

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



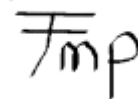
JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO
Director Carrera Ingeniería Industrial



DANIEL MORILLO TORRES
Director(a) Proyecto de Diseño



ÁLVARO FIGUEROA CABRERA
Jurado 1



FRANCISCO MUÑOZ PRADO
Jurado 2

Santiago de Cali, 18 de enero de 2023

Ingeniero Jorge Enrique Álvarez Patiño
Director Carrera de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia

Asunto: Carta aval para la entrega definitiva del documento Proyecto de Diseño 20222105

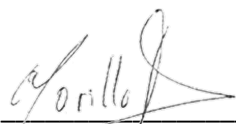
Estimado director,

Mediante esta misiva doy aval para la entrega final a la Carrera del documento que soporta el Proyecto de Diseño número 20222105 titulado “Problema de Orientación de Equipos heterogéneos con entrega dividida de recursos renovables con ventanas de tiempo: Aplicación y solución para la mitigación de protestas en un contexto colombiano”, que se encuentra bajo mi dirección. Este proyecto fue desarrollado por los estudiantes:

- Natalia Amaya Millán
- Santiago Barriga Jama
- Sofía Galvis Arias
- Juan Antonio Martínez Becerra

Quedo atento a cualquier información adicional que pueda necesitar.

Atentamente,



Daniel Morillo Torres, Ph.D.
Director de Proyecto de Diseño
Profesor Asociado Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia

Problema de Orientación de Equipos heterogéneos con entrega dividida de recursos renovables con ventanas de tiempo: Aplicación y solución para la mitigación de protestas en un contexto colombiano.

Natalia Amaya Millán ^{a,c}, Santiago Barriga Jama ^{a,c}, Sofía Galvis Arias ^{a,c},
Juan Antonio Martínez Becerra ^{a,c}

Daniel Morillo Torres, Ph.D. ^{b,c}, Gustavo Gatica, Ph.D. ^d

^a Estudiante de Ingeniería Industrial

^b Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

^c Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

^d Universidad Andrés Bello, Santiago de Chile, Chile

Resumen—En los últimos años, principalmente después del 2021, las protestas en Colombia han tenido una principal relación con manifestaciones violentas y daños a propiedad pública y privada. Solo en el paro nacional del 2021, las cifras de muertos ascendieron a 76 y las pérdidas monetarias superaron los 11,9 billones de pesos, siendo Cali una de las ciudades más afectada por estas manifestaciones. Considerando que las instituciones policiales, bajo sus mecanismos de atención actuales, encuentran dificultades para atender de manera oportuna y suficiente los diferentes focos de protestas que se puedan presentar en esta ciudad, se plantea la necesidad de diseñar un modelo de asignación de recursos que brinde una solución apropiada a esta problemática. El modelo propuesto se basa en el problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo. A su vez, considera flota heterogénea, varios nodos de origen y recursos renovables, así como el cumplimiento compartido de la demanda. Por ende, se llega al diseño de un modelo matemático con un alcance suficientemente amplio. La validación de este se realizó mediante un experimento computacional de simulación con casos de prueba, donde se obtuvo que en el 70% de los casos, el modelo encontraba la solución óptima, atendiendo el 100% de los focos considerados. Para el 30% restante, la mejor solución no pudo ser encontrada por falta de tiempo computacional. Con esto, se demuestra la capacidad suficiente del modelo para encontrar soluciones óptimas a problemas con alta complejidad. Finalmente, se plantea la opción de extender la experimentación computacional con el fin de verificar el desempeño general en el total de casos.

Palabras claves— experimento computacional, flota heterogénea, problema de orientación de equipos, protestas, recursos policiales, recursos renovables, ventanas de tiempo.

Abstract—In recent years, mainly after 2021, the protests in Colombia have had a main relationship with violent demonstrations and damage to public and private property. Only during the 2021's national strike, the death toll rose to 76 and monetary losses exceeded 11.9 trillion of colombian pesos, being Cali one of the most affected cities by this situation. Considering that the police institutions, under their current attention mechanisms, find it difficult to attend in a timely and sufficient manner the different foci of protests that can occur in this city, the need arises to design a resource allocation model that provides a appropriate solution to this problem is need. The proposed model is based on the equipment orientation problem with time windows. At the same time, it considers a heterogeneous fleet, several origin nodes and renewable resources, as well as the shared fulfillment of the demand. Therefore, it is possible to design a mathematical model with a sufficiently broad scope. The validation of this was carried out through a computational simulation experiment with test cases, where it was obtained that in 70% of the cases, the model found the optimal solution, attending 100% of the foci considered. For the remaining 30%, the best solution could not be found due to lack of computational time. With this, the sufficient capacity of the model to find optimal solutions to highly complex problems is demonstrated. Finally, the option of extending the computational experimentation is proposed in order to verify the general performance in all cases.

Key words— computational experiment, heterogeneous fleet, police resources, protests, renewable resources, team orienteering problem, time windows.

Tabla de contenido

I.	DEFINIR.....	8
A.	Contexto y Justificación	8
B.	Grupos de interés	11
C.	Requerimientos.....	13
II.	MEDIR.....	14
A.	Casos de aplicación	14
B.	Casos de prueba.....	16
1.	<i>Generación de instancias</i>	16
2.	<i>Formato de los casos de prueba</i>	20
3.	<i>Instancia considerada</i>	21
C.	Establecimiento de KPIs.....	23
1.	<i>Situación actual</i>	23
III.	ANALIZAR	24
A.	Análisis de Oportunidad	24
B.	Revisión de literatura.....	27
C.	Exploración de ideas y selección de alternativa	28
D.	Objetivos.....	29
1.	<i>Objetivo general</i>	29
2.	<i>Objetivos específicos</i>	30
E.	Plan de trabajo (PdT).....	30
IV.	DISEÑAR	31
A.	Desarrollo del diseño de la solución	31
1.	<i>Supuestos del modelo</i>	31
2.	<i>Definición de conjuntos</i>	32
3.	<i>Definición de parámetros</i>	33
4.	<i>Definición de variables</i>	33
5.	<i>Función Objetivo</i>	34
6.	<i>Restricciones</i>	34
B.	Validación del diseño propuesto.....	38
V.	VERIFICAR	45
A.	Resultados y Medición de Impactos	45
1.	<i>Resultados</i>	45
2.	<i>Medición de Impactos</i>	49
B.	Estandarización de la solución.....	52

C. Conclusiones.....	53
D. Recomendaciones.....	54
VI. GLOSARIO	55
VII. REFERENCIAS.....	56
VIII. ANEXOS	59

Índice de Tablas

TABLA I RESTRICCIONES, ESPECIFICACIONES Y NORMATIVAS DEL PROYECTO	13
TABLA II RESUMEN DE CASOS DE ÉXITO PARA PROBLEMAS DE ORIENTACIÓN DE EQUIPOS CON VENTANAS DE TIEMPO	14
TABLA III FOCOS DE PROTESTAS IDENTIFICADOS EN CALI	17
TABLA IV ESTACIONES DE POLICÍA DE CALI	17
TABLA V EJEMPLO DE CALIFICACIÓN DE LOS NODOS	19
TABLA VI VARIABLE E INDICADOR DE DESEMPEÑO A CONSIDERAR	23
TABLA VII SITUACIÓN ACTUAL INDICADOR DE DESEMPEÑO	24
TABLA VIII COMPARACIÓN ENTRE DOS POSIBLES MÉTODOS DE ASIGNACIÓN PARA EL MISMO ESCENARIO DEL PROBLEMA.....	25
TABLA IX MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE ORIENTACIÓN DE EQUIPOS CON VENTANAS DE TIEMPO ..	27
TABLA X PLAN DE TRABAJO.....	30
TABLA XI CARACTERIZACIÓN DE LOS CASOS DE PRUEBA PARA EL EXPERIMENTO COMPUTACIONAL.....	46
TABLA XII RESULTADOS DEL EXPERIMENTO COMPUTACIONAL	46
TABLA XIII RECUENTO DE EMISIÓN DE CO2 DE LOS VEHÍCULOS PARA EL EXPERIMENTO COMPUTACIONAL	51
TABLA XIV TABLA DE ANEXOS	59

Índice de Figuras

Fig. 1. Bienes privados averiados durante las manifestaciones de 2021.....	8
Fig. 2. Bienes públicos averiados durante las manifestaciones de 2021.....	9
Fig. 3. Modelo de orientación de equipos con ventanas de tiempo.....	11
Fig. 4. Identificación de grupos de interés mediante Onion Stakeholder	12
Fig. 5. Escala valorativa diseñada para calificar el nivel de riesgo de forma numérica	18
Fig. 6. Diagrama ilustrativo donde se demuestra el cálculo de rutas usando distancias reales.....	20
Fig. 7. Instancia considerada en su formato de presentación.....	22
Fig. 8. Ubicación geográfica de los nodos y las estaciones de policía a considerar en la instancia propuesta	22
Fig. 9. Rutas resultado para la instancia considerada.....	24
Fig. 10. Comparación de rutas planteadas para asignación de recursos por índice de priorización y por menor duración de la ventana de tiempo.....	25
Fig. 11. Explicación gráfica del método de búsqueda local iterativa.....	29
Fig. 12.Caso de prueba empleado para la validación del modelo	38
Fig. 13. Ruteo completo del modelo	39
Fig. 14. Flujo de salidas y retornos de vehículos de la estación de policía No. 22.....	40
Fig. 15. Flujo de llegadas y salidas de vehículos del foco de protestas de Univalle (No. 2)	40
Fig. 16. Flujo de llegadas y salidas de vehículos del foco de protestas de Loma de la Cruz (No. 10)	41
Fig. 17. Ruta del vehículo 3 del tipo 2 perteneciente a la estación de policía 22, con análisis de tiempos de recorrido	42
Fig. 18. Cantidad de vehículos Tipo 1 que llegan a los focos 1, 9, 14 y 16 desde las diferentes estaciones de policías	43
Fig. 19. Análisis del cumplimiento de la demanda de policías del foco de protestas de Univalle (No. 2)	43
Fig. 20. Análisis del cumplimiento de la demanda de policías del foco de protestas de Diamante (No. 14)	44
Fig. 21. Validación del funcionamiento de la variable <i>vi</i>	45

PROJECT CHARTER 2022105

Descripción (<i>Business case</i>)	Planteamiento del problema (<i>Problem statement</i>)		
Desde sus inicios como nación, Colombia ha sido un país que ha exigido sus derechos a través de las protestas. Ante la búsqueda constante de tratos equitativos y aceptación social, las protestas han sido cada vez más frecuentes desde el siglo XX, más aún en los inicios del siglo XXI. Dichas manifestaciones son consideradas un derecho constitucional, sin embargo, existe una pequeña parte de ellas que se lleva a cabo de manera violenta, alterando el orden público, generando no solo pérdidas materiales, sino también pérdidas humanas. Conforme a esto, se observa que la acción de los organismos de control para el manejo de estas ha sido poco efectiva al no asignar de manera oportuna los recursos policiales que se tienen.	Durante las manifestaciones del 2021, se presentaron 4445 bienes públicos y 1416 bienes privados averiados. Adicionalmente, 1140 civiles y 1712 uniformados lesionados por intervenciones en las protestas. Con esto se evidencia la ineficiencia de los mecanismos empleados para la asignación estratégica y oportuna de los recursos policiales obedeciendo una respuesta rápida y eficaz frente a los focos de protestas antes de tornarse destructivas.		
Impacto de los actores (<i>Stakeholder's business needs</i>)	Restricciones	Especificaciones	Marco legal
Llevando a cabo la implementación de la propuesta a la problemática, se verán reflejados impactos en los grupos de interés identificados. El primero, siendo los organismos de control de la ciudad, brindándoles una herramienta que les permitirá distribuir los recursos policiales de una manera adecuada, atendiendo a los focos que mayor impacto estén teniendo con un tiempo mínimo de respuesta. Por otro lado, los manifestantes caleños tendrán un impacto positivo ofreciéndoles seguridad en el foco de la protesta, debido a que, al tener una intervención se impedirán lesiones y disturbios. Adicionalmente, se pretende generar un impacto positivo en la comunidad civil, reduciendo los bienes afectados y manteniendo su integridad física y mental ante cualquier situación de alteración pública.	<p>No se manejan datos 100% reales, se manejan datos aproximados sobre magnitudes de protestas.</p> <p>La inexistencia de un mecanismo que calcule, en tiempo real, la magnitud de las protestas y sus posibles impactos negativos potenciales. Solo se cuenta con instrumentos de monitoreo más no de proyección. Se trabaja bajo simulaciones con datos históricos.</p> <p>Inexactitud entre los datos emitidos por los organismos competentes y la realidad, en consideraciones de recursos de armamento y personal (por motivos de seguridad y confidencialidad).</p> <p>Imposibilidad de certeza frente a la magnitud exacta de las manifestaciones y sus posibles rutas de expansión. Se tiene datos históricos, pero no siempre tienen el mismo patrón de comportamiento.</p>	<p>Debe diseñar múltiples rutas que permita intervenir los focos necesarios para causar la mayor reducción del impacto negativo total de las manifestaciones.</p> <p>Debe considerar la magnitud de cada foco de protestas, la cual es distinta en cada caso (densidad de la concentración).</p> <p>Debe limitar, a una sola, la cantidad de visitas realizadas a cada foco.</p> <p>Debe considerar la cantidad de recursos existentes de los organismos de control (vehículos, personal, armamento etc.) para hacer una asignación eficiente para los focos a intervenir, se trabajará con datos aproximados.</p> <p>Debe considerar las posibles combinaciones de recursos a ser enviados a cada foco.</p> <p>Debe establecer el orden de visita a los focos, cumpliendo con el menor tiempo de respuesta posible.</p> <p>El diseño de ruta debe considerar las distancias reales de la ciudad a intervenir.</p>	<p>Decreto No. 4112.010.20 de 2020, Santiago de Cali: Estipula el límite máximo de velocidad para los vehículos en Cali.</p> <p>Artículo 64. Ley 769 de 2002, Código Nacional de Tránsito Terrestre: Estipula la excepción de cumplimiento de los límites de velocidad y algunas señales de tránsito para los vehículos policiales bajo condiciones de emergencia.</p> <p>Resolución 03002 de 2017: Estipula el equipo necesario, dotaciones y caracterización de las cuadrillas de los organismos de control. Así como la asignación de los tipos de vehículos según las magnitudes de las concentraciones.</p> <p>Artículos 4 y 8. Resolución 481 de 2021: Estipulan las debidas medidas para disponer armamento a</p>

	<p>Incertidumbre frente a la duración y tamaño de las manifestaciones, se podría simular mediante datos históricos.</p> <p>Desconocimiento de la reacción de los manifestantes y el incremento negativo de los efectos de la concentración.</p>	<p>Se debe considerar la velocidad de tránsito permitida de la ciudad para emitir los tiempos de llegada.</p> <p>Se debe dar prioridad a la atención general de la ciudad (mayor cobertura), más que a la intervención de cada foco.</p> <p>Para cada serie de manifestaciones, se debe hacer una nueva asignación de rutas y recursos para la ciudad. No son aplicables las configuraciones de eventos pasados, dada la variación de las condiciones.</p> <p>Los datos y parámetros del modelo deben ser modificables para poder adaptarlo a otro contexto, tanto territorial como conceptual.</p>	<p>determinadas situaciones.</p> <p>Artículo 10. Resolución 481 de 2021: Asignación de recursos policiales según comportamiento de las concentraciones.</p>		
Indicadores de Desempeño (KPI's)					
Variable	Actualidad	Meta			
Cobertura de los focos de protestas (CFP)	67%	Aumentar como mínimo un 10%			
Objetivo general (Goal statement)					
Diseñar un modelo de programación exacto y aproximado enfocado a la mitigación de protestas en Cali, basado en el problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo.					
Objetivos específicos (Project scope)					
<ol style="list-style-type: none"> 1. Caracterizar matemáticamente el problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo para la mitigación de protesta de la ciudad de Cali. 2. Diseñar los componentes computacionales de la heurística del <i>Iterated Local Search</i> para la resolución del caso de estudio. 3. Implementar los modelos propuestos mediante un lenguaje de programación determinado para la solución del problema establecido. 4. Diseñar un experimento computacional que permita la validación a pequeña y gran escala de los modelos matemáticos para el problema de mitigación de protestas en Cali. 					
Plan de Trabajo (Project Plan)			Equipo de trabajo (Team members)		
Actividad	Fecha Inicio	Fecha Fin	Área IISE	Nombre	Rol
Identificar parámetros.	Ago 1/ 22	Ago 5/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Natalia Amaya Millán	Harmonizer
Identificar conjuntos.	Ago 1/ 22	Ago 5/ 22	Investigación y análisis de operaciones.	Sofía Galvis Arias	Follower

Formulación de restricciones.	Ago 8/ 22	Ago 26/ 22	Investigación y análisis de operaciones.	Santiago Barriga Jama	Compromiser
Definir función objetivo.	Ago 8/ 22	Ago 26/ 22	Investigación y análisis de operaciones.	Santiago Barriga Jama	Compromiser
Definir la naturaleza de las variables.	Ago 29/ 22	Sep 2/ 22	Investigación y análisis de operaciones.	Natalia Amaya Millán	Harmonizer
Realizar análisis dimensional de las restricciones.	Ago 22/ 22	Sep 2/22	Investigación y análisis de operaciones	Juan Antonio Martínez Becerra	Standard setter, observer
Plantear método de codificación.	Sep 5/ 22	Sep 7/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Juan Antonio Martínez Becerra	Standard setter, observer
Establecer la codificación del problema.	Sep 8/ 22	Sep 19/ 22	Investigación y análisis de operaciones.	Juan Antonio Martínez Becerra	Standard setter, observer
Realizar la codificación.	Sep 20/ 22	Sep 29/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Santiago Barriga Jama	Compromiser
Establecer la regla de movimiento (estructura del vecindario).	Sep 5/ 22	Sep 7/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Juan Antonio Martínez Becerra	Standard setter, observer
Creación de la solución inicial.	Sep 8/ 22	Sep 14/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Sofía Galvis Arias	Follower
Definir las estrategias de búsqueda según <i>Iterated Local Search</i> .	Sep 23/ 22	Sep 29/22	Investigación y análisis de operaciones	Natalia Amaya Millán	Harmonizer
Seleccionar el lenguaje de programación .	Sep 30/ 22	Sep 30/22	Investigación y análisis de operaciones	Sofía Galvis Arias	Follower
Adaptar los componentes computacionales al lenguaje de programación seleccionado.	Oct 3/ 22	Oct 19/22	Investigación y análisis de operaciones	Santiago Barriga Jama	Compromiser

Realizar debugging del código.	Oct 18/22	Oct 27/22	Investigación y análisis de operaciones	Santiago Barriga Jama	Compromiser
Inserción de los escenarios simulados al código realizado.	Oct 31/ 22	Nov 1/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Santiago Barriga Jama	Compromiser
Validación de la formulación.	Nov 2/ 22	Nov 8/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Juan Antonio Martínez Becerra	Standard setter, observer
Medición de indicadores.	Nov 9/ 22	Nov 16/22	Ingeniería de calidad y confiabilidad	Juan Antonio Martínez Becerra	Standard setter, observer
Análisis de resultados.	Nov 9/ 22	Nov 16/ 22	Ingeniería de calidad y confiabilidad	Juan Antonio Martínez Becerra	Standard setter, observer
Modificación de la heurística y ajustes.	Nov 15/ 22	Nov 18/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Santiago Barriga Jama	Compromiser
Realización de pruebas.	Nov 17/ 22	Nov 21/ 22	Investigación y análisis de operaciones	Santiago Barriga Jama	Compromiser

I.DEFINIR

A. Contexto y Justificación

Desde sus inicios, Colombia se ha caracterizado por ser un Estado exigente de justicia. Sus habitantes han sido promotores de tratos ecuánimes y han estado en la búsqueda constante del reconocimiento de la diversidad que ofrece este territorio. Como formas de manifestar sus inconformidades, en la gran mayoría de los casos, los colombianos han optado por medidas pacíficas, logrando, generalmente, ser escuchados. No obstante, existe una minoría de manifestaciones que se llevan a cabo de forma violenta. Estas, a pesar de no superar el 15% de las concentraciones generales, logran una gran perturbación al bienestar general. El carecer de una memoria histórica, implica inexactitud frente a la cantidad de pérdidas humanas, materiales y morales que se han causado en los escenarios de las protestas. Sólo durante el siglo XX, y los inicios del XXI, se puede hablar de más de 70 000 manifestaciones que terminaron de manera violenta, presentándose saqueos a edificios públicos y privados, daños materiales al bien privado, arrestos, asesinatos, violaciones, desapariciones, entre otros [1], [2].

En Colombia, el derecho a la protesta está contemplado en el artículo 37 de su Constitución Política, estipulando: “Toda parte del pueblo puede reunirse y manifestarse pública y pacíficamente” [3]. Igualmente, el artículo 20 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos resalta que “toda persona tiene derecho a la libertad de reunión y de asociación pacíficas” [4]. A pesar de esto, los actores malintencionados, nublan el propósito principal de la manifestación y detonan escenarios caóticos que alteran el orden civil. Como muestra de esto, se hace énfasis en las manifestaciones ocurridas en el marco del primer semestre del 2021 a nivel nacional. Durante este periodo, se registraron 12 478 actividades de protestas, 89% de ellas desarrolladas de manera pacífica, pero el restante 11%, presentaron disturbios y acciones violentas. A lo anterior, se suma el impacto económico ocasionado por los más de 1900 bloqueos que se presentaron en las distintas zonas del país. Según el gobierno nacional, dicho impacto alcanzó los 11,9 billones COP, esto sin considerar las diferentes afecciones a los bienes inmuebles. El resumen de las pérdidas por daños a propiedad pública y privada se presenta en las Fig. 1 y Fig. 2, representando estas un costo aproximado de 50 000 millones COP [5], [6].

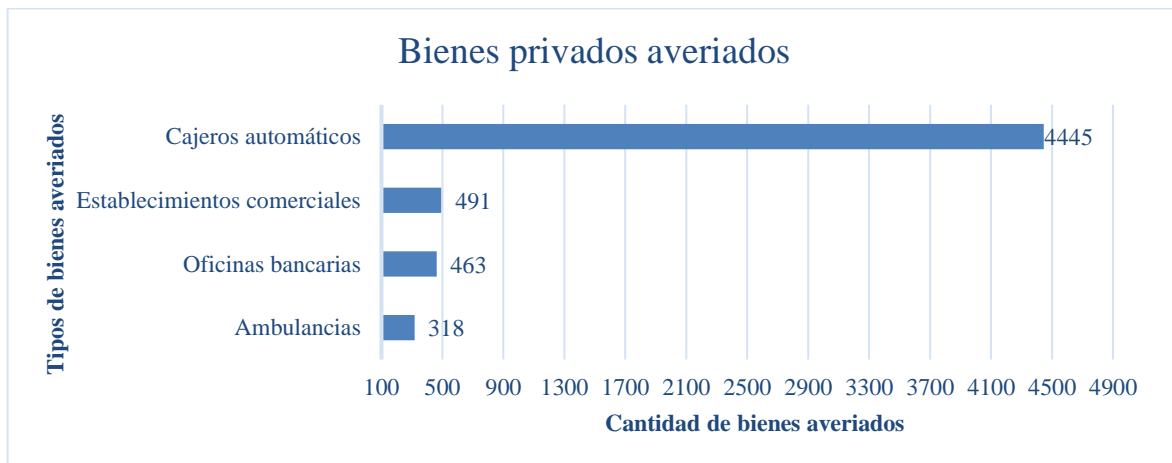


Fig. 1. Bienes privados averiados durante las manifestaciones de 2021. Mod. [5].

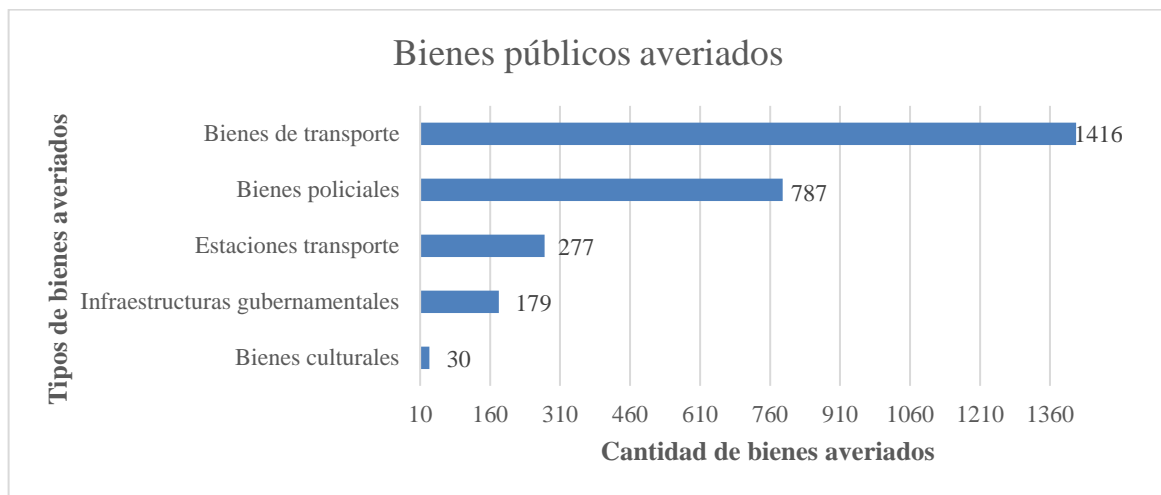


Fig. 2. Bienes públicos averiados durante las manifestaciones de 2021. Mod. [5].

Adicionalmente, los daños personales ocasionados durante las protestas del 2021 dejaron cifras alarmantes. Según informes, durante las manifestaciones del 2021 se registraron 1140 civiles y 1712 uniformados lesionados por intervenciones en las protestas. A su vez, fueron 1661 las víctimas de violencia física por parte de la policía, así como 1905 heridos por miembros de las fuerzas públicas y civiles armados no identificados. También, se tiene reporte de 1970 capturas en el contexto de las protestas. De ellas, 1685 realizadas en flagrancia y 285 bajo orden judicial, evidenciando la gran incidencia delictiva durante las manifestaciones en el territorio nacional. Sin embargo, las cifras más preocupantes corresponden a las pérdidas humanas. La ONU y la Fiscalía General de la Nación verificaron 44 muertes de civiles y 2 de policías, muriendo el 76% de ellos por herida de bala. Adicionalmente, 30 personas murieron de manera violenta en el contexto de las manifestaciones del 2021, incluidos funcionarios del CTI y miembros de las fuerzas públicas [5], [7].

Si bien el escenario nacional fue el protagonista, en Cali se registró el mayor número de afectaciones por consecuencia de las protestas causadas, principalmente, por el descontento frente a las reformas tributarias. En esta ciudad, según se expresó en los reportes de la ONU, la filtración de las bandas delictivas entre los manifestantes, ocasionaron un incremento en los disturbios. Además, las medidas de contención empleadas por las fuerzas públicas sobrepasaron los límites legales, así como también los manifestantes atentaron de manera desmedida contra los organismos de control. Lo anterior, deja como resultado el 15,8% de los lesionados y el 71% a las muertes ocasionadas a nivel nacional. Así pues, se evidencia la ineficacia de los mecanismos empleados por los organismos de control para responder y asignar los recursos policiales de manera oportuna, obedeciendo a las demandas de los focos identificados, dependiendo de los comportamientos y magnitudes de estos [5].

Asimismo, se reconoce que las manifestaciones en Cali, como en varias ciudades, son de magnitudes distintas, pues las concentraciones dependen de la ubicación y el entorno. Además, se suelen realizar en puntos previamente identificados, los más críticos son: Siloé, UniValle, Puerto Rellena y Paso del Comercio. Igualmente, se reconoce la existencia de varios puntos de concentración de los organismos de control y la dotación policial ubicados en diferentes partes de la ciudad. A pesar de esto, según los informes emitidos por la ONU, los recursos policiales de la ciudad deben ser enviados a varios focos de protestas durante una misma jornada, pues no se cuenta con las suficientes unidades para dar trato único a las manifestaciones. Por ende, la definición de puntos de protestas a atender, y el orden en que deben ser atendidos, juega un papel fundamental para contrarrestar las consecuencias de las protestas [5], [8].

El equipo desarrollador del proyecto intentó por varios canales tener un acercamiento con las entidades policiales de la ciudad. Se enviaron cartas dirigidas a la Policía Nacional, a la Alcaldía de Cali, se realizaron llamadas a los diferentes departamentos de policía de la ciudad con el fin de recolectar información de fuentes directas que permitiesen concretar el modo de operación ante estas situaciones de caos civil. Sin embargo, no se obtuvo ninguna respuesta por parte de estas entidades. Adicionalmente, las páginas oficiales de las mencionadas entidades tampoco cuentan con la información disponible que permita establecer con claridad el modo concreto de operación. Por lo tanto, la carencia de información se presenta como una limitante para tener sólidamente estructurada la forma de asignación de recursos y rutas que se maneja actualmente. A pesar de esto, se reconoce la naturaleza de la situación, las condiciones en las que se maneja y los objetivos que se deben alcanzar por lo que se puede llegar a una aproximación muy cercana de lo que es la realidad.

Considerando lo anterior, la intervención de la problemática identificada resulta altamente relevante bajo el escenario político y social actual. Las elecciones gubernamentales, según las encuestas nacionales, han generado una considerable tensión entre los habitantes de Cali y, teniendo como precedente los efectos de las concentraciones del 2021, los manifestantes, probablemente, generarán alteraciones futuras. A esto, se suma la falta de nuevas vinculaciones a las fuerzas públicas. Por el contrario, los retiros y pensiones de dichas entidades ascendieron a 33 000 en el 2021, lo que representa una baja considerable en sus listas de personal, contando con solo 268 policías por cada 100 000 habitantes en Cali. De igual manera, la constante vigilancia y cuestionamiento sobre las formas de actuar de los organismos policiales, revela sus malas prácticas al no realizar la orientación oportuna y eficiente para el debido control de las protestas, desencadenando esto en hechos de violencia [5], [9], [10].

Con la caracterización anterior, y la relevancia pertinente, es preciso considerar la necesidad de un diseño estratégico de asignación de rutas y recursos para lograr el debido control de las manifestaciones dentro de la ciudad. En el contexto a tratar, se reconocen las demandas variables de cada uno de los focos a atender, en cuanto a recursos policiales se refiere, dependiendo de la magnitud de la concentración (cantidad de personas), así como sus ubicaciones geográficas y las distancias entre ellos. Además, se establece la imposibilidad de atender a todos los focos durante una misma jornada de protestas, dado las limitaciones de recursos existentes. Entonces, existen focos que, por sus características, no serán atendidos, considerando que no impactan en gran manera el descontrol general de la ciudad. Lo mencionado anteriormente, revela gran relación entre la problemática a tratar y *el problema de orientación* (The Orienteering Problem en inglés). Este problema, teniendo en cuenta la magnitud de cada uno de los focos considerados, emite como resultado la mejor combinación posible de nodos a intervenir, buscando el mejor resultado global. Para esta problemática, se traduce en la mayor cobertura posible de la ciudad, que indica la mayor atención de nodos, con sus respectivos recursos demandados que logren minimizar el impacto negativo global [11], [12].

Sin embargo, según el contexto a tratar, es posible establecer múltiples rutas a seguir, teniendo en cuenta que hay varios recursos vehiculares que posibilitan el desplazamiento de varios equipos en simultáneo. Así pues, las rutas que atienden diferentes combinaciones de nodos logran un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles. Es preciso destacar que la atención a los nodos se dan de manera temporal, es decir, cada foco cuenta con un tiempo durante el cual requiere ser atendido, una vez la atención culmina, los recursos están en capacidad de desplazarse hasta otro foco donde sean requeridos, a esto se le conoce como recursos renovables. Adicionalmente, la eficiencia en los tiempos de llegada de los recursos representa un punto crucial de la problemática, pues la demora de los organismos de control influye en el nivel de descontrol de la manifestación. Por ende, las *ventanas de tiempo* toman una relevancia importante en esta situación, pues aseguran la menor demora para atender a los nodos. Además, según la naturaleza de la problemática, cada nodo sólo se interviene una vez, así como se estipula en los *ciclos Hamiltonianos*, pues se parte del hecho que la asignación de recursos logra la contención del foco y no es necesario realizar una reasignación o un retorno. Finalmente, la posibilidad que recursos provenientes de diferentes estaciones de policías se encuentren para hacer la atención a un nodo específico es totalmente válida, pues una sola estación puede no contar con el total de recursos requeridos por una misma manifestación, por esto se considera el cumplimiento de la demanda compartido. [13]–[15].

Las características expuestas, evidencian una estrecha relación de la problemática con el modelo de orientación de equipos considerando ventanas de tiempo (Team Orienteering Problem with time windows en inglés). A su vez, es posible adicionar otras consideraciones mencionadas como lo son los recursos renovables y el cumplimiento de demanda compartido. Esta adaptación del problema de orientación tradicional considera múltiples rutas, iniciadas en el mismo punto, que intervienen diferentes nodos, satisfaciendo sus demandas individuales, pero procurando la intervención de aquellos que generen un mayor impacto global. A continuación, se evidencia en la Fig. 3 una aproximación al modelo de *orientación de equipos considerando ventanas de tiempos*. En esta, se observa el establecimiento de múltiples rutas para intervenir los nodos que representan el mayor impacto global de la situación. Aunque, la figura es un modelo genérico, se puede asumir bajo este contexto que cada símbolo representa un recurso policial (tanquetas, escuadrones con escudos, gases lacrimógenos, entre otros) y cada foco, dependiendo de su magnitud, tiene una demanda específica de dichos recursos. [16].

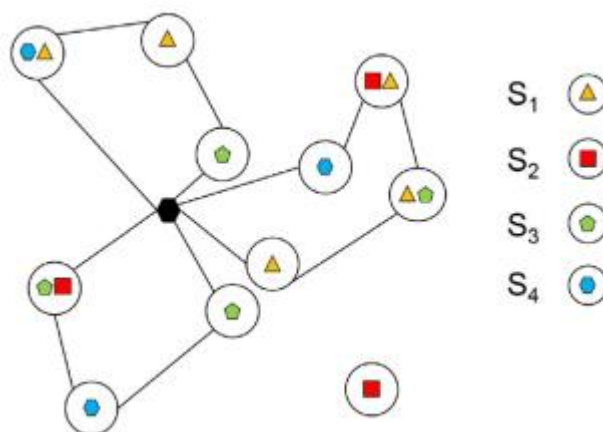


Fig. 3. Modelo de orientación de equipos con ventanas de tiempo [17].

En conclusión, se considera pertinente abordar la problemática mediante un caso de *orientación de equipos considerando ventanas de tiempo*. Con este modelo, se optimiza la asignación de los recursos policiales, así como una mejora en los tiempos de arribo a los puntos de concentración para ejercer el oportuno control de las manifestaciones. Por ende, al tener protestas reguladas, se tiene una disminución de los índices de violencia, tanto de los manifestantes como de la fuerza pública. Además, se considera la reducción de las pérdidas monetarias por daños a bienes públicos y privados, así como la disminución de pérdidas humanas. Por último, se presenta un ahorro en los costos operativos de las entidades de control de Cali, como consecuencia de un mejor aprovechamiento de sus recursos disponibles. Para evidenciar en detalle el proceso de identificación de la problemática, ver Anexo 1.

B. Grupos de interés

Si bien la problemática enmarcada en el contexto caleño puede ser extrapolada a otras esferas, el desarrollo del proyecto se basa en simulaciones respecto a aproximaciones históricas, pues es un proyecto de tipo exploratorio. Además, la definición de interesados de este proyecto permite contemplar otras aplicaciones que se le pueden dar al modelo a desarrollar y qué entidades podrían estar interesadas en su integración. Por ende, la lista de grupos de interés no se reduce a los implicados directos bajo el contexto definido previamente, sino que se amplía hasta las posibles instancias que podrían llegar a considerar conveniente la implementación del modelo.

Por lo anterior, se realizó la identificación de interesados en el contexto planteado para, posteriormente, tener en cuenta las instancias externas a este que puedan adoptar el modelo bajo unas condiciones similares. En primer lugar, los principales agentes impactados por el diseño y la implementación del proyecto resultan siendo los **organismos de control de la ciudad de Cali**, entiéndanse como la Policía Nacional, los Escuadrones Móviles Antidisturbios (ESMAD) y el ejército para casos extremos. Estos, son los responsables de acudir a los focos de protestas y garantizar que estas se lleven a cabo bajo los lineamientos que estipula la legislación colombiana, proveyendo el orden común. De igual forma, los **manifestantes caleños** representan otro gran grupo de interés, pues son ellos los que sienten la intervención de los organismos de control de manera oportuna gracias a la implementación del modelo. Por otra parte, la población civil de Cali representa también un grupo afectado, en este caso positivamente, teniendo en cuenta que, al ejercer un mayor control sobre los manifestantes malintencionados, las alteraciones del orden público, así como los daños a los bienes públicos y privados, se ven disminuidos en gran medida. También, un principal afectado con la implementación del proyecto es su equipo desarrollador, el **Equipo 105**, pues de sus miembros depende el diseño del modelo, el levantamiento de los supuestos que obedezcan a condiciones reales, así como la implementación y las debidas pruebas que se le realicen al mismo.

De manera menos directa, se consideran a los garantes de los derechos humanos, se habla de entidades como la **Defensoría del Pueblo**, como agentes afectados, los cuales, como procuradores del cumplimiento de los derechos individuales y colectivos, deben hacer presencia en las situaciones de conflicto. Además, son estos los encargados de emitir las normativas sobre las limitaciones y libertades que se pueden tener a la hora de mitigar la magnitud de las protestas. Por último, se considera el **Gobierno**

local de la ciudad como ente afectado por el proyecto, pues la implementación de este permite hacerle frente al incremento de los daños y perjuicios de los bienes públicos, reduciendo los rubros destinados para las reparaciones de los mismos. Esto, sumado al reconocimiento obtenido como un garante de la convivencia pacífica dentro del territorio y una disminución del entrecimiento de las tareas propias de su quehacer por cuenta de las manifestaciones destructivas.

Ahora bien, teniendo en cuenta la metodología usada para este proyecto, su desarrollo puede representar un interés por parte de entidades que no se encuentran mencionadas en el contexto inicial. Pues, al considerar este proyecto de tipo exploratorio, las adaptaciones que se pueden generar sobre este pueden ser tan variadas que su aplicación pueda llegar a implementarse en contextos no pensados inicialmente. Por ende, se considera que, solo realizando modificaciones a los datos tenidos en cuenta y los insumos base suministrados, el modelo a desarrollar puede ser usado en cualquier ciudad del país. Como consecuencia, **las fuerzas públicas de cada municipio** del país entran a considerarse como posibles interesados. De manera aún más ambiciosa, puede considerarse la implementación de este modelo para el control de las protestas en cualquier ciudad del mundo, percatándose que se cumpla con las características del modelo.

De manera similar, teniendo en cuenta lo que representa para los caleños la feria de Cali y las magnitudes de este evento, los **organismos de control, en conjunto con los organizadores de la feria**, pueden considerar la implementación de este modelo para generar un mayor control sobre los diferentes establecimientos involucrados. Modificando los parámetros del modelo, los organismos de control pueden generar estrategias de atención frente a actos violentos y garantizar un desarrollo más ameno de la festividad. De igual forma, se puede llegar a considerar esta implementación para celebraciones de tipo similar en diversas ciudades del mundo: el Carnaval de Barranquilla, los carnavales de Pasto, por mencionar algunos. También, se puede considerar para mantener el orden público durante el desarrollo de eventos deportivos múltiples, juegos panamericanos, juegos olímpicos, entre otros.

A continuación, se evidencia la priorización de los interesados, siendo coherente con el nivel de incidencia que tiene cada uno en el proyecto (Ver Anexo 2). Como resultado de lo anterior, el equipo considera adecuado el posicionamiento de los grupos de interés mediante el diagrama *Onion Stakeholder*, como se aprecia en la Fig. 4. Este, permite tener una visión global de los agentes interesados en el proyecto, pero a su vez los ubica según su grado de relevancia para el mismo, en una posición más cercana al centro. Los más cerca al centro del diagrama, se consideran los mayores interesados o afectados. En consideración, los posibles interesados en implementar el proyecto fuera del contexto delimitado, se encuentran en los niveles más alejados del diagrama.

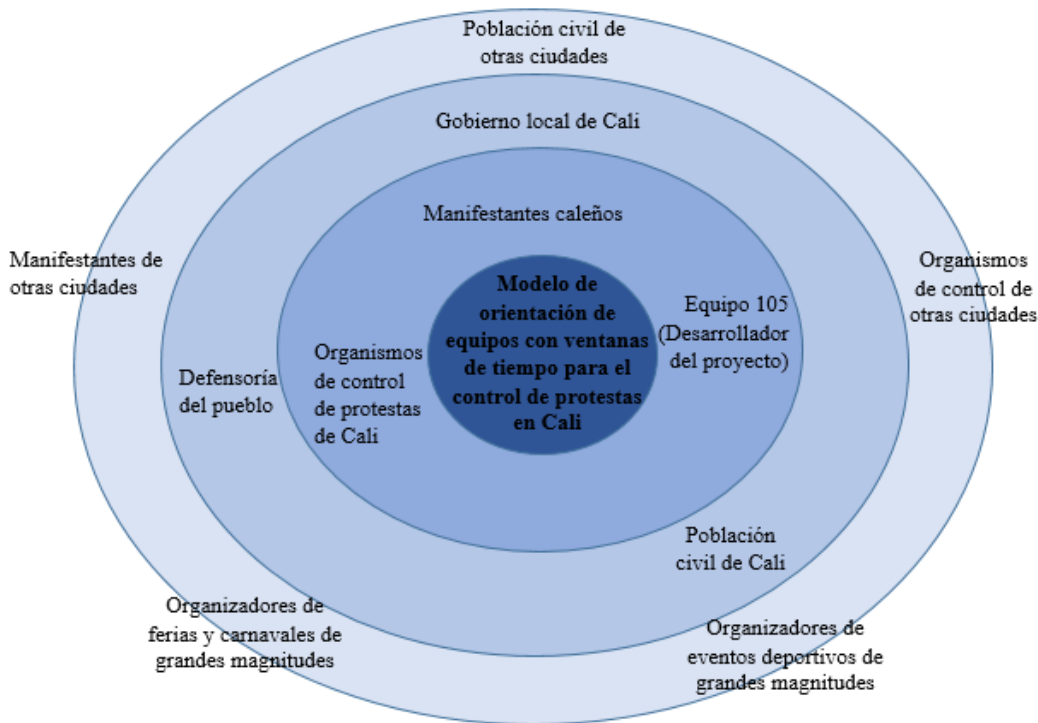


Fig. 4. Identificación de grupos de interés mediante Onion Stakeholder

C. Requerimientos

Al tener en consideración el desarrollo de este proyecto como un caso de investigación aplicada, los datos con los cuales se trabajan son simulados respecto a aproximaciones históricas. De igual forma, las consideraciones para cumplir con el requisito del proyecto se contemplan de manera general, diferente a otras metodologías donde cada grupo de interés tiene un requisito particular. En este caso, como requisito general se tiene: Contar con un mecanismo que permita generar las rutas de los organismos de control para acudir de forma oportuna a los focos de protestas, así como la asignación de los recursos policiales para atender a cada uno de ellos. Con esto en mente, en la TABLA I se establecen las restricciones, especificaciones y normativas que se estipulan para cumplir con el mencionado requisito.

TABLA I
RESTRICCIONES, ESPECIFICACIONES Y NORMATIVAS DEL PROYECTO

<p>Restricciones de diseño</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● No se manejan datos 100% reales, se manejan datos aproximados sobre magnitudes de protestas. ● La inexistencia de un mecanismo que calcule, en tiempo real, la magnitud de las protestas y sus posibles impactos negativos potenciales. Solo se cuenta con instrumentos de monitoreo más no de proyección. Se trabaja bajo simulaciones con datos históricos. ● Inexactitud entre los datos emitidos por los organismos competentes y la realidad, en consideraciones de recursos de armamento y personal (por motivos de seguridad y confidencialidad). ● Imposibilidad de certeza frente a la magnitud exacta de las manifestaciones y sus posibles rutas de expansión. Se tiene datos históricos, pero no siempre tienen el mismo patrón de comportamiento. ● Incertidumbre frente a la duración y tamaño de las manifestaciones, se podría simular mediante datos históricos. ● Desconocimiento de la reacción de los manifestantes y el incremento negativo de los efectos de la concentración.
<p>Especificaciones de diseño</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Debe diseñar múltiples rutas que permita intervenir los focos necesarios para reducir el impacto negativo total de las manifestaciones. ● Debe considerar la magnitud de cada foco de protestas, la cual es distinta en cada caso (densidad de la concentración). ● Debe limitar, a una sola, la cantidad de visitas realizadas a cada foco. ● Debe considerar la cantidad de recursos existentes de los organismos de control (vehículos, personal) para hacer una asignación eficiente para los focos a intervenir, se trabajará con datos aproximados. ● Debe considerar las posibles combinaciones de recursos a ser enviados a cada foco. ● Debe establecer el orden de visita a los focos, cumpliendo con el menor tiempo de respuesta posible. ● El diseño de ruta debe considerar las distancias reales de la ciudad a intervenir. ● Se debe considerar la velocidad de tránsito permitida de la ciudad para emitir los tiempos de llegada. ● Se debe dar prioridad a la atención general de la ciudad (mayor cobertura), más que a la intervención de cada foco. ● Para cada serie de manifestaciones, se debe hacer una nueva asignación de rutas y recursos para la ciudad. No son aplicables las configuraciones de eventos pasados, dada la variación de las condiciones. ● Los datos y parámetros del modelo deben ser modificables para poder adaptarlo a otro contexto, tanto territorial como conceptual. ● Se debe considerar el cumplimiento compartido de la demanda de cada foco por recursos provenientes de diferentes estaciones. ● Los recursos destinados a atender un foco pueden ser considerados nuevamente una vez se finalice la atención a dicho foco. ● La demanda de cada foco debe ser cumplida totalmente. ● Las rutas de cada estación deben ser independientes, es decir, no se mezclan recursos de diferentes estaciones, ni se recogen recursos en otras estaciones.

Normativas	<p>Decreto No. 4112.010.20 de 2020, Santiago de Cali: Estipula el límite máximo de velocidad para los vehículos en Cali [18].</p> <p>Artículo 64. Ley 769 de 2002, Código Nacional de Tránsito Terrestre: Estipula la excepción de cumplimiento de los límites de velocidad y algunas señales de tránsito para los vehículos policiales bajo condiciones de emergencia [19].</p> <p>Resolución 03002 de 2017: Estipula el equipo necesario, dotaciones y caracterización de las cuadrillas de los organismos de control. Así como la asignación de los tipos de vehículos según las magnitudes de las concentraciones [20].</p> <p>Artículos 4 y 8. Resolución 481 de 2021: Estipulan las debidas medidas para disponer armamento a determinadas situaciones [21].</p> <p>Artículo 10. Resolución 481 de 2021: Asignación de recursos policiales según comportamiento de las concentraciones [21].</p>
-------------------	---

II.MEDIR

A. Casos de aplicación

Una vez definida la manera en que se abordó la problemática identificada, en esta sección se evidencia la aplicabilidad del problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo (TOP-TW, por sus siglas en inglés) en contextos reales. A continuación, la TABLA II resume la bibliografía encontrada respecto a la aplicación del modelo. En esta, se establecen las problemáticas abordadas, orientadas principalmente a la industria turística, y los resultados obtenidos por diferentes adaptaciones del modelo.

TABLA II

RESUMEN DE CASOS DE ÉXITO PARA PROBLEMAS DE ORIENTACIÓN DE EQUIPOS CON VENTANAS DE TIEMPO

Título	Autores y Año	Problemática	Resultados	Referencia
Supporting Hospital Logistics During the First Months of The COVID-19 Crisis: A Simheuristic for the Stochastic Team Orienteering Problem	Markus Rabe; Jorge Chicaiza-Vaca; Rafael D. Tordecilla; Leandro do C. Martins; Angel A. Juan 2021	La inesperada crisis que planteó la pandemia del COVID-19 en 2020 provocó que artículos como protectores faciales y protectores de oídos fueran muy demandados. En el área de Barcelona, cientos de voluntarios emplearon sus impresoras 3D domésticas para producir estos elementos. Tras el confinamiento, tuvieron que ser recogidos por un reducido grupo de conductores voluntarios, que los trasladaron a varios centros de consolidación. Estas actividades requirieron un diseño ágil diario de rutas eficientes, especialmente considerando que las rutas no deben exceder un umbral de tiempo máximo para minimizar la exposición de los conductores. Estas restricciones limitan el número de casas que se pueden visitar. Además, los tiempos de viaje y servicio se consideran variables aleatorias.	Originalmente se debe visitar a 22 voluntarios ese día, sin embargo, como se debe cumplir con el mínimo tiempo al aire libre, tener un solo vehículo no es suficiente para visitarlos a todos. Así, la mejor solución determinística (BDS por sus siglas en inglés) logra una recompensa máxima al visitar 15 puntos de recolección, mientras que la solución codiciosa y la mejor solución estocástica (BSS por sus siglas en inglés) lo logran al visitar 14. Este hecho implica que el BSS alcanza una demanda total recolectada y una recompensa menor que el BDS	[22]
Integrating public transportation in personalized electronic tourist guides	Ander Garcia; Pieter Vansteenwegen; Olatz Arbelaitz; Wouter Souffriau; Maria Teresa Linaza	Una guía turística electrónica personalizada (PET), que es un dispositivo móvil de mano, puede realizar al menos la misma tarea que ahora realiza el personal de la oficina de turismo local de la ciudad de San Sebastián, España: debe crear rutas personalizadas que maximicen la	En cuanto a la cantidad de días (rutas) de los viajes, todos los enfoques son capaces de crear rutas de 2 o más días en un tiempo de cómputo corto. Las rutas de 2 días y 8 horas diarias recogen alrededor del 80% de la puntuación total. Esto se parece a la típica estancia turística en San Sebastián (un fin de	[23]

	2013	satisfacción de los turistas, teniendo en cuenta varias restricciones, como horarios de apertura, duración de las visitas, tarifas de entrada y distancias de viaje. Dado que los turistas no desean esperar minutos para recibir una nueva ruta, un PET debe proporcionar una solución integrada para la selección de puntos de interés y la planificación de rutas que se adapte a las nuevas circunstancias en tiempo real. Además, se debe integrar la información del transporte, ya que se identifica como una de las funcionalidades más apreciadas de un PET.	semana), lo que da tiempo suficiente para visitar la mayoría de los puntos de interés (PDI). Se realizaron pruebas con hasta 7 días, pero con viajes de 4 días se visitan todos los PDI. La suma de la duración de las visitas a todos los PDI, ignorando los tiempos de viaje, es de unas 20 h. Por lo tanto, no es posible visitarlos todos en 2 días (16 h) y probablemente incluso en 3 días. Aunque el algoritmo es capaz de resolver viajes de 7 días en tiempo real para San Sebastián, desde el punto de vista turístico los viajes tan largos son muy poco habituales en una ciudad como San Sebastián.	
A new accessibility based team orienteering approach for urban tourism routes optimization (A Real Life Case)	Fateme Sadat Moosavi Heris, Seyed Farid Ghannadpour, Morteza Bagheri, Fatemeh Zandieh. 2022	Seleccionar los Puntos de Interés (POIs) turísticos de la ciudad de Tehran, Iran, que ofrezcan el mayor nivel de satisfacción para los turistas y el mayor nivel de ganancias para la empresa de turismo. Teniendo en cuenta: mínima distancia entre los POIs a visitar, tiempos de apertura de los POIs, precios de las entradas, tiempo de viaje y tiempo total de la ruta.	Se determinó, mediante algoritmo genético, teniendo en cuenta el mismo punto de inicio y fin (hotel), 4 vehículos de transporte y 43 posibles POIs a visitar, que la ruta con mayores ganancias fue de 8091,22 puntos y satisfacción igual a 34, visitando 39 POIs. Por otra parte, la solución con mayor satisfacción arroja un puntaje de 1151,89, con 5066,79 puntos de ganancia, visitando 37 POIs. Estas soluciones fueron superiores a las obtenidas mediante métodos CPLEX y NSGA-II.	[24]
Time dependent orienteering problem with time windows and service time dependent profits	M. Khodadadian, A. Divsalar, C. Verbeeck, A. Gunawan, P. Vansteenwegen. 2022	Diseñar una ruta de puntos turísticos que permita la maximización de la satisfacción de los clientes, considerando las ventanas de tiempo y las ganancias dependientes del tiempo (para cada horario del día, la satisfacción de los clientes varía). En este caso, se considera: The Royal hotel como punto de inicio y fin de la ruta, así como las distancias entre los 36 sitios turísticos de la ciudad de Shiraz, Irán y sus horarios de apertura. Además, se consideran las condiciones variables del tráfico de la ciudad según la hora en la que se transite.	Mediante la implementación de las ventanas de tiempo y las ganancias dependientes del tiempo en la ciudad de Shiraz, Irán, se logró una mejora de las ganancias del 13,68% respecto a otros métodos de solución. Además, se determinó, el impacto de la mejora al considerar las ventanas de tiempo. Por otra parte, se evidenció que el tiempo computacional del algoritmo propuesto es apropiado para aplicaciones móviles en tiempo real y páginas web de turismo.	[25]
Using a heuristic approach to design personalized urban tourism itineraries with hotel selection	Weimin Zhenga, Haipeng Jia, Congren Linb, Wenhui Wanga, Bilian Yua 2020	Diseñar la ruta que mayor cobertura de lugares turísticos ofrezca en la ciudad de Xiamen, China, teniendo en cuenta tours de varios días, con 18 hoteles cinco estrellas disponibles y 38 posibles atracciones turísticas para visitar. Además de la consideración del aeropuerto y dos estaciones de descanso para viajes terrestres. Además, debe permitir el diseño de la ruta por parte del usuario y considerar los tiempos de viaje terrestre.	El algoritmo propuesto demuestra una mejora significativa del 11,5% aproximadamente respecto a otros algoritmos de solución (memético, genético, optimización por enjambre de partículas y colonia de hormigas). Además, permite una personalización de las rutas mayor a los métodos anteriores y una disminución en los tiempos de viaje de 402 min a 361 min para la solución óptima.	[26]

A mathematical model and metaheuristics for Time Dependent Orienteering Problem	Aldy GUNAWAN, Zhi YUAN, Hoong Chuin LAU. 2014	Diseñar una guía turística para los visitantes de dos parques temáticos muy populares en Asia, teniendo en cuenta que el tiempo de espera de cada parque varía con el tiempo. El objetivo es maximizar la utilidad general de las atracciones visitadas durante el periodo disponible de visita del turista, teniendo en cuenta que cada instancia se genera para cada visitante sobre la marcha en función de sus preferencias personales y el tiempo disponible que este posea. Luego se espera que el sistema de guía turístico calcule una buena solución en un tiempo aceptable.	La solución del algoritmo presentado arrojó la ruta óptima para el parque temático dejando como resultado la solución para 17 nodos y 36 pasos de tiempo resueltos para un tiempo óptimo de 15 minutos, reduciendo el horizonte de tiempo inicial. A partir de los resultados experimentales, mostramos que el enfoque propuesto, búsqueda local iterada con tamaño de perturbación adaptativo y reinicio intensificado probabilístico, parece ser rápido y efectivo: en el tiempo de cálculo de un segundo, logra encontrar el óptimo solución para la mayoría de los casos considerados.	[27]
Solving multi-objective team orienteering problem with time windows using adjustment iterated local search.	Indri Hapsari, Isti Surjandari & K. Komarudin 2019	Uno de los problemas que enfrenta el turismo es cómo hacer que los itinerarios sean más efectivos y eficientes. Este es un caso de Java Oriental, con 16 destinos turísticos y 56 instancias y otro más grande que consta de 100 destinos. El objetivo es plantear una ruta, con el fin de maximizar la puntuación y minimizar el tiempo necesario para el itinerario del turista. Maximizar la puntuación significa recopilar un máximo de varios tipos de puntuación de cada destino que se visita y minimizar el tiempo significa reducir al mínimo el tiempo de viaje y el tiempo de visita en el itinerario.	El resultado muestra que el modelo propuesto proporcionará un itinerario con menos número de destinos visitados 4,75% pero tiene un puntaje total más alto 8, 77% y 3836, 87% más rápido, en comparación con otros métodos.	[28]

Con la anterior revisión bibliográfica, se demuestra la aplicabilidad del modelo previamente expuesto para la solución de problemáticas relacionadas con diseños de rutas, obedeciendo a magnitudes variables y tiempos de atención estipulados. Por lo anterior, se demostró la conveniencia de efectuar las rutas con la asignación de recursos policiales para el control de protestas mediante una adaptación del problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo.

B. Casos de prueba

Teniendo en cuenta la naturaleza del proyecto, cabe resaltar que los casos de prueba corresponden a datos para validar el funcionamiento del diseño propuesto por el equipo, más no a un levantamiento de datos de campo. Así, se realizó la generación de múltiples escenarios, con diversas variaciones entre sí, para abarcar un conjunto representativo de datos y evidenciar la capacidad del diseño en escenarios realistas. Para la construcción de dichos casos de prueba se consideró lo expuesto en la literatura consultada. En esta subsección se describirá de forma detallada la metodología usada para la creación de los diversos casos de prueba. La validación del proyecto usará un experimento computacional basado en simulación discreta y modelos de optimización.

1. Generación de instancias

Para la construcción de las instancias se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

a) Nodos

Para este problema, los nodos corresponden a los focos de protestas mapeados en la ciudad, así como a las estaciones de policía de Cali. Dichas estaciones son el inicio y fin de las diversas rutas a generar y las emisoras de los recursos necesarios para controlar las protestas. Cabe resaltar que en la generación de los casos de prueba no siempre se tuvo en consideración la totalidad de los nodos, pues teniendo en cuenta la diversidad de escenarios requerida, se consideraron diferentes cantidades de focos seleccionados de manera aleatoria, así como de estaciones de policía. De cada una de estas combinaciones se generaron diferentes casos de prueba variando los parámetros asociados para generar mayor robustez al modelo En la TABLA III se presenta el listado de focos de protestas identificados y en la TABLA IV se muestran las estaciones de policía de Cali.

TABLA III

FOCOS DE PROTESTAS IDENTIFICADOS EN CALI

Número del foco	Nombre del foco	Número del foco	Nombre del foco
1	Siloé	11	Unidad Deportiva
2	Univalle	12	Universidades
3	Puerto Rellena	13	Plaza de Toros
4	Paso del Comercio	14	Diamante
5	Calipso	15	Cañasgordas
6	Sameco	16	Menga
7	Juanchito	17	Universidad Autónoma
8	La Luna	18	Chiminangos
9	Portada al Mar	19	Las Orquídeas
10	Loma de la Cruz	20	Puente de los Mil Días

[8]

TABLA IV

ESTACIONES DE POLICÍA DE CALI

Número de la estación	Nombre de la estación
1	Estación de Policía Floralia
2	Estación de Policía Las Américas
3	Estación Metropolitana de Cali
4	Estación de Policía El Guabal
5	Estación de Policía La María
6	Estación de Policía Nueva Floresta

[8]

(1) *Priorización de nodos*

Cada nodo se caracterizó mediante su valor correspondiente a los criterios de magnitud y nivel de riesgo:

- Magnitud

Se refiere a la cantidad de personas partícipes en la manifestación. Dicha magnitud se simuló teniendo en cuenta los datos históricos de los nodos identificados. Sin embargo, el comportamiento de las magnitudes no estuvo limitado a los rangos identificados, pues la variabilidad de las manifestaciones permite considerar, para un mismo nodo, magnitudes bastante diversas. Para efectos de la simulación, estos valores variaron de manera aleatoria.

- Nivel de riesgo

Se le asigna una calificación al foco según la posibilidad de generación de estragos a su alrededor en los niveles muy alto, alto, medio o bajo. Acudiendo a la conversión de variables cualitativas a cuantitativas, se propuso una escala valorativa donde se califica el nivel de riesgo de forma numérica según los rangos establecidos. Esta escala se aprecia en la Fig. 5. Cabe aclarar que, para la generación de las instancias, los valores asociados al riesgo varían indistintamente, esto con el fin de generar una diversidad suficiente de panoramas a atender. El nivel de riesgo asociado de cada uno de los focos de protesta se puede determinar mediante el historial de situaciones que se hayan presentado en el foco, pues se tiene una identificación previa de los mismos para posteriormente hacer su caracterización. Los organismos de control poseen la información que permite hacer aproximaciones a los valores a asignar según la escala valorativa. Las principales consecuencias que se tienen en cuenta son las pérdidas humanas, la cantidad de heridos, los daños a bienes públicos y privados, por mencionar algunos.

1 a 3	3 a 6	6 a 8	8 a 10
Nivel bajo	Nivel moderado	Nivel Alto	Nivel muy alto

Fig. 5. Escala valorativa diseñada para calificar el nivel de riesgo de forma numérica

- Índice de priorización

Se considera el planteamiento propuesto por la metodología *P-Median* respecto a la multiplicación de dos valores, con unidades aparentemente incompatibles, pero que permite tener un valor de calificación para priorizar un nodo. En este caso, los valores a multiplicar fueron el nivel de riesgo y la magnitud asociada a cada foco, obteniendo como resultado el denominado índice de priorización. Dicho resultado, se considera el elemento fundamental del modelo, mediante el cual se realizó el diseño de rutas y asignación de recursos. La relación entre estos dos valores resulta ser una forma apropiada de categorizar los nodos, pues si uno de los focos presenta una gran cantidad de personas, pero no tiene un nivel de riesgo tan alto, no merece tanta atención como uno de menor magnitud que pueda llegar a ser más peligroso. La Ecuación 1 presenta la fórmula para calcular dicho índice [29].

$$\text{Índice de priorización } (IP_j) = M_j * NR_j \quad (1)$$

Donde, M_j corresponde a la magnitud del foco $j \in J$, NR_j corresponde al nivel de riesgo del foco $j \in J$ y J representa el conjunto de los focos de protestas a considerar en el problema.

La TABLA V. presenta un ejemplo de un caso de prueba cualquiera donde se muestra la calificación de cada nodo según los dos criterios establecidos y el cálculo del índice de priorización individual. Primero se tienen los nodos seleccionados de manera aleatoria, que para este caso fueron la totalidad de ellos, así como las magnitudes en número de personas con los respectivos niveles de riesgo asociados, igualmente aleatorios. Por último, el cálculo del índice de priorización individual de cada nodo mediante el cual se hizo la asignación de los recursos policiales.

TABLA V
EJEMPLO DE CALIFICACIÓN DE LOS NODOS

Número de foco	Nombre del foco	Magnitud (Número de personas)	Nivel de riesgo (según daños materiales o número de personas lesionadas)	Valor según el nivel de riesgo	Índice de priorización del foco
1	Siloé	992	Nivel muy alto	10	9920
2	Univalle	644	Nivel bajo	2	1288
3	Puerto Rellena	823	Nivel muy alto	8	6584
4	Paso Comercio	527	Nivel bajo	1	527
5	Calipso	364	Nivel moderado	3	1092
6	Sameco	335	Nivel bajo	1	335
7	Juanchito	926	Nivel moderado	4	3704
8	La Luna	100	Nivel moderado	3	300
9	Portada al Mar	283	Nivel moderado	5	1415
10	Loma de la Cruz	493	Nivel bajo	2	986
11	Unidad Deportiva	472	Nivel moderado	3	1416
12	Universidades	305	Nivel bajo	2	610
13	Plaza de Toros	666	Nivel Alto	6	3996
14	Diamante	821	Nivel muy alto	10	8210
15	Cañas Gordas	697	Nivel muy alto	9	6273
16	Menga	816	Nivel moderado	3	2448
17	U. Autónoma	523	Nivel muy alto	8	4184
18	Chiminangos	772	Nivel moderado	5	3860
19	Las orquideas	642	Nivel bajo	1	642
20	Puente de los mil días	366	Nivel muy alto	10	3660

(2) *Distancia entre nodos*

Otro aspecto importante para la generación de las instancias es la distancia entre los nodos seleccionados. Para esto, se recurre al diseño de una matriz donde se establecen las distancias entre cada uno de los nodos identificados, y entre estos y las estaciones de policía (Ver Anexo 3, Hoja Matriz distancia total de nodos). Para el establecimiento de las distancias entre los nodos, se descartó la posibilidad de hacerlo mediante geometría euclidiana, pues mediante esta técnica, se desconocen los obstáculos o las vías de tránsito. Por ende, se recurrió al uso de la herramienta digital Open Source Routing Machine. Dicha herramienta, permitió el cálculo de distancias reales entre nodos considerando las vías posibles de llegada. En la Fig. 6 se evidencia la estipulación de una ruta realista de ejemplo para recorrer los nodos Estación de Policía Las Américas, Puente de los Mil Días, Estación de Policía Nueva Floresta, Calipso, La luna, Estación de Policía Metropolitana [30].

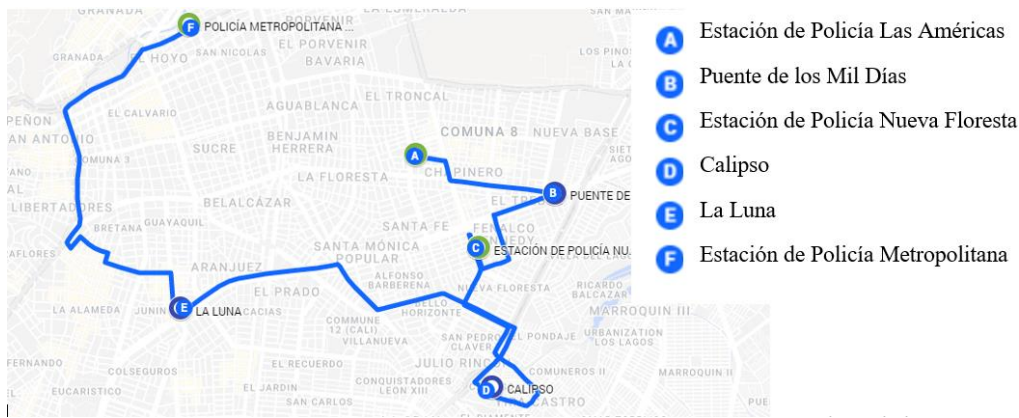


Fig. 6. Diagrama ilustrativo donde se demuestra el cálculo de rutas usando distancias reales.

(3) Ventanas de tiempo

En este problema, las ventanas de tiempo se consideran fundamentales, pues estipulan las franjas de tiempo en las cuales es pertinente llegar al foco para atender la concentración y retomar su comportamiento pacífico. El establecimiento de las ventanas de tiempo se realiza individualmente para cada foco y están sujetas a altas variaciones de una instancia a otra. Para generar la ventana de tiempo se debe considerar la hora temprana para llegada oportuna y la hora tardía para llegada oportuna, representando el mínimo y máximo instante de tiempo, respectivamente, entre los que resulta relevante atender el foco determinado. Se reconoce que, bajo el contexto manejado, las protestas no comienzan en horarios nocturnos, ni sobrepasan las 24 horas de duración.

b) Asignación de recursos a nodos

La asignación de recursos policiales se realiza de la siguiente manera según bases de las organizaciones. Cada estación policial cuenta con un número específico de hombres, los cuales son transportados en *vehículos kronos* con capacidad máxima de 13 personas (para el contexto presentado). También, las estaciones de policía disponen de una cantidad de tanquetas disponibles. A cada foco de protestas se le hará la asignación de sus recursos bajo las siguientes condiciones:

- Será asignado un escuadrón de 10 uniformados por cada 100 personas en concentraciones de riesgo bajo o medio.
- Será asignado un total de 42 uniformados por cada 300 personas para las concentraciones de riesgo alto o muy alto.
- Será asignada una tanqueta por cada 500 personas para las concentraciones de riesgo alto o muy alto

[20]

2. Formato de los casos de prueba

Teniendo en cuenta lo encontrado en la literatura, todos los casos de prueba generados deben estar contruidos bajo el mismo formato. Esto con el fin de garantizar la correcta comprensión y utilización de estas. Cabe recalcar que, aunque la relevancia con que cuentan los datos en un proyecto de aplicación es muy alta, para este caso, el levantamiento de datos es ajeno al propósito del proyecto, pues el éxito de este recae en la robustez del modelo a diseñar para solucionar un problema bajo escenarios muy diversos. A continuación, se describe el formato propuesto para la construcción de las instancias de este proyecto.

El formato está constituido por tres bloques

El primer bloque se compone de la siguiente información:

$i \quad j$

Donde,

i = número de estaciones de policía a considerar

j = número de focos de protestas a considerar

En el segundo bloque se encuentra la siguiente información:

$x \quad y \quad z \quad w$

Donde,

x = número asignado de la estación de policía

y = número de uniformados disponibles en la estación

z = número de tanquetas disponibles en la estación

w = número de *vehículos kronos* para el transporte de uniformados

El tercer bloque contiene la siguiente información:

$m \quad n \quad o \quad p \quad r \quad t \quad g \quad h \quad e \quad s$

Donde,

m = número asignado al foco de protesta.

n = nivel de riesgo del foco.

o = magnitud del foco.

p = indicador de priorización del foco.

r = demanda de uniformados del foco.

t = binaria correspondiente a la demanda de tanquetas (1, en caso de requerir; 0, en otro caso).

g = cantidad de tanquetas demandadas por el foco.

h = ventana de tiempo temprana para llegada oportuna (en formato horario de 24 horas).

e = ventana de tiempo tardía para llegada oportuna (en formato horario de 24 horas).

s = demanda de tiempo, en horas, para atender el foco.

[31]

3. *Instancia considerada*

Se seleccionó una instancia en particular para realizar la explicación del formato y aplicar la regla de asignación y ruteo. En la Fig. 7 se evidencia la instancia generada en su debido formato.

3	10								
2	184	2	14						
3	196	3	15						
6	138	2	11						
16	10	115	1150	16	0	0	10	13	3
8	8	723	5784	101	1	2	12	14	1
20	4	427	1708	43	0	0	13	19	3
13	10	785	7850	110	1	2	6	9	2
12	4	556	2224	56	0	0	7	15	1
5	10	663	6630	93	1	2	16	20	1
7	3	441	1323	44	0	0	14	17	3
19	8	717	5736	100	0	2	11	15	2
11	4	793	3172	79	0	0	14	21	2
14	8	998	7984	140	1	2	16	17	2

Fig. 7. Instancia considerada en su formato de presentación.

La matriz de distancias entre nodos para los focos considerados para esta instancia se puede apreciar en el Anexo 3, Hoja Matriz distancia nodos instancia. En la Fig. 8. se presenta la distribución geográfica de los focos a considerar y las estaciones policiales disponibles para suplir sus demandas. Con base en las distancias entre los nodos, sus indicadores de priorización y las ventanas de tiempo, se realiza el proceso de asignación de focos a estaciones.



Fig. 8. Ubicación geográfica de los nodos y las estaciones de policía a considerar en la instancia propuesta.

C. Establecimiento de KPIs

Mediante la revisión de literatura se encontró una constante fijación por establecer indicadores de procesos que relacionan el nivel de desempeño obtenido sobre el nivel total posible de desempeño. Con base en esto, se analiza los indicadores de los modelos de ruteo y se encuentra un establecimiento del desempeño como la relación entre la demanda satisfecha dividida entre la demanda total. De igual forma, tomando lo expuesto en el modelo *P-Median*, donde se presenta un planteamiento de índices de priorización producto de la multiplicación de dos magnitudes importantes para el contexto del problema, se considera conveniente adaptar un indicador similar para evidenciar el desempeño del problema. Como resultado se plantea la cobertura de los focos de protestas como principal indicador a maximizar. Dicho indicador corresponde a la sumatoria de los índices de priorización de los nodos atendidos dividido entre la sumatoria de los índices de priorización de todos los nodos considerados. En la TABLA VI se plantea la variable a considerar y el mecanismo de evaluación.

TABLA VI
VARIABLE E INDICADOR DE DESEMPEÑO A CONSIDERAR

Variable	Objetivo	Descripción	Indicador
Atención de las protestas en el territorio	Medir, respecto al índice de priorización, la atención a los focos en el terreno a considerar.	<p>La variable representa la cobertura alcanzada para el territorio considerado.</p> <p>Se expresa en unidades porcentuales. A mayor porcentaje, se logra un mayor éxito de la labor de cobertura. Se mide mediante la relación entre los indicadores de priorización de los nodos atendidos y la sumatoria de los indicadores de priorización de todos los nodos considerados.</p>	<p>Cobertura de los focos de protestas (CFP)</p> $CFP = \frac{\sum IP_j}{\sum IP_i} * 100 \quad (2)$ <p>$j \in X$, X representa el conjunto de los focos seleccionados para ser atendidos.</p> <p>$i \in I$, I representa todos los focos considerados en el problema.</p>

1. Situación actual

El proceso de asignación de recursos policiales, según literatura consultada, se realiza mediante asignación manual, siguiendo los modelos de ruteo tradicional. De este modo, se establecen índices que resaltan algunos focos respecto a otros y, de esta forma, atender sus demandas de manera prioritaria. Adaptando lo expresado por el modelo *P-Median*, se hace la asignación de los diferentes nodos, teniendo en consideración el indicador de priorización anteriormente expuesto, las estaciones de policías aptas para satisfacer las demandas de cada foco y las ventanas de tiempo individuales. En esta sección se retomó el ejemplo expuesto previamente para simular la situación actual y proponerlo como punto de comparación para determinar la mejoría esperada. [15], [29], [32].

Bajo el caso de prueba generado, tomándolo como caso característico, se realiza la asignación de los recursos policiales de las tres estaciones consideradas para lograr atender las protestas ubicadas en los 10 nodos seleccionados aleatoriamente. La evidencia del proceso de asignación y diseño de rutas se presenta en el Anexo 3, Hoja Instancia y Situación Actual. Por su parte, las rutas establecidas para esta instancia en particular se pueden apreciar en la Fig. 9. En la TABLA VII, se presenta el resumen de la situación actual, considerando el indicador previamente seleccionado y se estipula una meta como mejora de dicho indicador.

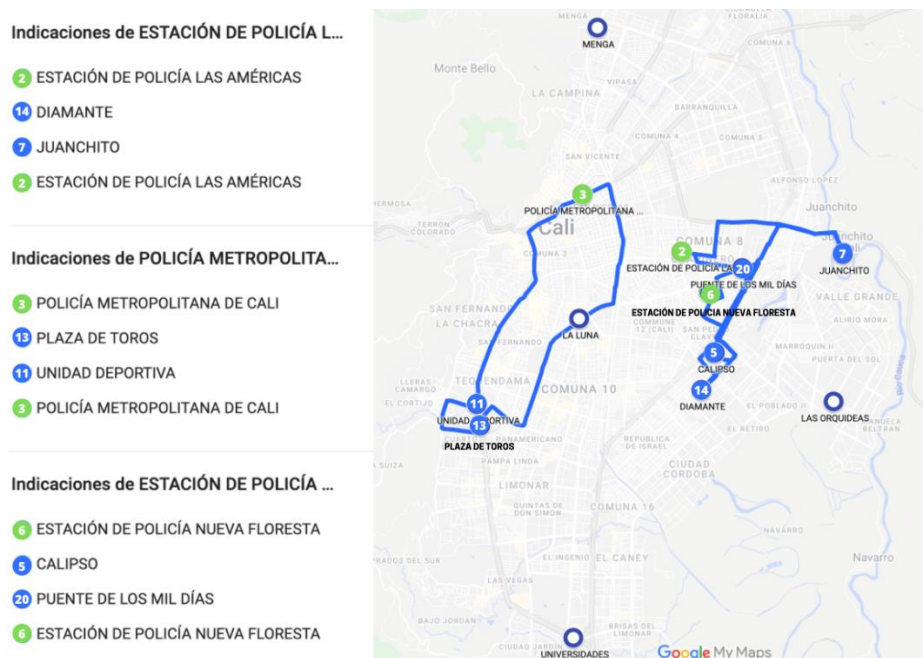


Fig. 9. Rutas resultado para la instancia considerada.

TABLA VII SITUACIÓN ACTUAL INDICADOR DE DESEMPEÑO

Variable	Actualidad	Meta
Atención de las protestas en el territorio.	$\text{Cobertura de los focos de protestas (CFP)} = \frac{28\ 667}{43\ 561} * 100 = 66\%$	Se espera mejorar este indicador, como mínimo, en un 10%.

La meta establecida se justifica por medio de la literatura consultada relacionada con los problemas abordados por la orientación de equipos con ventanas de tiempo. Como resultado de la investigación, se encontró que, en promedio, las problemáticas tratadas mediante este modelo mejoran en un 10% respecto a sus condiciones iniciales. Por lo tanto, resultó realista esperar, bajo el contexto actual, que la cobertura de los focos de protestas pase de 66% a 76% una vez sea probado el modelo [24]–[26].

III. ANALIZAR

A. Análisis de Oportunidad

La problemática contemplada en este proyecto se destaca por el número de posibles soluciones que se pueden llegar a tener. La alta variabilidad de resultados que se puede presentar bajo las mismas condiciones, simplemente modificando el método de asignación, excluye a esta problemática de una clasificación trivial. Por otra parte, las reglas de decisión empleadas en cada uno de los posibles casos generan una alteración contundente en los resultados obtenidos, demostrando la condición de sensibilidad del problema.

Además, al tratarse de un problema de asignación de recursos, pues se estipulan rutas para atender diferentes nodos con una capacidad de recursos limitada, las consideraciones que se tiene para asignar dichos recursos, influyen directamente en el resultado del planteamiento. Como muestra de lo anterior, se rescata de apartados anteriores el estado actual de la problemática, siguiendo la regla de decisión del mayor índice de priorización, evidenciado en la Fig.9. Posteriormente, para evidenciar la variabilidad existente, se propone un nuevo método de selección basado en la asignación de los recursos policiales a aquellos focos de protestas que tengan la menor duración. De esta forma, se priorizan para atender los focos de duración más corta, pues se supone que, al atender primero estos focos, cuando termina su intervención, posiblemente se puedan atender otros focos, no ocurriendo lo mismo de manera inversa, lo que posibilita una la mayor atención de focos. La asignación mediante esta regla de decisión se evidencia en el Anexo 3, Hoja Asignación por duración.

Para la asignación de los dos métodos previamente expuestos, se utilizó el mismo escenario (nodos seleccionados y recursos disponibles). Sin embargo, las rutas de solución difieren con las presentadas inicialmente como se observa en la Fig. 10. De igual forma, el diseño de rutas está sujeto a modificaciones por las reglas de asignación seguidas. Por lo tanto, el resultado puede ser aún más sensible, considerando que no es una asignación única. A manera comparativa, se presenta en la TABLA VIII el resumen de ambos casos de asignación, considerando las mismas condiciones iniciales, modificando sólo las reglas de decisión. De esta forma se evidencia la considerable variación entre los resultados y la influencia de las estrategias de decisión en los resultados de este tipo de problemas.



Fig. 10. Comparación de rutas planteadas para asignación de recursos por índice de priorización y por menor duración de la ventana de tiempo.

TABLA VIII

COMPARACIÓN ENTRE DOS POSIBLES MÉTODOS DE ASIGNACIÓN PARA EL MISMO ESCENARIO DEL PROBLEMA

	Asignación según índice de priorización	Asignación según menor duración de la ventana de tiempo
Descripción del método de asignación	Se priorizan aquellos focos con mayor índice de priorización, teniendo en cuenta las distancias entre las estaciones de policías y la disponibilidad de los recursos demandados	Se priorizan aquellos focos que tienen una menor duración, teniendo en cuenta las distancias entre ellos y las estaciones de policía y la disponibilidad de los recursos disponibles
Estaciones de policía consideradas	<ul style="list-style-type: none"> Estación Las Américas Estación Metropolitana Estación Nueva Floresta 	<ul style="list-style-type: none"> Estación Las Américas Estación Metropolitana Estación Nueva Floresta

Focos de protestas considerados	<ul style="list-style-type: none"> • Calipso • Juanchito • La Luna • Unidad deportiva • Universidades • Plaza de toros • Diamante • Menga • Puente de los mil días • Las orquídeas 	<ul style="list-style-type: none"> • Calipso • Juanchito • La Luna • Unidad deportiva • Universidades • Plaza de toros • Diamante • Menga • Puente de los mil días • Las orquídeas
Focos atendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Calipso • Juanchito • Unidad deportiva • Plaza de toros • Diamante • Puente de los mil días 	<ul style="list-style-type: none"> • Calipso • La Luna • Unidad deportiva • Universidades • Plaza de toros • Menga
Focos NO atendidos	<ul style="list-style-type: none"> • La Luna • Las orquídeas • Universidades • Menga 	<ul style="list-style-type: none"> • Puente de los mil días • Diamante • Las orquídeas • Juanchito
Asignación de focos según estación de policía	<p>Estación Las Américas: Diamante y Juanchito</p> <p>Estación Metropolitana: Plaza de toros y unidad deportiva</p> <p>Estación Nueva Floresta: Calipso y Puente de los mil días</p>	<p>Estación Las Américas: Calipso y Unidad deportiva</p> <p>Estación Metropolitana: Universidades y Plaza de toros</p> <p>Estación Nueva Floresta: La Luna y Menga</p>
Resultado según KPI	Cobertura de los focos de protestas=66%	Cobertura de los focos de protestas=62%

La situación presentada anteriormente es un claro ejemplo de las distintas variaciones que se pueden llegar a tener con este tipo de problemas de asignación. Como se puede evidenciar, la diferencia entre los métodos empleados resulta ser un factor determinante para los resultados del indicador de desempeño establecido. Encontrar el mejor método de asignación se traduce en un mejor desempeño del indicador. Por ende, la gran cantidad de opciones de solución que se presenta para este tipo de problemas lo designan como problema de decisión. Al enfocar esta condición para el problema de control de protestas, se evidencia una relación estrecha, pues se deben considerar reglas de decisión para realizar la asignación de los recursos a los nodos. Igualmente, se debe decidir qué rutas tomar para llegar a los nodos, qué tipos de recursos asignar para cada concentración, cuáles serán las estaciones que atenderán a cuáles nodos. También, debido a las limitaciones de recursos, se deben establecer reglas de priorización entre los focos para su atención. Estas decisiones que interfieren directamente en el comportamiento del indicador de desempeño deben ser consideradas en el método de solución. Así pues, es preciso catalogar el problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo como un problema de decisión bastante complejo [33], [34].

Es relevante reconocer que no siempre se puede obtener una solución óptima a los problemas de operaciones. Aunque existen diversas maneras de lograr buenas soluciones según los objetivos que se quieran alcanzar, en algunos casos, la optimalidad es casi imposible de alcanzar. Dentro del área de optimización, se les conoce a los problemas con las características anteriormente mencionadas como problemas tipo *NP-Hard*. Este conjunto de problemas de optimización ampliamente estudiados, además de ser problemas de decisión, son problemas con características como la asignación de recursos limitados, el diseño de rutas, entre muchas otras cualidades, presentando una alta complejidad debido a la diversidad de posibles soluciones factibles que se pueden encontrar. Por ende, las líneas de investigación se han enfocado en tratar de encontrar las mejores soluciones, variando los métodos de solución para este tipo de problemas, considerando su alto nivel de dificultad [35].

Según la literatura consultada, el problema de orientación (Orienteering Problem, en inglés) es catalogado como un problema *NP-Hard*. En su forma genérica, la diversidad de reglas de decisiones que se pueden manejar para asignar los recursos le otorga una alta complejidad. Ahora bien, para este caso en particular, se tiene una adición de condiciones que incrementan la complejidad del modelo. Por una parte, se considera la orientación de equipos, representando esto la asignación de un conjunto de recursos heterogéneos para cada nodo a atender. Por otra parte, los problemas con ventanas de tiempo representan limitantes para las asignaciones. En estos, se deben considerar los tiempos específicos en los que se pueden atender los diferentes focos, y las decisiones se limitan no solo por los recursos y distancias sino por las ventanas de tiempo. Adicionalmente, se deben diseñar las rutas teniendo en cuenta los recursos renovables, pues la duración de la atención a un nodo condiciona si ese recurso puede o no atender otro foco cumpliendo su ventana de tiempo. También, el cumplimiento compartido de la demanda aporta restricciones frente a la cantidad de recursos a enviar a cada foco, se requiere una sinergia con las demás estaciones para saber qué proporción cumplirá cada una. En conclusión, este problema representa un reto de solución. En primera instancia, por la infinidad de reglas de asignación que se pueden seguir para atender a los nodos considerados. Posteriormente, por el incremento de condiciones que adicionan complejidad a un problema ya catalogado como *NP-Hard*. La búsqueda de soluciones que mejoren el indicador de desempeño y el tiempo computacional del modelo cuenta con una alta relevancia [36].

B. Revisión de literatura

Debido a la complejidad presentada por el problema a solucionar, los investigadores han venido trabajando en encontrar mejores métodos de asignación mediante el diseño o adaptación de modelos de optimización. Para establecer la estrategia de solución para el proyecto en cuestión, se realizó un análisis exploratorio sobre las opciones evaluadas por otros autores para encontrar los métodos de solución más eficientes. Cabe resaltar que, durante esta investigación, se consideraron métodos empleados en escenarios reales, así como en escenarios simulados, pues lo que se busca es evidenciar los métodos empleados para resolver este tipo de problemas, más no la aplicabilidad de estos. Mediante la TABLA IX se presenta la síntesis de la investigación realizada por el equipo.

TABLA IX

MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE ORIENTACIÓN DE EQUIPOS CON VENTANAS DE TIEMPO

Título	Autor (es) y año	Método (s)	Resultado (s)	Referencias
Solving multi-objective team orienteering problem with time windows using adjustment iterated local search.	Indri Hapsari, Isti Surjandari, K. Komarudi. 2019	Búsqueda local iterada ILS. Pruebas de caso con: Programación lineal entera mixta. Multi-start simulated annealing.	Incremento de la satisfacción de los destinos visitados del 8.774% y un 3836.877% más rápido (minimización de tiempo).	[37]
Team Orienteering Problem with Time Windows and Time-dependent Scores.	Vincent F. Yua, Parida Jewpanya, Shih-Wei Lin, A. A. N. Perwira Redi. 2018	Algoritmo de colonia artificial híbrida de abejas (HABC).	Soluciones TOPTW-TDS de alta calidad. Solución óptima de cada pequeña instancia de TOPTW-TDS.	[38]

Iterated local search for the team orienteering problem with time windows.	Pieter Vansteenwegen, Wouter Souffriau, Greet Vanden Berghe, Dirk Van Oudheusden 2009	Metaheurística iterada de búsqueda local simple. (The heuristic combines an insertion step and a shaking step to escape from local optima).	La brecha promedio con las soluciones más conocidas es solo del 1,8 % y el tiempo de cálculo se reduce con un factor de varios cientos en comparación con otros algoritmos. Incluso cuando el tiempo de cálculo se limita a 1 s, se obtienen resultados de alta calidad.	[39]
Genetic Algorithm Solving the Orienteering Problem with Time Windows.	Joanna Karbowska-Chilinska, Pawel Zabielski. 2014	Algoritmo genético (GA). Usando mutación específica basada en la idea de inserción y sacudir pasos tomados de búsqueda local iterado (ILS).	La repetición del paso de mutación para la misma ruta durante una iteración de GA puede mejorar la solución, superando el resultado de la puntuación ILS.	[40]

Para este caso, se lograron encontrar diversos métodos de solución aplicados al tipo de problema identificado, teniendo en cuenta las condiciones adicionales de orientación de equipos y ventanas de tiempo. De esta forma, se evidencia una inquietud considerable por encontrar mejores soluciones a este tipo de problemas, no necesariamente enfocadas a la mitigación de protestas. No obstante, con la identificación de los métodos más comunes de selección se puede plantear la discusión sobre la idoneidad de algunos para la adaptación al contexto manejado.

C. Exploración de ideas y selección de alternativa

Teniendo como base la revisión de literatura previamente presentada, se selecciona la alternativa más conveniente para la resolución del problema tratado. De esta forma, se examinan en detalle cada uno de los métodos de solución encontrados y se toman las siguientes determinaciones:

Inicialmente, se hace una aproximación hacia los métodos de búsquedas poblacionales. Dichos métodos, como la colonia de hormigas o la colonia de abejas, presentaban escasa frecuencia de uso entre las opciones analizadas. Además, según la documentación encontrada, los resultados logrados mediante este tipo de mecanismos de solución eran comúnmente superados por otros métodos. Por ende, se considera una opción tentativa de solución, más no la más efectiva para este tipo de problemas, de acuerdo con las condiciones estipuladas.

Adicionalmente, se encuentran registros bibliográficos sobre la implementación de un método poblacional específico, algoritmos genéticos, que presenta diferencias con los mencionados anteriormente. Así pues, se establece este método como una posible alternativa para encontrar soluciones al problema propuesto. No obstante, al revisar en detalle los resultados, no se encontró mayor detalle en las especificaciones de estos, ni en la forma de plantear la codificación. Por ende, no se estipula una superioridad o inferioridad respecto a otros métodos, las comparaciones son escasas. Igualmente, la utilización de este tipo de métodos no resulta ser muy frecuente, por lo que esta alternativa de solución no se posiciona como prioritaria.

Por último, se evidencia una alta frecuencia de implementación para los mecanismos de búsqueda local, los ejemplos más encontrados aluden a las heurísticas y metaheurísticas. Los resultados obtenidos mediante estos métodos de solución presentan valores considerablemente atractivos. Los porcentajes de mejoría respecto a las situaciones iniciales que tenían los problemas dan pie a tener en consideración estas alternativas. Por otro lado, la diversidad de escenarios en los cuales se presentaron resultados positivos evidencia la flexibilidad del método para adaptarse a diferentes situaciones. También, se logra evidenciar una compatibilidad entre los problemas considerados en la literatura y la problemática de la mitigación de protestas, posicionando la implementación de heurísticas y metaheurísticas como una de las mejores alternativas de solución.

Abogando al criterio de expertos, la facilidad de implementación con que cuentan las heurísticas las posiciona como una de las mejores alternativas a seleccionar. Además, mediante un análisis comparativo, se encontró una mayor posibilidad de éxito en la implementación de heurísticas respecto a las metaheurísticas. También, los casos de mayor afinidad con la problemática a analizar, fueron abordados mediante la utilización de heurísticas, específicamente, con el método de búsqueda local iterado (ILS, por sus siglas en inglés).

Con base en lo anterior, se planteó el mecanismo de solución para la problemática de cobertura de protestas, siguiendo los lineamientos de la búsqueda local iterada. Este mecanismo, genera vecindarios locales partiendo de una solución inicial. Posteriormente, compara las posibles soluciones dentro del vecindario y selecciona la mejor según la función objetivo establecida. Este proceso se realiza de manera iterativa, creando en cada solución óptima local un nuevo vecindario. El método alcanza una buena solución cuando ninguna de las posibles soluciones del vecindario es mejor a la actual. Se debe tener en consideración que esta alternativa puede caer en óptimos locales. La mejor manera de mitigar esta condición es la generación de diversas heurísticas o métodos de decisión que permitan explorar la mayor cantidad de vecindarios posibles. Mediante la Fig. 11 se expone gráficamente el comportamiento de la búsqueda local [41].

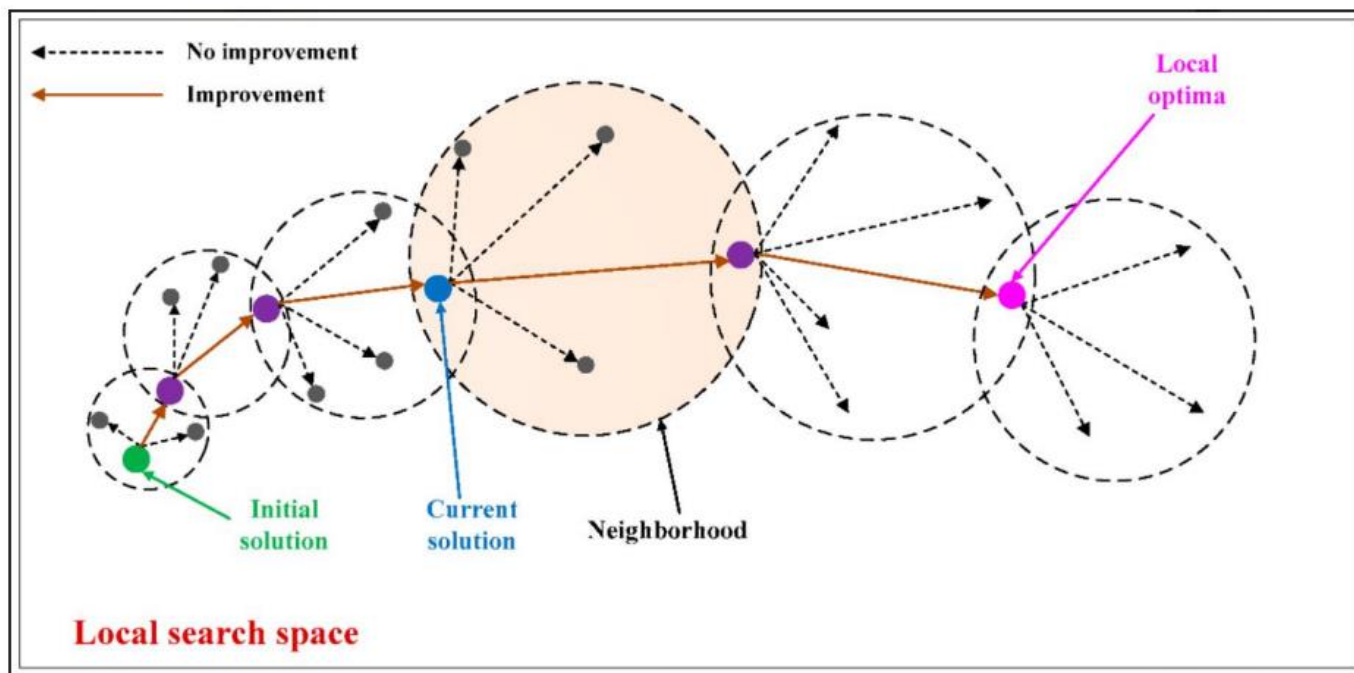


Fig. 11. Explicación gráfica del método de búsqueda local iterativa [42]

D. Objetivos

1. Objetivo general

Diseñar un modelo de programación exacto y aproximado enfocado en la mitigación de protestas en Cali, basado en el problema de Orientación de Equipos con Ventanas de Tiempo.

2. Objetivos específicos

- Caracterizar matemáticamente el problema de Orientación de Equipos con Ventanas de Tiempo para la mitigación de protestas en la ciudad de Cali.
- Diseñar los componentes computacionales de la heurística del *Iterated Local Search* para la resolución del caso de estudio.
- Implementar los modelos propuestos mediante un lenguaje de programación determinado para la solución del problema establecido.
- Diseñar un experimento computacional que permita la validación a pequeña y gran escala de los modelos matemáticos para el problema de mitigación de protestas en Cali.

E. Plan de trabajo (PdT)

El plan de trabajo de este proyecto se estipula en la TABLA X. Adicionalmente, en el Anexo 4 se soporta y amplía la planificación realizada por el equipo.

TABLA X
PLAN DE TRABAJO

Objetivo específico	Actividades	Área IISE	Herramienta	Entregable	Fecha de inicio	Fecha de fin
Caracterizar matemáticamente el problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo para la mitigación de protestas en la ciudad de Cali.	1.1 Identificar parámetros.	2. Operations Research and Analysis.	Investigación de operaciones: enfoque de modelado.	Modelo matemático revisado por el director del proyecto y el equipo desarrollador.	Ago 1/ 22	Ago 5/ 22
	1.2 Identificar conjuntos.				Ago 1/ 22	Ago 5/ 22
	1.3 Formulación de restricciones.				Ago 8/ 22	Ago 26/ 22
	1.4 Definir función objetivo.				Ago 8/ 22	Ago 26/ 22
	1.5 Definir naturaleza de las variables.				Ago 29/ 22	Sep 2/ 22
	1.6 Realizar análisis dimensional de las restricciones.				Ago 22/ 22	Sep 2/22
Diseñar los componentes computacionales de la heurística del <i>Iterated Local Search</i> para la resolución del caso de estudio.	2.1 Plantear método de codificación.	2. Operations Research and Analysis.	Investigación de operaciones: procedimiento heurístico.	Algoritmo. Componentes computacionales de la heurística.	Sep 5/ 22	Sep 7/ 22
	2.2 Establecer la codificación del problema.				Sep 8/ 22	Sep 19/ 22
	2.3 Realizar la decodificación.				Sep 20/ 22	Sep 29/ 22
	2.4 Establecer la regla de movimiento (Estructura de vecindario)				Sep 5/ 22	Sep 7/ 22
	2.5 Creación de la solución inicial.				Sep 8/ 22	Sep 14/ 22
	2.6 Definir las estrategias de búsqueda según <i>Iterated Local Search</i> .				Sep 23/ 22	Sep 29/22
Implementar los modelos propuestos mediante un lenguaje de programación determinado para la solución del problema establecido.	3.1 Seleccionar el lenguaje de programación.	2. Operations Research and Analysis	NA.	Código probado en el lenguaje de programación seleccionado.	Sep 30/ 22	Sep 30/22
	3.2 Adaptar los componentes computacionales al lenguaje de programación seleccionado.		Programación entera: aplicación y técnicas de modelado.		Oct 3/ 22	Oct 19/22

	3.3 Realizar debugging del código.		NA.		Oct 18/22	Oct 27/22
Diseñar un experimento computacional que permita la validación a pequeña y gran escala de los modelos matemáticos para el problema de mitigación de protestas en Cali.	4.1 Inserción de los escenarios simulados al código realizado.	2. Operations Research and Analysis.	Metodología de simulación.	Resultados del experimento computacional.	Oct 31/ 22	Nov 1/ 22
	4.2 Validación de la formulación.		NA.		Nov 2/ 22	Nov 8/ 22
	4.3 Medición de indicadores.	5. Quality & Reliability Engineering.	NA.		Nov 9/ 22	Nov 16/22
	4.4 Análisis de resultados.		NA.		Nov 9/ 22	Nov 16/ 22
	4.5 Modificación de la heurística y ajustes.	2. Operations Research and Analysis.	Programación entera: aplicación y técnicas de modelado.		Nov 15/ 22	Nov 18/ 22
	4.6 Realización de pruebas.				Nov 17/ 22	Nov 21/ 22

IV.DISEÑAR

A. Desarrollo del diseño de la solución

Teniendo en cuenta la naturaleza este proyecto como investigación aplicada, la propuesta de solución se refleja en un modelo matemático que permita, en este caso, la asignación asertiva y oportuna de los recursos policiales disponibles para atender a los diversos focos de protestas que se puedan presentar en la ciudad de Cali. Así pues, se plantean los supuestos que se estipulan en el modelo para su funcionamiento. Adicionalmente, se describe paso a paso la composición de dicho modelo, entendiendo los conjuntos planteados, los parámetros que se consideraron, las variables diseñadas, así como la función objetivo y el conjunto de restricciones que hacen posible el correcto desempeño del modelo.

1. Supuestos del modelo

Para el desarrollo de este modelo se tiene en cuenta los siguientes supuestos, retomando lo planteado en los requerimientos de apartados anteriores y haciendo alusión a diferentes características que se integran en este diseño:

Consideraciones generales:

- Los recursos deben retornar al mismo origen del cual salieron.
- Se considera una disponibilidad de recursos asociada a cada origen.
- No se permite hacer viajes de un nodo hacia sí mismo.
- Los recursos no finalizan su viaje en un nodo diferente a su origen, siempre deben salir del nodo al cual están atendiendo.
- No siempre se podrán visitar todos los nodos del problema.
- Se tiene un indicador de priorización mediante el cual se decide cuáles nodos visitar
- Se consideran distancias reales entre los nodos

Consideraciones asociadas al Problema de Orientación de Equipos:

- Cada recurso solo visita una vez cada nodo.
- Se pueden enviar varios recursos a un mismo nodo.
- La demanda de recursos es heterogénea y diferente para cada nodo.
- La demanda de cada nodo debe ser cumplida en su totalidad. No se considera cumplimiento parcial de la demanda.

Consideraciones asociadas a las Ventanas de Tiempo:

- Para cada nodo se consideran ventanas de tiempo durante las cuales se considera oportuna la llegada de los recursos para intervenir.

- No se considera retrasos respecto al cumplimiento de las ventanas de tiempo. Si el recurso no llega, como máximo, al final de la ventana de tiempo, no se considera su llegada.
- El tiempo de atención solo se podrá iniciar una vez se abra la ventana de tiempo temprana, así esto implique una espera previa del recurso en el nodo, pues todavía no se considera conveniente hacer la intervención al nodo.
- Se deben tener en cuenta el cálculo de los tiempos de desplazamiento entre nodos para conocer el tiempo de llegada a cada nodo.
- Los tiempos de llegada y de inicio de la atención en un nodo específico no siempre serán iguales.
- Se considera que un recurso termine de atender a un nodo después de que se haya cerrado la ventana de tiempo. Solo se considera la ventana de tiempo para el inicio de la atención.

Consideraciones asociadas a la flota heterogénea:

- Se considera flota heterogénea de vehículos para hacer las rutas: Tanquetas lanza agua y vehículos *kronos*, con capacidades de transportar máximo 4 y 10 policías, respectivamente.
- La demanda de cada tipo de vehículos es diferente en cada nodo.
- Se considera la misma velocidad de viaje para ambos tipos de vehículo (25 km/h)
- Cada vehículo puede generar una ruta independiente
- Un mismo vehículo no puede realizar más de una ruta
- Cada nodo de origen cuenta con una cantidad diferente de vehículos y policías.

Consideraciones asociadas a los recursos renovables:

- Una vez termine de atender a un nodo, el recurso no se consume o desecha, continúa en la misma cantidad a atender los demás nodos de la ruta.
- Se considera un tiempo de atención para cada nodo. Por ende, el transporte debe considerar ese tiempo como espera mientras se libera nuevamente el recurso para seguir atendiendo otros nodos.
- Al no desgastarse durante la ruta, puede que lleguen más recursos de los necesarios a un nodo. Al no haber penalización por utilización de recursos, se puede considerar sin problema.

Consideraciones asociadas al cumplimiento compartido de la demanda:

- La demanda de recursos de cada nodo se puede cumplir desde varios vehículos con diferentes orígenes. Por lo tanto, se asigna una proporción de cumplimiento para cada recurso en específico.
- Siempre el cumplimiento de la demanda debe ser el 100%.

Consideraciones asociadas a múltiples orígenes:

- Existe más de un origen desde el cual se emiten rutas de atención a los nodos.
- Cada origen tiene una disponibilidad específica de cada uno de los recursos.
- No se consideran viajes entre los nodos origen, es decir, los viajes entre estaciones de policía no son permitidos.
- Todos los recursos que salen de un mismo origen deben retornar a él cuando terminen de atender los nodos de la ruta.

2. Definición de conjuntos

- $I := \{1, \dots, i, \dots, I_{max}\}$ Conjunto de focos de protestas que se consideran en el problema, se pueden asemejar a los clientes que se deben atender en un problema de ruteo.
- $D := \{1, \dots, d, \dots, D_{max}\}$ Conjunto de estaciones de policías que se consideran para la solución. Son los *depots* donde se encuentran los vehículos y personal policial.
- $N := \{I \cup D\}$ Unión de los conjuntos I y D . Incluye todos los nodos del problema, estaciones de policía y focos de protesta.
- $K := \{1, 2\}$ Conjunto de tipo de vehículo: tanquetas lanza agua como tipo 1 y vehículo *kronos* como tipo 2.

- A_{dk} := Conjunto de vehículos del tipo k , que se tienen disponibles en la estación de policía d . Por ejemplo, el conjunto $A_{1,22}$ representa el conjunto de vehículos disponibles del tipo 1 (tanqueta lanza agua) en la estación (*depot*) 22. Este conjunto se propone con el fin de identificar la trayectoria individual de cada uno de los vehículos pertenecientes a cada una de las estaciones.

3. Definición de parámetros

Las condiciones bajo las cuales se formuló el modelo implicaban considerar los siguientes datos de entrada:

- **VehDisp_{dk}**: Cantidad conocida de cada tipo de vehículo $k \in K$ con que cuenta cada estación de policía $d \in D$.
- **PerDisp_d**: Cantidad de policías que se encuentran disponibles en cada una de las estaciones de policía $d \in D$.
- **Dist_{mn}**: Distancia real en km que existe desde un nodo cualquiera $n \in N$ hasta otro nodo $n \in N$. Para efectos de cálculo, las distancias de un nodo hasta sí mismo, se consideran negativas, para que el modelo no considere este tipo de desplazamiento. De igual forma, la distancia entre estaciones de policía también se considera negativa, teniendo en cuenta que no se deben considerar estos desplazamientos en el ruteo.
- **VenTem_i**: Ventana de tiempo temprana del foco de protesta $i \in I$, es decir, desde qué instante de tiempo pueden llegar los recursos policiales a intervenir en este foco.
- **VenTar_i**: Ventana de tiempo tardía correspondiente al foco de protesta $i \in I$ hace referencia al máximo instante de tiempo en el que pueden llegar los recursos policiales para que les sea permitido intervenir este nodo.
- **Dura_i**: Duración de la atención requerida del foco de protesta $i \in I$. Este parámetro cobra importancia en el planteamiento de este problema porque, a diferencia del problema de ruteo tradicional, los recursos no se pierden a medida que va avanzando la ruta. En este caso, se espera a que los recursos terminen de intervenir el nodo y continúen su ruta. Se presenta una mayor semejanza con los modelos de ruteo de prestación de servicios.
- **IndPri_i**: El índice de priorización de cada foco de protesta $i \in I$, resulta ser el que le otorga la importancia de atención a cada foco. El cálculo de este parámetro, como se mencionó en apartados anteriores, relaciona la cantidad de personas que hacen parte de la protesta y el nivel de riesgo asociado a cada uno de los focos. Además, este parámetro es de gran importancia para el cálculo de la función objetivo.
- **PolCap_k**: Capacidad máxima de policías que se pueden transportar en cada uno de los diferentes tipos de vehículos que se están considerando. En las tanquetas lanza agua (vehículo tipo 1) se pueden transportar máximo 4 policías, mientras que en los vehículos *kronos* (vehículo tipo 2) se pueden llegar a movilizar hasta 10 policías.
- **Vel**: Velocidad promedio de desplazamiento de vehículos. Esta se establece en un valor de 25 km/h teniendo en cuenta que se trata de desplazamiento de vehículos pesados, de gran tamaño y al interior de la ciudad.
- **GM**: Es un parámetro conocido como la Gran M, representa un valor muy numérico muy grande.

4. Definición de variables

- **x_{imkda}** : Variable binaria que toma el valor de 1 cuando el foco de protesta $m \in N$ sea visitado desde el nodo $i \in N$, por el vehículo específico $a \in A_{dk}$, del tipo $k \in K$, que sale de la estación de policía $d \in D$. Es 0 en el caso contrario.
- **SI_{ikda}** : Esta variable se encarga de guardar el instante de tiempo en que el foco de protesta $i \in I$ empieza a ser atendido por los recursos policiales que vienen en el vehículo específico $a \in A_{dk}$, del tipo de vehículo $k \in K$ que proviene de la estación de policía $d \in D$.
- **v_i** : Esta variable binaria toma el valor de 1 cuando el foco de protesta $i \in I$ es atendido. Es 0 en el caso contrario.

- y_{kda} : Esta variable registra el número de policías que se transportan en el vehículo específico $a \in A_{dk}$, del tipo $k \in K$, que salen de la estación de policía $d \in D$.
- p_{ikda} : Esta variable registra la proporción de la demanda de policías del foco de protesta $i \in I$ que es cumplida por los policías que llegan en el vehículo específico $a \in A_{dk}$, del tipo de vehículo $k \in K$, que viene de la estación de policía $d \in D$.

5. Función Objetivo

El valor que se pretende maximizar, como se explicó en apartados anteriores, es la proporción de atención a los focos de protestas. Este valor se calcula como la multiplicación de la variable de atención al foco específico por el Índice de Priorización dividido la sumatoria de los Índices de Priorización de todos los focos considerados. Así, se pretende que el modelo obtenga un mayor porcentaje de atención cubrimiento, bajo las condiciones dadas, a los nodos que generen una mayor contribución a la función objetivo.

$$\text{maximize } KPI = \frac{\sum_{i \in I} v_i * IndPri_i}{\sum_{i \in I} IndPri_i} \quad (3)$$

6. Restricciones

Para limitar la operatividad del problema según los estándares de los diferentes modelos que se integran en este problema, se establecen diferentes conjuntos de restricciones:

a) Restricciones de flujo

Para garantizar que los diferentes recursos que se consideran en el modelo tengan un comportamiento de ruteo asertivo, se deben generar ciertas restricciones que cumplan con los requerimientos establecidos. A continuación, se presentan las restricciones de flujo establecidas

$$\sum_{i \in I} x_{ijkda} \leq 1, \quad \forall j \in I, d \in D, k \in K, a \in A_{dk}, j \neq i \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{a \in A_{dk}} x_{dikda} \leq VehDisp_{dk}, \quad \forall d \in D, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{imkda} = \sum_{i \in N} x_{mikda}, \quad \forall m \in M, k \in K, d \in D, a \in A_{dk}, m \neq i \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} x_{dikda} = \sum_{i \in I} x_{ikda}, \quad \forall d \in D, k \in K, a \in A_{dk} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} x_{dikda} \leq 1, \quad \forall d \in D, k \in K, a \in A_{dk} \quad (8)$$

$$x_{ijkda} = 0, \quad \forall i \in D, j \in I, k \in K, d \in D, a \in A_{dk}, d \neq i \quad (9)$$

$$x_{ijkda} = 0, \quad \forall i \in I, j \in D, d \in D, k \in K, a \in A_{dk}, j \neq d \quad (10)$$

$$x_{iikda} = 0, \quad \forall i \in N, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (11)$$

Mediante la restricción (4) se establece que un foco solo puede ser visitado una vez por el mismo vehículo. En (5) se limita la cantidad de rutas que pueden salir de una estación de policía. Como máximo pueden generarse tantas rutas como vehículos tenga esa estación. Por medio de (6) se condiciona a que la cantidad de vehículos que lleguen a un foco de protesta sea la misma cantidad de vehículos que salen de este. Esto con el fin de evitar que los vehículos se queden en el foco después de cumplir su labor. De manera similar, (7) estipula la condición de retorno de vehículos a su lugar de origen. Por medio de esta restricción se plantea que todos los vehículos que salen de una estación de policías deben regresar a esa misma estación. En (8) se estipula que todas las rutas deben salir obligatoriamente de una estación de policía. En (9) se plantea que un vehículo perteneciente a una estación de policía específica no puede comenzar su ruta desde otra estación que no sea la dueña de él. En (10) se estipula que el vehículo perteneciente a una estación de policía específica no puede finalizar su ruta en una estación distinta de esta. Por último, en (11) se restringe la existencia de un arco de viaje de un nodo hacia sí mismo pues no tiene lógica pensar en iniciar un viaje a hacia un foco que ya se visitó.

b) *Restricciones asociadas a las ventanas de tiempo*

Las ventanas de tiempo corresponden a uno de los requerimientos establecidos para este problema, pues se considera un tiempo prudente en el cual los recursos policiales pueden intervenir determinado foco de protestas y considerar efectivo su actuar. Para condicionar al modelo a cumplir con este cometido se establecen las siguientes restricciones:

$$SI_{ikda} \geq \sum_{m \in N} VenTem_i * x_{mikda}, \quad \forall i \in I, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (12)$$

$$SI_{ikda} \leq \sum_{m \in N} VenTar_i * x_{mikda}, \quad \forall i \in I, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (13)$$

$$SI_{mkda} \geq SI_{ikda} + Dura_i + \frac{Dist_{im}}{Vel} - GM * (1 - x_{imkda}), \quad \forall i \in I, m \in I, k \in K, d \in D, a \in A_{dk}, m \neq i \quad (14)$$

$$SI_{mkda} \geq \frac{Dist_{im}}{Vel} - GM * (1 - x_{imkda}), \quad \forall i \in D, m \in I, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (15)$$

Respecto a las restricciones diseñadas para cumplir con las ventanas de tiempo se tienen las siguientes: (12) limita el tiempo de inicio de la atención del foco de protesta a, mínimo, la apertura de la ventana de tiempo de ese foco en específico. De manera complementaria, (13) limita el inicio de la atención del foco de protesta a, máximo, el cierre de la ventana de tiempo de ese foco específicamente. Por medio de (14) se calcula cuál es el tiempo mínimo en el que puede iniciar la atención del foco siguiente cuando se atiende otro previamente. El tiempo de atención de ese foco será como mínimo la suma del tiempo de inicio de atención del foco anterior más el tiempo de duración de la atención del foco anterior más la distancia entre los dos focos, dividida entre la velocidad promedio establecida (25 km/h). En caso de que no exista el arco entre los focos supuestos, se activará el valor de la Gran M, obligando a la variable de tiempo de inicio de la atención del segundo foco a no existir. De manera análoga, (15) calcula el tiempo de inicio de la atención del foco de protesta cuando se viene de una estación de policía. Esta restricción se estipula debido a la inexistencia de atención a las estaciones de policía. Por ende, se deben diferenciar ambos casos.

c) *Restricciones asociadas a la demanda de vehículos*

Se considera la necesidad de satisfacer para cada foco la demanda de vehículos específicos. Principalmente, se requiere que se envíe la cantidad de tanquetas asociadas al nivel de riesgo de cada foco, pues sin este recurso el actuar policial no tendría el mismo alcance. La restricción asociada a este planteamiento se presenta a continuación:

$$\sum_{i \in N} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A_{dk}} x_{ijkda} \geq DemVeh_{jk} * v_j, \quad \forall j \in I, k \in K \quad (16)$$

En (16), como se explicó anteriormente, se condiciona a que la cantidad enviada de cada tipo de vehículo sea, como mínimo, la cantidad de vehículos demandada de este tipo específicamente para cada foco de protesta considerado. El diseño de la restricción posibilita hacer la asignación de recursos por su demanda específica si así se considera. Sin embargo, en este caso solo se tiene demanda de vehículos tipo 1, es decir, de tanquetas lanza agua, pues la cantidad de vehículos *kronos* (vehículos tipo 2) depende de la cantidad de policías que se envían desde una estación específicamente. Por ende, se considera como 0 la demanda de vehículos tipo 2. El envío de este tipo de vehículos se condiciona por la cantidad de policías enviados, como se expresa más adelante.

d) *Restricciones asociadas a los recursos renovables y las proporciones de cumplimiento de la demanda*

Ahora bien, teniendo en cuenta que cada foco presenta una demanda de policías específica, se debe condicionar a que el modelo satisfaga dicha demanda y distribuya este recurso de la manera planeada, es decir, asumiendo la espera de estos recursos para continuar con su ruta, los recursos no se dejan en el foco de protesta. Por ende, se considera como un recurso renovable una vez se atiende cada foco. Además, teniendo en cuenta las capacidades y cantidades de los vehículos disponibles para transportar los policías, se debe considerar la proporción de cumplimiento de la demanda que representa cada uno de los equipos policiales que se movilizan en un vehículo específicamente, haciendo alusión a lo que se considera un problema de cumplimiento de demanda por separado. A continuación, se profundiza la explicación de este conjunto de restricciones

$$y_{kda} \geq DemPer_j * p_{jkda}, \quad \forall j \in I, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{a \in A_{dk}} y_{kda} \leq \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} \sum_{a \in A_{dk}} PolCap_k * x_{ajkda}, \quad \forall d \in D \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{a \in A_{dk}} y_{kda} \leq PerDisp_a, \quad \forall d \in D \quad (19)$$

$$y_{kda} \leq PolCap_k, \quad \forall j \in I, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (20)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A_{dk}} p_{ikda} = 1, \quad \forall i \in I \quad (21)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijkda} \geq p_{jkda}, \quad \forall j \in I, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (22)$$

En (17) se establece que la cantidad de policías que salgan de una estación de policías en un vehículo específico sea, como mínimo, la demanda de policías de un nodo específico multiplicado por la proporción de demanda que se cumple con los policías que se transportan en ese vehículo específicamente. En (18) se limita la cantidad de policías a enviar desde una misma estación de policía, pues esta puede ser, como máximo, igual a la capacidad de transporte de cada vehículo (4 policías para vehículos tipo 1 y 10 policías para vehículos tipo 2) multiplicada por la cantidad de vehículos que salgan de esa estación de policía en particular. De manera similar, (19) condiciona a que no se pueden enviar, desde una misma estación, un número mayor de policías al disponible en esa estación. (20) limita la cantidad de policías que pueden ir en un tipo específico de vehículo a, como máximo, la capacidad de transporte de ese vehículo específico. En (21) se establece la condición de cumplir con el total de la demanda de cada foco de protestas, pues la sumatoria de todas las proporciones de cumplimiento de demanda por parte de todos los vehículos que puedan llegar a un mismo foco debe ser igual al 100%. Finalmente, (22) establece que al un nodo ser visitado por algún vehículo, debe representar una proporción de cumplimiento de la demanda específica de ese nodo, si no se visita, no representa una proporción de cumplimiento.

e) *Restricciones asociadas a la visita de focos de protestas*

Para efectos del problema, se consideró necesario el establecer, en una sola variable, si un foco de protesta específico era atendido o no, sin importar la cantidad de vehículos necesarios ni la procedencia de estos. A continuación, la explicación de estas restricciones:

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A_{dk}} x_{imkda} \leq v_m * GM, \quad \forall m \in I, m \neq i \quad (23)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{a \in A_{dk}} x_{imkda} \geq v_m, \quad \forall m \in I, m \neq i \quad (24)$$

Por medio de (23) se establece que, si el arco de viaje con destino hacia un nodo específico existe, obligatoriamente la variable de visita (v_m) se debe activar, y se considera que el nodo específico fue visitado. Por otra parte, en (24) se establece la posibilidad de que no todos los arcos deban incluir a un foco de protesta específico para que este se considere visitado. Con un solo arco que tenga como destino el foco de protesta, es suficiente para que se considere atendido.

f) *Restricciones de dominio*

Mediante este conjunto de restricción se regula el comportamiento de las variables empleadas para el modelo:

$$SI_{ikda} \geq 0, \quad \forall i \in N, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (25)$$

$$y_{kda} \geq 0, \quad \forall k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (26)$$

$$p_{ikda} \geq 0, \quad \forall i \in N, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (27)$$

$$x_{imkda} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N, m \in N, k \in K, d \in D, a \in A_{dk} \quad (28)$$

$$v_m \in \{0,1\}, \quad m \in I \quad (29)$$

Por (25), (26) y (27) las variables S_{ikda} , y_{kda} y p_{ikda} tomarán siempre valores positivos, para todos los conjuntos en los que están indexadas. También, (28) y (29) condicionan sus respectivas variables a solo tomar valores de 0 o 1.

B. Validación del diseño propuesto

Una vez se tiene el modelo previamente detallado, se pretende corroborar el funcionamiento de este, evidenciando el cumplimiento de las directrices estipuladas para su diseño. Para este proceso, se toma el caso de prueba específico de la Fig. 12 que cuenta con la misma estructura explicada en apartados anteriores.

10	3							
1	3	571	1712	86	0	10	17	3
2	8	730	5838	102	1	9	10	1
6	5	116	580	15	0	13	19	2
8	4	601	2405	48	0	16	18	4
9	3	454	1360	24	0	14	17	2
10	9	270	2430	38	1	8	12	4
12	9	370	3330	52	1	15	22	2
13	6	709	4256	85	1	12	14	1
14	10	663	6629	133	2	10	17	1
16	7	606	4240	74	1	11	15	4
22	195	2	15					
23	187	2	14					
25	175	3	13					

Fig. 12. Caso de prueba empleado para la validación del modelo

Para el caso descrito anteriormente, se tiene el gráfico de ruteo completo que se evidencia en la Fig. 13. En este gráfico se puede observar que no todos los vehículos visitan todos los focos de protestas. Esto genera el cumplimiento de (4), posibilitando no atender a todos los nodos por todos los vehículos. Adicionalmente, se observa que todas las rutas inician desde una estación de policía, cumpliendo con (8). No se evidencian vehículos que inicien sus rutas de una estación diferente a la que pertenecen, vehículos que finalicen su ruta en una estación diferente a su origen, ni arcos de viaje de un nodo hacia sí mismo, cumpliendo así con (9), (10) y (11), respectivamente.

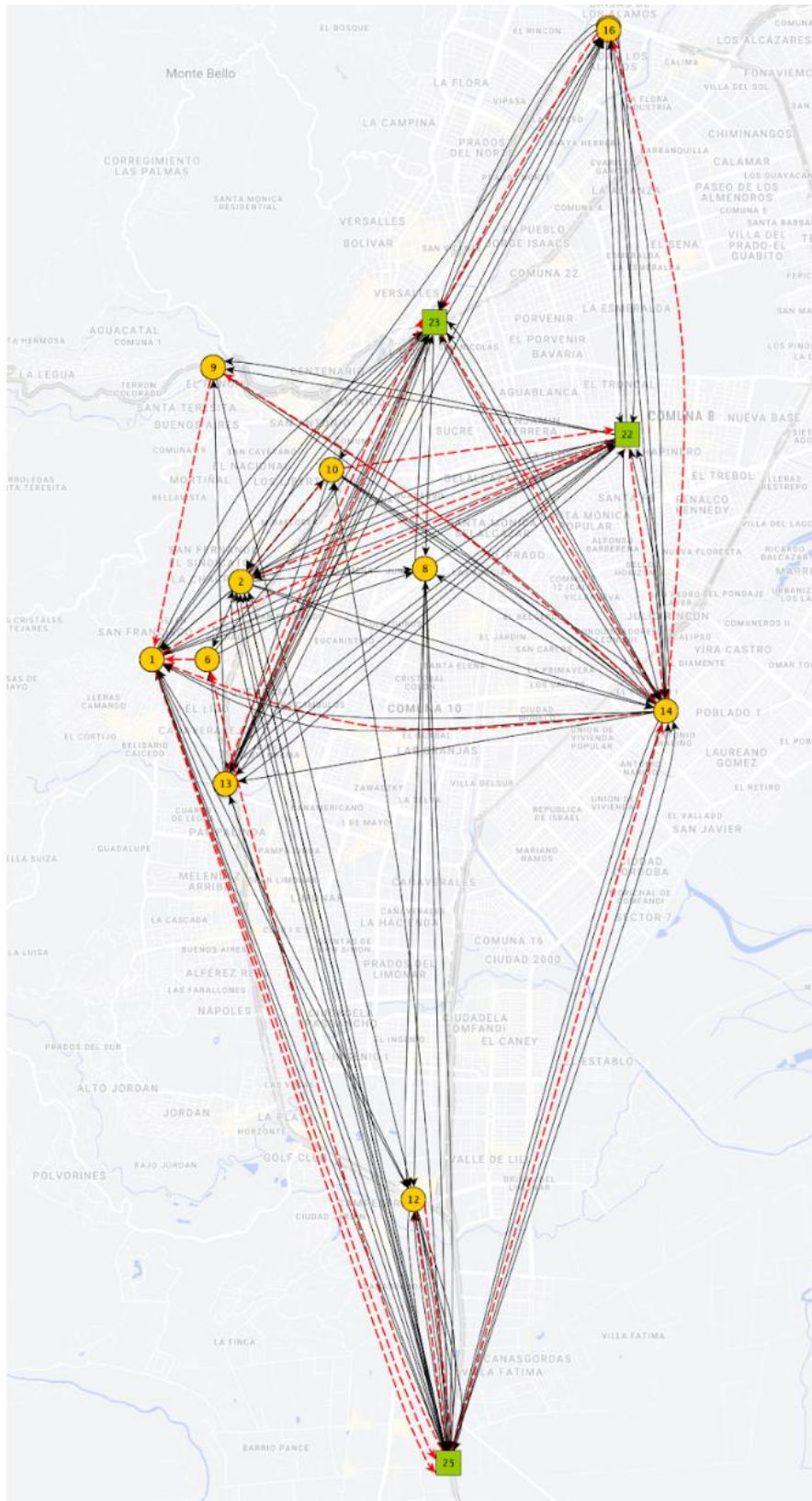


Fig. 13. Ruteo completo del modelo

En la Fig. 14, una ampliación del flujo de la estación de policía Las Américas identificada como 22, se puede evidenciar el correcto cumplimiento de (5), pues la cantidad de vehículos que sale de esta estación es la misma que ingresa. Además, hay una debida correspondencia entre los vehículos que salen y llegan a esta estación: Salen los vehículos 1 y 2 del tipo 1, representados por líneas punteadas rojas y los vehículos 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 13, 14 y 15 del tipo 2, representados con línea corrida negra. También, se reconoce que la cantidad de rutas emitidas desde esta estación son incluso inferiores que la cantidad de vehículos con los cuales dispone la estación (2 tanquetas lanza agua y 15 vehículos *kronos*, para este caso), enviando 2 vehículos tipo 1 y 11 vehículos tipo 2, cumpliendo completamente con (7).

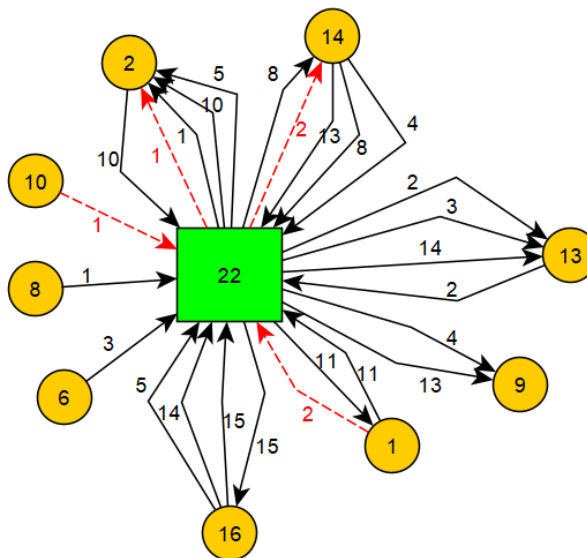


Fig. 14. Flujo de salidas y retornos de vehículos de la estación de policía No. 22

Ahora, pasando a analizar el flujo de un foco de protesta en específico se considera el foco de Univalle identificado con el número 2. Para este foco en específico, como se muestra en la Fig. 15, se esquematizan todos los focos y estaciones de los cuales salen vehículos hacia el foco 2. De igual forma, se diagraman las rutas inmediatas después de que los vehículos terminan de atender este foco. Se tiene que la cantidad de vehículos que llega a atenderlo es la misma cantidad de vehículos que salen de él, cumpliendo con (6). Lo mismo ocurre con el foco de Loma de la Cruz identificado con el número 10, como se muestra en la Fig. 16.

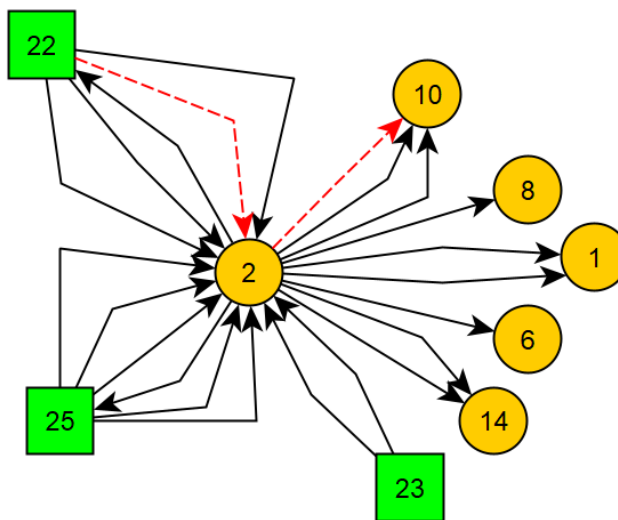


Fig. 15. Flujo de llegadas y salidas de vehículos del foco de protestas de Univalle (No. 2)

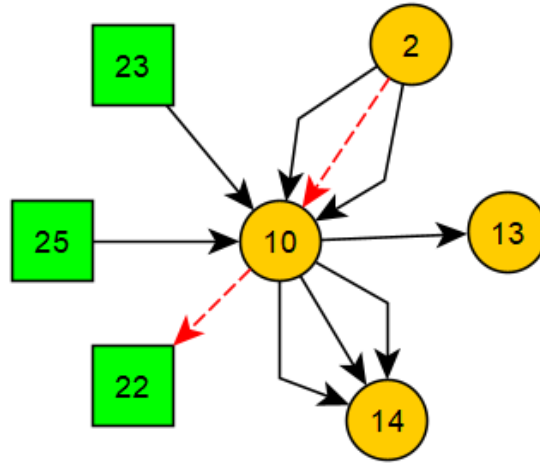
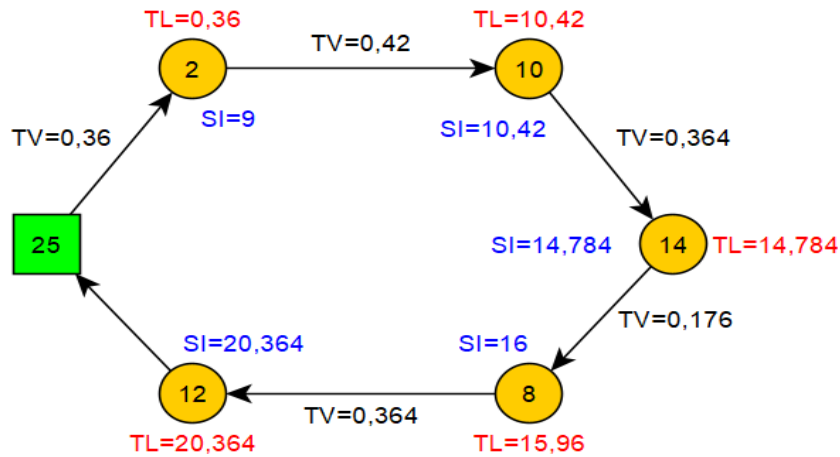


Fig. 16. Flujo de llegadas y salidas de vehículos del foco de protestas de Loma de la Cruz (No. 10)

Con la validación de funcionamiento de las restricciones de flujo, se verifica entonces el cumplimiento de las restricciones asociadas a las ventanas de tiempo. En la Fig. 17, se pretende analizar la ruta realizada por el vehículo número 3 del tipo 2 que sale de la estación de policía Las Américas, identificada con el número 25. Se establece el tiempo de inicio del recorrido en la hora 0. Para un mejor entendimiento, se cuenta con un recuadro inferior que recoge los diferentes tiempos a considerar. Principalmente, se tienen tiempos de viaje (TV) desde el nodo anterior hasta el nodo actual, el cual se calcula como la división entre la distancia entre ellos y la velocidad promedio establecida (25 km/h); el tiempo en el que el vehículo llega al foco (TL), el tiempo en el que inicia la atención al foco específico (SI), el tiempo de duración de la atención de cada foco (D) y el tiempo en que termina de ser atendido ese foco (TF). Adicionalmente, se recogen las ventanas de tiempo asociadas a los focos implicados para verificar su cumplimiento. El recuadro de cada de estas se pinta de verde en caso de que el tiempo de inicio de la atención sea mayor a la ventana de tiempo temprana y menor a la ventana de tiempo tardía.



Nodo	TV=Distancia/25km/h	TL	SI	D	TF=SI+D	VT Temp	VT Tard
25	-	-	-	-	-	-	-
2	0,36	0,36	9	1	10	9	10
10	0,42	10,42	10,42	4	14,42	8	12
14	0,364	14,784	14,784	1	15,784	10	17
8	0,176	15,96	16	4	20	16	18
12	0,364	20,364	20,364	2	22,364	15	22

Fig. 17. Ruta del vehículo 3 del tipo 2 perteneciente a la estación de policía 22, con análisis de tiempos de recorrido

Gracias al gráfico anterior, se evidencia cómo el modelo respeta las ventanas de tiempo, tanto tempranas como tardías para llegar a cada foco, cumpliendo (12) y (13). Además, se aprecia que no siempre el tiempo de llegada es el mismo en el que inicia la atención al foco, por lo que se piensa en una espera de los recursos antes de empezar la intervención. Esto lo define el modelo internamente, cumpliendo con (14). También, se evidencia cómo el modelo cumple con el cálculo del tiempo de inicio a un foco de protesta cuando se proviene inmediatamente de una estación de policía, según lo estipula (15).

Por medio de la Fig. 18, se presentan los focos de protestas 1, 9, 14 y 16. Lo que se pretende es evidenciar la cantidad de vehículos tipo 1 que llegan a cada uno de los focos según la demanda. Incluso, se evidencia una mayor cantidad de tanquetas que llegan respecto a las demandadas, esto se entiende debido a que en ellas también se transportan policías que contribuyen a cumplir la demanda de personal así el recurso del vehículo tipo 1 no sea requerido. Como se mencionó anteriormente, la demanda de vehículos tipo 2 se maneja como 0 debido a que esta se relaciona es con la demanda de personal policial. Por ende, la cantidad de vehículos de ese tipo que lleguen se verá determinada por la demanda de policías que se analizará más adelante. Mediante este gráfico, se verifica el cumplimiento de (16).

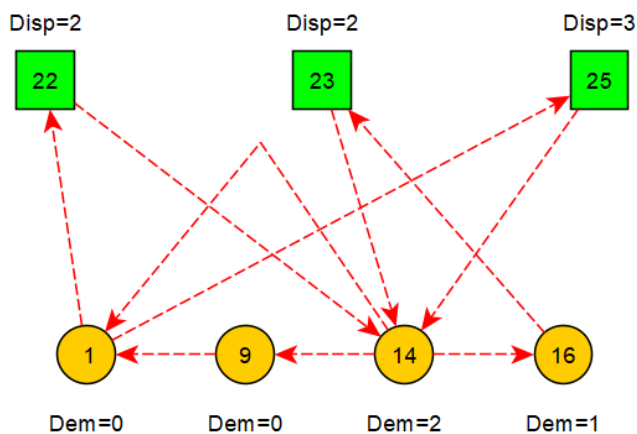
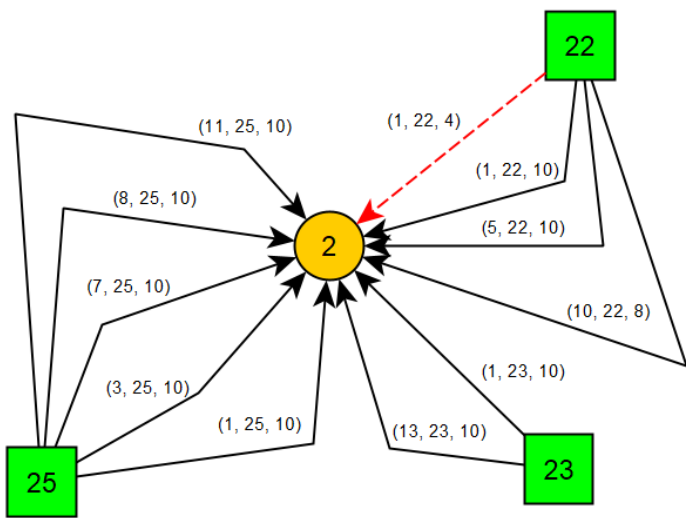


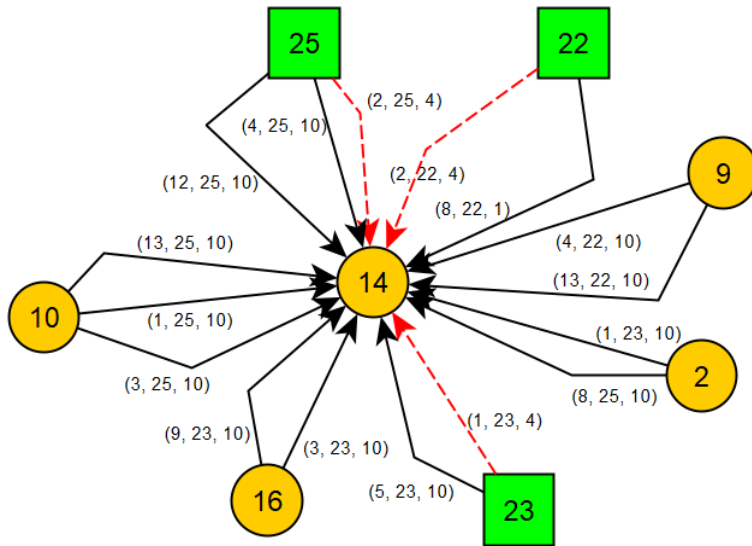
Fig. 18. Cantidad de vehículos Tipo 1 que llegan a los focos 1, 9, 14 y 16 desde las diferentes estaciones de policías

Como se plantea anteriormente, la demanda de vehículos tipo 2 se ve influenciada por la cantidad de policías requeridos para atender cada foco de protestas. Así pues, se debe verificar cuál es la cantidad que se demanda y cuál es la cantidad que se está enviando en cada vehículo para satisfacer completamente la demanda de personal policial de cada foco. En la Fig. 19 se analiza la cantidad de policías que son enviados desde las estaciones consideradas, en diferentes vehículos, para cumplir con la demanda total del foco de Univalle, identificado con el número 2. En la Fig. 20 realiza el mismo análisis, pero para el foco Diamante, identificado con el número 14. Para el entendimiento de estos gráficos se tiene que las líneas punteadas rojas representan las tanquetas que llegan a cada foco y las líneas corridas negras los vehículos tipo *kronos*. Adicionalmente, al lado de cada línea se especifica, mediante un vector, el número del vehículo específicamente, la estación de policía de la cual proviene y la cantidad de policías que transporta. Por ejemplo, una línea asociada a (1, 25, 10) representa el vehículo 1 que proviene de la estación de policía 25 y transporta 10 policías. Para estos gráficos se obvia el origen inmediatamente anterior del cuál proviene el vehículo. En el recuadro de la derecha se definen las proporciones de cumplimiento de la demanda de cada foco que representa cada vehículo en específico.



Demanda Foco 2 = 102 policías			
Tipo de Vehículo	Vehículo-Origen	Cant. de policías	Proporción de demanda cumplida
1	11-22	4	0,0392157
2	1-22	10	0,0980392
2	5-22	10	0,0980392
2	10-22	8	0,0784314
2	1-23	10	0,0980392
2	13-23	10	0,0980392
2	1-25	10	0,0980392
2	3-25	10	0,0980392
2	7-25	10	0,0980392
2	8-25	10	0,0980392
2	11-25	10	0,0980392
Total		102	1

Fig. 19. Análisis del cumplimiento de la demanda de policías del foco de protestas de Univalle (No. 2)

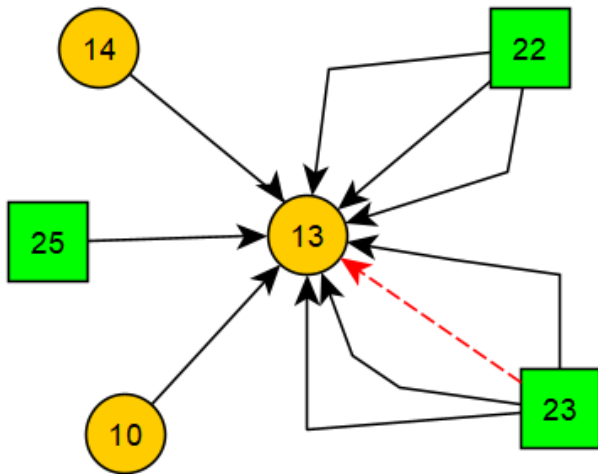


Demanda Foco 14 = 133 policías			
Tipo de Vehículo	Vehículo-Origen	Cant. de policías	Proporción de demanda cumplida
1	2-22	4	0,0301
1	1-23	4	0,0301
1	2-25	4	0,0301
2	4-22	10	0,0752
2	8-22	1	0,0075
2	13-22	10	0,0752
2	1-23	10	0,0752
2	3-23	10	0,0752
2	5-23	10	0,0752
2	9-23	10	0,0752
2	1-25	10	0,0752
2	3-25	10	0,0752
2	4-25	10	0,0752
2	8-25	10	0,0752
2	12-25	10	0,0752
2	13-25	10	0,0752
Total		133	1

Fig. 20. Análisis del cumplimiento de la demanda de policías del foco de protestas de Diamante (No. 14)

Por medio de los gráficos anteriores, se evidencia que la cantidad de policías que salen de una estación en un vehículo específico es, como mínimo, la proporción de la demanda que cumple, multiplicado por la demanda global de policías de ese foco, cumpliendo (17). También, se evidencia que la cantidad de policías que salen de una misma estación es, como máximo, la multiplicación entre la capacidad de cada uno de los vehículos por el número de rutas que salen de esa misma estación, se verifica el cumplimiento de (18). De igual forma, se reconoce que no se están enviando más policías de los que se tienen en cada una de las estaciones, respetando (19). Asimismo, en cada vehículo no se están transportando más policías que la máxima capacidad permitida para cada tipo específico, cumpliendo (20). Ahora enfocado a las proporciones, se evidencia que el cumplimiento es del 100% para los focos de protesta, cumpliendo (21) y se garantiza que cuando existe una visita de un vehículo a un foco, existe un aporte al cumplimiento de la demanda total de policías de ese foco específico, como lo estipula (22).

Adicionalmente, en la Fig. 21 se evidencia cómo la variable v_i , indistintamente de la cantidad de vehículos que visitan el foco, se activa con el valor de 1. Solo se requiere de una visita para que la variable se habilite, según lo estipulado en (23). También, se reconoce que no es necesario que el foco sea visitado por todos los posibles vehículos para que sea habilitada la variable v_i como lo plantea (24).



¿Es visitado? ¿v(13)=1?	Visitado por vehículo (Tipo,Número,Nodo anterior)
SI	(2,2,22)
	(2,3,22)
	(2,14,22)
	(1,2,23)
	(2,4,10)
	(2,10,23)
	(2,12,23)
	(2,14,23)
	(2,6,25)
	(2,13,14)

Fig. 21. Validación del funcionamiento de la variable v_i

Con todo lo anterior, se verifica el correcto funcionamiento del modelo, se cumple con la naturaleza de la problemática que se pretende abordar. Como resultado de la modelación se obtiene un problema de Orientación de Equipos con Ventanas de Tiempo, considerando depósitos múltiples, flota heterogénea, división del cumplimiento de la demanda y recursos renovables. Esto representa un problema bastante complejo de resolver y, con el incremento de los nodos que se consideren, su dificultad de resolución aumenta. Por otra parte, es preciso reconocer que, para el caso de prueba seleccionado, el modelo es capaz de alcanzar un valor óptimo para la función objetivo de 32 774, representando este una atención total de los focos de protestas considerados. Adicionalmente, se encuentra que, en este caso de prueba, se obtiene el mismo valor óptimo mediante diferentes soluciones, pues al contar con excedente de recursos, el modelo es capaz de alcanzar por diferentes formas el óptimo. Cabe resaltar que esta condición no se garantiza para los demás casos de prueba, pues la disponibilidad de recursos varía para cada caso.

V. VERIFICAR

A. Resultados y Medición de Impactos

1. Resultados

Para el desarrollo del experimento computacional, finalmente se diseñaron 90 casos de prueba. En estos, se consideraron combinaciones diferentes entre las cantidades de estaciones de policías y la cantidad de focos de protestas a atender. En la Tabla XI se resumen el contenido de los casos empleados en el experimento.

TABLA XI

CARACTERIZACIÓN DE LOS CASOS DE PRUEBA PARA EL EXPERIMENTO COMPUTACIONAL

Cantidad de casos de prueba	Cantidad de estaciones consideradas por caso	Cantidad de focos considerados por caso
10	3	10
10	5	10
10	6	10
10	3	15
10	5	15
10	6	15
10	3	20
10	5	20
10	6	20

Con la caracterización de los casos de prueba, se estipula un tiempo máximo de cálculo de 600 segundos para cada caso, pronosticando un tiempo experimental total de cálculo de 900 minutos. Posterior a la implementación del experimento en un computador con procesador Intel CORE i5 y memoria RAM de 8GB, este se toma un tiempo total de cómputo de 480 minutos, arrojando los resultados recogidos en la Tabla XII. El propósito de la organización de estos resultados es evidenciar el KPI obtenido en cada caso, la cantidad de focos visitados por caso, el estatus de la solución, representado 2 la solución óptima, 120 y 122 representan un resultado que puede ser el óptimo, pero el modelo no puede asegurarlo y 422 representa un caso que fue resuelto pero que por falta de tiempo de cálculo no pudo alcanzar una solución óptima; y el tiempo computacional requerido para ser resuelto.

TABLA XII

RESULTADOS DEL EXPERIMENTO COMPUTACIONAL

Caso de prueba	KPI	Total de nodos atendidos	Estatus	Tiempo computacional (segundos)
TOP_10_3_r1.dat	1	10	2	47,281
TOP_10_3_r2.dat	1	10	2	31,25
TOP_10_3_r3.dat	1	10	2	78,812
TOP_10_3_r4.dat	1	10	2	38,047
TOP_10_3_r5.dat	1	10	2	64,844
TOP_10_3_r6.dat	1	10	2	34,312
TOP_10_3_r7.dat	1	10	2	109,844
TOP_10_3_r8.dat	1	10	2	124,937
TOP_10_3_r9.dat	1	10	2	37,781
TOP_10_3_r10.dat	1	10	2	53,766
TOP_10_5_r1.dat	1	10	2	33,781
TOP_10_5_r2.dat	1	10	2	32,266
TOP_10_5_r3.dat	1	10	2	43,407
TOP_10_5_r4.dat	1	10	2	4,125
TOP_10_5_r5.dat	1	10	2	43,391
TOP_10_5_r6.dat	1	10	2	20,422
TOP_10_5_r7.dat	1	10	2	35,062
TOP_10_5_r8.dat	1	10	2	3,656
TOP_10_5_r9.dat	1	10	2	34,641

TOP_10_5_r10.dat	1	10	2	39,797
TOP_10_6_r1.dat	1	10	2	41,078
TOP_10_6_r2.dat	1	10	2	43,328
TOP_10_6_r3.dat	1	10	2	35,422
TOP_10_6_r4.dat	1	10	2	28,719
TOP_10_6_r5.dat	1	10	2	46,734
TOP_10_6_r6.dat	1	10	2	11,734
TOP_10_6_r7.dat	1	10	2	45,969
TOP_10_6_r8.dat	1	10	2	42,875
TOP_10_6_r9.dat	1	10	2	44,047
TOP_10_6_r10.dat	1	10	2	45,297
TOP_15_3_r1.dat	0,767532	13	120	600,813
TOP_15_3_r2.dat	0,804958	12	120	600,875
TOP_15_3_r3.dat	0,796488	11	120	607,813
TOP_15_3_r4.dat	0,722474	12	120	600,39
TOP_15_3_r5.dat	0,804493	12	2	609,406
TOP_15_3_r6.dat	0,529008	8	422	611,281
TOP_15_3_r7.dat	0,72549	10	2	600,593
TOP_15_3_r8.dat	0,398154	7	422	600,531
TOP_15_3_r9.dat	0,656287	10	122	616,219
TOP_15_3_r10.dat	0,858478	13	2	610,016
TOP_15_5_r1.dat	1	15	2	113,344
TOP_15_5_r2.dat	1	15	2	477,188
TOP_15_5_r3.dat	1	15	2	89,657
TOP_15_5_r4.dat	1	15	2	426,875
TOP_15_5_r5.dat	1	15	2	174,313
TOP_15_5_r6.dat	1	15	2	120,578
TOP_15_5_r7.dat	1	15	2	86,563
TOP_15_5_r8.dat	1	15	2	49,937
TOP_15_5_r9.dat	1	15	2	61,64
TOP_15_5_r10.dat	1	15	2	74,313
TOP_15_6_r1.dat	1	15	2	107,172
TOP_15_6_r2.dat	1	15	2	107,594
TOP_15_6_r3.dat	1	15	2	312,188
TOP_15_6_r4.dat	1	15	2	256,296
TOP_15_6_r5.dat	1	15	2	114,094
TOP_15_6_r6.dat	1	15	2	122,407
TOP_15_6_r7.dat	1	15	2	100,078
TOP_15_6_r8.dat	1	15	2	94,516
TOP_15_6_r9.dat	1	15	2	1195,47
TOP_15_6_r10.dat	1	15	2	109,937
TOP_20_3_r1.dat	0,2764	6	422	60,711

TOP_20_3_r2.dat	0,402467	9	422	602,812
TOP_20_3_r3.dat	0,409895	10	422	606,563
TOP_20_3_r4.dat	0,44814	8	422	603,156
TOP_20_3_r5.dat	0,430561	9	422	604,797
TOP_20_3_r6.dat	0,451114	10	422	609,828
TOP_20_3_r7.dat	0,341761	7	422	604,515
TOP_20_3_r8.dat	0,346768	7	422	603,875
TOP_20_3_r9.dat	0,548748	11	422	604,438
TOP_20_3_r10.dat	0,606718	14	422	602,406
TOP_20_5_r1.dat	0,368463	8	422	608,375
TOP_20_5_r2.dat	0,368463	8	422	608,141
TOP_20_5_r3.dat	0,579075	11	422	605,265
TOP_20_5_r4.dat	0,579075	11	422	603,687
TOP_20_5_r5.dat	0,487252	10	422	603,609
TOP_20_5_r6.dat	0,6843	13	120	608,546
TOP_20_5_r7.dat	0,599528	12	422	601,109
TOP_20_5_r8.dat	0,708329	13	422	600,828
TOP_20_5_r9.dat	0,587219	12	422	602,969
TOP_20_5_r10.dat	0,501067	11	121	607,344
TOP_20_6_r1.dat	0,253714	1	422	600,922
TOP_20_6_r2.dat	0,399681	7	422	600,734
TOP_20_6_r3.dat	0,162618	1	422	600,813
TOP_20_6_r4.dat	0,253714	1	422	600,813
TOP_20_6_r5.dat	0,399681	7	422	600,812
TOP_20_6_r6.dat	0,253714	1	422	600,891
TOP_20_6_r7.dat	0	0	422	601
TOP_20_6_r8.dat	0,253714	1	422	601
TOP_20_6_r9.dat	0,399681	7	422	600,938
TOP_20_6_r10.dat	0,253714	1	422	601

Al analizar los resultados obtenidos se tiene que tan solo 30 de los 90 casos no pudieron encontrar una solución óptima, siendo la razón de esto la falta de tiempo establecida. Para este tipo de experimento que se considera relativamente pequeño, obtener casi un 70% de optimalidad resulta ser un gran logro. Por ende, en los otros 60 casos se evidencia cómo el modelo es capaz de asignar los recursos suficientes y de manera oportuna para realizar la atención a todos los focos de protestas considerados. En promedio, la resolución de cada uno de los casos de prueba toma 5,4 minutos, un valor promedio considerablemente menor al máximo de 10 minutos. Sin embargo, se tienen casos en los que ese tiempo máximo no resulta suficiente para lograr una solución óptima.

De manera apreciativa, se resalta que son aquellos casos de prueba que tienen una diferencia mayor entre la cantidad de focos y la cantidad de estaciones disponibles consideradas los que cuentan con un estatus de 422. Se sobre entiende que, al limitar los recursos, el modelo requiere de mayor esfuerzo y tiempo computacional para poder alcanzar la mejor distribución de las rutas cumpliendo con las restricciones. Por ende, son este tipo de casos los que suman la mayoría de los 30 casos con estatus 422. La relevancia de estos casos es la afección que presentan al promedio del KPI en general, pues al no encontrar el óptimo, el modelo arroja la solución que alcanzó a calcular en el tiempo disponible, que puede no llegar a ser la mejor posible, lo que ocasiona una disminución en el promedio del KPI.

No obstante, al especular un poco más en la naturaleza y las razones de cada resultado, no resulta conveniente para este caso el trabajar con el promedio del indicador de desempeño, pues se puede llegar a tener un sesgo o interpretaciones erróneas. Analizando solo aquellas soluciones que alcanzaron la respuesta óptima o según su estatus (120 y 122), consideran que esa es la solución óptima, se encuentra que la totalidad de esos 60 casos logran una cobertura total de los focos considerados. Esto, demuestra la capacidad suficiente del modelo, en un tiempo relativamente reducido, de encontrar soluciones óptimas a problemas con un tal alto número de variables y de restricciones. Así pues, el modelo por sí solo demuestra su habilidad y solidez para encontrar soluciones óptimas a problemas complejos. Sin embargo, cuando se analizan los casos con estatus 422, se determina que la limitación encontrada es el tiempo computacional demandado, no la capacidad propia del modelo, en este caso se hablaría de soluciones infactibles. Por ende, la ampliación del tiempo de experimentación representaría un aumento en los casos que logran alcanzar una solución, que en su mayoría se esperaría que fuera óptima.

A pesar de la caracterización de los resultados, si se llega a hablar de un promedio del indicador de desempeño establecido, este presenta una mejora porcentual cercana al 10% respecto a la situación inicial considerada en apartados anteriores. Cabe aclarar que la utilización de estos datos para el cálculo del promedio no resulta ser lo más razonable, pues no se cuenta con la certeza de que sean las mejores soluciones alcanzadas por el modelo. Por ende, se espera que, con una mejoría en los estándares de la experimentación y las ampliaciones del tiempo computacional disponible, este incremento en el KPI calculado resulte aún mayor.

Por último, al analizar la robustez con que cuenta el modelo para encontrar soluciones óptimas en tiempos relativamente cortos, no se considera necesaria la implementación de una metaheurística para encontrar las mejores soluciones de este problema con el alcance y la definición actual. Posiblemente, para la consideración de escenarios más complejos o para la realización de experimentos mucho más grandes, resultaría interesante el diseño de estrategias de solución que agilicen un poco la solución del modelo. Actualmente, el modelo resulta ser suficiente, solo considerando la ampliación de los tiempos destinados al cómputo, se puede lograr un mejor conjunto de soluciones.

2. *Medición de Impactos*

Considerando que, aunque este proyecto se propone y desarrolla desde la metodología de investigación aplicada, se diseña como un modelo matemático y se valida mediante experimentos computacionales, no lo exime de tener un impacto fuera de los campos computacionales. En sí, el objetivo de los proyectos realizados con esta metodología es validar su utilidad en contextos diversos y su posterior adecuación a las condiciones que cada uno de los usuarios determine convenientes para resolver su problema específico. Por ende, se debe tener en cuenta las consecuencias, tanto positivas como negativas, que la implementación de este modelo matemático, mediante su vinculación a un lenguaje de programación matemática, tiene en contextos reales. Principalmente, la identificación y análisis de los impactos generados se enfocan en el contexto para el que inicialmente fue diseñado el modelo: las entidades policiales de la ciudad de Cali. Para tener una visión más amplia de los efectos colaterales resultantes de la posible implementación de la propuesta, se propone un enfoque financiero, social y ambiental. Reconociendo que se puede llegar a impactar en otros ámbitos de la sociedad si se extrapola a contextos más amplios.

a) *Impacto Financiero*

Es importante analizar los distintos impactos que pueden generarse con la elaboración del proyecto. Dentro de dichos impactos, se destaca el impacto financiero. En este, se consideran los beneficios que el proyecto puede aportar en cuanto a la reducción de costos al evitar, de manera significativa, problemas sobre el orden público, incluyendo la disminución de daños a bienes físicos de la ciudad, así como la disminución del vandalismo. Con dicha reducción, se estará evitando que la alcaldía o el gobierno en general, tenga que gastar dinero público para asumir los costos por reparación de los daños generados en la ciudad, dinero que se invierte en la reparación o restauración de estaciones de bus, estaciones de policía, semáforos dañados, eliminación de grafitis o estructuras incineradas, cámaras de seguridad, entre muchos otros bienes públicos.

Cabe destacar, que los bloqueos presentados en las protestas de abril de 2021 detuvieron la actividad comercial del 22,2% de las empresas a nivel regional en Cali, dejando graves consecuencias económicas para éstas, e impidiendo el transporte de los trabajadores a sus lugares de empleo. Además, el represamiento de aproximadamente 378 375 toneladas de alimentos como el

maíz, trigo o granos en general, sin contar otros productos de la canasta familiar, provocaron el alza de los precios de varios artículos comestibles, según el Ministerio de Agricultura [5], [6]

Se estima, según cifras de la Consejería Presidencial para los Derechos Humanos que, durante el año 2021, en el cual se presentaron un volumen alto de protestas, se registraron 2049 bienes privados destruidos, entre ellos, 491 establecimientos comerciales, 463 oficinas bancarias, 4445 cajeros y 318 ambulancias. Los bienes públicos destruidos fueron aproximadamente 2492, entre los cuales, se destacan 1416 buses, 227 estaciones de transporte, 179 edificios del Gobierno, 30 bienes culturales y 787 bienes policiales. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se estima que el Paro Nacional generó un impacto económico en pérdidas de 11,9 billones COP [5].

Por otra parte, dentro del análisis financiero, se considera el costo de implementación del lenguaje de programación que desarrolla la solución. Por tanto, se expone a continuación, tres alternativas que pueden ser consideradas por el usuario, para llevar a cabo la ejecución del diseño.

- Primera alternativa: se tiene la adquisición de las licencias de los *solvers* que utiliza AMPL llamados Cplex o Gurobi. Ambos *solvers* permiten encontrar soluciones óptimas, para varias instancias, en tiempos relativamente bajos.

El costo de estos *solvers* varía dependiendo del tipo de licencia que se quiera adquirir:

Licencia de usuario único: \$7750 dólares.

Licencia de Sesión Única: \$11 750 dólares.

Licencia multiusuario: \$19 000 dólares. [43]

- Segunda alternativa: existe la opción del *solver* gratuito llamado AMPL Community Edition. Esta es una versión gratuita la cual puede ser descargada y nunca caduca. Sin embargo, esta versión suele ser más lenta a diferencia de Cplex o Gurobi, con lo cual, si se está buscando rapidez y calidad en la solución, esta no sería la alternativa más adecuada [44].
- Tercera alternativa: se presenta la opción de independizarse de cualquier tipo de *solver* y resolver el problema con el diseño de una metaheurística. Para ello, no se tendría que incurrir en costos de licencias, pero sí se tendría que asumir el costo de un ingeniero que lo ejecute.

Llevar a cabo el uso de este modelo, no solo genera una disminución en gastos, también es necesaria una inversión puesto que es necesaria la adquisición del software específico utilizado (AMPL) y las licencias necesarias para la solución y ejecución del modelo, además de esto es necesario pensar en la capacitación de personal para la implementación, ajuste y correcto uso de la herramienta, lo cual permitirá no solo un uso continuo del modelo, sino que también una adaptación clara a la realidad. Esta inversión se puede ver como un gran costo, pero que al momento de vivir protestas como las presentadas en el 2021, va a acabar generando un ahorro y una disminución de problemas financiero para la población en general.

b) *Impacto Social*

Las marchas y protestas en Colombia han sido recurrentes en los últimos años. Desafortunadamente, algunas de ellas pierden su enfoque pacífico, y se convierten en epicentros de alteraciones públicas, causando perjuicios a nivel humano y material. Con esto en mente, cabe resaltar que el objetivo de este proyecto se centra, principalmente, en resolver una problemática de asignación de recursos. Sin embargo, no se puede desconocer que las manifestaciones generan efectos sociales que deben ser considerados.

Cuando no se cuenta con un sistema policial que designe de manera óptima los recursos que se tienen a disposición, va a ser muy difícil tener una respuesta o cubrimiento oportuno a los focos de protesta que lo requieran. Dichas respuestas poco eficientes por parte de la policía pueden ocasionar que se incrementen los bloqueos en las calles, la toma de propiedades privadas, vandalismo, daños a bienes públicos como buses de transporte o semáforos, y en el peor de los casos, la probabilidad de que aumenten los heridos o pérdidas humanas.

Pensando en dichas consecuencias que se pueden generar bajo el marco de una protesta social, se diseña un modelo de programación basado en el problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo, esto quiere decir que, considerando que hay focos de mayor impacto, se desplegarán vehículos policiales por diferentes rutas, para que dichos focos sean atendidos en el menor tiempo posible. La respuesta oportuna frente a esta situación logrará disminuir considerablemente los disturbios y alteraciones públicas anteriormente mencionadas.

Considerando el tenso ambiente político y social que se vive en un país como Colombia, se debe asegurar no solo el derecho a la libre protesta contemplado en el Artículo 37 de la Constitución Política “Toda parte del pueblo puede reunirse y manifestarse pública y pacíficamente. Sólo la ley podrá establecer de manera expresa los casos en los cuales se podrá limitar el ejercicio de este derecho”[45], sino también el cumplimiento de los derechos humanos en momentos de crisis, tanto para los manifestantes, como para la misma fuerza pública y los ciudadanos en general.

En un ambiente de presión, nerviosismo e incertidumbre como lo puede ser un paro o una manifestación, las fuerzas públicas deberían poder apaciguar y poner en orden la situación, pero aún más importante, se debe garantizar el derecho a la vida proclamado en el Artículo 3 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos “Todo individuo tiene derecho a la vida, a la libertad y a la seguridad de su persona”[46]. Por lo tanto, es importante que una vez puestos a disposición los recursos policiales, en los tiempos óptimos, y en los focos de protesta que más lo requieran, estos sean usados para salvaguardar los derechos humanos de cada una de las personas que se encuentren presentes.

c) Impacto Ambiental

El proyecto considera como recursos, dos tipos de vehículos policiales, el primero, tanqueta antimotines lanza agua y el segundo, vehículo *kronos* destinado principalmente al transporte de policías, de los cuales ambos constan de un motor Diesel para su funcionamiento. Este combustible es un hidrocarburo líquido el cual durante la combustión emite grandes cantidades de CO₂ y otros gases y partículas perjudiciales para el medio ambiente como lo son el CO₂, NO₂ y hollín. En el año 2019, las emisiones de dióxido de carbono superaron los 34 300 millones de kilo toneladas, esto representa una gran cantidad de presencia en la atmosfera mundial y en los gases de efecto invernadero. De esta manera, contribuye al calentamiento global y a la afección en la salud de las personas. Algunas de las consecuencias que se pueden considerar son el deshielo de los glaciales, sequía de los ríos y fuentes hídricas, incendios forestales, cambios drásticos en la temperatura de los países o ciudades del mundo, entre otros muchos [47], [48].

Realizando un análisis más específico, se determina, según los resultados del experimento, el total de distancia recorrida por cada tipo de vehículo en cada caso de prueba, observando que hay algunos con mayor uso del recurso que otros. Además, el enfoque del modelo no está ligado a reducir la distancia recorrida, solo al cumplimiento con la mejor asignación de los recursos disponibles. Con esto en mente, y considerando una emisión de 1009 gramos de CO₂ por cada kilómetro recorrido para las tanquetas antimotines lanza agua (vehículo tipo 1) y 595 gramos de CO₂ por cada kilómetro recorrido para los vehículos *kronos* (vehículo tipo 2), se realizaron los cálculos resumidos en la Tabla XIII. Estos permiten aproximar las emisiones generadas por cada tipo de vehículo en el total de casos de prueba [49].

TABLA XIII

RECUESTO DE EMISIÓN DE CO₂ DE LOS VEHÍCULOS PARA EL EXPERIMENTO COMPUTACIONAL

Tipo de Vehículo	Total distancia recorrida(km)	Distancia promedio por caso de prueba (km)	g CO ₂ /km	g CO ₂ Total emitidos	g CO ₂ promedio emitidos por caso de prueba
1	25 217	280,19	1009	25 443 953	282 711
2	104 234	1158,16	595	62 019 230	689 103

Como se observa, la emisión de CO₂ generada por los vehículos tipo 2 es mayor, teniendo en cuenta que, por ser el recurso con mayor disponibilidad, tiene una mayor asignación y estos vehículos recorren un mayor número de arcos. Por otro lado, se evidencia que, aunque los vehículos tienen una menor cantidad de emisiones, la emisión de gramos de CO₂ por cada kilómetro recorrido es mayor por el tamaño y peso del vehículo, el cual necesita una mayor fuerza para su movimiento. Cabe resaltar que la emisión de CO₂ varía mucho dependiendo del caso de prueba, teniendo en cuenta que no siempre se tienen los mismos recursos

o las mismas distancias a tratar y que para la realización de este análisis se consideró un promedio de las distancias recorridas por cada tipo de vehículo por caso de prueba. Adicionalmente, este no es el único impacto ambiental que se tiene por el uso de estos recursos, también se tiene que entrar en consideración el uso del agua por parte de las tanquetas antidisturbios, contando estas con una capacidad de aproximadamente 5000 litros, los cuales después de su uso no pueden ser aprovechados.

Por otro lado, se encuentran los gases lacrimógenos que, aunque no son parte de los recursos utilizados durante en el proyecto, es de vital importancia mencionarlo. Estos, son un tipo de arma química cuyos agentes se dispersan en el aire dificultando la respiración y visibilidad de los protestantes. Según un artículo de la Universidad Nacional, “El gas más usado para la dispersión de personas en escenarios de disturbio es el clorobenzilideno malonitrilo (CS), el cual es menos tóxico que el cloroacetofenona (CN) y la oleoresina capsicum (OC), o gas pimienta, que es una mezcla de diferentes compuestos extraídos del ají, entre los cuales la capsaicina es el mayor ingrediente activo”[50]. La investigación a fondo de los impactos de estos gases en el medio ambiente está por fuera del alcance de este proyecto debido a que se requieren experimentos químicos/ambientales para cuantificar los porcentajes de emanación de estos, además de costos adicionales para financiar un apropiado análisis químicos. No obstante, se hace un llamado al uso responsable y adecuado de los gases lacrimógenos.

B. Estandarización de la solución

Si bien la contextualización inicial de este proyecto se enfoca en las características específicas de una ciudad, las condiciones en las que se implemente ese modelo pueden llegar a ser bastante diversas. Por lo tanto, se debe tener suficiente claridad sobre los requerimientos propios de información como de manipulación del diseño para que se logre la correcta implementación, obteniendo resultados positivos como se demuestra en el experimento computacional. En coherencia con la estructura del modelo matemático, es la veracidad y exactitud de los datos de entrada, es decir, los parámetros, la que condiciona la precisión de las soluciones al momento de ser implementadas en la realidad. Como se expresa en apartados anteriores, las fuentes de información propias de las entidades policiales resultan insuficientes para tener total transparencia de los datos. Incluso, se puede evidenciar la inexistencia de los cálculos por parte de estas.

Con lo anterior en mente, es destaca la importancia de complementar los procesos de análisis de los comportamientos propios de las entidades policiales. Debido a la naturaleza de estas entidades, la custodia de los datos por motivos de seguridad es entendible. Sin embargo, es necesario para el adecuado funcionamiento del modelo que los datos sean lo más cercanos a la realidad posible. Como principal requerimiento, se demanda un inventario completo de cada una de las estaciones de policías a considerar. Se debe conocer con certeza la cantidad de hombres, tanquetas y vehículos *kronos* con que cuenta cada uno. Igualmente, se deben garantizar la disponibilidad de estos recursos para ser usados, pues se conoce que la totalidad de uniformados ubicados en una misma estación no siempre se encuentran disponibles para brindar atención a las protestas. Además, el estado de los vehículos es necesario conocerlo, pues se deben considerar solo aquellos medios de transporte que se encuentren en las condiciones adecuadas para ser usados.

Por otra parte, se debe tener una vinculación a un artefacto computacional que posibilite el reconocimiento de las distancias entre los nodos considerados. Además, este mecanismo debe establecer los posibles tiempos de viajes para recorrer cada uno de los posibles arcos. Esto, resaltando que, en condiciones reales, debido a las condiciones de las vías y el tráfico, es conveniente emitir los tiempos de desplazamiento para cada caso en particular. Adicionalmente, se deben tener en cuenta las restricciones de velocidad propias de cada contexto a considerar para calcular los tiempos de viaje.

Posteriormente, tal vez la parte más importante de la implementación del modelo recae en la caracterización de los focos de protestas. Se entiende que estos son los que condicionan las demandas, tiempo de atención y las ventanas de tiempo. Por ende, al evidenciarse la falta considerable de caracterización pública de estos eventos por parte de los organismos de control, se debe incurrir en estrategias que determinen los parámetros asociados a estos. De esta forma, mediante el diseño de experimentos estadísticos y regresiones, se pretenden estandarizar las relaciones de demanda de policías y vehículos con las personas pertenecientes a una manifestación. Adicionalmente, el proceso cuidadoso de experimentos de simulación y muestreo de datos para identificar las posibilidades de aparición de determinados focos de protestas, así como, considerando su impacto histórico y haciendo uso de herramientas de pronóstico, poder emitir presunciones adecuadas a lo que se puede presentar en un escenario determinado.

Complementando, la estandarización mediante el análisis de las ventanas de tiempo juega un papel fundamental en la parte de parametrizar los datos. Se debe realizar cuidadosos procesos de análisis histórico, así como de regresiones que permitan establecer

el comportamiento real de las ventanas de tiempo. De esta forma, se vincula la apertura y cierre de la ventana de tiempo teniendo en cuenta la demanda de tiempo de atención por cada uno de los focos. Se deben diseñar los experimentos computacionales que permitan definir, una vez relacionadas las cantidades de policías demandadas dependiendo de la concentración de civiles, el tiempo pronosticado que puede requerir cada uno de los focos para ser atendido. Para el cálculo de los posibles tiempos de atención, se debe tener en consideración la habilidad de los uniformados para prestar la atención a cada foco, así como el correcto funcionamiento de las tanquetas, permitiendo una atención eficaz.

El correcto análisis de las condiciones de los recursos disponibles se presenta como especial consideración para controlar los posibles impactos adversos generados con las soluciones. Con esto en mente, el monitoreo constante de las condiciones de los motores de los vehículos permite tener un mejor recuento de las emisiones de gases generados. El estado del material policial también juega un papel fundamental en la optimalidad del actuar de los uniformados. El debido monitoreo sistemático, así como la caracterización de cada uno de los recursos, se plantea como un aspecto bastante importante, principalmente para medir los posibles impactos medioambientales.

Se recalca la necesidad de contar con datos lo más ceñidos a la realidad posible, para que ofrezcan soluciones lo más acertadas posibles. Pues si no se cuenta con información suficientemente acoplada al contexto, al momento de implementar las soluciones emitidas bajo esos datos, los resultados serán muy diferentes a los esperados. Por ende, la implementación de los parámetros al modelo debe ser realizada con especial cuidado. Esto, requiere de un personal con competencias suficientes para implementar de manera adecuada esta información. El perfil de acción de un ingeniero industrial o un ingeniero de sistemas cuenta con las cualidades suficientes de análisis y habilidades de programación para incluir la información requerida. De igual forma, el conjunto de las soluciones emitidas también debe ser debidamente interpretado y contar con un diseño específico de integración al contexto real.

Por último, la necesidad de contar con lenguaje de programación suficientemente capaz de considerar los volúmenes de información considerados en este modelo. En este proyecto, se emplea AMPL como herramienta principal de resolución del modelo. Sin embargo, la formulación matemática puede ser adaptada para emitir soluciones dependiendo del funcionamiento interno de cada una de las herramientas computacionales. Lo que se espera es que tenga la suficiente capacidad para encontrar una muy buena solución, en un tiempo considerablemente corto.

C. Conclusiones

Recapitulando lo encontrado durante el proceso de diseño y análisis del modelo matemático, así como de sus resultados y los impactos potenciales identificados. Se reconoce que el modelo matemático diseñado para abarcar la problemática encontrada resultó teniendo un mayor grado de detalle en su caracterización respecto a la inicialmente planteada, pasando de un enfoque muy general a uno más específico. Así, el problema de orientación de equipos con ventanas de tiempo, la base inicial de la propuesta, terminó incluyendo consideraciones propias de la realidad como son la consideración de flota heterogénea, además de la característica de manejar recursos renovables. También, se extiende el alcance del modelo al considerarlo como *multidepot* y brindándole la capacidad de atender los focos de manera compartida. Por lo tanto, el alcance del modelo inicialmente pensado fue escalando a medida que se iban considerando aspectos relevantes a tener en cuenta, resultando un modelo bastante robusto que considera una gran cantidad de condiciones y satisface restricciones de múltiples naturalezas.

Haciendo énfasis en el proceso de recopilación de información de entrada para el modelo, se evidencia una gran carencia en la disponibilidad de esta. Las entidades policiales, probablemente debido a su naturaleza de entidad de seguridad, no tienen un recuento disponible de los mecanismos de respuesta frente a fenómenos de protestas múltiples. Tampoco, se tiene en detalle la disponibilidad de los recursos para atender a los diferentes focos de protestas. Por ende, el equipo desarrollador debe, mediante reglas y relaciones, establecer unos parámetros asociados a los recursos policiales, que pueden diferir de los reales, para obtener resultados mediante el modelo diseñado. Así, la estandarización de la solución mediante diferentes procesos estadísticos de muestreo, regresión y experimentos computacionales, se posicionan como una necesidad. Pues, el limitado acceso y organización de la información frente a los recursos y mecanismos policiales, se presenta como un obstáculo al momento de obtener resultados muy cercanos a la realidad.

Respecto a los resultados obtenidos mediante el experimento computacional, se evidencia la gran capacidad del modelo para encontrar, en 70 de 90 casos, la solución óptima bajo las condiciones establecidas. Se reconoce que, con modificaciones enfocadas a la expansión de cálculo computacional, el modelo pueda alcanzar un mejor valor para el total de óptimos encontrados. Para los 30 casos en los cuales no se obtuvo el óptimo, el experimento responsabiliza la falta de tiempo para calcularlo como causa de su

condición, no la capacidad del modelo para obtenerlo. En general, aun teniendo en consideración los resultados que no alcanzaron a emitir la mejor solución posible, el incremento respecto al KPI establecido se calcula superior al 10%. Bajo las adecuaciones del experimento computacional, se espera un incremento aún mayor.

Abogando a la naturaleza de los eventos de protestas, se busca mediante la implementación del modelo en contextos reales, dar la respuesta oportuna y efectiva a los focos, sin opacar el carácter social de los mismos. Al estar contemplados dentro de la constitución los derechos a la manifestación pacífica, el modelo atiende los focos de protestantes de manera oportuna para, aun cumpliendo con el respeto al derecho de manifestarse, ofrecer un debido control para mitigar los efectos adversos. El impacto social esperado al poder atender de manera oportuna los focos, se plantea en salvaguardar el bienestar común, sin que se vean afectados diferentes ámbitos ajenos de los ejes de protestas. Al este modelo poder ser extrapolado a diferentes contextos debido a su notable flexibilidad de adaptación, se puede pensar en un mantenimiento del bienestar social incluso en escenarios más grandes que una sola ciudad. Además, la vinculación del modelo a contextos de atención catástrofes ambientales, eventos sociales de grandes magnitudes, atención policial, entre otras, contempla varios escenarios que brindan un impacto directo en el bienestar social.

Finalmente, se reconoce la necesidad de establecer un proceso cuidadoso de estandarización a la hora de querer implementar este modelo matemático en determinados contextos. La efectividad de las soluciones emitidas depende de la coherencia entre estos y la realidad. Por otro lado, se observa que la medición detallada del funcionamiento de los recursos considerados, especialmente los vehículos, afecta directamente el volumen de emisiones de gases contaminantes. Estos contaminantes comprenden el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno, el monóxido de carbono, material particulado y ozono. Teniendo importantes contraindicaciones en las condiciones de vida de la población en general.

D. Recomendaciones

Teniendo en cuenta la naturaleza de este proyecto como proyecto de grado de pregrado, el alcance que tiene es bastante satisfactorio, considerando la diversidad de características y condiciones contempladas, anteriormente expuestas. No obstante, con el objetivo de lograr un impacto aún mayor que el actual que permita emitir soluciones en escenarios más complejos, se determinan una serie de recomendaciones y adiciones a considerar para el modelo matemático en un nivel de alcance mucho mayor.

Para la magnitud de los casos de prueba manejados en este proyecto, la solución mediante el diseño del modelo matemático resulta suficiente para encontrar las mejores soluciones posibles. Seguramente, al contar escenarios de mayor magnitud, se deba pensar en la adición de otras estrategias de solución al modelo matemático base, refiriéndose a metaheurísticas o heurísticas. Esta adición se considera oportuna para encontrar muy buenas soluciones a los problemas más grandes. Estas, podrían estar asociadas a la búsqueda local iterada o el algoritmo de la colonia de abejas que fueron estudiadas en apartados anteriores.

Nuevamente, abogando por la naturaleza del proyecto, se considera un escenario determinista justificado por el historial de sucesos con que cuentan las entidades policiales del territorio. Sin embargo, se debe reconocer que las manifestaciones presentadas en diferentes territorios no siempre cuentan con ubicaciones ni magnitudes conocidas. Por lo tanto, la implementación de un componente estocástico dentro del modelo de solución resultaría conveniente para generar soluciones que consideren la aparición de sucesos no planeados. Con esto, se buscaría aumentar el nivel de alcance y la robustez del modelo, pues no se necesitaría conocer con anterioridad la información propia de cada uno de los focos a atender, se entraría a analizar el componente probabilístico, para el cual se requiere un diseño experimental previo.

Por otra parte, al evidenciar la dificultad para encontrar información actualizada y verídica referente a los mecanismos de programación y a los recursos propios de las entidades policiales, se deben diseñar estrategias para mejorar estos procesos. Con esto en mente, resultaría conveniente la implementación de regresiones para analizar los comportamientos policiales. También, resultaría útil la realización sistemática de experimentación por parte de estas entidades para comprender mejor, basado en las condiciones que tienen, cuáles serían los mejores mecanismos de respuesta. De esta forma, se esperaría que dichos procesos tuvieran un impacto positivo en lo que es el abastecimiento de información confiable para encaminar procesos de mejoría. Proporcionando así un incremento en los índices de desempeño de este tipo de instituciones.

A través del análisis de los diversos impactos que genera el modelo, resultaría pertinente considerar un modelo multiobjetivo. Este, se encargaría no solo de la maximización de los porcentajes de cobertura y operación policial, sino de garantizar soluciones muy buenas, pero que tengan un impacto ambiental positivo. Es decir, se podría considerar como objetivo del problema el análisis

de consumo de combustible y la emisión de gases contaminantes a la hora de realizar las rutas de atención. Con este multiperspectivismo no solo se cumpliría con un objetivo policial, sino también con una mejoría medioambiental, contribuyendo a disminuir la huella contaminante por parte de los vehículos. Además, al considerar también la disminución de las distancias como objetivo del problema, se pretendería un ahorro en los costos incurridos por consumo de combustible y desgaste vehicular. Esto aumentaría la complejidad del problema, por lo que las herramientas de solución recomendadas anteriormente resultarían necesarias.

Finalmente, es importante tener una visión orientada hacia el valor que se le pueda proporcionar con este tipo de proyectos a la sociedad. Para ello, se recomienda tener en cuenta el cumplimiento de alguno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, más específicamente, el objetivo 16: “Paz, justicia e instituciones fuertes: Promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles”[51]. Esto se refiere a impulsar y favorecer entornos seguros, alejados de la violencia, en cooperación con las autoridades competentes. Al considerar diversos objetivos desde un mismo modelo, se posibilita la consolidación de sociedades más sostenibles.

Con el ámbito de generar un impacto contundente y real con este proyecto, es de vital relevancia para el equipo desarrollador la difusión de este. Así, la asistencia a congresos tanto nacionales como internacionales se convierte en un mecanismo para potencializar la integración de este diseño a diferentes contextos en los cuales se espera un desempeño bastante destacable. También, se planea la publicación de este modelo en diferentes plataformas de consulta científica, revistas indexadas, entre otros, pues, como se logró observar, los excelentes resultados obtenidos gracias a la robustez del modelo deben ser compartidos con la comunidad intelectual para aportar de manera significativa a las fuentes de conocimiento. De esta forma, se pretende ofrecer un proyecto innovador, pero a su vez adaptable dependiendo de los contextos en que se quiera implementar y que supere el ser un muy buen proyecto teórico y se convierta en un valioso aporte a la sociedad.

VIGLOSARIO

Problema de orientación: The Orienteering Problem en inglés, refiere a un problema de diseño de ruta donde se busca atender a aquellos nodos que representen el mayor impacto global de la situación. En este problema cada nodo a considerar tiene un peso asignado, estableciendo prioridades para ser seleccionado o no dentro de la ruta. Reconoce también las distancias entre los nodos, buscando el menor desplazamiento posible [12].

Ventanas de tiempo: Time Windows en inglés, es el periodo entre el que es pertinente atender un evento y cuando ya no vale la pena considerarlo[13].

Ciclo Hamiltoniano: Se refiere al diseño de ruta que visita todos los nodos en un grafo o problema una sola vez, donde el primer y el último nodo coinciden, eso lo hace un ciclo [14].

Modelo de orientación de equipos: Basado en la complementación del problema de orientación, se suma a este modelo la consideración de tener diversas rutas atendiendo diversos nodos en simultaneo. La caracterización de “equipos” hace referencia a las habilidades que tiene cada equipo para suplir las demandas de cada uno de los nodos a considerar [15].

Onion Stakeholder: Diagrama que permite posicionar a los diversos interesados de un proyecto en los diferentes círculos, según su nivel de influencia o participación en el mismo. A mayor distancia entre el centro del diagrama y la posición del interesado, menor será su relevancia para el proyecto [52].

Vehículos *Kronos*: Son vehículos blindados dedicados al transporte de personal policial durante situaciones de alteraciones de orden público [53].

Problema NP-Hard: Problema de optimización que, debido a su complejidad, no se garantiza su solución óptima, solo buenas soluciones [36].

Colonia Artificial de Abejas: Corresponde a una metaheurística de solución enfocada en el comportamiento de las colonias de abejas y los comportamientos de estas en busca de una mejor solución [54].

Algoritmo genético: Algoritmo de solución mediante el cual se estipulan dos soluciones iniciales y se empiezan a intercambiar características entre ellas con el fin de generar posibles mejores soluciones[55].

Heurística: Se refiere al método de buscar soluciones a algún problema [56].

Metaheurística: Método de solución empleado para aquellos problemas que no cuentan con una solución satisfactoria u óptima. Es una adaptación de modelos heurísticos [57]

VII.REFERENCIAS

- [1] M. C. García Velandia, “40 años del Paro Cívico Nacional de 1977,” *Cien días*, no. 91, pp. 19–24, 2017.
- [2] E. Cruz Rodríguez, “La rebelión de las ruanas: el paro nacional agrario en Colombia,” *Análisis*, vol. 49, no. 90, pp. 83–109, Feb. 2017.
- [3] “CONSTITUCIÓN POLÍTICA.” <http://www.secretariassenado.gov.co/index.php/constitucion-politica> (accessed Mar. 21, 2022).
- [4] “La Declaración Universal de Derechos Humanos | Naciones Unidas.” <https://www.un.org/es/about-us/universal-declaration-of-human-rights> (accessed Mar. 21, 2022).
- [5] Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos, “El Paro Nacional 2021: Lecciones aprendidas para el ejercicio del derecho de reunión pacífica en Colombia,” Dec. 2021.
- [6] Portafolio, “Economía ha perdido \$10,8 billones en un mes de paro,” May 27, 2021.
- [7] A. Lanz Sánchez, A. Rodríguez Pabón, J. Bustamante Reyes, M. Castro Martínez, and S. Mendez Niebles, “TIROS A LA VISTA,” 2021.
- [8] L. Marín Gutiérrez, “Pistas metodológicas para sistematizar las acciones colectivas en el marco del Paro Nacional en abril-junio de 2021 en Cali, Colombia,” *Chasqui. Revista Latinoamericana de Comunicación*, pp. 195–216, 2022.
- [9] “¿Nueva salida masiva de policías y militares?,” *Revista Semana*, Nov. 2021, Accessed: Apr. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.semana.com/nacion/articulo/nueva-salida-masiva-de-policias-y-militares/202132/>
- [10] “‘Cali tiene la tasa más baja de policías de todo el país’ - Cali - Colombia - ELTIEMPO.COM,” *El Tiempo*, Cali, Oct. 09, 2018. Accessed: Apr. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/cali/cali-tiene-la-tasa-mas-baja-de-policias-de-todo-el-pais-278868>
- [11] I.-M. Chao, B. L. Golden, and E. A. Wasil, “A fast and effective heuristic for the orienteering problem,” *Eur J Oper Res*, vol. 88, pp. 475–489, 1996.
- [12] A. Gunawan, H. C. Lau, and P. Vansteenwegen, “Orienteering Problem: A survey of recent variants, solution approaches and applications,” *European Journal of Operational Research*, vol. 255, no. 2. Elsevier B.V., pp. 315–332, Dec. 01, 2016. doi: 10.1016/j.ejor.2016.04.059.
- [13] T. Cura, “An artificial bee colony algorithm approach for the team orienteering problem with time windows,” *Comput Ind Eng*, vol. 74, no. 1, pp. 270–290, 2014, doi: 10.1016/j.cie.2014.06.004.
- [14] L. Alfaro, “CICLO HAMILTONIANO ÓPTIMO EN UN GRAFO (PROBLEMA DEL VIAJANTE),” Zaragoza, 2020.
- [15] I.-M. Chao, B. L. Golden, and E. A. Wasil, “The team orienteering problem,” *Eur J Oper Res*, vol. 88, pp. 464–474, 1996.

- [16] S. W. Lin, "Solving the team orienteering problem using effective multi-start simulated annealing," *Applied Soft Computing Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 1064–1073, 2013, doi: 10.1016/j.asoc.2012.09.022.
- [17] A. E. Yahiaoui, A. Moukrim, and M. Serairi, "The clustered team orienteering problem," *Comput Oper Res*, vol. 111, pp. 386–399, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cor.2019.07.008.
- [18] Alcaldía de Santiago de Cali, *DECRETO No. 4112.010.20. de 2020*. Colombia: Alcaldía de Santiago de Cali , 2020.
- [19] Congreso de la República de Colombia, *LEY 769 de 2002*. Colombia, 2002.
- [20] Ministerio de Defensa Nacional, *RESOLUCIÓN No. 03002 de 2017*. Colombia.
- [21] Defensoría del Pueblo, *RESOLUCIÓN No. 481 de 2021*. Colombia: Defensoría del Pueblo .
- [22] M. Rabe, J. Chicaiza-Vaca, R. D. Tordecilla, L. D. C. Martins, and A. A. Juan, "Supporting Hospital Logistics during the First Months of the COVID-19 Crisis: A Simheuristic for the Stochastic Team Orienteering Problem," *Proceedings - Winter Simulation Conference*, vol. 2021-December, 2021, doi: 10.1109/WSC52266.2021.9715335.
- [23] A. Garcia, P. Vansteenwegen, O. Arbelaitz, W. Souffriau, and M. T. Linaza, "Integrating public transportation in personalised electronic tourist guides," *Comput Oper Res*, vol. 40, no. 3, pp. 758–774, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.cor.2011.03.020.
- [24] F. S. Moosavi Heris, S. F. Ghannadpour, M. Bagheri, and F. Zandieh, "A new accessibility based team orienteering approach for urban tourism routes optimization (A Real Life Case)," *Comput Oper Res*, vol. 138, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.cor.2021.105620.
- [25] M. Khodadadian, A. Divsalar, C. Verbeeck, A. Gunawan, and P. Vansteenwegen, "Time dependent orienteering problem with time windows and service time dependent profits," *Comput Oper Res*, vol. 143, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.cor.2022.105794.
- [26] W. Zheng, H. Ji, C. Lin, W. Wang, and B. Yu, "Using a heuristic approach to design personalized urban tourism itineraries with hotel selection," *Tour Manag*, vol. 76, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.tourman.2019.103956.
- [27] A. Gunawan *et al.*, "A mathematical model and metaheuristics for Time Dependent A mathematical model and metaheuristics for Time Dependent Orienteering Problem Orienteering Problem Citation Citation A mathematical model and metaheuristics for Time Dependent Orienteering Problem A Mathematical Model and Metaheuristics for Time Dependent Orienteering Problem," 2014. [Online]. Available: https://ink.library.smu.edu.sg/sis_research
- [28] I. Hapsari, I. Surjandari, and K. Komarudin, "Solving multi-objective team orienteering problem with time windows using adjustment iterated local search," *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 15, no. 4, pp. 679–693, Dec. 2019, doi: 10.1007/s40092-019-0315-9.
- [29] R. L. Church, "COBRA: A New Formulation of the Classic p-Median Location Problem," 2003.
- [30] "Project OSRM." <http://project-osrm.org/> (accessed Apr. 20, 2022).
- [31] "TOPTW Format – Division CIB." <https://www.mech.kuleuven.be/en/cib/op/instances/TOPTWformat/view> (accessed Apr. 20, 2022).
- [32] L. Alberto Rodríguez Ospino *et al.*, "Encuesta Nacional Logística 2020." [Online]. Available: www.puntoaparte.com.co
- [33] Steven Nahmias and Tava Lennon Olsen, *Production and Operations Analysis, Seventh Edition 7th Edición*, 7th ed. Long Grove: Waveland Press. Inc , 2015.

- [34] Frederick S. Hillier and Gerarld J. Lieberman, *Introduccion a la investigacion de operaciones*. 2010.
- [35] D. S. Hochbaum, *Approximation algorithms for NP-hard problems*. PWS Pub. Co, 1997.
- [36] Moshe B. Rosenwein and Marisa G. Kantor, “The Orienteering Problem with Time Windows,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 43, no. 6, pp. 623–635, 1992.
- [37] I. Hapsari, I. Surjandari, and K. Komarudin, “Solving multi-objective team orienteering problem with time windows using adjustment iterated local search,” *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 15, no. 4, pp. 679–693, Dec. 2019, doi: 10.1007/s40092-019-0315-9.
- [38] V. F. Yu, P. Jewpanya, S. W. Lin, and A. A. N. P. Redi, “Team orienteering problem with time windows and time-dependent scores,” *Comput Ind Eng*, vol. 127, pp. 213–224, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2018.11.044.
- [39] P. Vansteenwegen, W. Souffriau, G. vanden Berghe, and D. van Oudheusden, “Iterated local search for the team orienteering problem with time windows,” *Comput Oper Res*, vol. 36, no. 12, pp. 3281–3290, Dec. 2009, doi: 10.1016/j.cor.2009.03.008.
- [40] J. Karbowska-Chilinska and P. Zabielski, “Genetic algorithm solving the orienteering problem with time windows,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2014, vol. 240, pp. 609–619. doi: 10.1007/978-3-319-01857-7_59.
- [41] H. R. Lourenço, O. C. Martin, and T. Stützle, “Chapter 11 ITERATED LOCAL SEARCH.”
- [42] J. B. Santana *et al.*, “Metaheurísticas: una revisión actualizada *,” 2004. [Online]. Available: <http://webpages.ull.es/users/gci/>
- [43] AMPL, “Licensing and payment options for your project’s needs,,” 2022. <https://ampl.com/licenses-and-pricing/standard-pricing/> (accessed Nov. 19, 2022).
- [44] AMPL, “Free, full-powered AMPL for professional, academic and personal use.,” 2022. Free, full-powered AMPL for professional, academic and personal use. (accessed Nov. 19, 2022).
- [45] Gacetas Asamblea Constituyente de 1991: 12 y 26A, “Artículos de la Constitución Política,” 2022.
- [46] Asamblea General de las Naciones Unidas, “La Declaración Universal de Derechos Humanos,” 1948.
- [47] J. A. Ortega-García and J. Alonso López-Andreu, “School buses and diesel engine: Atmospheric contamination, pediatric exposure and adverse effects in human health Pregnancy alcohol consumption. Spatial factors View project Childhood Cancer and Environment View project.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/286888249>
- [48] “ORGANIZACION DE NACIONES UNIDAS,” *Climate Action*, Jan. 05, 2022.
- [49] División de Ciencias Ambientales del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, “Emisiones de CO2 del consumo de combustible líquido (% del total) ,” 2016.
- [50] Combariza David, “Gases lacrimógenos: ¿qué son y cuáles son las consecuencias de estar expuesto a ellos?,” *Periódico Universidad Nacional de Colombia*, Dec. 2022, Accessed: Nov. 20, 2022. [Online]. Available: <https://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/gases-lacrimogenos-que-son-y-cuales-son-las-consecuencias-de-estar-expuesto-a-ellos/>
- [51] Sustainable Development Goals Fund, “Objetivo 16: Paz, justicia e instituciones fuertes.” <https://www.sdgfund.org/es/objetivo-16-paz-justicia-e-instituciones-fuertes> (accessed Nov. 20, 2022).

- [52] I. Alexander and S. Robertson, “Understanding Project Sociology by Modeling Stakeholders,” *IEEE Softw*, vol. 21, no. 1, pp. 23–27, Jan. 2004, doi: 10.1109/MS.2004.1259199.
- [53] “La Policía colombiana incorpora cuatro vehículos Kronos.” <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3124847/policia-colombiana-incorpora-cuatro-vehiculos-kronos> (accessed Apr. 20, 2022).
- [54] M. I. Gutiérrez Urzúa, P. G. Galvez, B. Eltit, and H. Reinoso, “Solving the problem of investment portfolios using heuristics from artificial bee colony,” *Estudios Gerenciales*, vol. 33, no. 145, pp. 391–399, 2017, doi: 10.1016/j.estger.2017.11.001.
- [55] Marcos Gestal, Daniel Rivero, Juan Ramón Rabuñal, Julián Dorado, and Alejandro Pazos, *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética*. Universidade da Coruña, 2010.
- [56] Clark Moustakas, *Heuristic Research: Design, Methodology, and Applications*. SAGE Publications, 1990.
- [57] S. Hart, “ADAPTIVE HEURISTICS,” 2005. [Online]. Available: <http://www.ma.huji.ac.il/hart/abs/>

VIII. ANEXOS

TABLA XIV TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo
1	2022 105 - Anexo 1. Hoja de Trabajo Contexto y Justificación	Propio	Documento Word
2	2022 105 - Anexo 2. Hoja de Trabajo Grupos de Interés	Propio	Documento Word
3	2022 105 - Anexo 3. Datos generales e instancias.	Propio	Documento Excel
4	2022 105 – Anexo 4. Plan de Trabajo	Propio	Documento Project
5	2022 105 - Anexo 5. Lista de Chequeo para Revisión Documental	Propio	Documento Word