 1 (almacén).
2	"nombre instancia1".dat (1)	Archivo en formato .dat, con los mismos parámetros por instancia que contienen el archivo número 1.
3	"nombre instancia2".dat (2)	Archivo en formato .dat, con los mismos parámetros por instancia que contienen el archivo número 1 y los parámetros Nadir y Utópicos.
4	"nombre instancia" + "Ruta".txt	Archivo en formato .txt con los valores de las variables X, Y, Z, u; que muestra la mejor ruta para cada instancia.
5	MODELO_SIN_ENTEROS1.mod	Modelo sin restricciones de enteros, ni variables binarias. Su función objetivo calcula el parámetro Nadir de la función objetivo de maximizar beneficio total acumulado.
6	MODELO_SIN_ENTEROS2.mod	Modelo sin restricciones de enteros, ni variables binarias. Su función objetivo calcula el parámetro Utópico de la función objetivo de maximizar beneficio total acumulado.
7	MODELO_SIN_ENTEROS3.mod	Modelo sin restricciones de enteros, ni variables binarias. Su función objetivo calcula el parámetro Utópico de la función objetivo de minimizar la distancia total acumulada.
8	MODELO_SIN_ENTEROS4.mod	Modelo sin restricciones de enteros, ni variables binarias. Su función objetivo calcula el parámetro Utópico de la función objetivo de minimizar la distancia total acumulada.
9	MODELO.mod	Modelo normal (con sus respectivas restricciones y variables binarias). Su función objetivo calcula el parámetro Utópico de la función objetivo de minimizar la distancia total acumulada.

TABLA XVII
RESUMEN ENTRADA Y SALIDA DE PROGRAMAS.

Nombre	Entrada	Salida
DATOS	"nombre instancia".txt	"nombre instancia1".dat (1)
DATOS1SOL	MODELO_SIN_ENTEROS1.mod MODELO_SIN_ENTEROS2.mod MODELO_SIN_ENTEROS3.mod MODELO_SIN_ENTEROS4.mod	"nombre instancia2".dat (2)
RUTASOL	MODELO.mod	"nombre instancia" + "Ruta".txt

El programa DATOS se encarga de transformar los archivos de texto (contienen los parámetros de cada una de las instancias) a archivos .dat; con el fin de procesarse a través del programa AMPL. El programa DATOS1SOL utiliza los archivos de salida de DATOS y los modelos sin enteros, para calcular y agregar los parámetros Nadir y Utópico. Finalmente, en el programa RUTASOL se utilizan los archivos de salida de DATOS1SOL y el modelo MODELO.mod para implementarlos en AMPL desde C++, en donde se desarrolla la ruta de acuerdo con las restricciones planteadas. La ruta de los casos de prueba es exportada en un archivo .txt con su respectivo nombre.

B. Validación del diseño propuesto

Para la validación del diseño propuesto, se realizaron pruebas al modelo matemático a medida que se incorporaban las modificaciones en las restricciones, con el objetivo de que estas fueran acordes con los requerimientos de los stakeholders. El modelo propuesto y las modificaciones se realizaron con base en el estudio presentado por Álvarez-Miranda, Luipersbeck, y Sinnl [16]. Con el fin de un mayor entendimiento en las restricciones, a continuación, se realiza una explicación más amplia sobre su funcionamiento.

- Las restricciones de balance de entrada y salida (3) y (4) tienen como función: si un nodo está en la ruta, por lo tanto, debe tener dos arcos que lo conectan. Como se observa en la Fig. 9, el nodo 4 al ser parte de la ruta, la variable Y_4 es igual a 1, consecuentemente el arco entrante X_{34} y saliente X_{45} deben existir, es decir, tener un valor de 1.

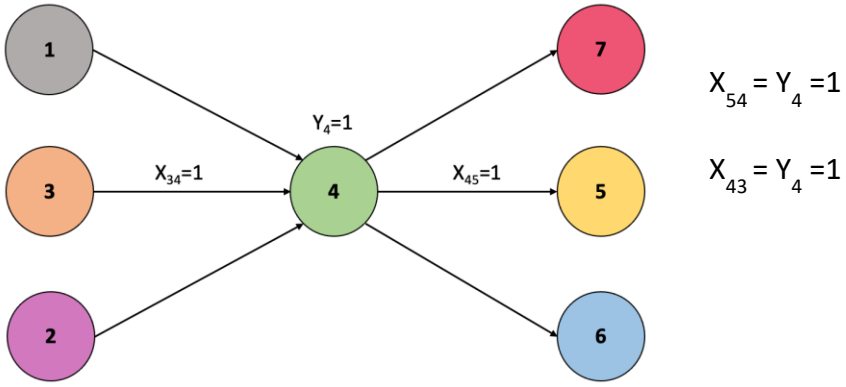


Fig. 9. Restricciones de salida y entrada

- La restricción (5) asegura que en la ruta exista al menos un nodo de cada clúster, además, la restricción (6) garantiza que en el clúster donde está ubicado el almacén (nodo 1) visite al menos otro nodo además de este. En la Fig. 10, se identifica los diferentes clústeres según su color, donde el verde es el clúster donde se encuentra el almacén, por lo tanto, se visita dos veces. Por otro lado, los demás clústeres se atienden al menos una vez.

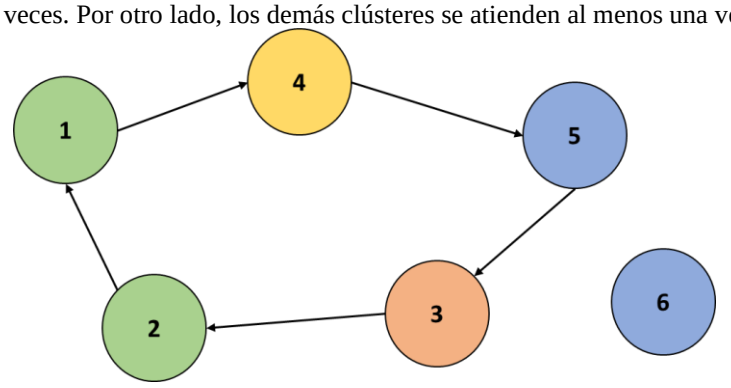


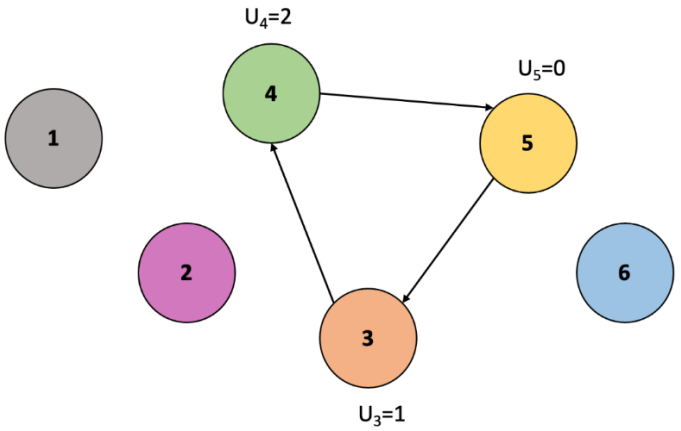
Fig. 10.Restricciones de clústeres

- Las restricciones de MTZ (12), (13) y (14) impiden la creación de subtours en el modelo, pero con el coste de añadir nuevas variables (ui, uj). Estas se basan en la secuencia o el orden de visita en que los mercados serán entregados a las familias (nodos) por el vehículo. Como ejemplo, se observa en la Fig. 11, un subtour que cuenta con los nodos 3, 4 y 5, y los arcos que los conectan, X_{53}, X_{34} y X_{45}. La ecuación (17) representa el comportamiento de la restricción de eliminación de subtours con respecto al arco 5-3, donde las variables X_{53}, u_5 y u_3 tienen un valor de 1, 0 y 1, respectivamente, satisfaciendo la desigualdad. Asimismo, se cumple para el arco 3-4, ecuación (18), debido a que X_{34}=1, u_3=1 y u_4=2, dando un resultado igual a 5. Sin embargo, para la ecuación (19), correspondiente al arco 4-5, no cumple la condición, ya que anteriormente u_5 tiene un valor de 0, entonces la última restricción no podría satisfacerse, dado que el valor de u_4 es mayor que u_5 (0> 2). De esta forma se impide la formación de este subtour.

$$0 - 1 + 6 \leq 5 \quad (17)$$

$$1 - 2 + 6 \leq 5 \quad (18)$$

$$2 - 0 + 6 \leq 5 \quad (19)$$



$$X_{53} \rightarrow u_5 - u_3 + 6\,X_{53} \leq 5$$

$$X_{34} \rightarrow u_3 - u_4 + 6\,X_{34} \leq 5$$

$$X_{45} \rightarrow u_4 - u_5 + 6\,X_{45} \leq 5$$

Fig.11.Esquema de restricción MTZ

Para la validación del modelo propuesto se realizó la frontera de Pareto con una instancia particular, la cual fue "11berlin52_COVID". La finalidad es mostrar las diferentes soluciones no dominadas (rutas) que se pueden obtener del problema, cada una varían según la importancia que se les dé a dichas funciones objetivo de Vulnerabilidad y Costo. Se observa en la Fig. 12, la Frontera de Pareto estimada para esta instancia, donde se detallan los valores de las soluciones óptimas. Además, se visualiza tanto en la TABLA XVIII como en la Fig.12, que a medida que se incrementa la importancia al objetivo Vulnerabilidad su valor aumenta, sin embargo, esto afecta negativamente al Costo, dado que ambos objetivos están en conflicto, es decir, a mayor vulnerabilidad atendida la distancia recorrida aumentara. Para determinar la importancia de los objetivos, se realizó una revisión en artículos sobre la decisión de las alternativas en un problema multicriterio. Se revisó en modelos de ayuda humanitaria la importancia de los diferentes criterios para establecer alguna alternativa de pesos. En estos artículos, los criterios económicos presentaban un menor peso con respecto a los criterios de distribución y salud de las personas [47][48], por lo que se dispuso a seleccionar una alternativa entre los pesos w7, w8 y w9. Por medio de la metodología AHP se analizó las anteriores alternativas de pesos para determinar la más conveniente (Anexo 13). Por lo tanto, se seleccionó la alternativa que corresponde al peso w9.

TABLA XVIII
PESOS Y VALORES DE LOS DIFERENTES OBJETIVOS DE 11BERLIN52_COVID.

Pesos	W(Costo)	W(Vulnerabilidad)	Z1-Costo-Distancia	Z2-Vulnerabilidad
w1	1	0	4089	30
w2	0,9	0,1	4171	39
w3	0,8	0,2	5288	56
w4	0,7	0,3	5411	57
w5	0,6	0,4	5411	57
w6	0,5	0,5	5709	58
w7	0,4	0,6	5709	58
w8	0,3	0,7	5709	58
w9	**0,2**	**0,8**	5709	58
w10	0,1	0,9	5709	58
w11	0	1	11848	58

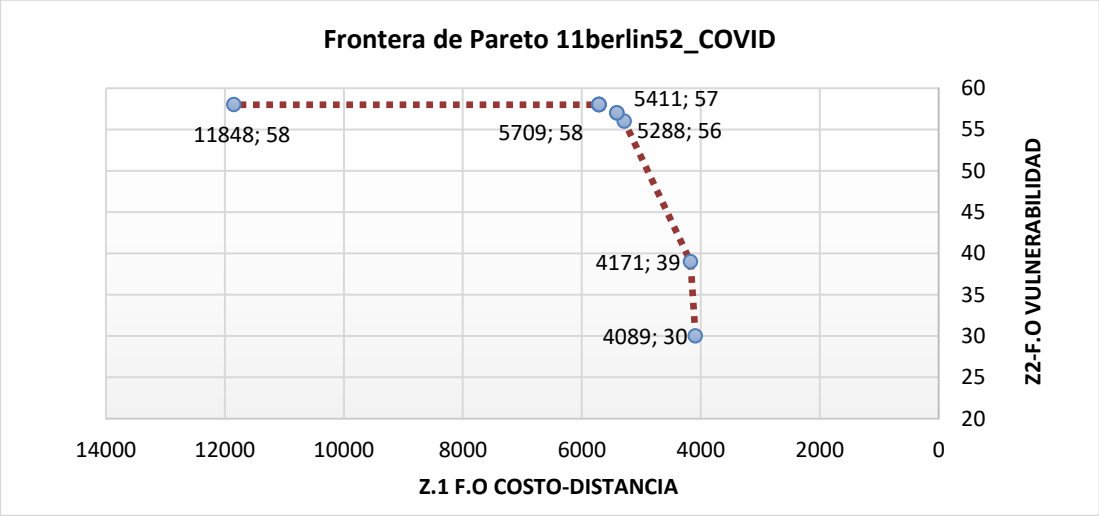


Fig.12.Frontera de Pareto de 11berlin52_COVID.

VI. VERIFICAR

A. Medición de los impactos y Resultados.

La medición de los impactos se realizó con respecto a los indicadores definidos en la etapa Medir y mediante la aplicación del modelo propuesto. El propósito de este modelo es encontrar una reducción en la distancia total recorrida y aumentar el beneficio obtenido al cubrir los mayores niveles de vulnerabilidad, cumpliendo así con las metas propuestas.

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos usando los métodos Actual y Propuesto, se implementó un programa en C++ y, como solucionador del MIP, se utilizó CPLEX 12.10.0. Con base en lo anterior, se calculó las dos funciones objetivo, el tiempo computacional, la diferencia porcentual entre los dos métodos y el denominado *Gap*. Este último es un indicador que representa la desviación porcentual de una solución entera respecto a la mejor cota encontrada (generalmente lineal). Las pruebas se realizaron en un equipo con un procesador AMD Ryzen 5 -3500U CPU @ 2,1 GHz, con una memoria RAM de

8,00 Gb. Se estableció un tiempo límite de ejecución de 15 minutos para las instancias inferiores a 490 nodos y para las superiores a estas, se determinó 60 minutos como tiempo límite. Los resultados de las instancias se presentan en la TABLA XIX. La columna MD corresponde al número de mercados disponibles, Dist representa la distancia total recorrida por la ruta en metros, Vulne reporta el beneficio acumulado, Tiempo registra la duración del tiempo computacional en segundos y si este alcanza el límite de tiempo establecido se denota como LT, Gap corresponde a la diferencia porcentual entre la mejor solución entera y el valor óptimo de la relajación, ΔD (%) reporta la reducción de la distancia, ΔV (%) registra el aumento del beneficio acumulado.

Como se observa en la TABLA XIX, 49 de las 88 instancias llegaron al límite computacional, es decir, no se resuelven de manera óptima en todos los casos, dado que alcanza el límite de tiempo estipulado. Sin embargo, todas las instancias inferiores a 490 nodos tienen un Gap inferior al 1%, lo que indica que están cercanos al mejor resultado de la ramificación dada por el método de Branch & Bound. Con el método propuesto se obtuvo una reducción frente a la distancia recorrida entre 7,84% y 99,46%, en otras palabras, se cumple con la meta (reducir un 5% el costo) para todas las instancias menores a 490 nodos. Respecto al indicador de vulnerabilidad, en promedio se obtuvo una mejora del 9,26%, por lo que se aproxima a la meta de incrementar un 10% el beneficio acumulado. Por otro lado, en las demás instancias, las cuales se encuentran sombreadas de color naranja, no fue posible alcanzar la meta, dado que la disponibilidad de mercados afecta directamente el beneficio acumulado, en vista que un mayor número de ayudas significaría una menor cantidad de familias sin abastecer. Por consiguiente, se tendrá un menor porcentaje de mejora, esto se debe a que el indicador al tener un valor relativamente grande se necesitará nodos adicionales a los actuales para satisfacer un 10% de mejora. Un ejemplo de lo anterior es la instancia "10gr48_COVID", el cual obtuvo un beneficio actual acumulado de 129, por lo tanto, para obtener una mejora del 10% se debe alcanzar un beneficio de 143, sin embargo, si se visitan todos los nodos de esta instancia solo se alcanzarán 141 puntos, por ende, no es posible cumplir con la meta propuesta. Por otra parte, la mayoría de las instancias superiores a 490 nodos no obtuvieron una solución factible luego de 60 minutos, debido a que al ser un problema NP-Hard, el espacio de búsqueda y el tiempo de resolución aumentan de forma exponencial, cuando la cantidad de nodos incrementa. Con base en esto, se analizó los resultados con los casos de prueba donde se obtiene una solución factible en ambos métodos.

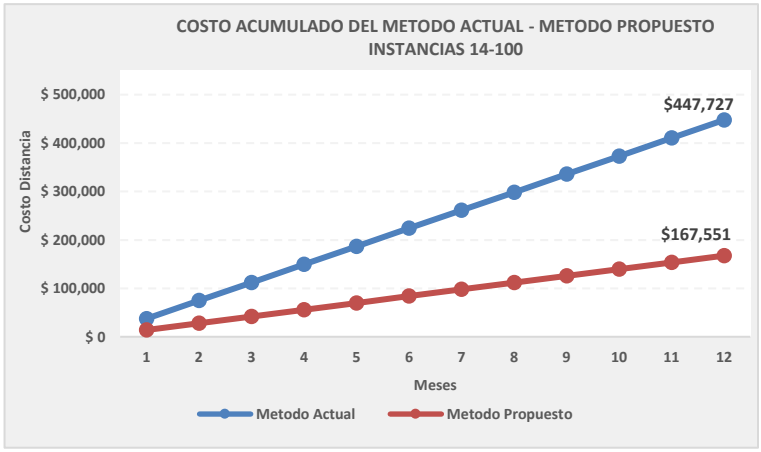
TABLA XIX
RESULTADOS OBTENIDOS POR MÉTODO ACTUAL Y PROPUESTO.

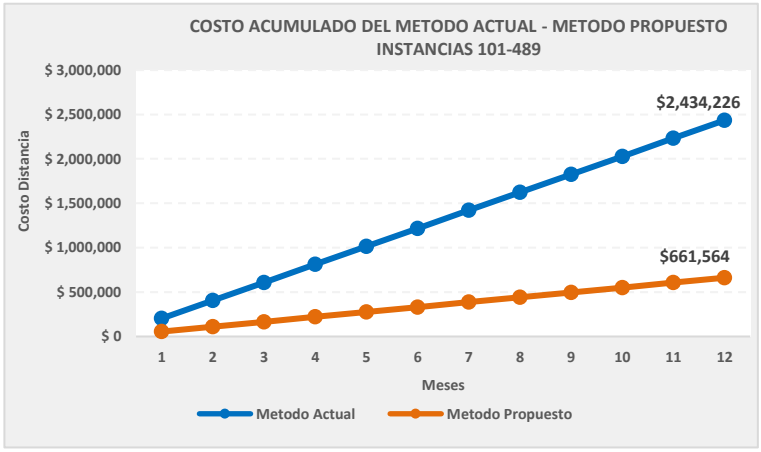
Instancia	MD	Solución Actual		Solución Propuesta					
		Dist	Vulne	Dist	Vulne	Tiempo	Gap	ΔD (%)	ΔV (%)
3burma14_COVID	13	3499	30	2324	30	0,2	0,006%	33,58%	0,00%
4br17_COVID	14	83	31	39	33	0,37	0,000%	53,01%	6,45%
4gr17_COVID	7	2466	23	1675	23	0,17	0,000%	32,08%	0,00%
4ulysses16_COVID	12	6751	19	5075	19	0,46	0,008%	24,83%	0,00%
5gr21_COVID	17	2436	34	2245	38	0,12	0,000%	7,84%	11,76%
5gr24_COVID	27	2143	58	1091	61	0,15	0,000%	49,09%	5,17%
5ulysses22_COVID	36	13141	49	6899	49	58,06	0,010%	47,50%	0,00%
6bayg29_COVID	34	2220	67	1382	68	0,56	0,009%	37,75%	1,49%
6bays29_COVID	25	3158	51	1579	54	0,26	0,004%	50,00%	5,88%
6fri26_COVID	28	924	44	784	52	0,37	0,003%	15,15%	18,18%
7ftv33_COVID	9	1338	27	751	31	0,09	0,000%	43,87%	14,81%
8ftv36_COVID	32	2320	81	1133	83	0,35	0,000%	51,16%	2,47%
8ftv38_COVID	65	3379	110	1473	110	1,95	0,009%	56,41%	0,00%
9dantzig42_COVID	43	1335	93	617	96	701,34	0,010%	53,78%	3,23%
10att48_COVID	77	29902	145	9126	146	9,54	0,010%	69,48%	0,69%
10gr48_COVID	71	11443	129	4113	129	2,28	0,010%	64,06%	0,00%
10hk48_COVID	45	22158	95	8699	96	7,47	0,010%	60,74%	1,05%
11berlin52_COVID	27	11096	50	5709	58	0,47	0,000%	48,55%	16,00%

11eil51_COVID	92	1045	142	401	144	9,37	0,009%	61,63%	1,41%
12brazil58_COVID	65	56273	141	21810	148	72,05	0,010%	61,24%	4,96%
14st70_COVID	89	1902	174	546	181	103,67	0,010%	71,29%	4,02%
16eil76_COVID	23	445	55	280	70	1,2	0,008%	37,08%	27,27%
16pr76_COVID	31	124931	64	77778	83	199,95	0,010%	37,74%	29,69%
20gr96_COVID	122	145302	249	45959	254	59,06	0,010%	68,37%	2,01%
20kroA100_COVID	83	50651	186	16185	204	36,37	0,010%	68,05%	9,68%
20kroB100_COVID	66	43889	153	15087	172	72,12	0,010%	65,62%	12,42%
20kroC100_COVID	184	127401	306	21398	308	LT	0,110%	83,20%	0,65%
20kroD100_COVID	50	31294	112	14274	141	27,92	0,010%	54,39%	25,89%
20kroE100_COVID	40	34321	91	13056	108	1,4	0,002%	61,96%	18,68%
20rat99_COVID	129	2555	229	1004	241	LT	0,077%	60,70%	5,24%
20rd100_COVID	177	35419	293	7615	294	LT	0,038%	78,50%	0,34%
21eil101_COVID	144	1708	279	529	286	831,35	0,008%	69,03%	2,51%
21lin105_COVID	203	59948	320	17290	320	LT	0,280%	71,16%	0,00%
22pr107_COVID	30	72077	94	30885	116	LT	0,390%	57,15%	23,40%
24gr120_COVID	233	36375	357	6711	357	LT	0,010%	81,55%	0,00%
25pr124_COVID	119	152618	244	51169	262	LT	0,220%	66,47%	7,38%
26bier127_COVID	167	311302	327	105557	337	LT	0,059%	66,09%	3,06%
26ch130_COVID	195	29657	354	5868	357	LT	0,120%	80,21%	0,85%
28gr137_COVID	122	133165	268	54558	290	LT	0,054%	59,03%	8,21%
28pr136_COVID	84	184862	206	68609	238	LT	0,110%	62,89%	15,53%
29pr144_COVID	280	329597	420	71532	423	LT	0,500%	78,30%	0,71%
30ch150_COVID	208	25399	356	6275	365	LT	0,310%	75,29%	2,53%
30kroA150_COVID	262	150716	407	28079	411	LT	0,220%	81,37%	0,98%
30kroB150_COVID	115	79724	267	20195	293	859,28	0,010%	74,67%	9,74%
31pr152_COVID	107	193689	215	68752	243	LT	0,510%	64,50%	13,02%
32u159_COVID	190	92123	385	38542	398	LT	0,110%	58,16%	3,38%
35si175_COVID	63	9532	148	7668	181	63,47	0,010%	19,56%	22,30%
36brg180_COVID	101	327820	220	1780	271	23,44	0,004%	99,46%	23,18%
39rat195_COVID	79	3320	174	1186	230	28,98	0,009%	64,28%	32,18%
40d198_COVID	103	25016	236	13302	282	LT	0,220%	46,83%	19,49%
40kroa200_COVID	305	173234	551	36521	566	LT	0,420%	78,92%	2,72%
40krob200_COVID	85	74880	215	18325	281	674,07	0,010%	75,53%	30,70%
41gr202_COVID	82	53153	195	28128	248	518,64	0,010%	47,08%	27,18%
45ts225_COVID	396	656530	627	138996	639	LT	0,180%	78,83%	1,91%
45tsp225_COVID	357	14398	622	4249	628	LT	0,190%	70,49%	0,96%
46gr229_COVID	324	364047	605	150521	616	LT	0,230%	58,65%	1,82%
46pr226_COVID	77	253849	184	67324	239	LT	0,071%	73,48%	29,89%
53gil262_COVID	204	7713	444	2027	504	LT	0,180%	73,72%	13,51%
53pr264_COVID	378	180514	668	60835	689	LT	0,290%	66,30%	3,14%
56a280_COVID	82	3908	211	1573	280	LT	0,086%	59,75%	32,70%

60pr299_COVID	603	235943	892	69396	897	LT	0,300%	70,59%	0,56%
64lin318_COVID	334	102495	650	54146	688	LT	0,610%	47,17%	5,85%
65rbg323_COVID	566	5306	964	1129	972	136,94	0,000%	78,72%	0,83%
72rbg358_COVID	183	1997	378	739	459	42,44	0,000%	62,99%	21,43%
80rd400_COVID	340	62303	748	15597	816	LT	0,440%	74,97%	9,09%
81rbg403_COVID	508	4934	929	2009	960	225,66	0,000%	59,28%	3,34%
84fl417_COVID	300	52079	646	18831	754	LT	0,440%	63,84%	16,72%
87gr431_COVID	629	437753	1113	-	-	LT	-	-	-
88pr439_COVID	215	290107	513	108086	617	LT	0,410%	62,74%	20,27%
89pcb442_COVID	561	240369	1136	62854	1165	LT	0,340%	73,85%	2,55%
89rbg443_COVID	433	4235	886	1301	930	313,12	0,000%	69,28%	4,97%
99d493_COVID	749	110111	1362	110218	1209	LT	11,400%	-0,10%	-11,23%
107ali535_COVID	369	980131	796	259947	922	LT	0,610%	73,48%	15,83%
107att532_COVID	760	172330	1404	-	-	LT	-	-	-
107si535_COVID	734	62674	1406	40706	1445	LT	0,540%	35,05%	2,77%
113pa561_COVID	1096	9750	1646	3989	1650	LT	0,440%	59,09%	0,24%
115rat575_COVID	889	27818	1551	61756	995	LT	42,000%	-122,00%	-35,85%
115u574_COVID	325	52123	716	38101	870	LT	0,400%	26,90%	21,51%
131p654_COVID	594	169776	1201	-	-	LT	-	-	-
132d657_COVID	1157	252795	1820	265726	608	LT	78,000%	-5,12%	-66,59%
134gr666_COVID	317	524826	657	-	-	LT	-	-	-
145u724_COVID	784	135429	1669	-	-	LT	-	-	-
157rat783_COVID	802	32419	1654	-	-	LT	-	-	-
200dsj1000_COVID	575	1,18E+08	1339	-	-	LT	-	-	-
201pr1002_COVID	378	449534	881	-	-	LT	-	-	-
207si1032_COVID	1142	101190	2364	-	-	LT	-	-	-
212u1060_COVID	649	361504	1481	-	-	LT	-	-	-
217vm1084_COVID	1569	3,00E+06	2845	-	-	LT	-	-	-

Para el análisis del costo asociado a la distancia en la entrega mensual de mercados durante un año, es necesario agrupar las instancias en tres diferentes grupos debido a la variabilidad del número de nodos. El primer grupo corresponde a instancias inferiores a 100 nodos, el segundo entre 100 y 490 nodos y el tercero mayor a 490. Solo se toman las instancias donde se obtiene un resultado factible en ambos métodos para realizar una comparación. Se realizó la Fig. 13 para analizar los costos asociado a la distancia recorrida dentro de un periodo de un año, en esta se detalla los costos promedio obtenidos mediante el método actual y propuesto para los tres grupos, dado que se tienen casos con diferentes cantidades de nodos. Los costos acumulados se obtuvieron a través del costo mensual promedio de cada grupo durante un año. Al observar la Fig. 13, se determina que el modelo propuesto en todos los grupos obtiene menores costos; en instancias menores a 100 nodos se redujo $280.176 los costos que equivalen a una disminución del 62,58%, asimismo, por medio del modelo matemático el costo promedio de la ruta bajó en un 72,82% y 47,81% para el grupo 2 y 3 respectivamente. Con respecto al grupo 3, la reducción del costo no supera el 50% como los demás, debido a la dificultad en encontrar una solución eficiente por la cantidad de nodos, un ejemplo de esto es la instancia 115rat575_COVID, la cual obtuvo un aumento en costos del 122%.





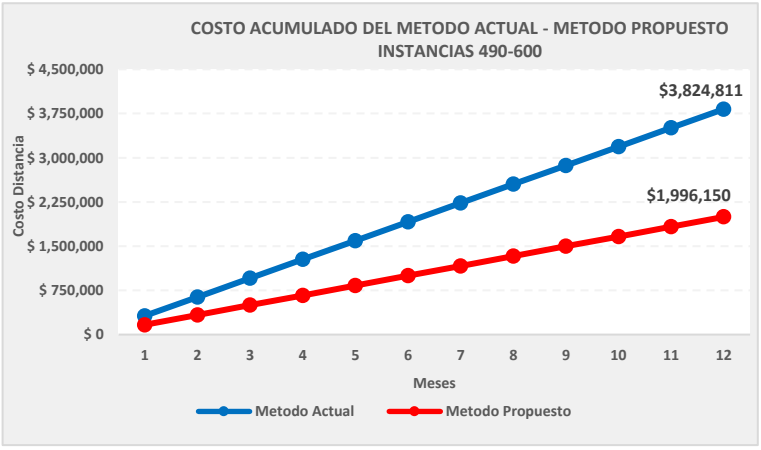


Fig. 13. Costo de las instancias con el método actual y propuesto.

Se realizó la Fig. 14 para analizar el resultado del modelo matemático gráficamente, donde se muestra la ruta de la instancia 11berlin52_COVID. Esta figura se compone por nodos de distinto color, el nodo amarillo representa el almacén y los demás hacen alusión a los clústeres. Se observa en la gráfica la mejora de la ruta con respecto a la situación actual, esto se debe a que presenta una disminución de la distancia recorrida de más de 5300 metros, es decir se redujo en un 48,5% el indicador de costo, además, ya no presentan cruces entre arcos como ocurría en el método actual, lo que indica una solución más eficiente. Asimismo, el beneficio obtenido pasó de 50 a 58 niveles de vulnerabilidad, un aumento del 16% en el indicador, por consiguiente, se incrementó el número de familias atendidas, donde previamente se visitaban 13 y con el método propuesto, 18 familias, así logrando una mayor cobertura a las familias vulnerables.

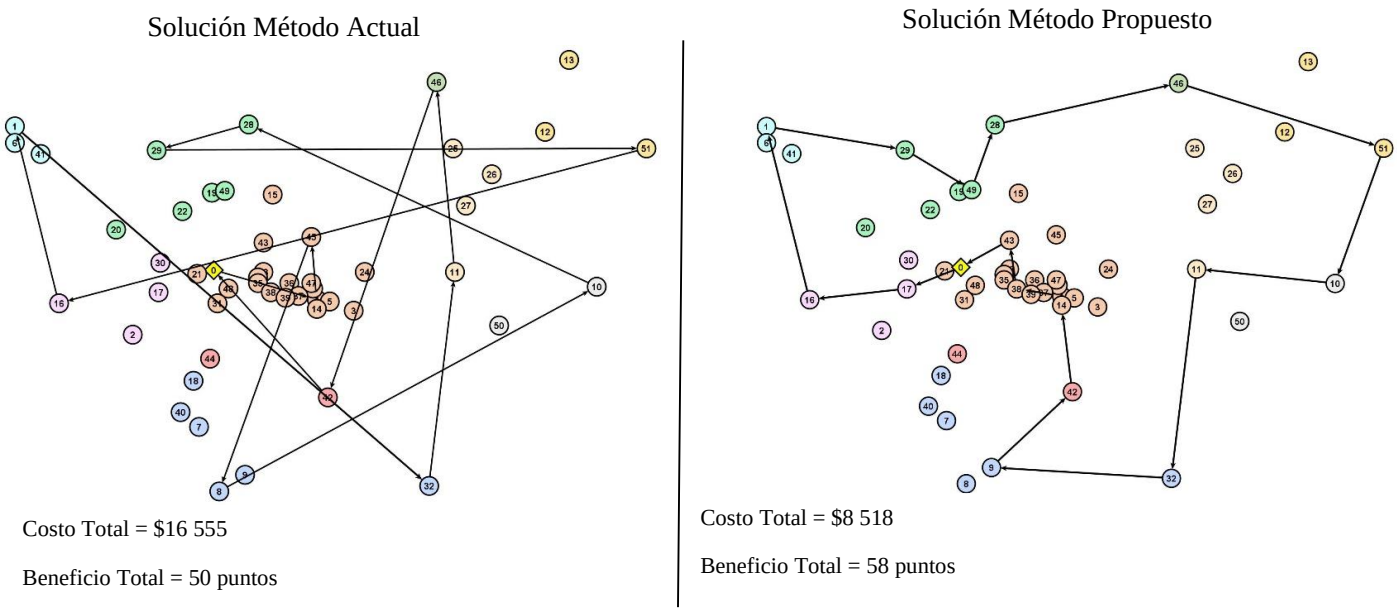


Fig. 14. Método Actual y Método Propuesto en la instancia 11berlin52_COVID.

Para analizar la mejora en la variable de beneficio acumulado, se realizó la Fig. 15, que corresponde al resumen de la diferencia del número de familias atendidas entre el método actual y propuesto. Este gráfico, está compuesto por el eje X, que representa dicha diferencia entre el número de familias atendidas en los métodos mencionados, mientras que el eje Y muestra el número de instancias que están dentro de cierto rango de mejora (<0,1-5, 6-10, 11-20, 20-50 y >50), y el eje secundario representa el porcentaje del número total de instancias. Las instancias que presentaron una desmejora usando el modelo matemático fueron 3, estos casos contienen más de 500 nodos, por lo que el Gap obtenido fue mayor al 10%, esto quiere decir que no fueron soluciones eficientes, debido a que la solución estaba sujeta al tiempo límite. Por otra parte, el 88% de las instancias usadas obtuvieron una mejora respecto al número de familias visitadas, además, más de la mitad logro un incremento entre 1 y 10 familias abastecidas.

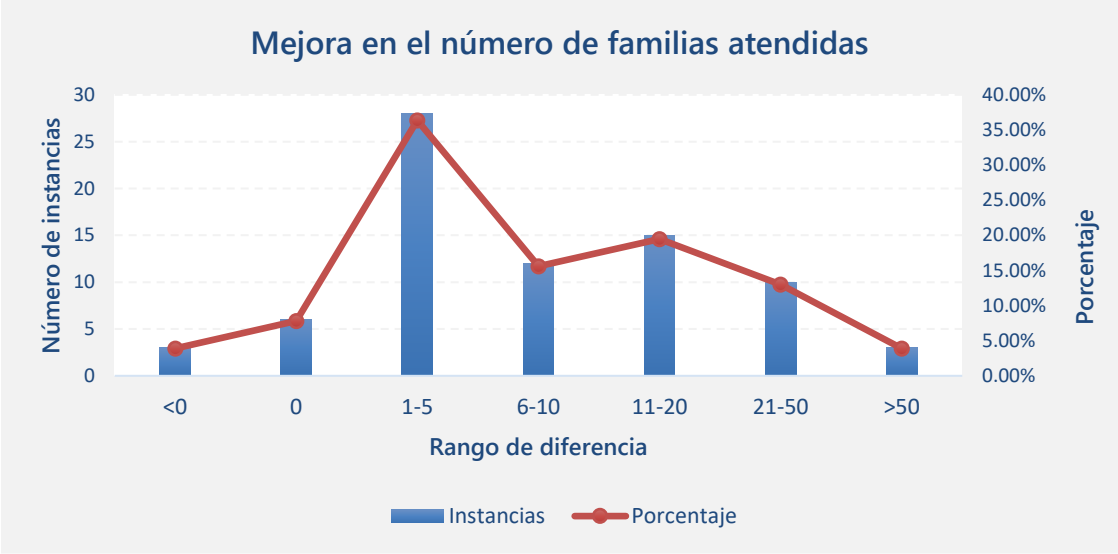


Fig. 15. Mejora en la cantidad de familias atendidas.

B. Estandarización de la solución

Durante la realización de este proyecto fueron notables los pasos para la generación de rutas en un contexto humanitario; por esto, como herramienta de estandarización de este método aplicado, se desarrolló el manual *"Manual para Generación de Rutas de Asignación de Ayudas Humanitarias Maximizando el Beneficio de las Familias Atendidas y Minimizando la Distancia de Ruta"* con sus respectivos pasos, requisitos y recomendaciones (Anexo 16), donde se consideran también, unas acciones anteriores que deben ser realizadas y dos anexos adicionales que deben ser utilizados (Anexo 14 y Anexo 15), para una aplicación satisfactoria. El objetivo de este manual es que el lector u otra organización pueda poner en práctica este modelo de ruteo.

C. Conclusiones

A partir de una revisión de literatura y la investigación que se aplicó a lo largo de todo el proyecto, se logró abordar satisfactoriamente el caso particular de ruteo denominado Problema del Agente Viajero Generalizado (GTSP, por sus siglas en inglés), a través de un modelo MIP, considerando una función de múltiples objetivos, mediante el método de suma de pesos ponderados. Para la validación de la funcionalidad y la eficacia de este modelo, se tuvieron unos casos de prueba que variaban la dificultad computacional. Las rutas generadas por este modelo propuesto presentaron una mejora con respecto al método de generación de rutas de la situación actual.

Desde el contexto de un estado de emergencia sanitaria o natural y considerando la logística humanitaria como metodología o herramienta para la atención de estos desastres. La caracterización del sistema resultó ser desafiante, puesto que, en Colombia, no se cuenta con el registro o información que detalle el método de asignación de ayudas humanitarias en situaciones de emergencias. Por consiguiente, fue imperativo generar un método de ruteo y asignación de mercados acorde con reglas lógicas de asignación y a través de la priorización de las familias con mayor índice de vulnerabilidad y demanda. Este método de asignación fue evaluado y validado a través de casos de prueba sencillos y difíciles computacionalmente. Por lo tanto, la implementación de un método eficiente de ruteo y asignación de recursos es necesariamente obligatoria.

Al basarnos en un problema GTSP se tuvo en cuenta una metodología de programación MIP, el método de acotación de ramas de Branch and Bound y restricciones de eliminación de subtours MTZ, que permiten la asignación de rutas viables de acuerdo con las restricciones de mercados, demanda y vulnerabilidad de las familias; así, como también la función de múltiples objetivos. Con base en esto, se obtuvieron unas mejoras significativas en los indicadores, ya que se redujo el costo promedio con el método propuesto en un 60,44%; de igual manera el indicador de beneficio aumento en 9,26%, debido a que el nuevo método de ruteo priorizaba más a las familias que tenían el nivel de vulnerabilidad más alto con respecto al anterior método de ruteo. Sin embargo, el modelo no tiene la capacidad de dar soluciones factibles cuando se sobrepasan los 500 nodos, por lo cual no es posible su implementación en grandes ciudades.

Para evaluar la viabilidad del proyecto, se realizaron dos análisis, uno económico y otro sobre la capacidad de abastecimiento para las familias. Mediante el análisis económico de los tres grupos de instancias, se obtuvo una mejora superior al 40%, por lo que reduce significativamente el costo asociado a la distancia recorrida. En cuanto al número de familias atendidas en el modelo propuesto, se evidenció un incremento en 88% de las instancias, por ende, es posible mejorar mediante este modelo la distancia recorrida y, al mismo tiempo, el número de familias abastecidas. Por lo tanto, el modelo es viable para implementarse en las organizaciones humanitarias que requieran de la generación de rutas para entrega de ayudas.

D. Recomendaciones

- Se recomienda implementar para futuras investigaciones aplicadas al problema GTSP, una heurística o metaheurística con el fin de abarcar o considerar mayor número de nodos y clústeres debido a que el modelo desarrollado en este documento no muestra resultados para casos de más de 500 nodos.

- La utilización de un algoritmo de búsqueda local, tal como k-opt para obtener una mejora en la distancia recorrida para las instancias que no alcanzan el óptimo.

- En la implementación del modelo propuesto es imperativo utilizar un ordenador con especificaciones de alto nivel, una elevada capacidad de procesamiento y una memoria RAM de mayor tamaño. De esta manera, obtendrán resultados en tiempos computacionales más cortos.

- Pese a tener un manual para la implementación del modelo propuesto para este proyecto se recomienda desarrollar un programa, plataforma u aplicación con el fin de eliminar las confusiones que se puedan dar a la hora de aplicar la alternativa propuesta.

VII. GLOSARIO

Gap: representa la diferencia entre el valor de la función del modelo lineal relajado y el valor de la función del modelo entero [49].

Heurística: procedimiento enfocado a encontrar una buena solución, no necesariamente óptima, para un problema específico[50].

Línea de pobreza (LP): valor del ingreso mensual per cápita mínimo para cubrir el costo de la canasta básica de alimentos[51].

Logística humanitaria: se define como aquellas actividades que son desarrolladas para suministrar recursos de ayuda rápidamente a las personas afectadas por los desastres[52].

Metaheurística: metodología general de solución de problemas que brinda tanto un método heurístico, como también criterios estratégicos para su desarrollo, con el fin de que se ajuste a un problema determinado[50].

Nadir: representa el valor anti-ideal de la función objetivo, proporciona los límites superiores del conjunto óptimo de Pareto [43], [44].

Pobreza monetaria: cuando el ingreso mensual per cápita de un hogar es inferior a la línea de pobreza monetaria[51].

Subtour: ciclo dirigido que no está conectado a una ruta [53].

Upper Bound: Es el valor de la función objetivo al realizar la relajación del modelo entero [50].

Utopia: representa el valor ideal de una función objetivo, proporciona los límites inferiores del conjunto óptimo de Pareto[43], [44].

VIII. REFERENCIAS

[1] EMDAT, “The international disasters database,” 2020. https://www.emdat.be/data.

[2] F. Barzinpour and V. Esmaeili, “A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 70, no. 5–8, pp. 1291–1302, 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5379-x.

[3] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Coronavirus (CoV) GLOBAL,” 2020, [Online]. Available: https://www.who.int/es/health-topics/coronavirus.

[4] BBC, “Coronavirus: el mapa que muestra el número de infectados y muertos en el mundo por covid-19.” https://www.bbc.com/mundo/noticias-51705060.

[5] Organización Mundial de la Salud (OMS), “WHO COVID-19 Situation Reports,” 2020. https://github.com/CSSEGISandData/COVID-19/tree/master/who_covid_19_situation_reports.

[6] Semana, “¿Habrá cama para tanta gente?,” 2020. https://www.semana.com/nacion/articulo/coronavirus-en-colombia-hay-cama-para-tanta-gente/658306/.

[7] DANE, “Defunciones por COVID-19(23 de agosto),” 2020. [Online]. Available: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/defunciones-covid19/presentacion-defunciones-covid-2020-02mar-23ago.pdf.

[8] A. Álvarez, D. León, M. Medellín, A. Zambrano, and H. Zuleta, “El coronavirus en Colombia: vulnerabilidad y opciones de política,” *Programa las Nac. Unidas para el Desarro. #COVID19 | Ser. Doc. Política Pública*, no. 11, pp. 1–36, 2020, [Online]. Available: https://www.latinamerica.undp.org/content/rblac/es/home/library/crisis_prevention_and_recovery/el-coronavirus-en-colombia--vulnerabilidad-y-opciones-de-politic.html.

[9] DANE, “Gran Encuesta Integradora de Hogares (GEIH)- Mercado Laboral-Julio 2020,” 2020. [Online]. Available: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/empleo-y-desempleo/geih-historicos.

[10] Gobierno de Colombia, “Ayuda Social,” 2020, [Online]. Available: https://coronaviruscolombia.gov.co/Covid19/estadisticas-covid-19/ayuda-social.html.

[11] L. Delgado, “Análisis de los programas sociales en Colombia: evidencia de encuestas a hogares,” 2017.

[12] B. Vitoriano, M. T. Ortuño, G. Tirado, and J. Montero, “A multi-criteria optimization model for humanitarian aid distribution,” *J. Glob. Optim.*, vol. 51, no. 2, pp. 189–208, 2011, doi: 10.1007/s10898-010-9603-z.

[13] M. Hamedi, A. Haghani, and S. Yang, “Reliable Transportation of Humanitarian Supplies in Disaster Response: Model and Heuristic,” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 54, pp. 1205–1219, 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.835.

[14] A. G. Qureshi and E. Taniguchi, “A multi-period humanitarian logistics model considering limited resources and network availability,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 46, no. 2019, pp. 212–219, 2020, doi: 10.1016/j.trpro.2020.03.183.

[15] DANE, “ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR MANZANA,” 2020. [Online]. Available: https://geoportal.dane.gov.co/visor-vulnerabilidad/.

[16] E. Álvarez-Miranda, M. Luipersbeck, and M. Sinnl, “Gotta (efficiently) catch them all: Pokémon GO meets Orienteering Problems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 265, no. 2, pp. 779–794, 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.08.012.

[17] G. Laporte, H. Mercure, and Y. Nobert, “Generalized travelling salesman problem through n sets of nodes: the asymmetrical case,” *Discret. Appl. Math.*, vol. 18, no. 2, pp. 185–197, 1987, doi: 10.1016/0166-218X(87)90020-5.

[18] P. C. Pop, O. Matei, and C. Sabo, “A new approach for solving the generalized traveling salesman problem,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 6373 LNCS, no. September 2015, pp. 62–72, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-16054-7_5.

[19] J. Holguín-Veras, M. Jaller, and T. Wachtendorf, “Comparative performance of alternative humanitarian logistic structures after the Port-au-Prince earthquake: ACEs, PIEs, and CANs,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 46, no. 10, pp. 1623–1640, 2012, doi: 10.1016/j.tra.2012.08.002.

[20] E. Ander-Egg, *Diccionario del Trabajo Social*, 25th ed. Instituto Ciencias Sociales Aplicadas, 2011.

[21] E. Angelelli, C. Archetti, and M. Vindigni, “The Clustered Orienteering Problem,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 238, no. 2, pp. 404–414, 2014, doi: 10.1016/j.ejor.2014.04.006.

[22] R. L. Rardin and R. Uzsoy, “Experimental evaluation of heuristic optimization algorithms: A tutorial,” *J. Heuristics*, vol. 7, no. 3, pp. 261–304, 2001, doi: 10.1023/A:1011319115230.

[23] P. Praneetpholkrang, V. N. Huynh, and S. Kanjanawattana, “A multi-objective optimization model for shelter location-allocation in response to humanitarian relief logistics,” *Curr. Opin. Psychol.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.ajsl.2021.01.003.

[24] H. Kim, B. I. Kim, and D. jin Noh, “The multi-profit orienteering problem,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 149, p. 106808, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106808.
[25] A. Cerdeira-Pena, L. Carpente, and C. Amiama, “Optimised forage harvester routes as solutions to a traveling salesman problem with clusters and time windows,” *Biosyst. Eng.*, vol. 164, pp. 110–123, 2017, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.10.002.
[26] J. Á. Gómez-Pantoja, M. A. Salazar-Aguilar, and J. L. González-Velarde, “The food bank resource allocation problem,” *Top*, no. 0123456789, 2020, doi: 10.1007/s11750-020-00581-y.
[27] F. Sabouhi, M. Heydari, and A. Bozorgi-Amiri, “Multi-objective routing and scheduling for relief distribution with split delivery in post-disaster response,” *J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 17–27, 2016.
[28] UNGRD, *Estandarización de Ayuda Humanitaria de Colombia*. 2013.
[29] G. Gutin and D. Karapetyan, “A memetic algorithm for the generalized traveling salesman problem,” *Nat. Comput.*, vol. 9, no. 1, pp. 47–60, 2010, doi: 10.1007/s11047-009-9111-6.
[30] G. Reinelt, “TSPLIB--A Traveling Salesman Problem Library,” *INFORMS J. Comput.*, vol. 3, no. 4, pp. 376–384, 1991, doi: doi.org/10.1287/ijoc.3.4.376.
[31] Instituto Nacional de Vias (INVIAS), “Costos de operacón vehicular,” 2016. https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/6608-costos-de-operacion-vehicular.
[32] H. Labordere, “The record balancing problem: A dynamic programming solution of a generalized travelling salesman problem,” pp. 43–49, 1969.
[33] J. Van Pinxten, M. Geilen, T. Basten, U. Waqas, and L. Somers, “Online heuristic for the Multi-Objective Generalized traveling salesman problem,” *Proc. 2016 Des. Autom. Test Eur. Conf. Exhib. DATE 2016*, no. project 12693, pp. 822–825, 2016, doi: 10.3850/9783981537079_0953.
[34] B. Hu and G. R. Raidl, “Effective neighborhood structures for the generalized traveling salesman problem,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 4972 LNCS, pp. 36–47, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-78604-7_4.
[35] C. M. Pintea, P. C. Pop, and C. Chira, “The generalized traveling salesman problem solved with ant algorithms,” *Complex Adapt. Syst. Model.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1186/s40294-017-0048-9.
[36] J. A. PACHECO, “PROBLEMAS DE RUTAS CON VENTANAS DE TIEMPO.”
[37] R. S. de Moraes and E. P. de Freitas, “Experimental analysis of heuristic solutions for the moving target traveling salesman problem applied to a moving targets monitoring system,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 136, pp. 392–409, 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2019.04.023.
[38] M. S. Farham, H. Süral, and C. Iyigun, “Generalization of the restricted planar location problems: Unified metaheuristic algorithms,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 99, pp. 48–66, 2018, doi: 10.1016/j.cor.2018.04.022.
[39] G. María D, M.-O. Julio, and L.-C. Oscar, “Análisis computacional de los problemas del vendedor viajero y patrones de corte,” *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 16, no. 1, pp. 59–70, 2015, doi: 10.1016/s1405-7743(15)72107-4.
[40] R. Smith, G. Poveda, O. J. Mesa, D. Valencia, L. Dyner, and P. Jaramillo, *Decisiones con multiples objetivos e incertidumbre*. 2000.
[41] E. K. Burke and K. Graham, *Search Methodologies*. Boston, MA: Springer US, 2014.
[42] M. Elarbi, S. Bechikh, L. Ben Said, and R. Datta, “Multi-objective optimization: Classical and evolutionary approaches,” *Adapt. Learn. Optim.*, vol. 20, pp. 1–30, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-42978-6_1.
[43] Z. Yahia and A. Pradhan, “Multi-objective optimization of household appliance scheduling problem considering consumer preference and peak load reduction,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 55, no. 1410, p. 102058, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102058.
[44] O. Grodzevich and O. Romanko, “Normalization and Other Topics in Multi-Objective Optimization,” *Proc. fields-MITACS Ind. Probl. Work.*, pp. 89–101, 2006, [Online]. Available: https://www.academia.edu/11635242/Normalization_and_other_topics_in_multi_objective_optimization.
[45] H. Paul, “A survey of different integer programming formulations of the travelling salesman problem . A Survey of Different Integer Programming,” *Work. Pap.*, vol. 25, pp. 104–118, 2004, [Online]. Available: https://www.jstor.org/stable/43998959.
[46] I. Castellano, “ANÁLISIS DE LAS ESTRATEGIAS ANTIBUCLES DE MILLER-TUCKER-ZEMLIN Y DESROCHERS-LAPORTE PARA EL PROBLEMA DE STEINER EN GRAFOS,” empresas Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, 2017.
[47] M. M. L. Nappi, V. Nappi, and J. C. Souza, “Multi-criteria decision model for the selection and location of temporary shelters in disaster management,” *J. Int. Humanit. Action*, vol. 4, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s41018-019-0061-z.
[48] H. L. Tay and W. L. Chew, “Humanitarian Logistics : Addressing Challenges and Improving Relief Operations,” pp. 1–22, 2018.

[49] T. Ajayi, C. Thomas, and A. Schaefer, “The Gap Function : Evaluating Integer Programming Models over Multiple Right-hand Sides,” *Oper. Res. (To Appear.*, pp. 1–45, 2020, [Online]. Available: http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2018/10/6893.pdf.
[50] F. Hilier and G. Lieberman, *INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES*, 9a Edición. Ciudad de México: Mac Graw Hill, 2010.
[51] DANE, “Pobreza Monetaria Colombia,” 2018. [Online]. Available: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/condiciones_vida/pobreza/2018/bt_pobreza_monetaria_18.pdf.
[52] B. Balcik, B. M. Beamon, and K. Smilowitz, “Last mile distribution in humanitarian relief,” *J. Intell. Transp. Syst. Technol. Planning, Oper.*, vol. 12, no. 2, pp. 51–63, 2008, doi: 10.1080/15472450802023329.
[53] G. Pataki, “Teaching Integer Programming Formulations Using the Traveling Salesman Problem,” *SIAM Rev.*, vol. 45, no. 1, pp. 116–123, 2003.

IX. ANEXOS

TABLA XX
TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo
1	Anexo 1- Distribución de las defunciones por COVID-19 total, según estrato socioeconómico -PD1-2020207.	DANE.	Excel.
2	Anexo 2-Plan para recolección de datos-PD1-2020207	Propio.	Excel.
3	Anexo 3- Especificaciones de empaque y almacenamiento de productos - PD1-2020207.	Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).	PDF.
4	Anexo 4-CrearDatos- PD1-2020207	Propio.	PDF.
5	Anexo 5-SoluciónActual - PD1-2020207.	Propio.	PDF.
6	Anexo 6-Instancia 3burma14- PD1-2020207	GTSP librería.	txt.
7	Anexo 7-Instancia 3burma14 modificada - PD1-2020207.	Propio.	txt.
8	Anexo 8-Matriz AHP PD1-2020207.	Propio.	Excel.
9	Anexo 9-Plan de Trabajo PD1-2020207.	Propio.	Excel.
10	Anexo 10-DATOS -2020207.	Propio.	PDF.
11	Anexo 11-DATOS1SOL-2020207.	Propio.	PDF.
12	Anexo 12-RUTASOL-2020207.	Propio.	PDF.
13	Anexo 13-Matriz AHP Alternativas de Pesos - 2020207.	Propio.	Excel.
14	Anexo 14-Modelos-2020207.	Propio.	Rar.
15	Anexo 15-Programas C++-2020207.	Propio.	Rar.
16	Anexo 16-Manual -2020207.	Propio.	PDF.