

Un algoritmo genético para el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia en caso de desastres naturales.

Aenny Johanna Riveros Villabona y Andrea Viviana Salgado López

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniería Industrial

Director

Karin Julieth Aguilar Imitola

Magister En Ingeniería Industrial

Codirector

Javier Eduardo Arias Osorio

Magister en Administración.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2021

**Dedicatoria**

*A Dios por ser mi guía durante toda la carrera.*

*A mis padres, hermano, familiares, y allegados por su ejemplo y apoyo, por crear en mí una mujer luchadora y persistente.*

*A mis compañeros y amigos con quienes compartí estos años de formación, y de quienes aprendí cosas nuevas para mi vida, porque este logro no hubiese sido posible sin ustedes, los llevare siempre en mi corazón.*

*A Andrea Salgado compañera de proyecto quien me acompaño en mi formación y quien trabajó hombro a hombro en este proyecto conmigo, con el fin de que salieran de la mejor manera.*

**Anny Riveros Villabona**

*A Dios por llenarme de fortaleza y paciencia para alcanzar este gran logro en mi vida profesional.*

*A mis padres por su amor y paciencia durante la realización de mi proyecto.*

*A mis hermanos por su apoyo incondicional, compañía y consejos en mi desarrollo como profesional.*

*A mis amigos y compañeros por brindarme su amistad durante este tiempo.*

*A mi compañera Anny Riveros por su paciencia, su apoyo y por haber sido una gran aliada en la culminación de este proyecto.*

**Andrea Salgado López**

### **Agradecimientos**

A nuestra alma mater, la Universidad Industrial de Santander por todas sus enseñanzas y las experiencias vividas que nos permitieron crecer personal y profesionalmente.

A los profesores Karin Aguilar Imitola y Javier Arias Osorio por su compromiso y guía en el desarrollo de este proyecto.

Al grupo de Investigación OPALO por su colaboración.

**Tabla de Contenido**

Introducción.....	12
1 Generalidades del proyecto.....	15
1.1 Planteamiento del Problema.....	15
1.2 Justificación del proyecto.....	18
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo General.....	21
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
1.4 Metodología.....	22
2 Revisión literaria.....	25
3 Marco Teórico.....	31
3.1 Logística.....	31
3.1.1 Logística humanitaria.....	32
3.2 Desastre.....	33
3.3 Gestión de Desastres.....	34
3.3.1 Procesos de la Gestión del Riesgo a Desastres.....	36
3.4 Red de Prestación de servicios de salud en el municipio de Bucaramanga.....	38
3.4.1 Asistencia Médica en Desastres.....	39
3.4.2 Servicios de emergencias médicas SEM.....	39
3.4.2.1 Descripción básica de las actividades que se realizan en un SEM.....	40
3.4.2.2 Vehículos de Emergencia.....	41
3.5 Optimización Combinatoria.....	42
3.5.1 Problemas de optimización combinatoria.....	43
3.5.1.1 Complejidad Combinatoria.....	44
3.6 Métodos de solución.....	45
3.7 Computación Evolutiva.....	49
3.7.1 Programación Evolutiva.....	50
3.7.2 Estrategias Evolutivas.....	51
3.7.3 Algoritmos Genéticos (AG).....	52
3.7.3.1 Funcionamiento.....	54
3.7.3.2 Operadores Genéticos.....	56
4 Formulación del Modelo Matemático.....	59

5	Diseño del Algoritmo Genético .....	66
5.1.1	Representación de los individuos .....	70
5.1.2	Generación de la población inicial .....	71
5.1.3	Operador de selección.....	71
5.1.4	Operador de cruce.....	74
5.1.5	Operador de mutación.....	76
6	Caso de Estudio .....	78
6.1	Descripción del Caso.....	78
6.1.1	Red de Emergencia.....	79
6.1.2	Nodos de la red de emergencia.....	81
6.1.2.1	Área de desastre.....	81
6.1.2.2	Servicios de Salud – Hospitales. ....	81
6.1.2.3	Vehículos de emergencia.....	82
6.1.3	Estimación de las zonas de emergencia.....	85
6.1.4	Estimación de la población afectada.....	87
6.1.5	Clasificación por prioridad mediante códigos de colores.....	91
7	Validación del algoritmo .....	92
7.1	Primer escenario .....	92
7.2	Segundo escenario.....	96
7.3	Tercer escenario.....	99
7.4	Resultados de Validación. ....	104
8	Resultados y Análisis.....	109
8.1	Resultados de escenarios .....	110
9	Conclusiones.....	126
10	Recomendaciones .....	128
	Referencias Bibliográficas.....	130

**Lista de Tabla**

<b>Tabla 1</b> Cumplimiento de Objetivos.....	14
<b>Tabla 2</b> Valores fitness de las soluciones planteadas .....	74
<b>Tabla 3</b> Priorización de los servicios de salud según gravedad de la lesión.....	82
<b>Tabla 4.</b> Datos relaciones con el vehículo. ....	83
<b>Tabla 5.</b> Priorización de vehículos de emergencia según gravedad del paciente. ....	84
<b>Tabla 6</b> Zonas afectadas por nivel de intensidad de Mercalli.....	86
<b>Tabla 7</b> Porcentaje de víctimas en la zona K para un sismo de intensidad t .....	88
<b>Tabla 8</b> Victimas generadas por área de desastre. ....	89
<b>Tabla 9</b> Descripción de los códigos de los pacientes según su clasificación por colores....	90
<b>Tabla 10</b> Asignación Caso 1 .....	94
<b>Tabla 11</b> Asignación Caso 2.....	97
<b>Tabla 12</b> Resumen Asignación y Reasignación Caso 3 .....	100
<b>Tabla 13</b> Resumen Asignación Caso Real, momento 1.....	112
<b>Tabla 14</b> Resumen Reasignación Caso Real, momento2 .....	117
<b>Tabla 15</b> Resumen Reasignación Caso Real, momento 3. ....	121

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1</b> Planificación de la metodología proyecto de grado .....	23
<b>Figura 2</b> Objetivos y metas de la logística.....	31
<b>Figura 3</b> Procesos de la gestión de desastre.....	36
<b>Figura 4</b> Diagrama de Flujo de un SEM.....	42
<b>Figura 5</b> Diagrama del funcionamiento general de un Algoritmo Genético .....	56
<b>Figura 6</b> Diagrama de flujo de la descripción del algoritmo genético .....	69
<b>Figura 7</b> Representación del cromosoma .....	71
<b>Figura 8</b> Cromosoma de asignación: Hospitales, VE.....	71
<b>Figura 9</b> Ejemplo de representación de 4 posibles soluciones al problema. ....	73
<b>Figura 10</b> Cruce en un punto de p1 y p2 .....	75
<b>Figura 11</b> Cruce en un punto de p3 y p4 .....	76
<b>Figura 12</b> Mutación: hijo 4.....	77
<b>Figura 13</b> Fallas geológicas de Bucaramanga .....	80
<b>Figura 14</b> Organismos de Socorro y hospitales.....	80
<b>Figura 15</b> Comunas de Bucaramanga.....	80
<b>Figura 16</b> Zonificación geomorfica de Bucaramanga .....	80
<b>Figura 17</b> Escenario de prueba. ....	85
<b>Figura 18</b> Zonas de mayor vulnerabilidad según zonificación geomorfica .....	86
<b>Figura 19</b> Escenario 1 .....	94
<b>Figura 20</b> Comportamiento Función Objetivo PG Caso 1. ....	95
<b>Figura 21</b> Comportamiento Función Objetivo PM Caso 1.....	95
<b>Figura 22</b> Comportamiento Función Objetivo PL Caso 1.....	96
<b>Figura 23</b> Escenario Caso 2.....	98
<b>Figura 24</b> Comportamiento Función Objetivo PG Caso 2 .....	98
<b>Figura 25</b> Comportamiento Función Objetivo PM Caso 2.....	98
<b>Figura 26</b> Comportamiento Función Objetivo PL Caso 2.....	99
<b>Figura 27</b> Escenario Caso 3.....	100

<b>Figura 28</b> Comportamiento Función Objetivo PG. Caso 3 .....	101
<b>Figura 29</b> Comportamiento Función Objetivo PM Caso 3.....	101
<b>Figura 30</b> Comportamiento Función Objetivo PL Caso 3.....	102
<b>Figura 31</b> Escenario Caso 3 Reasignación .....	102
<b>Figura 32</b> Comportamiento Función Objetivo PG Caso 3 Reasignación.....	103
<b>Figura 33</b> Comportamiento Función Objetivo PM Caso 3. Reasignación .....	103
<b>Figura 34</b> Comportamiento Función Objetivo PL Caso 3. Reasignación .....	103
<b>Figura 35</b> Momento 1 Caso real .....	111
<b>Figura 36</b> Momento 1 Resumen Caso Real.....	112
<b>Figura 37</b> Uso de (TAM) Caso Real .....	114
<b>Figura 38</b> Uso de (TAB) Caso Real. ....	114
<b>Figura 39</b> Momento 2 Caso Real.....	116
<b>Figura 40</b> Momento 2 Caso Real.....	117
<b>Figura 41</b> Uso de (TAM) Caso Real .....	118
<b>Figura 42</b> Uso de (TAB) Caso Real .....	118
<b>Figura 43</b> Momento 3 Caso Real.....	120
<b>Figura 44</b> Momento 3 Resumen Caso Real.....	121
<b>Figura 45</b> Momento 4 Caso Real.....	123
<b>Figura 46</b> Momento 5 Caso Real.....	123
<b>Figura 47</b> Momento 6 Caso Real.....	124
<b>Figura 48</b> Momento 7 Caso Real.....	124
<b>Figura 49</b> Momento 8 Caso Real.....	125

### **Lista de Apéndices**

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Información requerida para los vehículos de emergencia.

Apéndice B. Tabla de Asignación y Reasignación Caso 3.

Apéndice C. Tabla de Asignación y Reasignación Caso Real.

Apéndice D. Figuras Asignación y Reasignación Caso Real.

Apéndice E. Artículo de Carácter Publicable.

Apéndice F. Código de Programación Matlab.

### Resumen

**Título\*:** Un algoritmo genético para el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia en caso de desastres naturales\*

**Autores:** Riveros Villabona, Anny Johanna  
Salgado López, Andrea Viviana\*\*

**Palabras Claves:** Logística humanitaria, algoritmo genético, programación de enteros mixtos, asignación de vehículos de emergencia, estrategia de reasignación.

### Descripción:

Una de las principales dificultades en caso de presentarse un fenómeno natural, es la eficacia en la gestión de emergencias, ya que se requiere de un sistema logístico para apoyar la organización e implementación de las operaciones de respuesta a estos eventos. En la presente investigación se implementa un algoritmo genético para dar solución al problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia para un escenario de desastre, en este caso un evento sísmico en la ciudad de Bucaramanga. Desde el punto de vista de la logística, el objetivo de este trabajo es abordar correctamente a los pacientes críticos desde el sitio de emergencia hasta los centros de atención más adecuados, es decir, una vez que se generan víctimas en las áreas de desastre se realiza la clasificación de los pacientes de acuerdo a un nivel de gravedad que determina la prioridad del paciente para el tratamiento, permitiendo identificar que vehículo de emergencia y centro de atención puede atender a dicho paciente.

Se plantea un modelo matemático que puede definir el número óptimo y la asignación de vehículos de emergencia involucrados en operaciones de socorro, con el fin de minimizar los tiempos de rescate y así socorrer el mayor número de pacientes lesionados de un área de desastre. Además, se desarrolla una estrategia de reasignación de vehículos de emergencia, teniendo en cuenta la evolución de las condiciones de salud de los pacientes, dado que pueden empeorar durante el proceso de rescate y pueden ser revaluadas, dicha estrategia permite ajustar de manera óptima el plan de asignación. Para validar la metodología propuesta es necesario evaluar casos de prueba mediante experimentación numérica, considerando un escenario de desastre para la ciudad de Bucaramanga.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Directora. Karin Julieth Aguilar Imitola, MS.c en Ingeniería Industrial. Codirector. Javier Eduardo Arias Osorio. MS.c en Administración

**Abstract**

**Title:** A genetic algorithm for the problem of allocation and reallocation of emergency vehicles in case of natural disasters\*

**Author:** Riveros Villabona, Anny Johanna  
Salgado López, Andrea Viviana\*\*

**Key Words:** Humanitarian logistics, genetic algorithm, mixed integer programming, emergency vehicle allocation, reallocation strategy.

**Description:**

One of the main difficulties in the event of a natural phenomenon occurring, is the effectiveness in emergency management, since a logistics system is required to support the organization and implementation of response operations to these events. In this research, a genetic algorithm is implemented to solve the problem of assignment and reassignment of emergency vehicles for a disaster scenario, in this case a seismic event in the city of Bucaramanga. From a logistics point of view, the objective of this work is to correctly approach critical patients from the emergency site to the most appropriate care centers, that is, once victims are generated in disaster areas, the patients are classified according to a level of severity that determines the priority of the patient for treatment, allowing to identify which emergency vehicle and care center can attend to said patient.

A mathematical model is proposed that can define the optimal number and allocation of emergency vehicles involved in relief operations, in order to minimize rescue times and thus help the largest number of injured patients in a disaster area. Moreover, a strategy is developed for the allocation of emergency vehicles, taking into account the evolution of the health conditions of the patients, since they can worsen during the rescue process and can be reassessed, this strategy allows the allocation plan to be optimally adjusted. To validate the proposed methodology, it is necessary to evaluate test cases through numerical experimentation, considering a disaster scenario for the city of Bucaramanga. In addition, a strategy is developed for the reassignment of emergency vehicles, taking into account the evolution of the health conditions of the patients, since they can worsen during the rescue process and can be re-evaluated.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physico-mechanical Engineering. Studies School industrials and Businesses Director. Karin Julieth Aguilar Imitola, MS.c in Industrial Engineering. Codirector. Javier Eduardo Arias Osorio. MS.c in Management.

## Introducción

El mundo ha sido testigo de un alarmante aumento en la frecuencia y severidad de los desastres. La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) define los desastres naturales como cambios violentos, súbitos y destructivos en el medio ambiente cuya causa no es la actividad humana, sino los fenómenos naturales. De acuerdo con esto, los desastres naturales forman parte de los procesos de la tierra, pero que al hacer contacto con la población provoca efectos adversos y su gravedad se mide en pérdidas de vida, pérdidas económicas y la capacidad de la población para la reconstrucción.

Según el análisis llevado a cabo por la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR) y el Centro de Investigación de Epidemiología de Desastres (CRED), en los últimos 20 años casi las dos terceras partes de las catástrofes han tenido su origen en inundaciones y tormentas, aunque el riesgo más mortífero sigue teniendo carácter sísmico, dejando millones de personas afectadas alrededor del mundo, como el terremoto de Nepal, que ocasionó en 2015 un total de 8.831 muertos.

Uno de los territorios a nivel mundial más expuestos a las amenazas naturales es América Latina, debido a que comprende al menos cuatro placas tectónicas activas y está situada sobre la cuenca del Pacífico, dando lugar a una parte significativa de la actividad sísmica y volcánica del planeta. Dentro de los países que conforman esta zona, Colombia, cuenta con una amplia diversidad hidrológica, geológica, geomorfológica, y climática, que dan origen a fenómenos naturales, como inundaciones, sequías, movimientos en masa, deslizamientos, sismos, erupciones volcánicas, entre otros. Factores como el incremento de la población humana, especialmente en condiciones de vulnerabilidad, la degradación ambiental, el cambio acelerado del uso del suelo, han hecho que se produzcan más desastres,

por ello el país afronta grandes desafíos que amenazan seriamente su desarrollo socio-económico.

Por su ubicación geológica y geográfica, las regiones Pacífica y Andina son las más propensas y susceptibles a desastres naturales, destacándose el departamento de Santander, por presentar diferentes tipos de fenómenos naturales y antrópicos como deslizamientos, inundaciones, erosión y remoción en masa, además de su alta actividad sísmica, ya que es considerado el segundo nido sísmico a nivel mundial luego de Afganistán. Como consecuencia a la ocurrencia de estos eventos, es necesario tomar acciones para prevenir y mitigar los riesgos existentes, logrando fortalecer la capacidad de respuesta ante estos eventos.

Toda situación de desastre presenta comportamientos y dificultades únicas que determinan el nivel de desafío a enfrentar, para proveer suministros de emergencia rápida en las zonas afectadas. La logística humanitaria desempeña un papel importante en estos eventos, ya que a través de esta se puede planear, implementar, y controlar efectivamente los recursos necesarios. Sin embargo uno de los principales problemas en las operaciones de logística humanitaria se da en la gestión adecuada de los organismos de socorro, específicamente en la asignación de vehículos de emergencia. Por lo cual, el uso de modelos y métodos de la investigación de operaciones es utilizado para hacer frente a este problema.

Debido a la importancia del tema anterior, esta investigación se centra en el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia, con el fin de abordar correctamente los pacientes críticos desde su sitio de incidencia hacia los hospitales más adecuados dependiendo de la gravedad su lesión, por medio de un algoritmo genético que define el

número óptimo y la asignación de vehículos de forma eficiente, logrando maximizar el número de pacientes lesionados tratados con éxito.

**Tabla 1**

*Cumplimiento de Objetivos*

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Numerales relacionados</b>
Realizar una revisión de literatura sobre el problema de asignación y reasignación de vehículos y su aplicación en casos de desastres o emergencias.	Capítulo 2
Formular un modelo matemático para el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia en caso de desastres naturales, a partir de la literatura revisada.	Capítulo 4
Diseñar un algoritmo de genético para dar solución al problema modelado de asignación y reasignación de vehículos de emergencia ante un desastre natural.	Capítulo 5
Implementar el algoritmo construido mediante el lenguaje de programación Matlab para dar solución al problema en estudio.	Apéndice F
Validar el algoritmo construido a través de experimentos numéricos para corroborar la coherencia de los resultados.	Capítulo 7 y Apéndice B.
Elaborar un artículo para publicación en un medio de difusión académico, con base en los resultados obtenidos en la investigación.	Apéndice E

## **1 Generalidades del proyecto**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

La posibilidad que se presenten sucesos o fenómenos naturales de gran impacto junto con las condiciones de vulnerabilidad que facilitan la ocurrencia de los desastres cuando suceden dichos eventos, son entonces los llamados factores de riesgo, sin los cuales el riesgo de desastre no puede existir. Ahora bien, de acuerdo a los indicadores de gestión del riesgo del Banco Interamericano de Desarrollo (2010) la vulnerabilidad está íntimamente ligada a los procesos sociales que se desarrollan en las áreas propensas y usualmente tiene que ver con la fragilidad, la susceptibilidad o la falta de resiliencia de la población ante amenazas de diferente índole. En otras palabras, los desastres son eventos socio-ambientales cuya materialización es el resultado de la construcción social del riesgo.

Los países subdesarrollados o con economía de transición, se han visto más perjudicados por los desastres naturales, debido a las elevadas tasas de crecimiento demográfico y de migración, la pobreza, la desigualdad, la rápida urbanización en lugares expuestos a las amenazas naturales, permiten la aparición de comunidades urbanas vulnerables, que se ven afectadas por enfermedades, lesiones, pérdida de vidas humanas, daños en la infraestructura entre otros, de forma creciente y desproporcionada. En estos sectores, el efecto de las amenazas naturales se intensifica sobre la población más pobre, lo que hace más difícil la capacidad de reaccionar con efectividad y rapidez ante estos eventos.

Colombia, por su posición geográfica y su ubicación en el globo terráqueo (en la zona de confluencia intertropical), es un país altamente vulnerable a las afectaciones causadas por desastres naturales de distinta índole. De acuerdo con estimativos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el país es “uno de los más vulnerables a los desastres naturales en

América Latina, con más de ocho de cada diez colombianos ubicados en zonas propensas a desastres y el 87% del Producto Interno Bruto (PIB) del país en riesgo de tales eventos. Más de 150 desastres naturales han afectado a Colombia en los últimos cuarenta años, cobrando la vida de más de 32.000 personas y afectando a más de doce millones”.

El departamento de Santander está situado en el norte del país formando parte de la Región Andina, la cual es considerada una de las más expuestas a fenómenos de origen natural tales como inundaciones, sequías, movimientos en masa, deslizamientos, sismos y erupciones volcánicas, debido a las variaciones climáticas y su ubicación geográfica, que se caracteriza por su topografía con relieves fuertes y predominio de pendientes abruptas. Según el Índice Municipal De Riesgo del Desastre en Colombia, estudio realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), cerca de ochocientos veinticinco mil personas se encuentran bajo una permanente y alta amenaza por desastres naturales, de acuerdo con la entidad el 39,5 % de la población en el departamento, está expuesta a este tipo de emergencias.

El estudio también señala que el departamento se ubica en el puesto 14 en la escala nacional de acuerdo al ranking departamental como uno de los territorios con más áreas de riesgo. Donde el municipio de Bucaramanga, es considerado el más propenso a fenómenos de origen geológico, es decir que es una zona de alta amenaza sísmica, debido a que confluye el movimiento de las placas tectónicas de la cordillera oriental. A esta problemática se le suma la temporada de lluvias que se presentan en el año, dejando emergencias por deslizamientos, remoción en masa e inundaciones que afectan a la gran cantidad de asentamientos precarios localizados en este municipio.

Asimismo se ha evidenciado una tendencia reactiva, es decir, que solo se actúa cuando ya el evento ha ocurrido a pesar de su posible previsibilidad. Con el fin de reducir, mitigar, y prevenir esta problemática, es fundamental en los procesos de toma de decisiones, crear políticas efectivas que conlleven a una adecuada planeación y atención del riesgo, es necesario fortalecer el desarrollo institucional y estimular la inversión para la reducción de la vulnerabilidad con fines de contribuir al desarrollo sostenible del país, por lo que desde el año 2012 se adoptó la política nacional de gestión de desastres y se estableció el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres constituidos en la Ley 1523, desde ese mismo año el municipio de Bucaramanga constituye el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastre, (PMGRD), tomando así un papel importante el tema de logística humanitaria en todos los procesos de atención del riesgo, ya que a través de esta disciplina se logra gestionar y controlar los diversos actores que entran a participar ante dichos eventos.

Cabe destacar que al presentarse un desastre de gran magnitud, el sistema no logra atender de manera real las necesidades que surgen, puesto que afrontan diversos problemas dentro de la cadena de suministro, especialmente en el sector transporte, donde las pésimas condiciones en las que queda la infraestructura impiden el acceso a las zonas afectadas, retrasando así los tiempos de respuesta para suministrar las ayudas pertinentes, entre ellas, el traslado de personal de asistencia para la primera atención y transporte de heridos a los centros de atención adecuados. Dicho esto, se hace necesario mejorar las acciones y estrategias para una adecuada logística en la gestión del riesgo, con la intención de atenuar el gran impacto que puede presentarse.

Lo anterior sustenta la importancia de la investigación que se realizará para lograr una adecuada gestión de la flota de vehículos de emergencia (ambulancias, defensa civil,

bomberos, cruz roja, entre otros) con los que cuenta en este caso el municipio de Bucaramanga. Este estudio específico se centra en el problema de asignación de vehículos de emergencia (VE), asumiendo que la ubicación inicial de los vehículos se conoce a priori, con la finalidad de abordar correctamente a los pacientes críticos ubicados en las áreas afectadas a los hospitales correspondientes, dependiendo de la severidad de la lesión. También se considera una estrategia de reasignación que se realizará en base a la evolución de las condiciones de salud de los pacientes, con el objetivo de maximizar la cantidad de pacientes lesionados tratados con éxito.

En síntesis, se propone un modelo de programación entero mixto, capaz de determinar el número óptimo y la asignación de vehículos de emergencia involucrados en operaciones de socorro. Los métodos de solución del modelo usan diferentes tipos de heurística y metaheurística dentro de los cuales se encuentran los algoritmos evolutivos, como el algoritmo genético, que son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Esta técnica puede tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otras técnicas encuentran dificultades, generando soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo, asegurando de esta forma una adecuada gestión del riesgo, de forma controlada y coordinada, con tiempos correspondientes para la toma de decisiones.

## **1.2 Justificación del proyecto**

En los últimos años se ha presentado con mayor frecuencia desastres naturales, generando consecuencias devastadoras alrededor del mundo. Estos acontecimientos producen efectos directos de tipo sociocultural, pérdidas humanas, que depende de la magnitud del desastre y del lugar de ocurrencia; geográfico, cambios en la superficie terrestre

de la zona afectada, modificando aquellas zonas habitables, por territorios sin posibilidad de ocupar para vivienda; económicos, pérdidas de infraestructura, agricultura, y daños irreversibles en el medio ambiente, alterando los aparatos productivos de los territorios afectados; y políticos, la inversión inesperada en reparación y fortalecimiento de los anteriores contextos, presupuesto que desequilibra el estado económico de un territorio. (Wordpress.com, 2008)

Colombia es altamente vulnerable a la variabilidad climática, dado que se encuentra ubicada en una posición geográfica en donde factores atmosféricos contribuyen de forma significativa a tener condiciones climáticas particulares. También, está localizada en una zona sísmológica activa, debido a las coincidencias de las placas tectónicas Nazca, Suramericana y Del Caribe, y cuya convergencia de éstas, da lugar a una actividad sísmica y volcánica frecuente en el territorio. Igualmente, por estar ubicada en una zona tropical y ser un país con grandes afluentes hídricos y zonas montañosas, es propenso a sufrir, inundaciones y remociones en masa.

Las regiones que se ven más afectadas por estas condiciones hidrometeorológicas y geomorfológicas a que dichos eventos se presenten, principalmente son, la Región Pacífica y la Región Andina, del que hace parte el departamento de Santander. Considerando esto, en el municipio de Bucaramanga se presentan amenazas de origen natural, tanto para el sector rural como para el sector urbano, determinadas por fallas geológicas, inundaciones y deslizamientos. Con el conocimiento que se tiene de éstos fenómenos naturales amenazantes, el Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres de Bucaramanga estableció los tipos de riesgos presentados en la región, los cuales son: Riesgo por sismos, Riesgo por erosión, Remoción en masa y Riesgo por inundación (UNGR - Colombia, 2013).

El principal escenario de riesgo para esta región es la alta actividad sísmica, haciendo que se considere esta zona como la más propensa a fenómenos de origen geológico, debido al movimiento de las placas tectónicas de la cordillera oriental, por hallarse ubicado el municipio sobre las fallas de Santa Martha-Bucaramanga, Suárez y Suratá. Esta dinámica terrestre ha hecho que este territorio sea calificado como el segundo nido sísmico más activo del mundo (UNGR - Colombia, 2013). Estas circunstancias en las que se encuentra la región, han sido de interés para diferentes entes nacionales, principalmente los gubernamentales, que se han preocupado por buscar mecanismos que permitan mejorar la capacidad de respuesta a emergencias de este tipo, dando lugar al surgimiento de la Logística Humanitaria como campo de investigación en materia de Atención y Riesgo en Desastres.

Por esta razón se requiere de un Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastre (PMGRD), ya que en el actual no se contempla un ítem específico referente a la planeación de los vehículos de emergencia (ambulancias, defensa civil, cruz roja, bomberos, entre otros), para actuar de manera eficaz al momento que se presente un desastre natural. Cabe mencionar, que dicho Plan estará condicionado por los efectos mencionados en párrafos anteriores, que harán que éste tenga diversas y variadas salidas frente a múltiples dificultades, dándole participación esencial a la Ingeniería Industrial, desde la Logística y la Investigación de Operaciones.

Posterior a la ocurrencia de un desastre, deben tratarse cientos o miles de víctimas distribuidas espacialmente con diferentes tipos de lesiones, por lo que la eficacia en la gestión de emergencias se ha convertido en uno de los principales problemas al considerar cuestiones médicas y logísticas, siendo el tiempo una variable crucial en estas eventualidades. Un gran número de víctimas puede abrumar fácilmente el sistema de vehículos de emergencias (VE),

debido a que la cantidad de heridos generalmente se determina por referencia a un evento importante pero no desastroso. Para garantizar una respuesta rápida en el desempeño del trabajo de rescate, se requiere de una gestión eficiente de la flota de vehículos de emergencia, específicamente de la asignación apropiada de Vehículos a las zonas donde se encuentran las víctimas, con el fin de trasladar los pacientes críticos desde el sitio de emergencia hasta los hospitales más adecuados y de esta forma mitigar pérdidas humanas, por tal motivo las operaciones de socorro y de logística no son triviales, que se puedan gestionar con éxito sin la ayuda de herramientas de soporte específicas.

Por las consideraciones anteriores, se aborda un problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia a víctimas en caso de desastres naturales, mediante un algoritmo genético, cuyo objetivo es decidir qué vehículo se debe asignar para transportar a un paciente dependiendo de la gravedad de su lesión, además de desarrollar una estrategia de reasignación de ambulancias, en el que las condiciones del paciente varíen durante el proceso de rescate.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Desarrollar un algoritmo genético para el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia en caso de desastres naturales.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Realizar una revisión de literatura sobre el problema de asignación y reasignación de vehículos y su aplicación en casos de desastres o emergencias.

Formular un modelo matemático para el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia en caso de desastres naturales, a partir de la literatura revisada.

Diseñar un algoritmo de genético para dar solución al problema modelado de asignación y reasignación de vehículos de emergencia ante un desastre natural.

Implementar el algoritmo construido mediante el lenguaje de programación Matlab para dar solución al problema en estudio.

Validar el algoritmo construido a través de experimentos numéricos para corroborar la coherencia de los resultados.

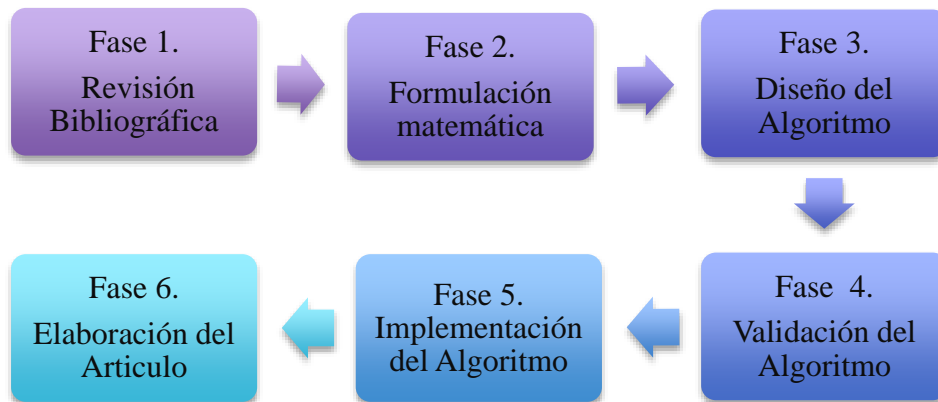
Elaborar un artículo para publicación en un medio de difusión académico, con base en los resultados obtenidos en la investigación.

#### **1.4 Metodología**

El trabajo de investigación se desarrollará bajo la modalidad exploratoria con enfoque cuantitativo, el cual se centra en analizar e investigar aspectos concretos de la realidad que aún no han sido analizados a profundidad, en este caso de logística humanitaria en atención a desastres. La metodología para este proyecto consta de seis fases, ilustradas en la Figura 1, que se describen en detalle a continuación:

**Figura 1**

*Planificación de la metodología proyecto de grado*



### **Fase 1. Revisión Bibliográfica**

- Buscar información disponible en las bases de datos como web of science, science direct, EBSCO Host, Elsevier entre otras, asociada al tema de logística humanitaria, con relación significativa al problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia.
- Reunir información sobre los planes de emergencia y contingencia manejados en Colombia, para lograr una comprensión de los planes de acción y estrategias en caso de desastres naturales.
- Documentar la información recopilada de diferentes autores, que contenga los diversos modelos matemáticos para su representación, enfatizados en el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia.

### **Fase 2. Formulación del modelo**

- Seleccionar un modelo matemático basado en los modelos identificados de la revisión de la literatura para el problema de asignación y reasignación.

- Establecer la función objetivo, parámetros, conjuntos del modelo, variables involucradas y restricciones del problema.
- Formular el modelo matemático para el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia.

### **Fase 3. Diseñar algoritmo**

- Estudiar las bases teóricas del algoritmo genético y su adaptación al problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia.
- Construir un algoritmo de optimización para dar solución al problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia en caso de desastres naturales.

### **Fase 4. Implementar el algoritmo**

- Estudiar el funcionamiento y codificación del lenguaje de programación Matlab, para su respectiva implementación.
- Ejecutar el software para verificar los resultados obtenidos de acuerdo a la función objetivo, variables involucradas y sus respectivas restricciones.

### **Fase 5. Validar el algoritmo**

- Plantear una situación hipotética de desastre natural tomando como caso de estudio la ciudad de Bucaramanga, para la validación de los resultados.

### **Fase 6. Elaboración de artículo.**

- Identificar la revista de investigación en la que se va a realizar la publicación.
- Elaborar un artículo de carácter publicable de acuerdo a las normas técnicas de la revista, sintetizando los aspectos más importantes de la investigación.

## 2 Revisión literaria

Existe un creciente interés por la investigación en logística de emergencias dentro de la comunidad de investigación de operaciones. A diferencia de las operaciones comerciales normales, la respuesta de emergencia ante desastres a gran escala es muy compleja y hay muchos desafíos que enfrentar, como las decisiones con respecto a la ubicación y la asignación óptima de las unidades de socorro, que consiste en decidir que vehículo debe asignarse para ayudar en una emergencia, siendo esta de vital importancia para la supervivencia de las personas. La investigación sobre logística de emergencia se encuentra todavía en su etapa inicial. Comprender los desafíos y las nuevas direcciones de investigación es fundamental para atender de manera oportuna esta problemática.

A continuación, se presenta evidencia de algunos artículos destacados en el área de logística de emergencias médicas con enfoque al problema de asignación de vehículos de emergencia, tomados como referencia para abordar el tema propuesto.

Con el avance de los sistemas de transporte inteligentes, los sistemas de servicios médicos de emergencia actuales y futuros, se caracterizan por la respuesta en tiempo real, la especialización y la descentralización. Para proporcionar una respuesta en tiempo real de los servicios médicos, varios componentes son esenciales, como: despacho, enrutamiento, instalaciones de emergencia e historial médico del paciente. Conforme a lo anterior, los autores (TY & HU, 2002) proponen un sistema de información geográfica basado en la arquitectura de corredores de solicitud de objetos comunes (CORBA) para un marco de transporte, a fin de enviar y asignar vehículos médicos para servicios de emergencia a través de comunicación inalámbrica. El marco combina la computación de objetos distribuidos, los sistemas de información geográfica para el transporte y los modelos de transporte en un solo sistema, lo que proporciona flexibilidad e interoperabilidad entre los sistemas de servicios médicos existentes. Además, utiliza el concepto de sistemas distribuidos y las capacidades de CORBA para diseñar objetos y actualizar dinámicamente la información de las instalaciones médicas

para transmitir información actualizada a las ambulancias. Esto utilizando una red de carreteras real en los experimentos numéricos para ilustrar aspectos dinámicos del sistema propuesto.

En el artículo de Yang, Hamedi, & Haghani, (2004) se desarrolló un modelo de simulación para el despacho de vehículos de un sistema de servicios médicos de emergencia (EMS). Este modelo está calibrado con datos del mundo real, y se incorpora en un algoritmo genético para ayudar a resolver los problemas de ubicación del depósito de EMS y la asignación de la flota simultáneamente. Los tipos de emergencia, sus prioridades de respuesta y si requieren o no el envío de unidades múltiples se tienen en cuenta en el modelo. El tiempo promedio de respuesta y los costos de capital y operativos se utilizan como criterios para la evaluación, ya que en un EMS, la ubicación del depósito y la asignación de la flota afectan en gran medida el tiempo de respuesta promedio, que es el criterio principal para medir el rendimiento del sistema. Si bien el problema de ubicación del depósito de EMS es un problema estratégico, el problema de asignación de la flota es táctico. Como tal, la ubicación del depósito de EMS y los problemas de asignación de flota generalmente se resuelven por separado bajo algunas suposiciones simplificadas. Sin embargo, existe un potencial de ahorro tanto en el tiempo de respuesta promedio como en el capital y los costos operativos si estos problemas se pueden resolver simultáneamente.

Para maximizar la cobertura del servicio a las infraestructuras de transporte críticas (CTI) (Cheu, Huang, & Huang, 2008) formulan un modelo de programación entera que optimiza la asignación simultánea de múltiples tipos de vehículos de servicio de emergencia entre un conjunto de estaciones candidatas. Se logra una cobertura suficiente de un CTI sólo cuando todos los tipos de vehículos de servicio de emergencia son capaces individualmente de alcanzar el CTI dentro del estándar de distancia y nivel de confiabilidad especificados. También se propone una variante del modelo que da más énfasis a las infraestructuras de transporte altamente críticas en relación con la infraestructura de transporte menos crítica. Los datos que obtuvieron de Singapur se utilizan para ilustrar las aplicaciones de los modelos en una ciudad relativamente grande. También se muestran los

escenarios de asignación de varios tamaños de flota de camiones de bomberos, camiones de bomberos y ambulancias a 15 estaciones de bomberos para cubrir 151 CTI.

La investigación de (Yang, Guo, Liu, & Huang, 2009) está motivada por una situación de respuesta después de la ocurrencia de un desastre, enfocada en el rescate de las víctimas. Este documento propone un modelo de optimización robusta de múltiples períodos en la asignación de ambulancias donde se maximiza la utilización de las mismas para formular un problema de alivio de siniestros que surge en emergencias, basados en múltiples escenarios. Una distinción importante del modelo (MROAA) de otra formulación regular es que se considera la incertidumbre debido a la falta de información. También se presenta un algoritmo eficiente para resolver el (MROAA), que resuelve el problema en dos fases que consiste en una secuencia de problemas de mochila y un procedimiento de ruta más corta. El caso de estudio demuestra que este enfoque promete resolver los problemas más grandes de socorro de emergencia.

Por otro lado, se encuentran (Ma, Song, & Huang, 2010) quienes contribuyen al problema de transferencia de heridos basados en un criterio de robustez absoluta, en el cual los vehículos están programados para transferir un gran número de heridos en varias áreas afectadas por el desastre a los centros médicos disponibles más cercanos en el contexto de emergencias a gran escala como tifones, inundaciones, terremotos, sequías, etc. En primer lugar, describen la metodología relacionada y luego introducen un modelo de transporte multipunto robusto mínimo-máximo con vehículos de tipo múltiple para minimizar el tiempo máximo de rescate en todos los escenarios. Finalmente, proporcionan un experimento computacional para ilustrar la efectividad de este enfoque en la toma de decisiones de actividades de rescate en emergencias a gran escala.

Las decisiones más importantes que deben tomar los administradores de vehículos de emergencia están relacionadas con la asignación y los problemas de cobertura. Es así como, se encuentra en la investigación propuesta por (Ibri, Nourelfath, & Drias, 2011) donde desarrollaron un enfoque de solución distribuida descentralizada basada en sistemas multiagentes (MAS) para

administrar los vehículos de emergencia. El sistema propuesto integra el envío de vehículos a llamadas con problemas de cobertura de zona, esta integración significa que las decisiones de asignación y cobertura se consideran conjuntamente. El objetivo es coordinar a los agentes para alcanzar soluciones de buena calidad de manera distribuida. Para este propósito se examinan dos enfoques. El primero se usa para mostrar el impacto de la distribución de datos y el control en la calidad de la solución, ya que las decisiones de envío se basan únicamente en las evaluaciones locales. El segundo enfoque se basa en la coordinación implícita de los agentes mediante un mecanismo de subasta más refinado y eficiente. Finalmente el rendimiento de cada enfoque se compara con la solución centralizada obtenida al resolver el modelo propuesto con el solucionador ILOG CPLEX.

(Billhardt, Lujak, Sánchez, Fernández, & Ossowski, 2014) proponen un modelo de coordinación para los servicios de ambulancia en los Servicios de Asistencia Médica de Emergencia (EMA) a fin de mejorar dinámicamente la asignación de ambulancias a los pacientes, así como la redistribución de las ambulancias disponibles en la región bajo consideración. Uno de los indicadores clave de rendimiento de tales servicios es el tiempo de llegada de las ambulancias a la ubicación de los pacientes de emergencia, especialmente para pacientes graves, los tiempos de llegada más cortos dan como resultado una mayor probabilidad de salvar sus vidas y brindar asistencia médica rápida. La coordinación eficiente de los recursos disponibles en este caso, las ambulancias proporcionan un medio para obtener tiempos de llegada más cortos. La propuesta de coordinación eficiente de ambulancia consiste en dos mecanismos principales que brindan servicios de coordinación a los agentes de ambulancia, el primero de ellos, es un mecanismo dinámico de asignación de ambulancia (DAAM) y el segundo, un mecanismo dinámico de redistribución de ambulancia (DARM). El DAAM se encarga de asignar las ambulancias disponibles a los pacientes que deben ser atendidos. En contraste con una estrategia de asignación de primer servicio, este mecanismo calcula dinámicamente la asignación óptima desde un punto de vista global, es decir, la asignación que minimiza la suma de los tiempos de viaje esperados para todos los pacientes pendientes. El DARM tiene el objetivo de

recomendar las posiciones adecuadas para las ambulancias disponibles, de modo que los próximos pacientes puedan ser atendidos más rápido. Finalmente, Los resultados confirman que la propuesta reduce significativamente los tiempos de respuesta promedio de los servicios de EMA.

(Yusoff, Ariffin, & Mohamed, 2015) en su artículo plantean un algoritmo mejorado de optimización de enjambre de partículas discretas (DPSO) para resolver el problema de asignación de vehículos de evacuación (EVAP). Los autores justifican el tema tratado, basándose en el hecho de que la tarea más desafiante durante un evento de inundación es evacuar a las personas de las áreas afectadas a lugares más seguros. La dificultad de esta tarea se atribuye a una distribución desigual de los vehículos, a la falta de asistencia oportuna, a una deficiencia en la toma de decisiones y a una coordinación deficiente a nivel operativo. Si bien es importante identificar las áreas propensas a inundaciones, la asignación de vehículos a las rutas de evacuación apropiadas es de primordial importancia. También utilizan un enfoque mínimo-máximo para los cálculos iniciales de las posiciones de partículas para el EVAP. Este algoritmo se probó computacionalmente utilizando diferentes números de áreas potencialmente inundadas y se comparó con un enfoque de DPSO promedio y con algoritmos genéticos. Los hallazgos de este estudio revelan que el DPSO con un enfoque mínimo-máximo que incorpora un nuevo procedimiento de sujeción de velocidad ofrece un buen rendimiento con respecto a la maximización del número de individuos que pueden ser evacuados por vehículos desde diversos lugares para situaciones que involucran varios números de áreas potenciales inundadas.

El enfoque de este documento propuesto por (Repoussis, Paraskevopoulos, Vazacopoulos, & Hupert, 2016) presenta un modelo de respuesta para las consecuencias de un Incidente de Accidentes en Masa (MCI) que puede usarse para proporcionar orientación operativa para la planificación regional de emergencias, así como para evaluar planes de preparación estratégica. Donde se propone una formulación de programación entera mixta (MIP) para el envío de ambulancia combinada, la asignación de paciente a hospital y el problema de orden de tratamiento. El objetivo es asignar de

manera efectiva los recursos limitados durante la respuesta para mejorar los resultados del paciente, y a su vez minimizar el tiempo de respuesta general y el tiempo de flujo total requerido para tratar a todos los pacientes, de manera jerárquica. El modelo se resuelve mediante métodos de solución de heurística exactos y basados en MIP. La aplicabilidad del modelo y el rendimiento de los nuevos métodos se enfrentan en escenarios de MCI realistas. El estudio se realizó bajo el caso hipotético de un ataque terrorista en la Bolsa de Nueva York en el Bajo Manhattan con hasta 150 pacientes de trauma, en el que se cuantificó el impacto de los cuellos de botella basados en la capacidad para ambulancias y camas de hospital disponibles.

(Azimi, Delavar, & Rajabifard, 2018) abordan el problema de asignación óptima de la asistencia médica a los lesionados de acuerdo con una toma de decisiones de criterios múltiples que se realiza mediante el Diagrama de Voronoi de la Red de Peso Multiplicado (MWNVD). Para considerar la asignación de los heridos en el área afectada a los hospitales apropiados y disminuir la brecha entre la población estimada y esperada, aplican Optimización de enjambre de partículas (PSO) a esta metodología. Este documento propone un modelo basado en múltiples agentes para incorporar la asignación de los suministros médicos a los heridos de acuerdo con los diagramas de Voronoi generados del PSO-MWNVD.

### 3 Marco Teórico

#### 3.1 Logística.

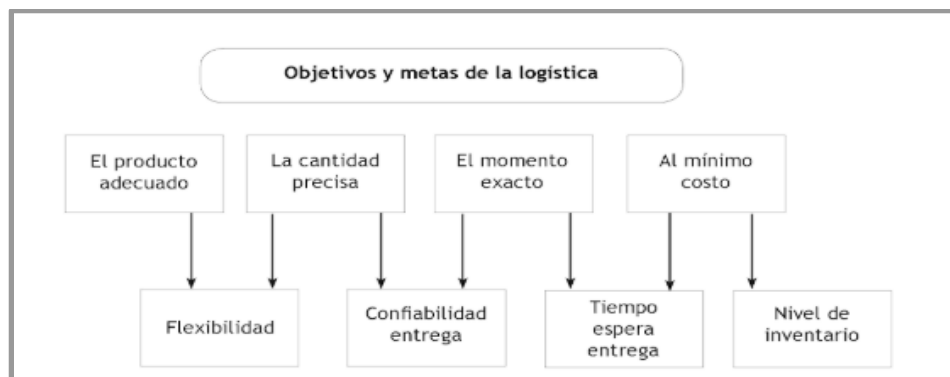
Según Douglas M. Lambert, M. Cooper y J. D. Pagh, la logística se define como - La parte de la gestión de la cadena de suministro (Supply Chain Management, SCM) que planifica, implementa y controla el flujo eficiente y efectivo de materiales y el almacenamiento de productos, así como la información asociada desde el punto de origen hasta el de consumo, con el objeto de satisfacer las necesidades de los clientes.

Ronald H. Ballou en 1999 afirmó que todo movimiento y almacenamiento que facilite el flujo de productos desde el punto de compra de los materiales hasta el punto de consumo, así como los flujos de información que se ponen en marcha, con el fin de dar al consumidor el nivel de servicio adecuado a un costo razonable, es logística.(GOYES & SALAZAR, 2016)

A continuación se observa en la **Figura 2**, los objetivos y metas de la logística.

#### Figura 2

*Objetivos y metas de la logística*



*Nota:* Tomado de (GOYES & SALAZAR, 2016)

### 3.1.1 *Logística humanitaria*

Según Thomas y Mizushima la logística humanitaria se define como ” El proceso de planificación, ejecución y control eficiente del flujo de costos y el almacenamiento de los bienes y materiales, así como la información relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo con el propósito de cumplir con los requisitos del beneficiario final”.(Thomas & Mizushima, n.d.)

De la definición anterior se desprende que su objetivo fundamental es satisfacer las necesidades de las personas afectadas por un desastre lo más rápido posible. Esto incluye proveer de soporte, servicios, materiales y transporte a los involucrados en la asistencia a los damnificados. (Viera & Moscatelli, 2012)

Otra definición de logística humanitaria es dada por Camacho-Vallejo, quien la define como una disciplina que se ha desarrollado en respuesta a la creciente severidad y frecuencia de los desastres, tanto naturales como causados por el hombre. Los desastres generan impactos devastadores que se ven reflejados en pérdidas humanas y materiales, colocando a prueba la capacidad de los entes gubernamentales para conservar de manera efectiva su población e infraestructura y reponerse rápidamente.

Finalmente, la logística humanitaria se encarga de estimar, proveer, almacenar, transportar y distribuir el personal y servicios requeridos en la zona afectada por un desastre(Sharif & Salari, 2015) a través de una gran diversidad de actividades desarrolladas en distintos momentos, que tienen como fin asistir a las personas sobrevivientes de un desastre (Kovács & Spens, 2007). Cuyo principal objetivo es proveer suministros de emergencia rápidamente a las áreas afectadas para salvar la mayor cantidad de vidas posibles, mediante una adecuada gestión de la cadena de suministro.

El campo de la logística humanitaria en los últimos años ha ganado más atención por estar vinculado a la gestión de la cadena de suministro, ya que esta sin duda alguna entre las cadenas de suministro, son las más dinámicas y complejas del mundo. Debido a que ésta lidia con los desastres naturales como terremotos, tsunamis, huracanes, epidemias, escasez y hambruna entre otros, y aquellas catástrofes provocadas por el ser humano como, ataques terroristas y situaciones de violencia y guerra y otros eventos o bien, combinaciones naturales y humanas que ocurren simultáneamente. (Spens & Kovács, 2009)

Un componente importante en las operaciones propias de la logística humanitaria es el transporte, ya que por este medio se moviliza el personal capacitado y los suministros requeridos, lo cual depende de las condiciones de los accesos a la población afectada, el volumen de suministros a movilizar, la flota y el tipo de vehículos a disposición de los organismos de socorro.

En situaciones de emergencia el principal problema logístico es llevar un número de diferentes productos a través de distintos medios de transporte desde unos puntos de origen a uno o más destinos de forma efectiva y eficiente. En efecto, la gestión de la cadena de suministro se torna una labor compleja al tomar decisiones respecto al qué comprar, en qué lugar, en qué momento, quién hace la compra, y de qué forma, lo que conlleva a serias implicaciones logísticas. Por esto en las operaciones de emergencia la logística es requerida para apoyar la organización e implementación de las acciones de respuesta, para que estas sean no solo rápidas, sino también ágiles y efectivas.

### **3.2 Desastre**

Según la Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja (IFRC) un desastre es un evento calamitoso, repentino o previsible, que trastorna seriamente el funcionamiento

de una comunidad o sociedad y causa unas pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales que desbordan la capacidad de la comunidad o sociedad afectada para hacer frente a la situación a través de sus propios recursos. Aunque frecuentemente están causados por la naturaleza, los desastres pueden deberse a la actividad humana.(Federation, 2017)

Asimismo, es una situación adversa causada por la combinación de la amenaza y vulnerabilidad, que ha ocasionado daños y pérdidas, superiores a los que una comunidad pueda recuperarse por sí sola. Los cuales son fruto de la combinación de factores naturales, físicos, ambientales, humanos, entre otros. La profundidad y amplitud del desastre depende, por supuesto, del tipo, intensidad y duración de la catástrofe. Pero más determinante aún es el nivel de la vulnerabilidad preexistente.

Los desastres naturales tienen como consecuencias devastadoras la afectación al desarrollo económico, social, cultural, político y ambiental de todo país. Al mismo tiempo, impactan en las construcciones sociales, producción agrícola, la seguridad alimentaria, educación, incrementa la pobreza, pérdidas humanas, recursos naturales, proliferación de enfermedades y sobre todo en la calidad de vida de los ciudadanos y el deterioro del medio ambiente. (Pineda, 2017)

En este contexto resulta importante la presencia y coordinación de los entes gubernamentales para buscar mecanismos y métodos que permitan disminuir los riesgos y así prevenir o mitigar el impacto que puedan generar dichos eventos.(Aguirre, 2004)

### **3.3 Gestión de Desastres**

La Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja define la gestión de desastres como la organización y la gestión de recursos y responsabilidades para abordar todos los aspectos humanitarios de las emergencias, en

particular la preparación, la respuesta y la recuperación a los desastres, a fin de reducir sus efectos.

En la actualidad se promueve la reducción del riesgo de desastre, término que se utiliza para incentivar acciones a nivel nacional, local y comunitario que eviten que el impacto de un determinado evento se convierta en un desastre, mediante decisiones político-administrativas y de intervenciones operativas que se llevan a cabo en las diferentes etapas de un desastre tanto a la anticipación como a la respuesta del mismo. (Aguirre, 2004)

Por lo anterior, se habla ahora de reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos, por ejemplo construyendo de forma más segura, con buenos materiales, con condiciones sísmicas, o promoviendo un buen uso del suelo evitando la construcción en zonas inundables o de altas pendientes, o también preparando a las comunidades y las instituciones para actuar en situaciones críticas reduciendo así la posibilidad de un desastre. (Andes, 2017)

La creación y el fortalecimiento de los sistemas legislativos e institucionales relacionados con la gestión del riesgo son un paso fundamental para que un país pueda adoptar medidas de prevención, preparación, respuesta y recuperación. En Colombia, a través de la Ley 1523 de 2012 el Congreso de la República adoptó la política nacional de gestión del riesgo de desastres GRD y estableció el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres SNGRD. Cuya norma define los objetivos, programas, acciones, responsables y presupuestos, mediante las cuales se ejecutan los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres en el marco de la planificación del desarrollo nacional. (UNGR - Colombia, 2016) La cual sustenta precisamente el proceso de Gestión del Riesgo de Desastre (GRD) como una política de desarrollo para la nación.

### 3.3.1 *Procesos de la Gestión del Riesgo a Desastres*

La gestión de desastres abarca varios tipos de intervención con unos objetivos diferenciados. Aunque sus medidas frecuentemente se superponen e intercalan, cada uno de esos tipos tiene mayor peso y protagonismo en una u otra de las varias etapas que sigue un desastre (antes, durante y después). Los objetivos de dichos niveles de intervención son básicamente los observados en la **Figura 3**. (Pérez, 2018)

**Figura 3**

*Procesos de la gestión de desastre*



*Nota:* Tomado de (Pérez, 2018)

A Continuación los distintos procesos que componen la gestión de desastres.

- Estimación del riesgo. Este proceso comprende las acciones para generar el conocimiento de los peligros, analizar la vulnerabilidad y establecer los niveles de riesgo.
- Prevención del riesgo. Hace referencia al conjunto de acciones cuyo objeto es impedir o evitar que sucesos naturales o antrópicos en combinación con las

vulnerabilidades generen daños y pérdidas en las personas, los bienes, los servicios y el ambiente. (Meléndez, 2015)

- Reducción del Riesgo. Se refiere al conjunto de métodos que disminuyen o eviten los riesgos de desastres, analizando sus causas y disminuyendo la vulnerabilidad de personas y bienes, minimizando así su exposición a este tipo de fenómenos. (Meléndez, 2015)
- Preparación. Es el conjunto de acciones principalmente de coordinación, sistemas de alerta, capacitación, equipamiento, centros de reserva y albergues y entrenamiento, con el propósito de optimizar la ejecución de los diferentes servicios básicos de respuesta, como accesibilidad y transporte, telecomunicaciones, evaluación de daños y análisis de necesidades, salud y saneamiento básico, búsqueda y rescate, extinción de incendios y manejo de materiales peligrosos, albergues y alimentación, servicios públicos, seguridad y convivencia, aspectos financieros y legales, información pública y el manejo general de la respuesta, entre otros.(Nacional, 2012)
- Respuesta. Ejecución de las actividades necesarias para la atención de la emergencia como accesibilidad y transporte, telecomunicaciones, evaluación de daños y análisis de necesidades, salud y saneamiento básico, búsqueda y rescate, extinción de incendios y manejo de materiales peligrosos, albergues y alimentación, servicios públicos, seguridad y convivencia, aspectos financieros y legales, información pública y el manejo general de la respuesta, entre otros. La efectividad de la respuesta depende de la calidad de preparación.(Nacional, 2012)

- **Rehabilitación.** Aquí, se llevan a cabo acciones cuyo fin es el restablecimiento, en la medida de lo posible, de las necesidades vitales de la comunidad. Algunas acciones de rehabilitación podrían ser: Evaluación y cuantificación de daños, organizar brigadas que apoyen el trabajo de las instituciones en la rehabilitación de los servicios básicos, identificar áreas y actividades prioritarias para la pronta recuperación de la funcionalidad de los centros de Salud, entre otras.(Meléndez, 2015)
- **Reconstrucción.** Es el proceso de reparación, a mediano y largo plazo, del daño físico, social, económico y ambiental a un nivel de desarrollo igual o superior al existente antes del evento adverso. También se refiere a la reparación o reemplazo permanente de estructuras físicas gravemente dañadas, la restauración de todos los servicios e infraestructura local y la revitalización de la economía (incluyendo la agricultura).

### **3.4 Red de Prestación de servicios de salud en el municipio de Bucaramanga**

Según el Ministerio de la Protección Social define la red de prestación de servicios de salud como el “conjunto articulado de prestadores de servicio de salud, ubicados en un espacio geográfico, que trabajan de manera organizada y coordinada en un proceso de integración funcional, orientado por los principios de complementariedad, subsidiariedad y los lineamientos del sistema de referencia y contrarreferencia, establecidos por la entidad responsable del pago, que busca garantizar la calidad de la atención en salud y ofrecer una respuesta adecuada a las necesidades de la población en condiciones de accesibilidad, continuidad, oportunidad, integralidad y eficiencia en el uso de los recursos”.

En tal sentido, la gestión de la red comprende los procedimientos implementados en condiciones de acceso para la transferencia segura, rápida y eficiente de las víctimas, en los vehículos apropiados, a los hospitales adecuados y preparados para recibirlas, para una respuesta acorde, efectiva y eficiente a la misma, en condiciones de accesibilidad, continuidad, integralidad, calidad y resolutivez.

#### **3.4.1 *Asistencia Médica en Desastres***

Desde el punto de vista de la asistencia médica, un desastre sin importar su origen implica una desproporción entre la demanda asistencial, es decir el número de víctimas y los recursos médicos disponibles para atenderla, implicando la necesidad de intervención de medios no habituales, tanto por su importancia como por su naturaleza.

Las catástrofes implican siempre un problema de salud pública al producir en los afectados alteraciones de su bienestar físico, psíquico y/o social. Además, existe la prioridad de salvar el mayor número de víctimas, proporcionarles un tratamiento adecuado in situ y organizar su evacuación a un centro sanitario para el tratamiento definitivo. Todas estas son operaciones complejas que ocurren en un escenario con desorden y confusión que precisa, por ello, una planificación previa. Para hacer frente con garantías de éxito a una situación de catástrofe es necesario que existan y se activen los planes de emergencia correspondientes y que exista un buen nivel de coordinación de las instituciones y servicios movilizados.(Alvarez, Arcos, Blanco, Busto, & López, 2006)

#### **3.4.2 *Servicios de emergencias médicas SEM***

El Sistema de Emergencias Médica SEM, es un modelo general integrado. Se aplica frecuentemente al componente del servicio de ambulancia, ya sea básica o medicalizada que

responde a una emergencia médica o quirúrgica en el propio lugar, estabiliza a la víctima de una enfermedad o traumatismo súbito mediante tratamiento médico de emergencia en el lugar del hecho y transporta al paciente a un establecimiento médico más cercano para el tratamiento definitivo (Organización Panamericana de la Salud, 2003). Con la finalidad de responder de manera oportuna y eficiente las 24 horas del día, los 7 días de la semana, en la cantidad y calidad necesaria para satisfacer las demandas de SEM de la población atendida en cualquier momento.

Actualmente el transporte de emergencias se controla desde centros coordinadores de emergencias y está regulado por una serie de procedimientos de coordinación de manera que las ambulancias acuden al lugar del suceso alertadas por diferentes vías.

Los Servicios de Emergencias Médicas-SEM son sistemas responsables de la estabilización y transporte pre-hospitalario de pacientes con urgencia y emergencia médicas. Una de las constantes preocupaciones de los SEM es mejorar el tiempo de respuesta ante la ocurrencia de un evento, debido a que este es una medida de desempeño muy importante para determinar la calidad de atención pre-hospitalaria de los SEM y para preservar la vida y la salud de los pacientes. (Rodríguez, Osorno, & Maya, 2016)

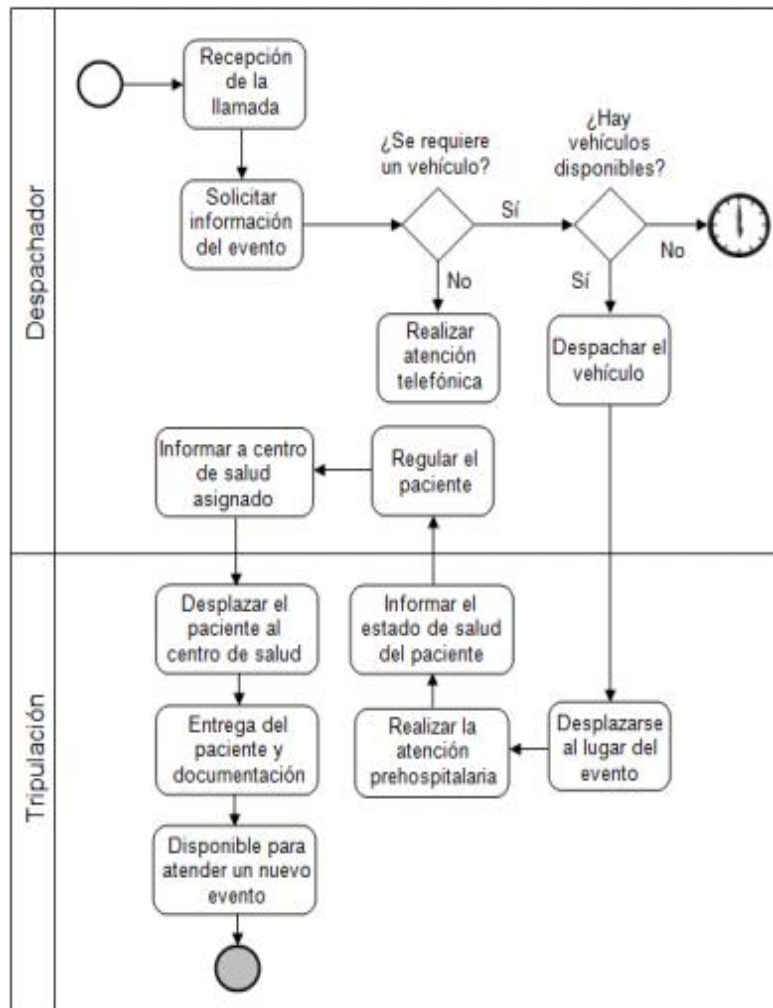
#### **3.4.2.1 Descripción básica de las actividades que se realizan en un SEM.**

En el proceso de la atención de una emergencia, se realizan un grupo de actividades que generalmente inician con la recepción de una llamada y la solicitud de la información necesaria para identificar la necesidad de enviar un vehículo al lugar del evento. Posterior a esto, de ser necesario el envío del recurso (vehículo) se evalúa la disponibilidad y se despacha el vehículo. En esta última actividad, hay algunos criterios posibles para la decisión, por ejemplo, la elección de la ambulancia disponible más cercana o una “respuesta

regionalizada”, la cual consiste en la asignación de un área de servicio específica para cada recurso. Cuando el vehículo llega al sitio del evento la tripulación realiza la atención pre-hospitalaria; luego, de ser necesario, se asigna y desplaza al paciente hacia el centro de atención de salud que cuente con los recursos disponibles para su tratamiento y sea el más cercano al lugar del evento. Al llegar al centro de salud la tripulación hace entrega del paciente y de la documentación que le sea requerida. Una vez se finaliza esta actividad el vehículo vuelve a estar disponible para responder a un nuevo evento, como se puede observar en la Figura 4. (Rodríguez et al., 2016)

#### **3.4.2.2 Vehículos de Emergencia.**

De acuerdo al artículo 2° de la Ley 769 de 2002 del Código Nacional de Tránsito, se define como vehículos de emergencia a todo vehículo automotor debidamente identificado e iluminado para transitar a velocidades mayores que las reglamentadas con objeto de movilizar personas afectadas en salud, prevenir o atender desastres o calamidades, o actividades policiales, debidamente registrado como tal con las normas y características que exige la actividad para la cual se matricule. Estos vehículos suelen pertenecer a entidades operativas como: Bomberos de Colombia, Defensa Civil, Cruz Roja de Colombia, Hospitales, entre otros.

**Figura 4***Diagrama de Flujo de un SEM**Nota: Tomado de (Rodríguez et al., 2016)*

### 3.5 Optimización Combinatoria

La optimización combinatoria es una rama de la optimización de las matemáticas aplicadas fuertemente relacionada con la investigación operativa, la teoría algorítmica y la teoría de la complejidad computacional. Los algoritmos de optimización combinatoria resuelven problemas que se creen difíciles en general, por la vía de explorar el, habitualmente grande, espacio de soluciones del citado problema.

En los problemas de optimización combinatoria el objetivo es encontrar la mejor solución posible existente o solución óptima (sea máximo o mínimo) de una determinada función o funciones sobre el conjunto de soluciones. Dependiendo del número de funciones que se empleen los problemas de combinatorios pueden ser monobjetivos (una sola función) y multiobjetivo (más de una función)) (Sánchez, 2012)

### 3.5.1 *Problemas de optimización combinatoria*

Según Blum y Roli definen los problemas de optimización combinatoria como aquellos que buscan una solución “óptima” o la que encuentra el valor máximo o mínimo dentro un espacio finito, o infinito, numerable de soluciones factibles definidos por la función objetivo.

También Marek afirma que los problemas genéricos de optimización combinatoria requieren encontrar la solución más óptima sobre un conjunto finito de soluciones. Por ende las variables a usar han de ser de carácter discreto, restringiendo su dominio a una serie finita de valores. Si agrupamos las variables en conjunto que representan grafos u objetos, lo ideal es ubicar dichas variables en determinadas posiciones, la técnica a usar es de carácter combinatorio, como se define a continuación.

Un problema de optimización combinatoria puede ser definido por:

- Un conjunto de variables  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$
- Un dominio de las variables  $D_1, \dots, D_n$
- Restricción entre variables  $f: D \rightarrow R^*$
- Una función objetivo  $f$  para ser maximizada o minimizada, Donde

$$S = \{s = (X_1, V_1), \dots, (X_n), V_n\}$$

El conjunto de todas las posibles asignaciones factibles es:

Donde  $X_1 \in D_1$ ,  $s$  satisface todas las restricciones

Así resolver un problema de optimización combinatoria consiste en encontrar una solución  $s^* \in S$  tal que,  $f(s^*) \leq f(s)$  si se minimiza o  $f(s^*) < f(s)$  si se maximiza. (Blum & Roli, 2003)

### 3.5.1.1 Complejidad Combinatoria.

Un problema desde el punto de vista computacional está conformado por “un conjunto de datos de entrada, un conjunto de datos de salida, y una función que asigna a cada dato del problema, una salida correcta del mismo” (Pérez & Sancho, 2003). La teoría de la complejidad estudia la manera de clasificar problemas de acuerdo con la dificultad propia para resolverlos, basándose en los recursos necesarios y requeridos para establecer su grado de complejidad. Los recursos comúnmente estudiados son el tiempo (número de pasos de ejecución de un algoritmo para resolver un problema) y el espacio (cantidad de memoria utilizada para resolver un problema)(Cruz, Moreno, & Peralta, 2014).

Para saber el grado de complejidad que puede tener un problema, se toma como referencia el modelo computacional de la máquina de Turing, con el cual se obtiene una clasificación de los problemas con base en el grado de complejidad inherente para resolverlos, ya que se han identificado problemas intratables, clasificados como NP (nondeterministic polynomial time), que se piensa son imposibles de resolver en un tiempo razonable cuando el número de variables que los componen es una cantidad extremadamente grande, a la clase NP los siguientes problemas:(Cruz et al., 2014)

- Problemas P: Son aquellos problemas que pueden ser resueltos en un tiempo polinómico utilizando una máquina de Turing determinista, por lo cual existe un algoritmo en el que se conocen las variables de entrada que los puede resolver.
- Problemas NP: Son todos aquellos que son no-polinomiales y que, en consecuencia, ni se abordan ni se resuelven descomponiendo los mismos en los términos que los componen. Estos problemas NP son aquellos cuya solución, hasta la fecha, no se ha resuelto de manera exacta por medio de algoritmos deterministas en tiempo polinomial.
- Problemas NP-Completos: Para estos problemas no existe una máquina de Turing determinista que pueda resolverlos en tiempo polinómico. En su lugar, se puede encontrar un valor próximo a la solución del problema mediante una máquina de Turing no determinista acotando poligonalmente el tiempo(Alfonseca, 2000).
- Problemas NP-Hard: Son problemas que implican, se abordan y se resuelven en un tiempo polinómico no determinista. (Maldonado, 2016) Estos problemas pueden ser de decisión, de optimización o de búsqueda.

### **3.6 Métodos de solución.**

Los problemas de optimización combinatoria han presentado diversas aplicaciones prácticas en la ingeniería, por lo que son temas atractivos para la investigación y resolución de dichos problemas. Aunque se tienen numerosas técnicas disponibles, hay una continua búsqueda de nuevas y más robustas técnicas de optimización, que puedan solucionar tales

problemas, las cuales son aproximaciones que pretenden acercarse lo más posible al óptimo.

Los métodos habitualmente utilizados son:

- **Métodos Exactos:** Son aquellas técnicas que garantizan encontrar la solución óptima de cualquier problema, pero tienen el grave inconveniente de que en problemas de tipo NP-Hard el tiempo de ejecución crece de forma exponencial con el tamaño del problema, es decir que se invierte mucho tiempo en la ejecución. Dentro de la categoría de métodos exactos los más nombrados son método simplex, algoritmos de ramificaciones y acotaciones (branch and bound) y programación lineal.
- **Métodos Aproximados:** Según Matai (2010) son algoritmos que permiten conseguir soluciones buenas en un tiempo asequible. Entre estos métodos se encuentran técnicas heurísticas y metaheurísticas que están disponibles para resolver problemas de gran tamaño ( $n \geq 20$ ) en un tiempo computacional razonable y que se acercan a la solución óptima.
- **Heurísticas:** El término heurística proviene del vocablo griego *heuriskein*, que puede traducirse como encontrar, descubrir o hallar. De acuerdo con Werra “Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema matemático bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución”

En efecto, un método heurístico permite obtener soluciones de alta calidad para problemas combinatorios complejos explotando el conocimiento del dominio de aplicación, con un costo computacional razonable, aunque no se garantice la optimalidad de la solución o su factibilidad.

Cuando se resuelve un problema por métodos heurísticos, como la optimalidad no está garantizada se debe de medir la calidad de los resultados, evaluando la eficiencia del algoritmo para poder determinar su valía frente a otros. Para tal fin un buen algoritmo heurístico debe de tener las siguientes propiedades:

- a. Ser eficiente. Que el esfuerzo computacional sea realista y adecuado para obtener la solución.
- b. Ser bueno. La solución debe de estar, en promedio, cerca del óptimo.
- c. Ser robusto. La probabilidad de obtener una mala solución (lejos del óptimo) debe ser baja.

Las técnicas heurísticas se clasifican en dos categorías:

- Heurísticas Constructivas: Consisten en construir literalmente paso a paso una solución del problema. Usualmente son métodos deterministas y suelen estar basados en la mejor elección en cada iteración. Estos métodos han sido muy utilizados en problemas clásicos como el del agente viajero.
- Heurísticas de búsqueda local: Los procedimientos de búsqueda o mejora local comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. El procedimiento realiza en cada paso un movimiento de una solución a otra con mejor valor. El método finaliza cuando, para una solución, no existe ninguna solución accesible que la mejore. Un ejemplo clásico es el algoritmo de Ramificación y Poda (branch and bound) en programación dinámica.
- Metaheurísticas: El término “metaheurística” fue introducido en 1986 por Glover y deriva de la composición de dos palabras griegas *Heuristic*, que significa encontrar, y *meta*, que significa "más allá, en un nivel superior". Con este

término, pretendía definir un “procedimiento maestro de alto nivel que guía y modifica otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimalidad local”. Luego, este término fue ampliamente adoptado y también frecuentemente es denominado heurísticas modernas.

Los profesores Osman y Kelly (1996) proponen la siguiente definición: “Las metaheurísticas son una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Las metaheurísticas proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los procedimientos estadísticos”. De modo general, se puede decir que la metaheurística nace con el propósito de evitar tener que comenzar de cero cada vez que se presente un problema cuyo modelo no puede ser tratado por los métodos convencionales, para encontrar una solución óptima. La mayor ventaja de los algoritmos metaheurísticos frente a otros métodos está en su gran flexibilidad, lo que permite usarlos para abordar una amplia gama de problemas.

En la actualidad se conocen varias metaheurísticas que se han desarrollado exitosamente en la resolución de determinados problemas, tales como: los algoritmos voraces, la ascensión de colinas, el recocido simulado, colonias de hormigas, algoritmos de enjambre, la búsqueda tabú, los algoritmos genéticos, los algoritmos meméticos, entre otros.

Algunos autores han recopilado algunas formas en las que se pudieran clasificar las metaheurísticas. En este sentido autores como Herrera (2009) presentan una posible forma de clasificación de las metaheurísticas:

- Basadas en métodos constructivos: Las cuales parten de una solución inicial vacía y se van agregando componentes hasta construir una solución. En este grupo se pueden mencionar: GRASP, optimización basada en colonias de hormigas.
- Basadas en trayectorias: Utilizan como heurística subordinada cualquier algoritmo de búsqueda local, que sigue una trayectoria en el espacio de búsqueda, mediante iteraciones que tratan de reemplazar una solución inicial por otra de mejor calidad. Allí se encuentran: búsqueda local, templada simulada, búsqueda tabú, búsqueda local iterativa, entre otras.
- Basadas en poblaciones: Los métodos basados en población operan en cada iteración del algoritmo con un conjunto de soluciones, denominada población. Así ellos, en forma natural, exploran el espacio de búsqueda desde varias regiones a la vez. El resultado final depende de la forma en que la población es manipulada. Dentro de ellas están: algoritmos genéticos, algoritmos meméticos, algoritmos basados en nubes de partículas, búsqueda dispersa, entre otros.(Gómez, 2007)

### **3.7 Computación Evolutiva**

La Computación Evolutiva es una rama de las Ciencias de la Computación y la inteligencia artificial dedicada al estudio de una clase de algoritmos de optimización global, estocásticos, basados en los principios Darwinianos de la selección natural. Esta usa modelos computacionales de procesos evolutivos como elementos clave en la solución de problemas. También se conocen como algoritmos evolutivos y comparten una base conceptual común

de estructuras individuales similares vía procesos de selección y reproducción. En términos generales, para simular el proceso evolutivo en una computadora se requiere:

- Codificar las estructuras que se replicarán (o sea, una estructura de datos que se utilice para almacenar a un “individuo”).
- Operaciones que afecten a los “individuos” (típicamente, se usa cruce y mutación).
- Una función de aptitud que nos indique qué tan buena es una solución con respecto a las demás.
- Un mecanismo de selección que implemente el principio de “supervivencia del más apto” de la teoría de Darwin.

Aunque hoy en día es cada vez más difícil distinguir las diferencias entre los distintos tipos de algoritmos evolutivos existentes, por razones sobre todo históricas, suele hablarse de tres paradigmas principales: Programación Evolutiva, Estrategias Evolutivas, Algoritmos Genéticos(Quintero & Coello, 2006)

### **3.7.1 Programación Evolutiva**

La Programación Evolutiva surge principalmente a raíz del trabajo “Artificial Intelligence Through Simulated Evolution” de Fogel, Owens y Walsh, publicado en 1966, en el que se propuso una técnica denominada “Programación Evolutiva”, en la cual la inteligencia se ve como un comportamiento adaptativo. La Programación Evolutiva enfatiza los nexos de comportamiento entre padres e hijos, en vez de buscar emular operadores genéticos específicos (como en el caso de los Algoritmos Genéticos).

El algoritmo básico de la programación evolutiva es el siguiente:

- Genera aleatoriamente una población inicial.
- Aplica mutación.
- Calcula la aptitud de cada hijo y usa un proceso de selección mediante torneo (normalmente estocástico) para determinar cuáles serán los hijos (soluciones) que se retendrán.

La programación evolutiva es una abstracción de la evolución al nivel de las especies, por lo que no se requiere el uso de un operador de recombinación (diferentes especies no se pueden cruzar entre sí). Asimismo, usa selección probabilística. (Newton, 2009)

### **3.7.2 Estrategias Evolutivas**

Las Estrategias Evolutivas fueron desarrolladas en 1964 en Alemania para resolver problemas hidrodinámicos de alto grado de complejidad por un grupo de estudiantes de ingeniería encabezado por Ingo Rechenberg. La versión original (1+1)-EE denominada así porque trabaja únicamente con dos individuos: un padre que mediante una mutación produce un solo hijo. Ambos se someten a un proceso de selección donde el más apto (es decir, la mejor solución) “sobrevive” para la siguiente generación y el menos apto se desecha. En estos modelos se usa control determinístico (desviación estándar) sobre el tamaño del cambio aleatorio o tamaño del paso (mutación).

Las estrategias evolutivas son una abstracción de la evolución al nivel de un individuo, por lo que la recombinación es posible y utiliza los siguientes operadores:

- **Sexuales:** el operador actúa sobre 2 individuos elegidos aleatoriamente de la población de padres.

- **Panmíticos:** se elige un solo padre al azar, y se mantiene fijo mientras se elige al azar un segundo padre (de entre toda la población) para cada componente de sus vectores (Quintero & Coello, 2006).

### 3.7.3 Algoritmos Genéticos (AG)

Los Algoritmos Genéticos se basan en la teoría de la evolución que surge con la investigación propuesta por Charles Darwin (1859), según la cual sólo los individuos más aptos de la población sobreviven, al ser capaces de adaptarse mejor a los cambios que se producen en el entorno. El desarrollo de los Algoritmos Genéticos se debe en gran medida a John Holland, investigador de la Universidad de Michigan. Quien a finales de la década de los 60 desarrolló una técnica que imitaba en su funcionamiento a la selección natural, la cual es posible implementar en un ordenador que guiado por los principios de la herencia y la evolución de las especies, suministre la solución de un problema. Aunque originalmente esta técnica recibió el nombre de *planes reproductivos*, a raíz de la publicación en 1975 de su libro "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*"(Holland, 1975) se conoce principalmente con el nombre de Algoritmos Genéticos.

Distintos autores en la literatura enunciaron definiciones de Algoritmos Genéticos ,una definición bastante completa es la propuesta por John Koza:"Es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o

números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia con una cierta función matemática que refleja su aptitud”.

Los algoritmos genéticos alcanzaron popularidad a raíz de la publicación del libro de Goldberg (1989) que ponía las bases fuertes para su aplicación en problemas prácticos. Que a su vez introdujo la siguiente definición “los Algoritmos Genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de selección natural y de la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorizado, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las genialidades de las búsquedas humanas”(Goldberg, 1989).

Esta técnica de solución trabaja con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la bondad de dicha solución. En la naturaleza esto equivaldría al grado de efectividad de un organismo para competir por unos determinados recursos. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma. Este cruce producirá nuevos individuos (descendientes de los anteriores) los cuales comparten algunas de las características de sus padres. Cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y por tanto de que su material genético se propague en sucesivas generaciones.

A grandes rasgos un AG consiste en una población de soluciones codificadas de forma similar a cromosomas. Cada uno de estos cromosomas tendrá asociado un ajuste, valor de bondad, ajuste o fitness, que cuantifica su validez como solución al problema. En función

de este valor se le darán más o menos oportunidades de reproducción. Además, con cierta probabilidad se realizarán mutaciones de estos cromosomas.

El poder de los Algoritmos Genéticos proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades. Una ventaja respecto a otras técnicas de búsqueda es que operan con operadores probabilísticos (al contrario que otras técnicas que usan operadores deterministas), no necesitan conocimientos específicos acerca del problema a resolver, operan simultáneamente con varias soluciones y presentan menos problemas con los máximos locales que las técnicas tradicionales. Si bien no se garantiza que el Algoritmo Genético encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo con el resto de algoritmos de optimización combinatoria(Lima, 2014).

### **3.7.3.1 Funcionamiento.**

Para alcanzar la solución a un problema se parte de un conjunto inicial de individuos, llamado población, generado de manera aleatoria. Cada uno de estos individuos representa una posible solución al problema.

A continuación se evalúa la función de adaptación para estos individuos. La función de adaptación da una medida de la aptitud del cromosoma para sobrevivir en su entorno. Debe estar definida de tal forma que los cromosomas que representan mejores soluciones tengan valores más altos de adaptación.

Los individuos más aptos se seleccionan en parejas para reproducirse. La reproducción genera nuevas cromosomas que combinan características de ambos padres. Estos nuevos cromosomas reemplazan a los individuos con menores valores de adaptación.

A continuación, algunos cromosomas son seleccionados al azar para ser mutados. La Mutación consiste en aplicar un cambio aleatorio en su estructura.

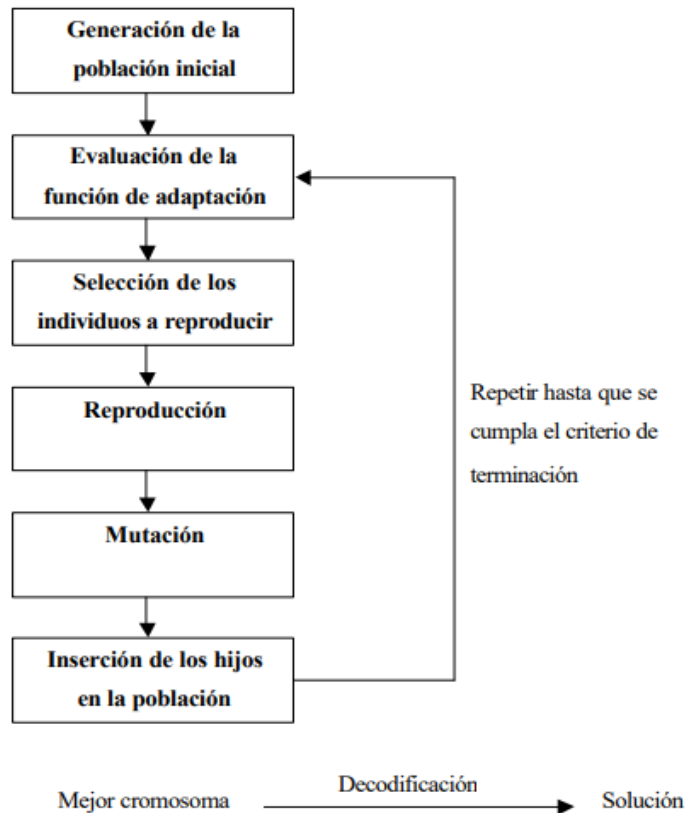
Luego, los nuevos cromosomas deben incorporarse a la población. Estos cromosomas deben reemplazar a cromosomas ya existentes. Hay Varios criterios que pueden utilizarse para elegir a los cromosomas que serán reemplazados.

El ciclo de selección, reproducción y mutación se repite hasta que se cumple el criterio de determinación del algoritmo, momento en el cual el cromosoma mejor adaptado se devuelve como solución.

El funcionamiento general del algoritmo genético puede verse ilustrado en el diagrama expuesto en la **Figura 5**, (Yolis, Britos, Perichisky, & García, 2003).

**Figura 5**

*Diagrama del funcionamiento general de un Algoritmo Genético*



*Nota:* Tomado de (Yolis et al., 2003)

### 3.7.3.2 Operadores Genéticos.

En cada nueva generación se crean algunos individuos que no estaban presentes en la población anterior. De esta forma el algoritmo genético va accediendo a nuevas regiones del espacio de búsqueda. Los nuevos individuos se van generando utilizando ciertos operadores genéticos a individuos de la población anterior. Los más empleados son los operadores de selección, cruce, copia y mutación.

**Selección:** Los algoritmos de selección serán los encargados de escoger qué individuos van a disponer de oportunidades de reproducirse y cuáles no. Puesto que se trata de imitar lo que ocurre en la naturaleza, se ha de otorgar un mayor número de oportunidades de reproducción a los individuos más aptos. Por lo tanto, la selección de un individuo estará relacionada con su valor de ajuste. No se debe sin embargo eliminar por completo las opciones de reproducción de los individuos menos aptos, pues en pocas generaciones la población se volvería homogénea(Dorado, Gestal, Rivero, Rabuñal, & Pazos, 2010).

- El primer paso es el cálculo del fitness y por el método con el que se hace:
- proporcional (proportional fitness assignment)
- según el rango obtenido (rank-based fitness assignment)
- según el valor obtenido en combinación de los distintos objetivos (multi-objective ranking)

La actual selección se mejora en el siguiente paso. Los padres son seleccionados según sus aptitudes por uno de los siguientes métodos:

- Selección “ruleta” (roulette-wheel selection)
- Muestreo estocástico universal (stochastic universal sampling)
- Selección local (local selection)
- Selección truncada (truncation selection)
- Torneo para selección (tournament selection)

**Cruce:** Una vez realizada la selección, se procede a la reproducción sexual o cruce de los individuos seleccionados. En esta etapa, los sobrevivientes intercambiarán material cromosómico y sus descendientes formarán la población de la siguiente generación.

Normalmente la cruce se maneja dentro de la implementación del algoritmo genético como un porcentaje que indica con qué frecuencia se efectuará. Esto significa que no todas las parejas de cromosomas se cruzarán, sino que habrá algunas que pasarán intactas a la siguiente generación(Coello, 1995).

**Copia:** La copia es otra estrategia reproductiva para la obtención de una nueva generación a partir de la anterior. A diferencia del cruce, se trata de una estrategia de reproducción asexual. Consiste simplemente en la copia de un individuo en la nueva generación(Pulido, 2014).

**Mutación:** La mutación se considera un operador básico, que brinda aleatoriedad a los individuos de una población, encargado de aumentar o reducir el espacio de búsqueda en un algoritmo genético y de proporcionar cierta variabilidad genética de los individuos. La probabilidad con la que estos cambios se producen suele ser baja, generalmente menor al 1%. Esto se debe sobre todo a que los individuos suelen tener un ajuste menor después de mutados.

#### 4 Formulación del Modelo Matemático

El modelo matemático formulado en esta investigación, aborda el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia, para la atención de desastres, en este caso, un evento sísmico, adaptado a partir del propuesto por (Mancini, Pani, Fadda, & Fancello, 2017). Se consideran los siguientes supuestos, a partir del caso en el que, después de una evaluación inicial de las condiciones de salud de las víctimas, se sabe:

- Gravedad de la lesión del paciente (código rojo, código amarillo, código verde)
- Un tiempo límite dentro del cual el paciente debe ser tratado
- Un umbral de tiempo adicional después del cual el servicio médico ofrecido se considera no eficiente

##### **Supuestos:**

- Se asume, un conjunto de centros médicos y un conjunto de vehículos de emergencia, para cada uno de ellos se conoce el número, ubicación y disponibilidad.
- Para cada uno de los pacientes, se conoce el vehículo que puede transportarlos y a que centros médicos puede dirigirse.
- Cada vehículo puede llevar solo un paciente a la vez.
- Se agregan penalizaciones adicionales, si el tiempo de rescate es mayor que los umbrales prefijados.
- Para cada paciente de acuerdo al código de gravedad al que pertenezca, se estableció un parámetro de entrada, que es una penalización de tiempo proporcional a la gravedad de su lesión. De hecho, cada minuto de retraso en el

tratamiento de un paciente con lesión grave tiene un peso específico mucho más alto con respecto a un minuto de retraso en el tratamiento de un paciente con lesión leve.

- Se considera diferentes tiempos para cargar y descargar al paciente en el vehículo de emergencia, dependiendo de la gravedad de su lesión.
- Tanto la demanda como la posición geográfica de las víctimas se genera de forma aleatoria dentro de las comunas que se establecieron como área de desastre, específicamente las comunas; Norte (1), Nororiental (2), Cabecera del llano (12), Oriental (13), Morrónico (14).
- Todos los pacientes se generan en las áreas de desastre en el período de tiempo 0 y tienen diferentes valores de probabilidad de morir ( $P_s$ ) asociada a la gravedad de su lesión, es decir grave, moderado y leve. La  $P_s$  disminuye de manera lineal con respecto al tiempo que transcurre desde que la víctima es rescatada hasta que recibe tratamiento.
- Se asume una constante de penalización por congestión que evitará que todos los pacientes sean trasladados a un solo hospital.
- Después de recibir una orden de despacho, una ambulancia se envía al lugar de recolección y luego de terminar su tarea, se dirige a su siguiente orden de despacho.
- Se asume, que todos los vehículos de emergencia se encuentran inicialmente en sus respectivas bases.

- Una vez que se realiza la asignación de los pacientes, se considera que las condiciones de los pacientes puede cambiar dinámicamente durante el proceso de rescate.

**Notación:****Conjuntos del modelo.**

I: Conjunto de pacientes

S: Conjunto de Hospitales

K: Conjunto de vehículos

**Parámetros**

$A_1$ : Ambulancia básica

$A_2$ : Ambulancias medicalizadas

$R_1$ : Penalización por superar el primer umbral

$R_2$ : Penalización por superar el segundo umbral

$U_{1i}$ : Umbral de tiempo de rescate para el paciente, después de lo cual se produce una penalización

$U_{2i}$ : Umbral de tiempo de rescate para el paciente, después de lo cual se produce una penalización adicional

$\epsilon$ : Constante muy pequeño para dar un peso a la congestión del hospital

$Cong_i$ : = tiempo promedio en el que se debe ser atendido un paciente por el hospital.

$\sigma_i$ : tiempo necesario para cargar y descargar al paciente  $i$  en la ambulancia  $k$ .

$M$ : Constante muy pequeña.

$W$ : Constante muy grande.

### Variables involucradas

$X_{isk}$ : Variable binaria que toma el valor igual a 1 si el paciente  $j$  es llevado inmediatamente después del paciente  $i$  y 0 en caso contrario.

$Y_{is}$ : Variable binaria que toman valor igual a 1 si el paciente  $i$  se lleva al hospital  $s$ .

$Z_{1i}$ : Variable binaria que toma el valor igual a 1 si el tiempo de rescate para el paciente es mayor que  $U_1$  y 0 en caso contrario

$Z_{2i}$ : Variable binaria que toma el valor igual a 1 si el tiempo de rescate para el paciente es mayor que  $U_2$  y 0 en caso contrario

$Carga_k$ : Tiempo acumulado de pacientes asignados al hospital  $h$  antes de paciente  $i$ .

$tp_i$ : = Tiempo del Paciente  $i$

### Función Objetivo

$$\text{Min} \sum_{i \in I} tp_i + \sum_{i \in I} Z_{1i} R_{1i} + \sum_{i \in I} Z_{2i} R_{2i} + \sum_{i \in I} Carga_k + \sum_{i \in I} \varepsilon Cong_i \quad (1)$$

Donde

$$tp_i = \text{tiempo de recorrido } A_k + t. \text{ carga } A_k + t. \text{ descarga } A_k$$

**Sujeto a.**

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I_0} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in I \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in I} X_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{j \in I} X_{ijk} \leq \sum_{j \in I_0} X_{jik} \quad \forall k \in K, \forall i \in I \quad (4)$$

$$\sum_{j \in I} X_{0jk} \geq M \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} X_{ijk} \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in I} X_{0jk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$T_j \geq T_i + \sum_{s \in S} Y_{is} T_s^R + \sigma_j + \sum_{s \in S} Y_{js} T_s^R - W(1 - X_{ijk}) \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall k \in K, \quad (7)$$

$$T_i \geq -W(1 - X_{0ik}) + \sum_{s \in S} I_{sk} T_s^R + \sigma_j + \sum_{s \in S} Y_{is} T_s^R \quad \forall i \in J, \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{s \in S} Y_{is} = 1 \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} Z_{1i} \geq \varepsilon(T_i - U_{1i}) \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} Z_{2i} \geq \varepsilon(T_i - U_{2i}) \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$Cong_i \geq \sum_{\substack{j \in J \\ i \neq j}} Y_{js} - W(1 - Y_{js}) \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (12)$$

$$Y_{is} \leq A_{is} \quad \forall i \in I \forall s \in S \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I_0} X_{ijk} \leq B_{jk} \quad \forall j \in J \forall k \in K \quad (14)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall k \in K \quad (15)$$

$$Y_{is} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall s \in S \quad (16)$$

$$Z_{1i} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (17)$$

$$Z_{2i} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (18)$$

$$T_i \in Z^+ \quad \forall i \in I \quad (19)$$

$$\text{cong}_j \in Z^+ \quad \forall i \in I \quad (20)$$

El objetivo del modelo es minimizar los tiempos de viaje, expresado en la ecuación (1), dada por la suma de todos los tiempos de rescate, más la suma de penalizaciones adicionales por ineficiencia. Las restricciones (2) y (3) implican que todos los pacientes deben ser abordados por un vehículo. La restricción (4) establece que el vehículo  $k$  puede atender a un cliente  $j$  inmediatamente después del cliente  $i$ , solo si, el cliente  $i$  ha sido asignado al mismo vehículo. En la restricción (5), los pacientes pueden ser abordados por un vehículo, solo si, ese vehículo se usa en la solución. La restricción (6), determina que, si se usa un vehículo, habrá un paciente que será llevado como primer paciente por ese vehículo. La restricción (7) permite calcular el tiempo de rescate para un paciente que no es el primer paciente atendido por el vehículo, mientras que el tiempo de rescate para pacientes que son tratados como primer paciente puede calcularse mediante la restricción (8). La restricción (9) garantiza que cada paciente sea asignado a un solo hospital. Las restricciones (10) y (11) implican que si el tiempo de rescate del paciente es mayor que el umbral prefijado, se pagan las multas correspondientes. La restricción (12) permite tener en cuenta el incremento de los tiempos de permanencia debido a la congestión. Un paciente puede ser transportado por un vehículo solo si ese vehículo es compatible con su tipo de lesión y puede ser asignado a un hospital solo si ese hospital puede tratar su tipo de lesión, como lo indican las restricciones

(13) y (14), respectivamente . Finalmente, las restricciones (15) - (20) especifican variables de dominio.

## 5 Diseño del Algoritmo Genético

Para dar solución al problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia propuesto en este trabajo de investigación, se requiere de una metodología adecuada que proporcione una respuesta rápida y eficaz, ya que es un problema de tipo NP-hard. Por esto, se fundamenta en las metaheurísticas, que aunque no proporcionan una respuesta óptima si encuentra una muy cercana a la misma en un tiempo más corto. En este caso, se hace uso del algoritmo genético, que utiliza mecanismos que simulan los de la evolución, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas.

Teniendo en cuenta el modelo matemático, donde la función objetivo busca minimizar los tiempos de rescate de las personas afectadas por el desastre, el algoritmo toma la decisión de cuál vehículo de emergencia asignar para transportar a cada paciente lesionado y además decidir cuál hospital es el más adecuado para su atención, considerando la congestión de estos.

### 5.1 Descripción del algoritmo genético propuesto

Se describe de manera detallada la estructura del algoritmo propuesto como mecanismo de solución al problema, el cual con ayuda de los operadores genéticos de selección, cruce y mutación, permiten desarrollar una búsqueda más selectiva de soluciones que determinen el menor tiempo de ser rescatados y atendidas las víctimas generadas por el desastre.

Antes de realizar el proceso de representación de los individuos y operadores genéticos, se ejecutan otras actividades que permiten generar un escenario realista con el cual

trabajar; iniciando con la ubicación de la flota de vehículos de emergencia y los hospitales dentro de la matriz (ciudad) previamente dispuesta para este caso de estudio, luego se introduce como dato de entrada la cantidad aproximada de heridos, los cuales se ubican aleatoriamente dentro de la matriz con una probabilidad de estar en ese punto dependiendo de factores como las zonas más vulnerables y clasificación de heridos, una vez generado el escenario, el programa lee tanto las coordenadas como la cantidad de los heridos, centros de atención y ambulancias, posteriormente se definen los parámetros del problema, tales como; umbrales de tiempo, penalizaciones, congestión, velocidad de las ambulancias, entre otros, y de esta manera se ejecuta el algoritmo de asignación en primer lugar a los pacientes graves (código rojo) después a los pacientes moderados (código amarillo) y finalmente a los pacientes leves (código verde).

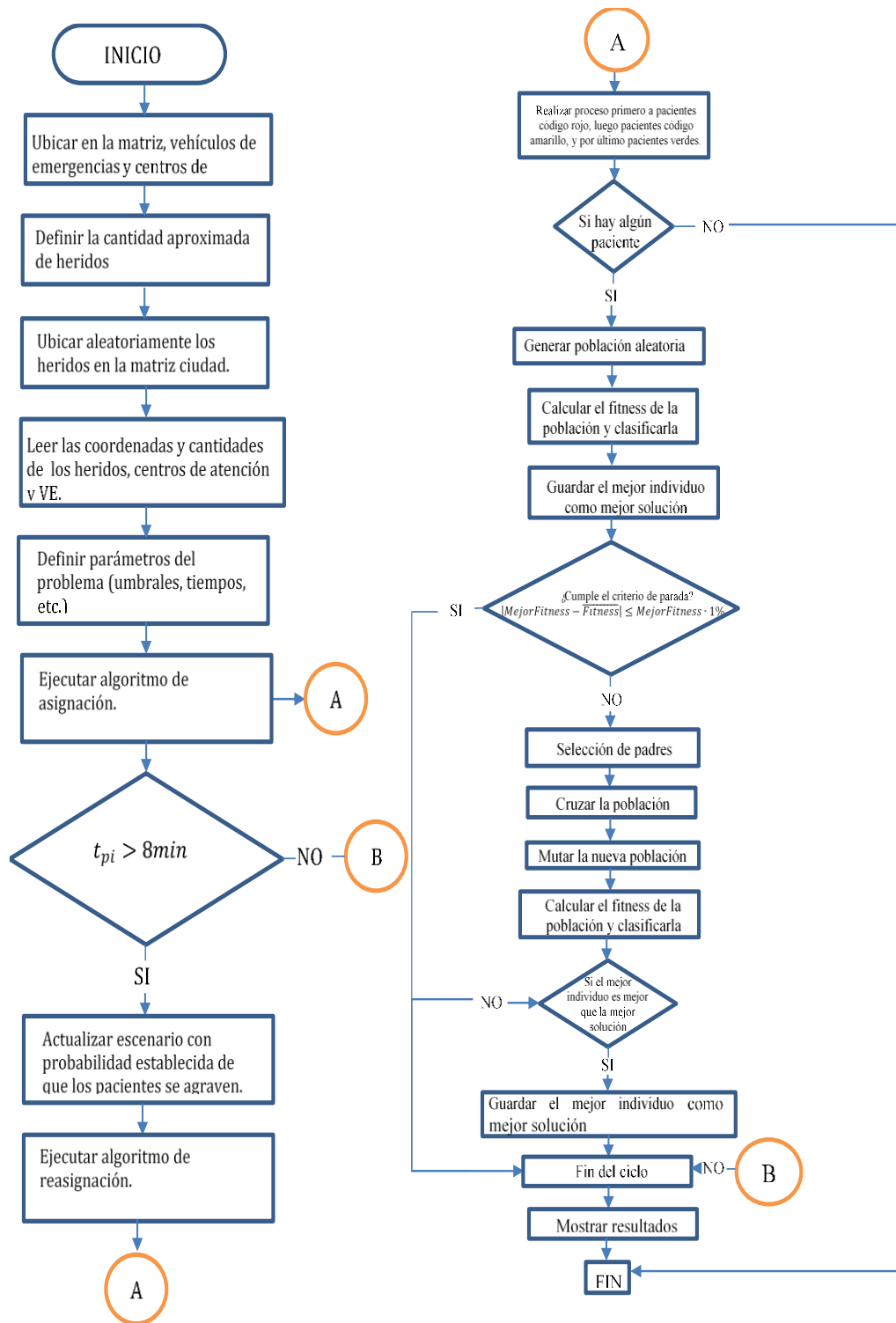
Básicamente, el algoritmo genético empieza con la generación de la población inicial, elegida aleatoriamente, la cual, está conformada por un conjunto de cromosomas. Posteriormente se realiza la evaluación a cada uno de los cromosomas mediante la función fitness, a fin de guardar el mejor individuo como mejor solución hasta que se cumpla el criterio de parada. La condición de parada está dada, no por un número máximo de iteraciones, sino por la convergencia de la solución a un solo punto, es decir, detenerlo cuando no haya cambios en la población, mientras no se cumpla este criterio se realiza la aplicación de los operadores genéticos. Estos operadores son; selección, cruce y mutación. Por medio de la selección se procede a elegir las parejas de individuos que se convertirán en padres, mediante el cruce se mezclan los materiales genéticos, es decir, se crean dos descendientes por cada pareja de padres, a través de la mutación se modifica al azar parte del cromosoma de los individuos, generando nuevos cromosomas, los cuales serán evaluados a

través de la función aptitud como se realizó con la población inicial. Por último se eligen las soluciones que sobreviven y que formarán la nueva generación, hasta encontrar la que mejor solución que se ajuste al problema.

Cabe resaltar que sí, el tiempo de algún paciente es mayor que 8 min el programa actualiza el escenario con una probabilidad establecida de que se agrave, para así aplicar la estrategia de reasignación. En la Figura 6 se visualiza el diagrama de flujo sobre la secuencia lógica del algoritmo genético.

Figura 6

Diagrama de flujo de la descripción del algoritmo genético



### 5.1.1 *Representación de los individuos*

Las soluciones potenciales a un problema pueden ser presentadas dando valores a una serie de parámetros. Este conjunto de parámetros se denomina genes, que al ser codificados en una cadena de valores conforman la estructura del cromosoma. Para esta investigación la representación genética de los individuos consiste en un número de cromosomas que se encuentran en función del conjunto de pacientes “I”, cuyo subíndice está dado por  $i=\{1,2,3,\dots,I\}$ , según la cantidad de heridos encontrados en el desastre, además cada cromosoma está compuesto por dos celdas que serán rellenas usando valores numéricos enteros. El segmento representa la asignación de un hospital y un vehículo de emergencia, a cada herido (i), realizando este proceso primero a los todos los heridos graves, luego a todos los moderados y finalmente a todos los leves. A un mismo hospital le puede corresponder más de un herido, por lo tanto, los números relacionados a los hospitales pueden repetirse, a fin de que todos los heridos tengan un hospital asignado al cual trasladar las víctimas, de igual forma sucede con los vehículos de emergencia.

Para visualizar de una manera más sencilla y facilitar su representación ver Figura 7, se plantea el siguiente ejemplo; en un evento sísmico se producen 4 heridos, para los cuales se tienen disponibles 2 vehículos de emergencia y 3 centros de salud, al leer el segmento de cromosoma de la Figura 8, de izquierda a derecha, se puede observar que al herido  $i=1$  se le asignó el hospital  $s=1$  y el vehículo  $k=1$ , al  $i=2$  el  $s=2$   $k=2$  y , al  $i=3$  el  $s=3$  y el  $k=1$  finalmente al  $i= 4$  el  $s=3$  y  $k=1$ .



oportunidades de reproducción a los individuos más aptos. Por lo tanto, la selección de un individuo estará relacionada a sus valores de la función aptitud. No se debe sin embargo eliminar por completo las opciones de reproducción de los individuos menos aptos, pues en pocas generaciones la población se volvería homogénea.

Este proceso de selección se puede llevar a cabo a través de varios mecanismos, en este caso, selección por ruleta, donde a cada uno de los individuos de la población se le asigna una parte proporcional a su ajuste de una ruleta, de tal forma que la suma de todos los porcentajes sea la unidad. Los mejores individuos recibirán una porción de la ruleta mayor que la recibida por los peores. Generalmente la población está ordenada en base al ajuste por lo que las porciones más grandes se encuentran al inicio de la ruleta. Para seleccionar un individuo basta con generar un número aleatorio del intervalo [0,1] y devolver el individuo situado en esa posición de la ruleta. Esta posición se suele obtener recorriendo los individuos de la población y acumulando sus proporciones de ruleta hasta que la suma exceda el valor obtenido.

Para fines de esta investigación, debido a que el mejor individuo es aquel con el menor fitness, se encuentra el individuo con mayor fitness. A este valor se le suma una unidad, y de este valor se restan los demás fitness para asignar un nuevo fitness en el que el peor individuo tendrá un fitness de 1 y el mejor individuo tendrá el fitness más grande para que tenga más opciones de ser seleccionado. Luego se suman todos los nuevos fitness y la probabilidad de ser seleccionado está dada por:

$$P_i = \frac{Fitness_i}{\sum Fitness}$$

Continuando con el ejemplo anterior, en la Figura 9 se evidencia la representación de 4 posibles soluciones del plan de asignación tanto de centros de salud, como de vehículos de emergencia para 4 heridos, donde los hospitales estarán expresados por números enteros del 1 al 3, los VE 1, 2, y los heridos del 1 al 4.

### Figura 9

*Ejemplo de representación de 4 posibles soluciones al problema.*

#### Solución 1

1	1	2	2	3	1	3	1
---	---	---	---	---	---	---	---

#### Solución 2

3	1	2	1	1	1	2	2
---	---	---	---	---	---	---	---

#### Solución 3

2	2	3	1	1	2	3	2
---	---	---	---	---	---	---	---

#### Solución 4

1	2	3	2	2	1	3	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Debido a que en esta investigación el problema que se aborda tiene como finalidad disminuir los tiempos de rescate de heridos en una situación de desastre sísmico, primero se halla el valor fitness perteneciente a cada una de las soluciones propuestas, teniendo en cuenta las operaciones que están contenidas en la función objetivo, detalladas en la sección de la formulación matemática y como el método de selección utilizado en este caso es por ruleta, se procede a encontrar la probabilidad ( $p_i$ ) proporcional al fitness de cada uno de los individuos, mediante la fórmula descrita anteriormente, después se calcula la probabilidad acumulada ( $q_i$ ) de cada individuo, posterior a dicho procesamiento se realiza la selección de

los padres, generando números random ( $r$ ) en este caso; 0.256620309, 0.507715755, 0.507715755, 0.75862069 y finalmente se selecciona el padre que cumple que  $q_i > r$ , como se evidencia en la Tabla 2 y así se obtiene para este caso 2 parejas de padres, conformados de la siguiente manera:

- Padre 1: solución 1, Padre 2: solución 2
- Padre 3: solución 2, Padre 4: Solución 3

**Tabla 2**

*Valores fitness de las soluciones planteadas*

Padres	Valor Fitness	Pi	qi
Solución 1	42.300 min	0.25662	0.257
Solución 2	46.650 min	0.25110	0.508
Solución 3	46.800 min	0.25090	0.759
Solución 4	54.300 min	0.24138	1.000

#### 5.1.4 Operador de cruce

Una vez realizada la selección de los cromosomas, el primer paso en el proceso de cruce entre dos o más de estos cromosomas es simplemente un intercambio de información genética entre los padres de tal manera que los hijos que resultan sean también cromosomas válidos. El objetivo del cruce es conseguir que el descendiente mejore la aptitud de sus padres y explore las regiones con mayor adaptación.

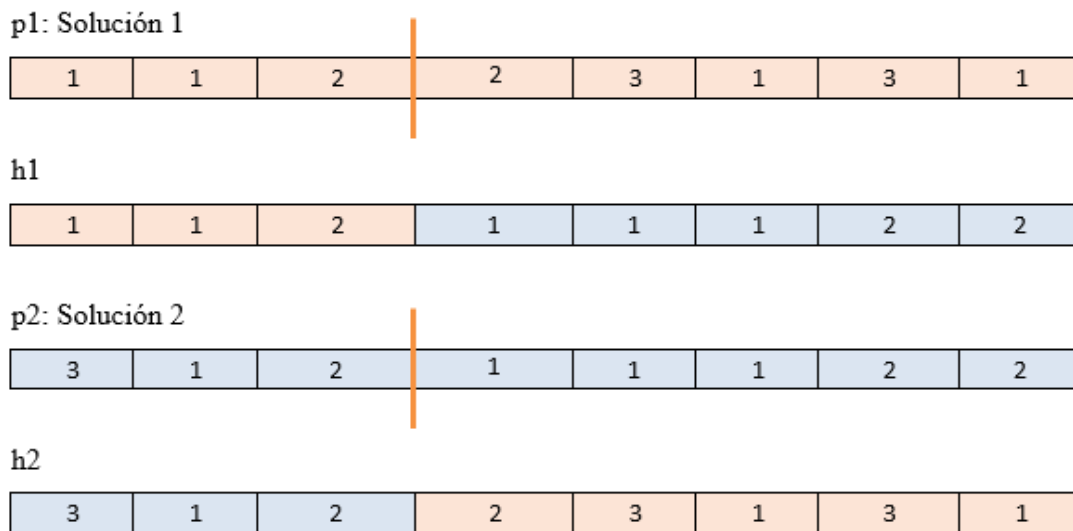
Existen diversos métodos de cruce, en este caso se utilizará el método de cruce en un punto, siendo esta la más sencilla de las técnicas de cruce. Una vez seleccionados dos individuos se cortan sus cromosomas por un punto seleccionado aleatoriamente para generar dos segmentos diferenciados en cada uno de ellos: la cabeza y la cola. Se intercambian las

colas entre los dos individuos para generar los nuevos descendientes. Es decir, los genes del padre 1 a la izquierda del punto de corte forman parte del hijo 1 y los situados a la derecha formarán parte del hijo 2, mientras que con el padre 2 sucederá lo contrario. De esta manera ambos descendientes heredan información genética de los padres.

Siguiendo con el ejemplo, a fin de realizar el cruce de estos 2 pares de padres y que den como resultado 4 descendientes, se genera el corte en un punto, cuyo corte es identificado con una línea color naranja, esto indica la cantidad de genes que se heredaran, más adelante con esta cantidad, para este caso es 3, este valor se genera aleatoriamente entre  $(2 \text{ y } n-1)$ , donde  $n$  representa el número de genes. Con base a la aplicación de cruce para el primer hijo (h1) este hereda en su cabeza las 3 primeras posiciones del padre 1 (p1) y las demás posiciones faltantes en su cola se heredan con los genes del padre2 (p2) y de igual forma para los hijos, h2, h3 y h4, tal y como lo muestra las Figura 10 Y Figura 11.

**Figura 10**

*Cruce en un punto de p1 y p2*



**Figura 11**

*Cruce en un punto de p3 y p4*

p3: Solución 2

3	1	2	1	1	1	2	2
---	---	---	---	---	---	---	---

h3

3	1	2	1	1	2	3	2
---	---	---	---	---	---	---	---

p4: Solución 3

2	2	3	1	1	2	3	2
---	---	---	---	---	---	---	---

h4

2	2	3	1	1	1	2	2
---	---	---	---	---	---	---	---

### 5.1.5 Operador de mutación

El operador de mutación es el que ofrece aleatoriedad a los individuos de una población, es decir, que este operador es el encargado de aumentar o reducir el espacio de búsqueda en un algoritmo genético y de proporcionar cierta variabilidad genética de los individuos. En este caso la mutación simplemente implica alterar un cromosoma con cierta probabilidad, algunos autores recomiendan utilizar porcentajes bajos (entre 1 y 10% aproximadamente), ya que es un proceso en el cual los cambios tienen poca variación porque se deriva de los individuos calificados como los más aptos. Para esta investigación se considera una probabilidad de 5%, entonces se genera un número aleatorio que indica, si ese individuo mutará o pasa igual a la siguiente generación, luego para cada posición de cada individuo se comprueba la tasa de mutación y si cumple esta condición, se aplica el operador,

es decir si cae en un número de 1 al 5 muta. El descendiente a mutar es el hijo 4 y el gen que cambia es el de la posición 3, como se aprecia en la Figura 12.

### Figura 12

*Mutación: hijo 4*

h4

2	2	3	1	1	1	2	2
---	---	---	---	---	---	---	---

h4 mutado

2	2	1	1	1	1	2	2
---	---	---	---	---	---	---	---

## 6 Caso de Estudio

Con el fin de evaluar el modelo matemático planteado; esta investigación presenta un caso de estudio que aborda los problemas de asignación inicial y reasignación de vehículos de emergencia a pacientes lesionados dependiendo de un nivel de gravedad, considerando la ocurrencia de un desastre natural en la ciudad de Bucaramanga (Santander).

### 6.1 Descripción del Caso

Este caso se centra en la ciudad de Bucaramanga (Santander), capital del departamento de Santander. El municipio es de gran interés, ya que se presentan amenazas de origen natural, tanto para el sector rural como para el sector urbano, determinadas por fallas geológicas, inundaciones y deslizamientos, siendo el principal escenario de riesgo para esta región la alta actividad sísmica, debido al movimiento de las placas tectónicas de la cordillera oriental, por hallarse ubicado sobre las fallas de Santa Martha-Bucaramanga, Suarez y Surata. Esta dinámica terrestre ha hecho que este territorio sea calificado como el segundo nido sísmico más activo del mundo. El proceso acelerado de urbanización que ha vivido la ciudad, la imprecisión al construir, la necesidad de vivienda económica que obliga a algunos de sus habitantes a edificar en zonas de probable riesgo sísmico y, en ciertos casos, el manejo inadecuado de problemas sísmico en los proyectos de construcción, permite afirmar que ante un sismo, las probables pérdidas y números de víctimas sean considerables. (Maldonado & Chio, 2005)

Para el propósito de este trabajo, se consideran 5 de las 17 comunas que se encuentran en las zonas más vulnerables, según el estudio de identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables de la ciudad de Bucaramanga de Maldonado y Chio, las cuales son: Comuna Norte (1), Nororiental (2), Cabecera del llano (12), Oriental (13), Morrórico (14).

### 6.1.1 *Red de Emergencia*

Para la construcción de la red de emergencias de Bucaramanga, se utiliza el mapa de la división política de la ciudad, por medio de la herramienta de información geográfica OpenstreetMap, la cual proporciona el trace de la estructura de Matlab extrayendo una matriz de adyacencia de gráficos dirigidos que representa la conectividad de la red, lo que permite la geolocalización de todos los puntos incluidos en la red, es decir, de los hospitales, ambulancias, intersecciones de carreteras y la representación geográfica de la solución. La información sobre la red de emergencias incluida en este estudio, corresponde a una serie de investigaciones llevadas a cabo anteriormente por, (Barrera & Hernandez, 2016),(Barreto & Niño, 2016), (Contreras & Martinez, 2016)y (Aguilar, 2017).

En el mapa político de la ciudad se aprecia las zonas vulnerables conforme a los tipos de amenazas que allí se presentan y también las fallas geológicas que atraviesan la ciudad de Bucaramanga **Figura 13**, las instituciones de atención a emergencias (defensa civil, sistema nacional de bomberos, cruz roja, policía nacional), los principales hospitales, centros clínicos y centros médicos con los cuales cuenta la ciudad **Figura 14**, las comunas por las cuales está dividido el municipio **Figura 15** y la zonificación geomórfica **Figura 16** con base a lo propuesto por Maldonado y Chio (2005). Las figuras que se presentan a continuación han sido tomadas de la tesis realizada por Amaya y Gómez.

**Figura 13**

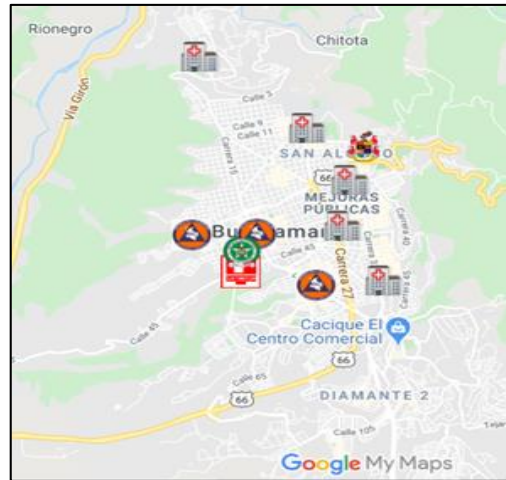
*Fallas geológicas de Bucaramanga*



*Nota:* Tomado de la tesis de Amaya y Gómez 2019

**Figura 14**

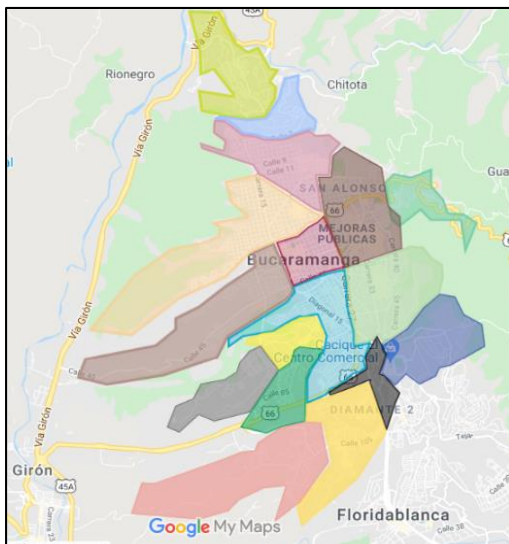
*Organismos de Socorro y hospitales*



*Nota:* Tomado de la tesis de Amaya y Gómez 2019

**Figura 15**

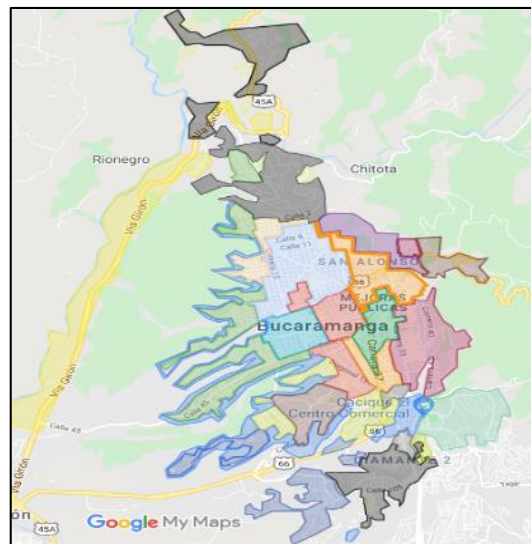
*Comunas de Bucaramanga*



*Nota:* Tomado de la tesis de Amaya y Gómez 2019

**Figura 16**

*Zonificación geomorfológica de Bucaramanga*



*Nota:* Tomado de la tesis de Amaya y Gómez 2019

### **6.1.2 *Nodos de la red de emergencia***

Como objeto de estudio, para el desarrollo de los escenarios de prueba, se hace uso de mapas del territorio mediante la herramienta OpenstreetMap, que permite la representación de los sentidos viales de las carreteras que comunican los nodos de la red, es decir, del punto de origen (lugar del desastre) al destino final (hospitales, clínicas especializadas y centros médicos). Así pues, se tendrá la información de los elementos y las coordenadas en latitud y longitud. Los nodos que componen la red de emergencia son:

#### **6.1.2.1 Área de desastre.**

Se consideran áreas de desastre a las zonas que por el impacto de un evento de origen natural o humano, en este caso, un evento sísmico sufren grandes daños a nivel estructural y social, que a su vez genera una cantidad considerable de personas lesionadas. Para el desarrollo de los escenarios se han determinado 5 áreas de desastre, aproximadamente de 250.000 metros cuadrados cada uno.

#### **6.1.2.2 Servicios de Salud – Hospitales.**

Hace referencia a la red de hospitales que se contemplan en caso de la ocurrencia de un desastre, los cuales cuentan con los recursos necesarios en personal esencial y equipamiento para afrontar la situación. En este caso, se cuenta con servicios de salud de complejidad alta (hospitales), media (centros clínicos) y baja (centros de salud). La atención de estos depende de la gravedad del paciente, es decir, los hospitales reciben a las víctimas con código rojo, amarillo y verde priorizando a los más graves, en este caso los de código rojo; los centros clínicos por su capacidad atenderán a las víctimas de código amarillo y verde respectivamente, y los centros de salud solamente a los de código verde, en la Tabla 3 tabla

5 se encuentra resumida la información. La red hospitalaria que se utilizara para este escenario son: Hospital local del Norte, Hospital Universitario de Santander, Serviclínicos Dromedicos, Sede Gonzalez Valencia, Los Comuneros Hospital Universitario de Bucaramanga, Clínica de Urgencias Bucaramanga S.A.S.

**Tabla 3**

*Priorización de los servicios de salud según gravedad de la lesión*

<b>Servicios de Salud</b>	<b>Prioridad de atención</b>
Hospitales (Complejidad Alta)	Código Rojo (pacientes graves)
	Código Amarillo (pacientes moderados)
	Código Verde (pacientes leves)
Centros Clínicos (Complejidad Media)	Código Amarillo (pacientes moderados)
	Código Verde (pacientes leves)
Centros Médicos (Complejidad Baja)	Código Verde (pacientes leves)

### **6.1.2.3 Vehículos de emergencia.**

Ante una emergencia ocasionada por un evento sísmico, el transporte asistencial terrestre es de gran importancia para la oportuna atención de las víctimas. El municipio de Bucaramanga dispone de una flota de vehículos de emergencia para atender dicha situación, de acuerdo con la resolución 1439 de 2002 expedida por el Ministerio de Protección Social se categorizan dos tipos de ambulancias: Ambulancia de Transporte Asistencial Básico (TAB) y Ambulancia de Transporte Asistencial Medicalizado (TAM), estos vehículos difieren en cuanto a la dotación, las características de la tripulación y el tipo de evento que están en la capacidad de responder. Además se cuenta con el apoyo de los vehículos de emergencia de los principales organismos de socorro como los de la Cruz Roja, Defensa Civil, entre otros. Estos vehículos se encontrarán ubicados en sus respectivas bases.

Para los vehículos de emergencia que se emplearán en el caso de estudio se ha recopilado la siguiente información:

- Tipo y cantidad: Estos datos hacen referencia a los diferentes tipos, es decir, si son tipo TAB o TAM y las cantidades de los vehículos de emergencia disponibles que se pueden usar para llevar a las personas heridas a los hospitales y evacuar a la población externa, como se observa en la Tabla 4 y (ver apéndice A).
- Capacidad: Esta información indica el número máximo de pacientes que puede transportar cada vehículo a la vez, como se observa en la Tabla 4.
- Ubicación: Especifica la ubicación inicial de los vehículos de emergencia, como se evidencia en el (ver apéndice A).
- Tiempo de viaje: Los tiempos de viaje de los vehículos de emergencia se han estimado desde la ubicación inicial de cada vehículo de emergencia a la zona donde ocurrió el desastre y de allí a cada hospital. Los tiempos se han estimado considerando la distancia de viaje (km) (distancia manhattan) y la velocidad promedio de la ambulancia sin congestión de tráfico. Se supone que una ambulancia funciona a una velocidad promedio de 40 km / h (cuando se conduce en modo de emergencia con las luces y las sirenas activadas

**Tabla 4.**

*Datos relaciones con el vehículo.*

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Velocidad media</b>
Ambulancia tipo1	Ambulancia utilizada para transportar pacientes que solo requieren Transporte	70	1 Paciente	40 KM/h

	Asistencial (TAB)	Básico			
Ambulancia tipo2	Ambulancia equipada con personal médico, para Transporte Asistencial Medicalizado (TAM) de pacientes con lesiones graves		28	1 paciente	40 km/h

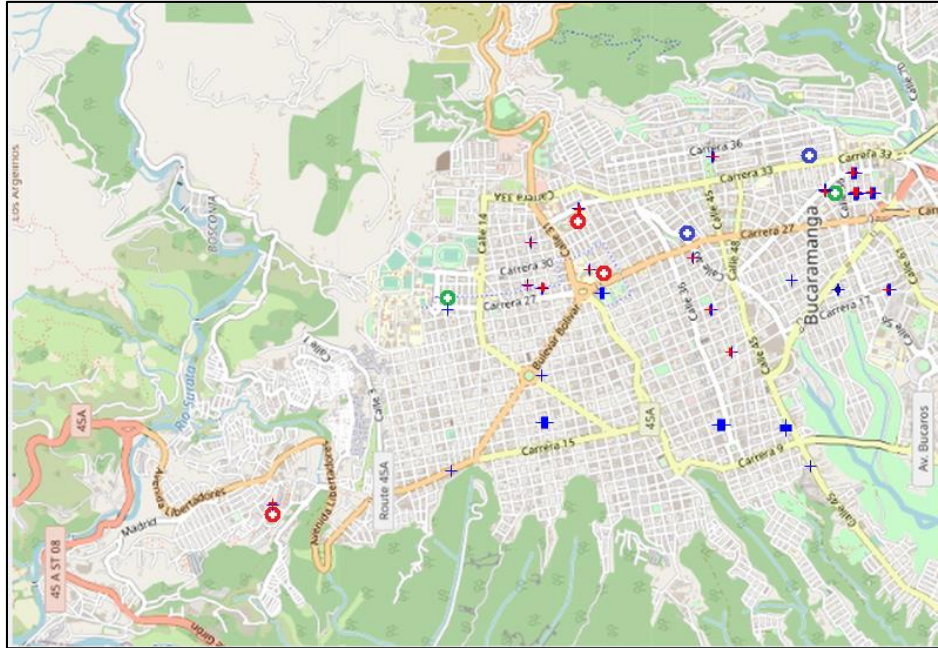
Para los escenarios de prueba, los vehículos de emergencia transportarán a los pacientes dependiendo del tipo de prioridad que estos presenten, de la siguiente manera: las ambulancias tipo TAM trasladarán a cualquier tipo de lesión ya sea código rojo, amarillo o verde, priorizando a los pacientes con código rojo, las ambulancias tipo TAB a los pacientes con código amarillo y verde respectivamente, en la Tabla 5 , se aprecia la información de manera concisa.

**Tabla 5.**

*Priorización de vehículos de emergencia según gravedad del paciente.*

<b>Tipos de Vehículos de Emergencia</b>	<b>Priorización en la atención de los pacientes</b>
Vehículos de Emergencia Tipo TAM	Código Rojo (Paciente Grave) Código Amarillo (Paciente Moderado) Código Verde (Paciente Leve)
Vehículo de Emergencia Tipo TAB	Código Amarillo (Paciente Moderado) Código Verde (Paciente Leve)

En la Figura 17, se aprecia el mapa de la ciudad de Bucaramanga con los servicios de salud disponibles (los hospitales, centros clínicos, centros de salud), y flota de vehículos que se usarán para el escenario de prueba.

**Figura 17***Escenario de prueba.*

### 6.1.3 *Estimación de las zonas de emergencia*

Para delimitar e identificar las zonas más vulnerables sísmicamente de la ciudad de Bucaramanga, se tomó como referencia el estudio realizado por Maldonado y Chio, cuyo estudio define las zonas que se verían más afectadas ante diferentes escenarios sísmicos, como se evidencia en la Tabla 6. Teniendo en cuenta esta información se hace mayor énfasis en los sismos de nivel VII en la escala de Mercalli, ya que son los escenarios que con mayor frecuencia se presentan en el municipio, así pues, las zonas con mayor afectación y las que se tendrán en cuenta para esta investigación son la 12, 18, 9A, y 11, de acuerdo con la zonificación geomórfica, como se evidencia en la Figura 18.

**Tabla 6**

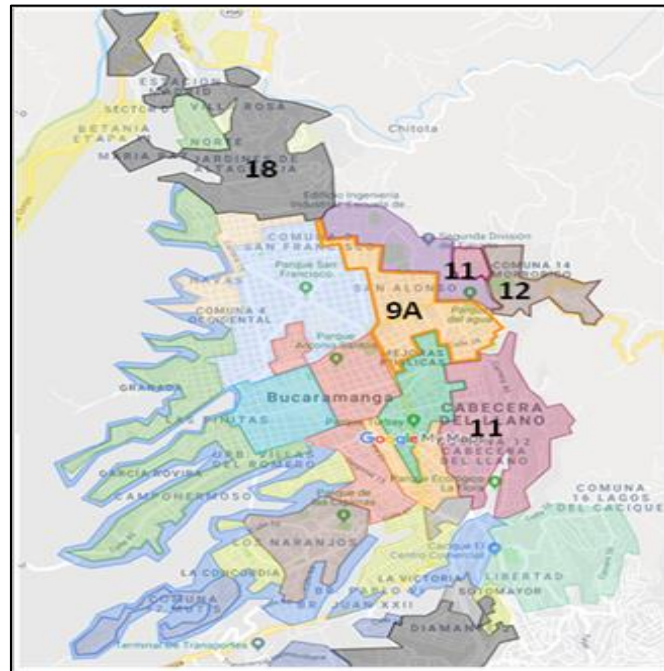
*Zonas afectadas por nivel de intensidad de Mercalli.*

Nivel de Afectación	Niveles de Intensidad				
	VI	VII	VIII	IX	X
1	Zona 12	Zona 12	Zona 12	Zona 12	Zona 12
2	Zona 18	Zona 18	Zona 18	Zona 18	Zona 18
3	Zona 9ª y 11	Zona 9ª y 11	Zona 11	Zona 11	Zona 13
4			Zona 9	Zona 13	Zona 11
5				Zona 6 y 4	Zona 6
6					Zona 4
7					Zona 17

*Nota:* Zonas afectadas según intensidad del sismo y nivel de afectación. Tomado: (Maldonado & Chio, 2005)

**Figura 18**

*Zonas de mayor vulnerabilidad según zonificación geomorfológica*



*Nota:* Tomada de la tesis de Amaya y Gómez. 2019

#### **6.1.4 *Estimación de la población afectada***

Es necesario y de vital importancia tener una estimación de la población afectada que puede dejar el impacto de un desastre, en este caso un evento sísmico. Para la estimación de las víctimas se toma en cuenta las zonas sísmicamente más vulnerables de la ciudad, tales como, la zona 12, 11, 18 y 9A mencionadas anteriormente. Las cuales corresponden a las comunas de Morrórico, Cabecera, Oriental, Norte y Nororiental respectivamente, esto de acuerdo a la zonificación geomórfica de la ciudad.

A fin de estimar el número de víctimas, se empleó información del Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 realizado por el DANE, el cual consistió en contar y caracterizar las personas residentes en Colombia, así como las viviendas y los hogares del territorio nacional. A través del censo, el país obtiene datos de primera mano sobre el número de habitantes, su distribución en el territorio y sus condiciones de vida. Es decir, a partir de la información se obtuvo la distribución de la población por comunas del municipio de Bucaramanga, ver tabla 8, también los hogares conformados según el número de personas, cuyo valor es de 175.107 hogares, teniendo en cuenta que fueron efectivamente censadas 528.855 personas en ese año. Estos valores se utilizan para establecer el número promedio de personas que habitan un hogar en el municipio, dando como resultado 3 habitantes por casa. Asumiendo que al menos una persona del hogar se verá afectada, se obtiene la probabilidad del 33.33%, con el objeto de calcular el número de afectados.

Ahora bien, se considera el nivel de afectación por comunas extraído del estudio realizado por Maldonado y Chio, el cual, establece que las zonas identificadas como más vulnerables alcanzan un alto grado de afectación en sismos de intensidades 6,7, y 8, y ante la posibilidad de un sismo con intensidad superior a 9, el resultado sería devastador. Es de

resaltar que la intensidad del sismo se relaciona a los posibles daños que puedan presentarse en las edificaciones. En la Tabla 7 se aprecia los porcentajes estimados de la población afectada en cada zona dependiendo la intensidad de un sismo, para este caso, se asume un nivel de intensidad 7 tomando los valores mínimos del rango establecido.

Ahora bien, para determinar el número de víctimas generadas en las zonas, por ejemplo para la comuna 1; se toma 61.583 personas que habitan esta comuna, de las cuales solo el 33.33% serán las personas afectadas por hogar, no obstante, el 10% realmente se verán afectadas en esta zona debido al nivel de afectación, dando como resultado 2.053 víctimas que requerirán ser trasladadas para recibir atención médica, como se muestra a continuación:

$$(61.583 * 33.33\% * 10\%) = 2.052,6$$

Después de realizar el procedimiento anterior para cada una de las comunas, se obtienen 8.260 víctimas en las zonas de desastre establecidas. Debido a que, la información a procesar era muy grande y no se contaba con el equipo de cómputo adecuado, para términos de esta investigación y con el fin de probar la eficiencia del modelo se tomó una muestra del 10% de la cantidad de víctimas generadas, como se observa en la Tabla 8.

**Tabla 7**

*Porcentaje de víctimas en la zona K para un sismo de intensidad t*

Intensidad del sismo	Zona K			
	Zona 12	Zona 18	Zona 9A	Zona 11
T=6	30-60%	10-30%	0-10%	0-10%
T=7	30-60%	10-30%	10-30%	10-30%
T=8	30-60%	30-60%	10-30%	10-30%

**Tabla 8***Victimas generadas por área de desastre.*

<b>Zona</b>	<b>Comuna</b>	<b>Total Población 2020</b>	<b>Población Afectada</b>	<b>Muestra del caso de estudio (10%)</b>
Zona 18	Comuna 1 (Norte)	61.583	2053	205
	Comuna 2 (Nororiental)	29.781	993	99
Zona 11	Comuna 12 (Cabecera del llano)	37.930	632	63
	Comuna 13 (Oriental)	59.373	989	99
Zona 12	Comuna 14 (Morrórico)	26.043	2604	260
Zona 9A	Comuna 13 (Oriental)	59.373	989	99
<b>TOTAL</b>		<b>274.083</b>	<b>8.260</b>	<b>825</b>

En cuanto a los datos relacionados con el paciente, se debe identificar la gravedad de la lesión, la cual permite determinar la prioridad del paciente para su tratamiento. Para ello, es importante la realización de un triage inicial en el lugar donde ocurre el evento, el cual, es un método de clasificación de las víctimas según la gravedad de sus lesiones para el traslado adecuado a los respectivos hospitales, centros médicos o centros de salud, que estén en la capacidad de atenderlos de acuerdo a las necesidades de atención médica que presentan. En definitiva, el objetivo del triage en la zona de ocurrencia es distinguir entre las víctimas que necesitan transporte inmediato y las que pueden esperar. Por lo que, la clasificación por prioridad se hace mediante una codificación por colores representando cada estado de gravedad. Se han distinguido cuatro tipos de pacientes que a continuación se describen en la **Tabla 9**.

**Tabla 9***Descripción de los códigos de los pacientes según su clasificación por colores*

<b>Clasificación de pacientes</b>	<b>Descripción</b>
Código Rojo	Paciente con máxima prioridad. Herido muy crítico, en el que existe riesgo para la vida, por lo que se obliga a una atención inmediata, es decir, que necesita ser trasladado lo antes posible a un hospital de complejidad alta por una ambulancia tipo TAM. Estos casos comprenden, víctimas que necesitan cirugía para sobrevivir, cirugía para salvar funciones, o que deben ser internadas en la unidad de Terapia Intensiva.
Código Amarillo	Paciente con segunda prioridad. Hace referencia a situaciones en la que el riesgo para la vida es menor, pero que de igual manera puede ser trasladado a un hospital de complejidad alta por una ambulancia tipo TAM o TAB, una vez que se hayan evacuado todas las víctimas con código rojo, también pueden ser trasladados a centros clínicos con complejidad media, ya que se encuentran equipados para su asistencia. Estos casos comprenden fracturas abiertas, quemaduras severas, estado de inconsciencia o traumatismo craneoencefálico, entre otras.
Código Verde	Paciente con tercera prioridad. Herido leve con situación en la que no existe riesgo para la vida, es decir, que puede esperar o no requiere de atención inmediata y que puede ser transportado al centro de salud por una ambulancia tipo TAB. En estos casos se puede presentar fracturas menores, heridas y quemaduras menores, entre otras.
Código Negro	Paciente con cuarta prioridad. Situación en las que las posibilidades de vida son nulas, es decir, personas fallecidas.

### 6.1.5 *Clasificación por prioridad mediante códigos de colores*

- **Código Rojo:** Paciente con máxima prioridad. Herido muy crítico, en el que existe riesgo para la vida, por lo que se obliga a una atención inmediata, es decir, que necesita ser trasladado lo antes posible a un hospital de complejidad alta por una ambulancia tipo TAM. Estos casos comprenden, víctimas que necesitan cirugía para sobrevivir, cirugía para salvar funciones, o que deben ser internadas en la unidad de Terapia Intensiva.
- **Código Amarillo:** Paciente con segunda prioridad. Hace referencia a situaciones en la que el riesgo para la vida es menor, pero que de igual manera puede ser trasladado a un hospital de complejidad alta por una ambulancia tipo TAM o TAB, una vez que se hayan evacuado todas las víctimas con código rojo, también pueden ser trasladados a centros clínicos con complejidad media, ya que se encuentran equipados para su asistencia. Estos casos comprenden fracturas abiertas, quemaduras severas, estado de inconsciencia o traumatismo craneoencefálico, entre otras.
- **Código Verde:** Paciente con tercera prioridad. Herido leve con situación en la que no existe riesgo para la vida, es decir, que puede esperar o no requiere de atención inmediata y que puede ser transportado al centro de salud por una ambulancia tipo TAB. En estos casos se puede presentar fracturas menores, heridas y quemaduras menores, entre otras.
- **Código Negro:** Paciente con cuarta prioridad. Situación en las que las posibilidades de vida son nulas, es decir, personas fallecidas.

## 7 Validación del algoritmo

La validación de un algoritmo es el proceso de verificación que permite evidenciar que el algoritmo está libre de errores tanto de escritura, como de sintaxis y que genera buenos resultados para cualquier combinación congruente de las variables de entrada, es decir debe corroborar que el algoritmo genere resultados factibles. Se usa con regularidad en el área científica para comparar los resultados obtenidos con los de la literatura. Debido a que actualmente para el problema tratado en esta investigación no existe un punto de referencia en la literatura, y con el propósito de validar el comportamiento del algoritmo propuesto, es necesario evaluar casos de prueba mediante experimentación numérica, a partir de los cuales se pueda medir la eficiencia del mismo, ejecutado mediante datos de entrada previamente definidos arrojando una buena solución en un tiempo computacional corto.

Para ello, se plantean 3 escenarios; en los que se tiene en cuenta que el primero no supera la flota de vehículos, ni la red hospitalaria; en el segundo supera solo la red hospitalaria, puesto que existe un aumento en la cantidad de heridos, y en el último escenario se aborda el problema donde supera tanto la red hospitalaria como la flota de vehículos permitiendo observar a su vez la estrategia de reasignación en algunos pacientes.

### 7.1 Primer escenario

Se realiza la primera prueba para el plan de asignación de VE, a partir de una matriz descargada de OpenstreetMap (ceros y unos) la cual representa la ciudad, donde se aprecia la ubicación de los vehículos de emergencia, la red hospitalaria, y la ubicación de los pacientes. Se simula el escenario con 7 heridos distribuidos aleatoriamente, en las 5 zonas de desastre más vulnerables mencionadas en capítulos anteriores, y su descripción se plantea a continuación:

- Los pacientes involucrados se dividen de la siguiente manera: 1 paciente código rojo, 3 pacientes código amarillo y 3 pacientes código verde.
- Una flota compuesta por 98 VE: 70 VE tipo TAB y 28 VE tipo TAM.
- Una red hospitalaria conformada por 3 Hospitales, 2 centros médicos y 2 centros clínicos.
- Se consideran 3 umbrales de tiempo, aquel donde la atención se considera eficiente. 8, 16 y 32 minutos, para pacientes, con códigos rojo, amarillo y verde respectivamente.
- Se asume que los VE se transportan a una velocidad promedio aproximada de 40 km/h, cuando se conduce con luces y sirena activada.
- Se estima que el tiempo para cargar al paciente dentro del VE y descargarlo son de 2 min cada uno.
- Se supone una probabilidad de morir de 0.2; 0.1; 0.05 como dato de entrada para pacientes graves, moderados y leves respectivamente.

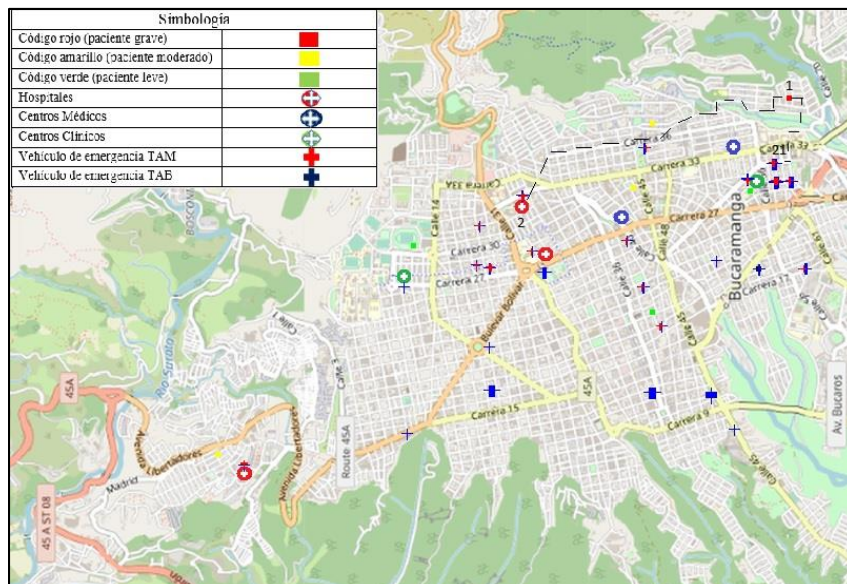
**Tabla 10**

*Asignación Caso 1*

Asignación de pacientes graves (PG):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
1	2	21	0.61667
Asignación de pacientes moderados (PM):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
2	1	29	0.29167
3	4	71	0.96667
4	5	12	1.1167
Asignación de pacientes leves (PL):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
5	6	7	0.775
6	3	15	0.16667
7	7	72	0.11667

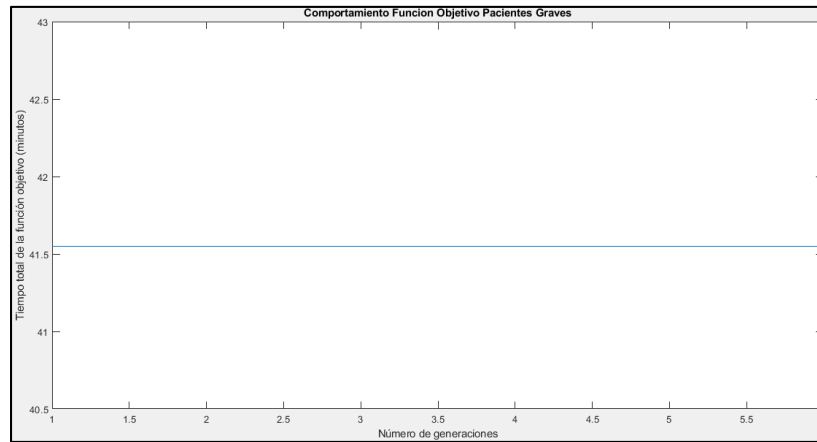
**Figura 19**

*Escenario 1*



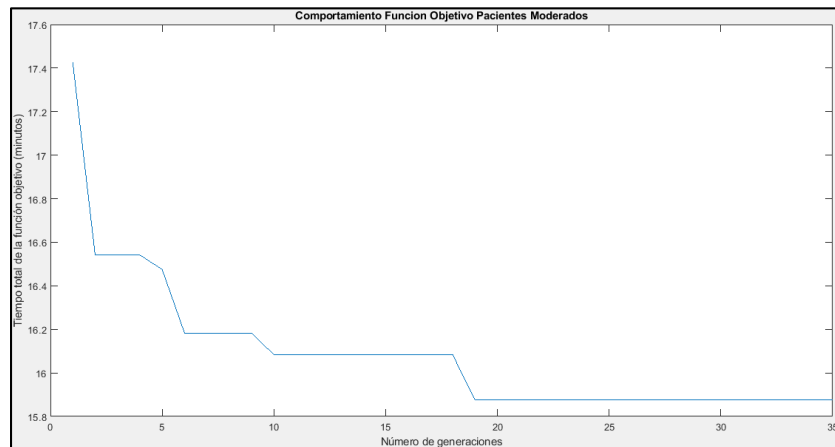
**Figura 20**

*Comportamiento Función Objetivo PG Caso 1.*



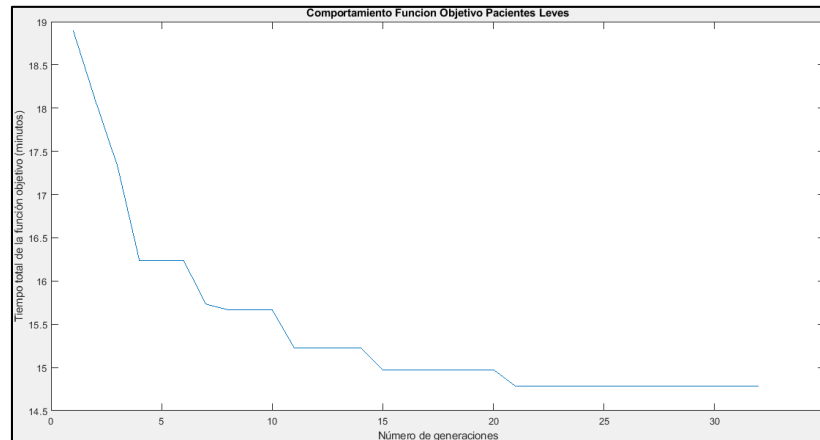
**Figura 21**

*Comportamiento Función Objetivo PM Caso 1*



**Figura 22**

*Comportamiento Función Objetivo PL Caso 1.*



## 7.2 Segundo escenario

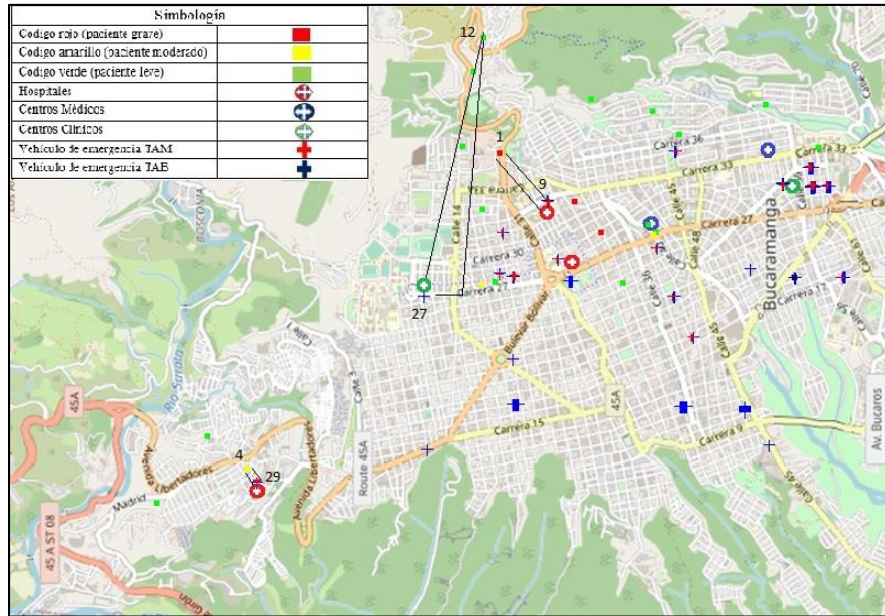
Para el segundo escenario, se realiza la prueba con los mismos parámetros mencionados anteriormente, variando la población afectada, en este caso 21 heridos igualmente distribuidos en las 5 áreas de desastre y una red hospitalaria de 7 centros de atención, superando de esta manera la red hospitalaria. En este sentido se distribuyen los 21 heridos de la siguiente forma: Graves 3, Moderados 3, Leves 15.

**Tabla 11***Asignación Caso 2*

Asignación de pacientes graves (PG):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
1	2	9	0.725
2	2	8	0.2
3	3	11	0.51667
Asignación de pacientes moderados (PM):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
4	1	29	0.175
5	4	3	0.2
6	4	45	0.89167
Asignación de pacientes leves (PL):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
7	1	37	4.3583
8	1	39	2.5417
9	5	46	1.7917
10	6	43	1.5083
11	6	31	2.2083
12	6	27	3.6667
13	7	59	2.3417
14	7	52	1.0167
15	3	60	1.3833
16	4	48	0.99167
17	5	44	1.4417
18	4	89	1.525
19	7	50	1.0083
20	7	23	0.94167
21	5	19	0.20833

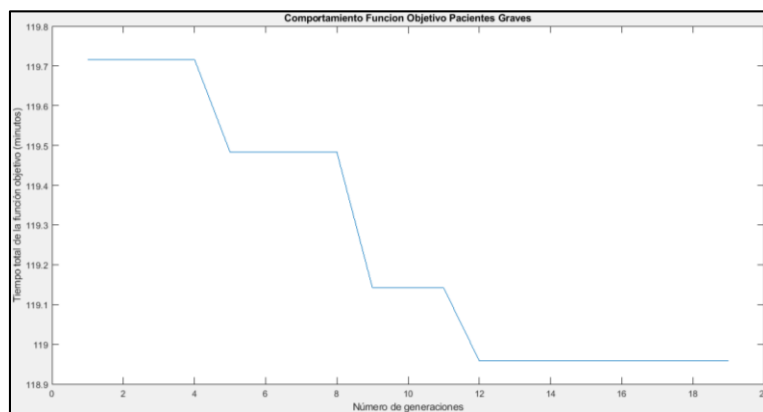
**Figura 23**

*Escenario Caso 2*



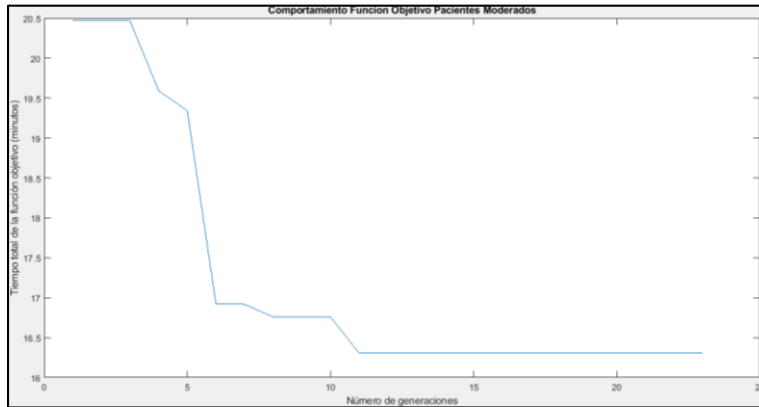
**Figura 24**

*Comportamiento Función Objetivo PG Caso 2*



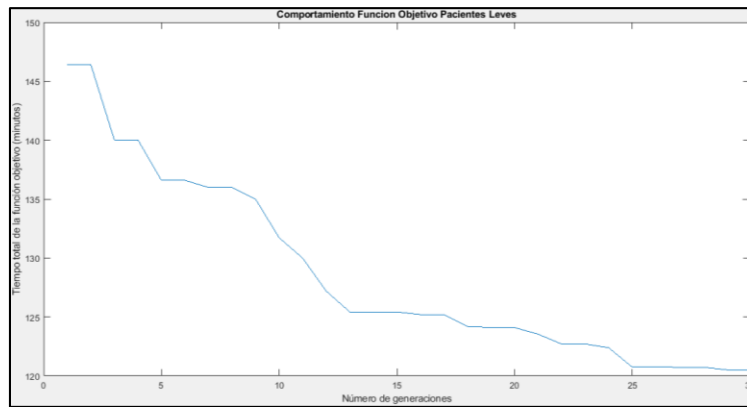
**Figura 25**

*Comportamiento Función Objetivo PM Caso 2*



**Figura 26**

*Comportamiento Función Objetivo PL Caso 2*



### 7.3 Tercer escenario

Para el último caso, se generan un total de 191 heridos, de tal manera que se supera la red hospitalaria, y la flota de vehículos de emergencia, permitiendo observar el comportamiento de la estrategia de reasignación una vez exista un cambio en las condiciones clínicas de los heridos. En particular se considera 22 Graves, 66 Moderados, 103 Leves.

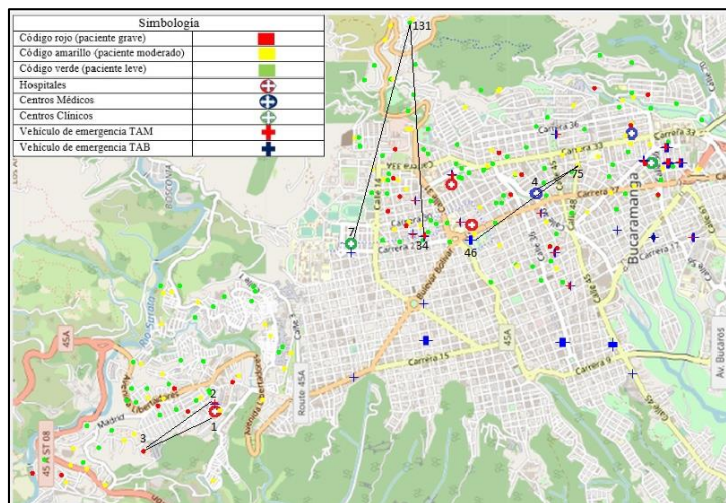
**Tabla 12**

*Resumen Asignación y Reasignación Caso 3*

Asignación de pacientes graves (PG):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
3	1	2	1.1
Asignación de pacientes moderados (PM):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
75	4	46	9.0417
Asignación de pacientes leves (PG):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
131	7	34	15.867
Reasignación de Pacientes graves (PG):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
75	2	14	0.475
Reasignación de pacientes moderados (PM):			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
131	3	4	1.675

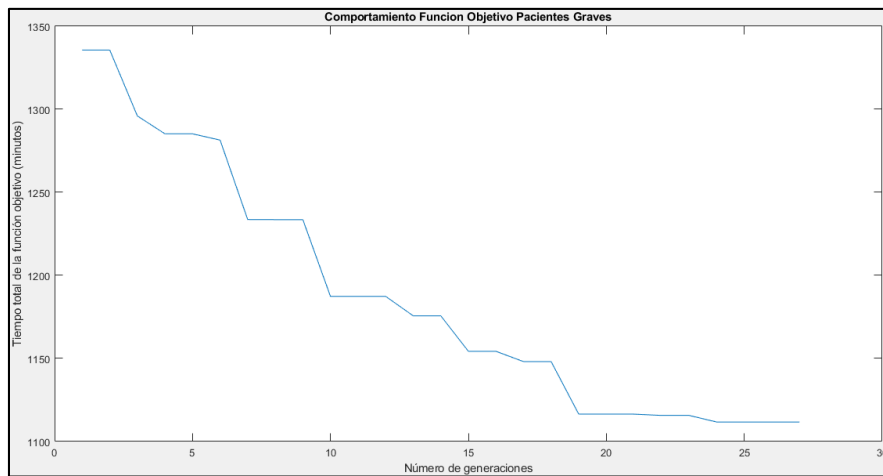
**Figura 27**

*Escenario Caso 3*



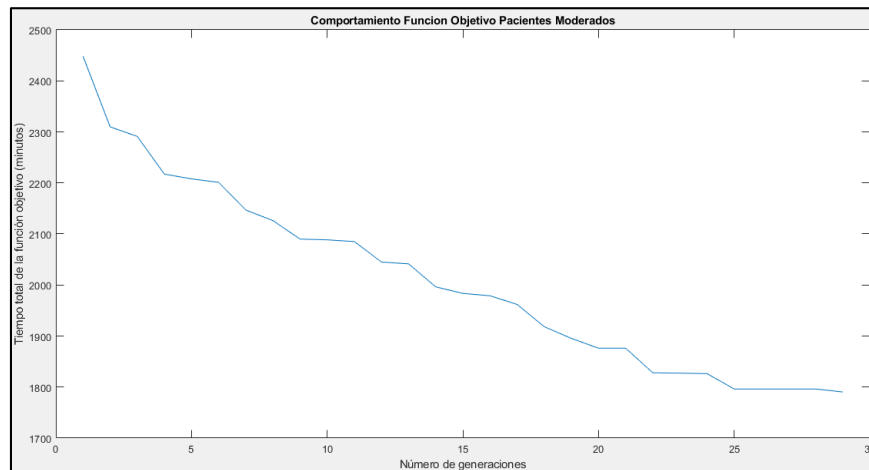
**Figura 28**

*Comportamiento Función Objetivo PG. Caso 3*



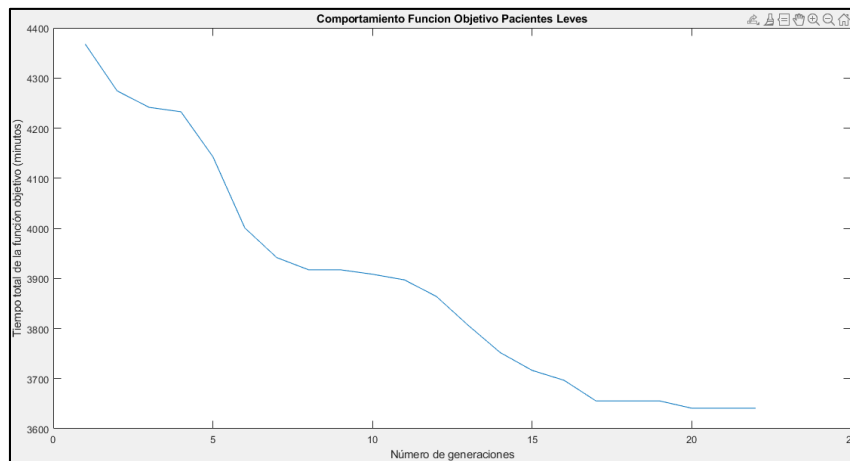
**Figura 29**

*Comportamiento Función Objetivo PM Caso 3*



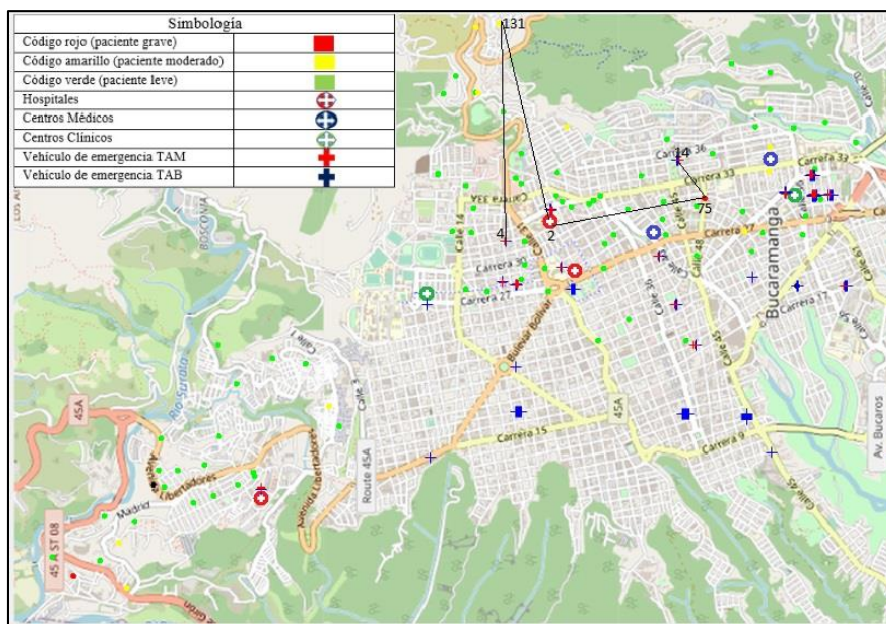
**Figura 30**

*Comportamiento Función Objetivo PL Caso 3*



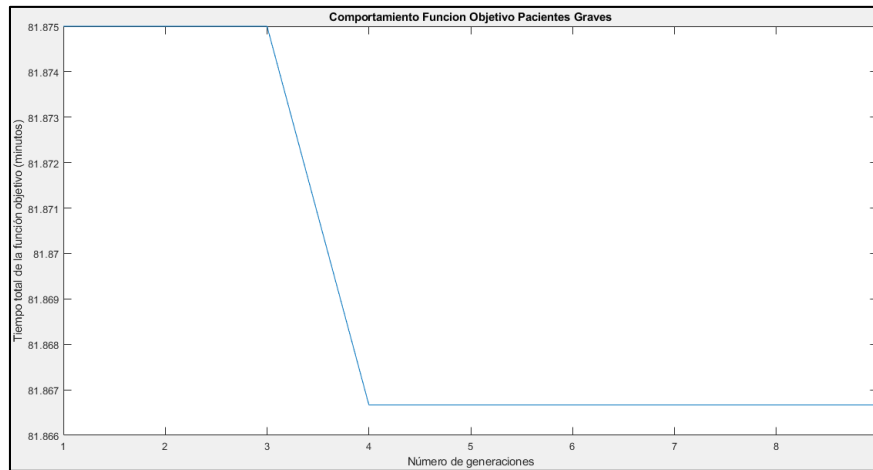
**Figura 31**

*Escenario Caso 3 Reasignación*



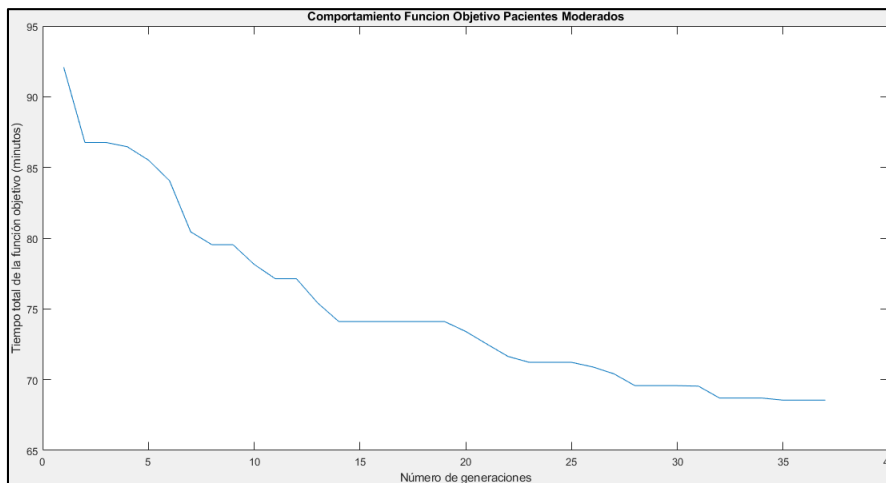
**Figura 32**

*Comportamiento Función Objetivo PG Caso 3 Reasignación*



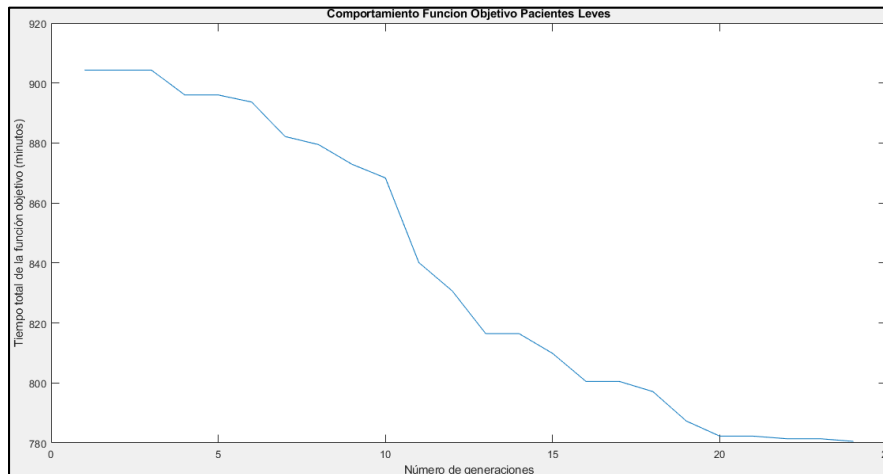
**Figura 33**

*Comportamiento Función Objetivo PM Caso 3. Reasignación*



**Figura 34**

*Comportamiento Función Objetivo PL Caso 3. Reasignación*



#### 7.4 Resultados de Validación.

El algoritmo propuesto en esta investigación para la solución del problema asignación y reasignación de vehículos de emergencia, es verificado mediante 3 escenarios planteados anteriormente. Esta programación fue desarrollada en Matlab 2020b, en un equipo con procesador Intel ® Core i5 cuarta generación con 4 GB memoria RAM.

- **Escenario 1.**

En la Figura 19 se evidencia la simulación del primer escenario, con las respectivas ubicaciones tanto de la flota de VE, como los servicios de salud y la distribución de los heridos en las zonas de desastre, identificados mediante la clasificación de colores que indican a qué tipo de gravedad pertenecen. Los resultados obtenidos para este escenario con la mejor solución arrojada por el algoritmo genético se muestran en la Tabla 10, representando este el plan de asignación, dentro de ella contiene información del número de paciente, clínica, ambulancia y tiempo que demora la ambulancia en recoger al herido.

La corrida arroja para este caso 7 heridos, de los cuales se hizo la representación del paciente número 1 ver Figura 19, siendo este un paciente grave, el cual es trasladado por la ambulancia (TAM) 21, tomando un tiempo para recogerlo de 0.61667 min, hallado por medio de la distancia de Manhattan y llevado al hospital 2, lo que permite observar que el algoritmo está realizando una asignación factible, puesto que el paciente 1 a pesar de estar cerca de dos servicios de salud, esté lo asignó a un hospital que puede atender este tipo de gravedad y a su vez dentro de la flota de VE disponible lo asignó a una ambulancia tipo TAM, quien cuenta con el equipamiento requerido para su atención y así ocurre con el resto de pacientes.

En las Figura 20, Figura 21 y Figura 22, se evalúa el comportamiento de la Función Objetivo para los 3 tipos de pacientes que existe, tomando el tiempo total de la función objetivo frente al número de generaciones, donde se observa en las 3 figuras una convergencia hacia un tiempo mínimo pero factible en términos de asignación explicados anteriormente, como por ejemplo, en la Figura 21, el algoritmo inicia su proceso de asignación de pacientes moderados con un tiempo total de 17.55 min, y termina con un tiempo mínimo de 15.85 min, en la generación 19, permitiendo así ver que, uno se logró una minimización en los tiempos de atención y dos la asignación que realizo es factible para este caso.

- **Escenario 2**

Ahora se prueba el segundo escenario variando la cantidad de heridos con un total para este caso de 21 como se mencionó en la descripción de este escenario, ilustrado en la

Figura 23, en la cual se aprecia nuevamente la distribución de todas las partes que conforman esta experimentación numérica. Observando los resultados obtenidos del plan de asignación de vehículos, presentados en la Tabla 11, se puede notar que a pesar de superar la red hospitalaria, la solución generada es coherente para cada paciente contenido en este escenario, es decir que asigna a todos los pacientes a un hospital y ambulancia que puedan asistir a cada tipo de paciente.

Un ejemplo de la solución arrojada por el algoritmo consiste en abordar a los pacientes números: 1 (código rojo), 4 (código amarillo) y 12 (código verde), estos pacientes son llevados por los vehículos numero 9 (TAM), 29 (TAB) y 27 (TAM), y trasladados a los servicios de salud: numero 2 (Hospital), 1 (Hospital) y 6 (centro clínico) respectivamente. En la Figura 23 se encuentran representados con una línea negra la asignación de cada uno de los pacientes mencionados, a partir de esto, se evidencia que el programa asigna por orden de prioridad, es decir, una vez son asignados los pacientes graves, la disponibilidad en flota de VE, y servicios de salud son asignados a los pacientes moderados y por ultimo a los pacientes leves, priorizando de esta manera la gravedad de la lesión, como es el caso del paciente leve mencionado, el cual es transportado por un vehículo medicalizado en lugar de una ambulancia básica. Por otro lado, se puede concluir que el comportamiento de la función objetivo para los tres tipos de paciente muestra la convergencia de los resultados, llegando a un punto en el que la dispersión de los resultados es mínima. Por tanto, las Figura 24, Figura 25 y Figura 26 muestran una tendencia constante al final.

- **Tercer escenario**

Con el fin de probar la estrategia de reasignación propuesta, para el último escenario se excede tanto la flota de VE, como los servicios de salud con un total de 191 heridos,

ilustrados en la Figura 27, donde se aprecia su distribución. En este caso, los pacientes pueden volverse críticos justo después de 8 min de su primera clasificación, por lo tanto su prioridad puede crecer. Con más detalle en el (ver apéndice A), se encuentra el plan de asignación y reasignación de vehículos óptimo resultante mostrando así la mejor solución. Los resultados reportados en la Tabla 12 muestran que el paciente Grave número 3 es asignado al Hospital 1, y la Ambulancia (TAM) 2, sin duda alguna el algoritmo mantiene nuevamente una solución factible en la asignación de cada tipo de paciente porque cumple el criterio para la asignación, descrito en la sección de formulación matemática.

Ahora bien, se considera que el paciente 75 empeora su estado al pasar de un código de severidad moderado a grave ver Tabla 12, este paciente estaba programado para ser trasladado por la ambulancia (TAB) 46 a la Clínica 4, con un tiempo de espera de 9.0417 min, aplicando la política de reasignación ver Figura 31, se encontró que la mejor solución era reubicarlo a la ambulancia (TAM) 14 retrasando sus tareas y priorizando la nueva tarea, transportándolo al Hospital 2, reduciendo su tiempo de espera a 0.475 min. Algo semejante ocurre con el paciente 131, el cual, cambio su estado de gravedad al pasar de ser un paciente leve a moderado en el plan de asignación, donde su tiempo de espera en la atención es de 15.867 min, y finalmente después de la nueva reasignación su tiempo es de 1.675 min.

De acuerdo a los resultados arrojados por la experimentación numérica realizada, en las Figura 28, Figura 29, Figura 30 y la Figura 32 ,Figura 33 y Figura 34 se presenta el comportamiento de la función objetivo de los pacientes graves, moderados y leves, para el plan de asignación y reasignación. En estas figuras se puede observar que al aumentar el número de pacientes, éste sigue convergiendo hacia un tiempo mínimo, cumpliendo con el criterio de parada, es decir la comparación del valor del mejor fitness encontrado en esa

generación multiplicado por un factor de 0.01 con el valor absoluto del mejor fitness menos el promedio de todos los fitness de esa generación. Después de analizar los tres escenarios propuestos como prueba para el presente estudio con las características planteadas, se encontró coherencias en las soluciones, por este motivo se da por validado el algoritmo mediante la experimentación numérica y se procede a continuar con el caso de estudio real.

## 8 Resultados y Análisis

Para efectos de esta investigación se considera un caso de estudio en la ciudad de Bucaramanga, descrito detalladamente en la sección 6. Para el cual, se asume la ocurrencia de un desastre natural, en tal caso, un evento sísmico de intensidad 6 de acuerdo a la escala de Mercalli, en el que se presenta un escenario con varios momentos, específicamente 8 para este caso de estudio práctico, en el primero se realiza la asignación inicial y a partir del segundo momento se pone en acción la estrategia de reasignación de VE hasta recoger el último paciente, dado que al transcurrir un tiempo el estado de salud de los pacientes pueden cambiar. Las condiciones se mantienen iguales durante los periodos de tiempo, en cuanto a la flota de vehículos de emergencia, servicios de salud (hospitales, centros clínicos y centros médicos) y áreas de desastre determinadas anteriormente teniendo en cuenta a las zonas más vulnerables de Bucaramanga, que serían las de mayor afectación, por ende, se presentaría un mayor número de heridos simulados. La cantidad de personas lesionadas se maneja como dato de entrada para el algoritmo. A estas instancias se les aplica el algoritmo genético expuesto en la sección 5, que permite generar el plan de asignación y reasignación de vehículos de emergencia.

Los resultados generados por el algoritmo genético se dan por la exploración del escenario propuesto, el cual encuentra una solución factible mediante un cromosoma representado, en este caso por el plan de asignación y reasignación de vehículos de emergencia. Al finalizar los periodos de tiempo generados en el escenario, el algoritmo muestra los resultados de la configuración de la mejor solución, al utilizar como criterio de parada, que la diferencia absoluta entre los mejores individuos no sea superior al valor de

tolerancia, es decir, el algoritmo se detiene una vez convergen todas las soluciones hacia un punto.

### **8.1 Resultados de escenarios**

A continuación se presenta los resultados del escenario propuesto para el caso real Figura 35, cuyo objetivo es asignar vehículos de emergencia para auxiliar a todos los pacientes lesionados de la manera eficiente. El algoritmo es ejecutado mediante los datos de entrada mencionados anteriormente, donde se obtienen soluciones para el problema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia. Para este caso se consideran 829 víctimas, distribuidas en las cinco zonas de desastre mencionadas en la sección 6, a su vez los heridos fueron clasificados por el algoritmo de la siguiente manera; 68 pacientes código rojo (graves), 271 pacientes código amarillo (moderados) y 488 pacientes código verde (leves), además de contar con red de emergencia compuesta por, 3 Hospitales, 2 Centros Clínicos y 2 Centros Médicos, también se cuenta con una flota de 98 vehículos de emergencia divididos en 28 tipo TAM y 70 tipo TAB, allí se encuentra una lista con indicaciones de la categoría a la que pertenece y su localización. Se han considerado tres umbrales de tiempo 8, 16, 32 minutos, y se asume que los vehículos se transportan a una velocidad de 40 Km/h. Al finalizar la ejecución del programa se obtienen los resultados presentados por medio de una tabla que corresponde al plan de asignación de VE una vez realizado el primer triage, (ver apéndice C).

- **Momento 1: Primer Triage.**

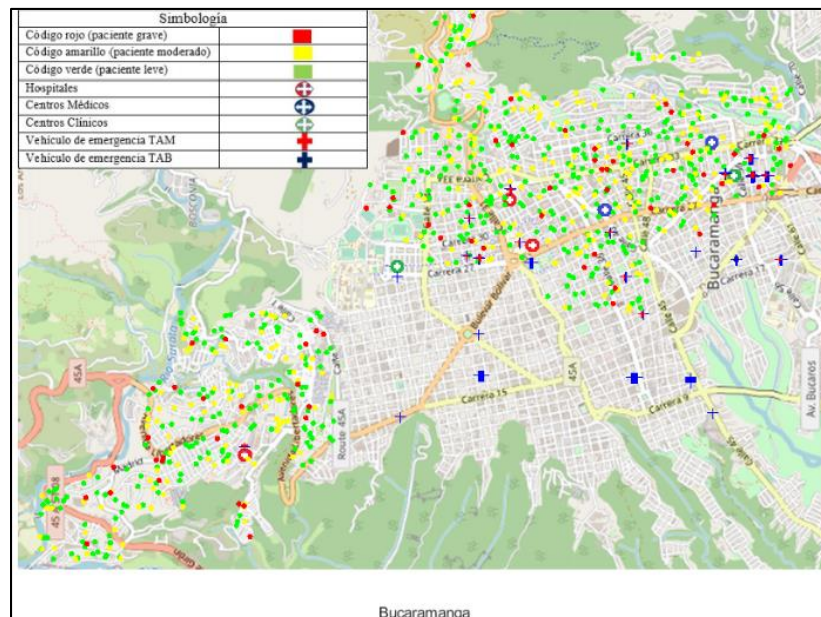
El primer periodo de tiempo, corresponde al primer triage. Después de ejecutar la simulación, en la Figura 36 se aprecia la ubicación de los vehículos de emergencia, y los

hospitales que se encuentran disponibles para atender a las víctimas, las cuales se generan de forma aleatoria por medio del software de Matlab y a su vez se en la parte superior izquierda de la figura, se indica la representación simbólica utilizada para la interpretación de la simulación. Los resultados obtenidos del plan de asignación se observan (ver apéndice B), donde se evidencia para cada paciente según su código de gravedad: el vehículo específico que lo traslada, el hospital que lo asiste y el tiempo de espera. Con el fin de evitar una sobrecarga hospitalaria que daría lugar a un retraso de los servicios de asistencia a los pacientes, se considera una penalización por congestión.

Para propósitos de esta investigación y con el fin de simplificar su análisis en la Tabla 13 se muestra en detalle el plan de asignación de algunos pacientes, en este caso los pacientes 1, 210, 357 y en la Figura 36 se observa la representación gráfica de estos pacientes mediante líneas que indican su respectiva asignación.

### Figura 35

#### *Momento 1 Caso real*



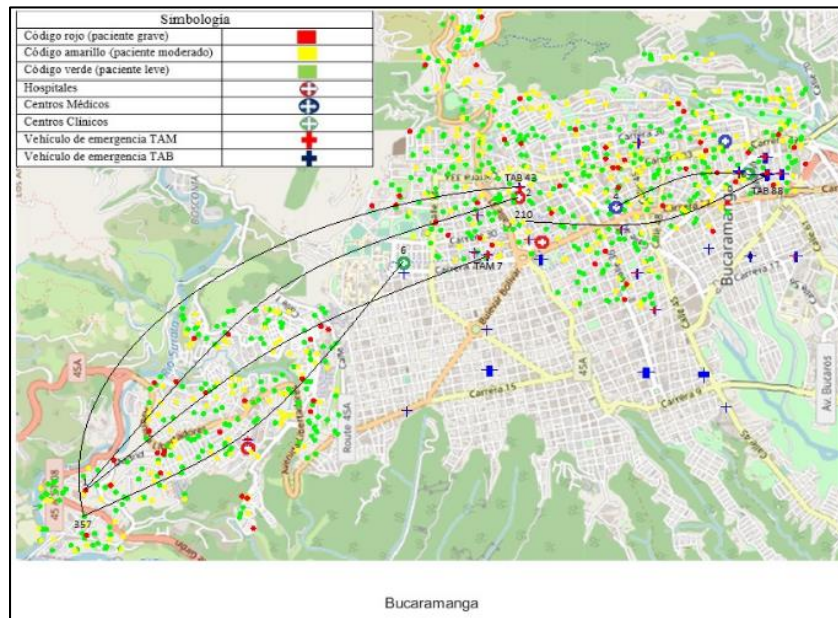
**Tabla 13**

*Resumen Asignación Caso Real, momento 1*

Asignación de pacientes graves:			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
1	2	7	3.6588
Asignación de pacientes moderados:			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
210	4	8	31.941
Asignación de pacientes leves:			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
357	2	43	36.771

**Figura 36**

*Momento 1 Resumen Caso Real*



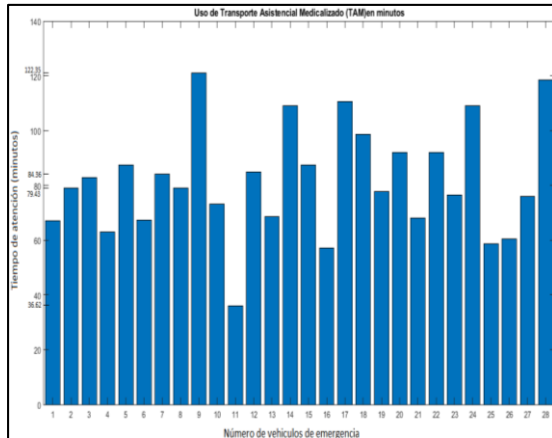
Las gráficas que a continuación se presentan hacen referencia al uso de la flota de los vehículos de emergencia. En la Figura 37 se observa la solución factible dada por el algoritmo

genético para las ambulancias especializadas (TAM), a simple vista, se aprecia que todos los vehículos fueron utilizados unos con mayor tiempo de uso que otros, debido a factores como; distancias entre vehículo - paciente y paciente - hospital, teniendo en cuenta la distancia de Manhattan y tiempo de carga y descarga del paciente. Tal es el caso del vehículo 9 que representa el pico más alto de la gráfica con un tiempo de 122.35 minutos y el vehículo 11 el pico más bajo con un tiempo de 36.62 minutos. Los vehículos asignados a los pacientes 1 y 210 expuestos en la Tabla 13 son el 7 y 8 respectivamente con un tiempo de atención de 84.36 Y 79.43 minutos. Es de resaltar, que las ambulancias tipo TAM pueden transportar pacientes de cualquier tipo de gravedad, una vez que descargue los pacientes código rojo, estos quedan disponibles para el traslado de los pacientes código amarillo y posteriormente código verde, un ejemplo de ello es que el vehículo 11 transporto un paciente grave y tres pacientes leves, (ver apéndice C).

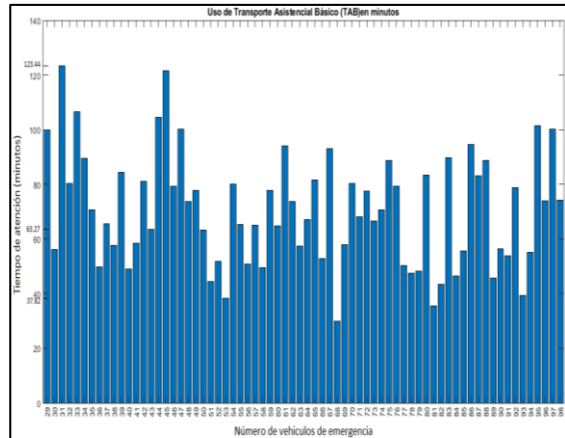
De igual manera en la Figura 38 se observa el comportamiento del uso de los vehículos tipo TAB, donde al paciente 357 se le asignó el vehículo 43 con un tiempo de atención de 63.27 minutos y las ambulancias 31 y 68 son las más representativas, ya que tomaron 123.44 y 37.82 minutos para realizar sus viajes, esto puede explicarse principalmente por la ubicación geográfica en la que se encuentra el vehículo en ese momento, la víctima y el servicio de salud al que será trasladado para su atención. En general se realiza una buena gestión de los VE para la atención de las víctimas, es decir que se utilizaron todos los vehículos de este tipo para el traslado de los pacientes con código amarillo y verde.

**Figura 37**

Uso de (TAM) Caso Real

**Figura 38**

Uso de (TAB) Caso Real.



El tiempo de espera para la atención, ha sido definido en este caso, como el tiempo en el que la víctima permanece en el área de desastre hasta ser recogida por el vehículo asignado para su posterior traslado al servicio de salud. Los resultados reportados (ver apéndice C), muestran el tiempo de espera de los pacientes con código de severidad rojo (grave), amarillo (moderado) y verde (leve). De los pacientes graves se obtiene que el paciente 59 es el último en la lista del vehículo 20 con un tiempo de 39.2 minutos y el paciente 65 es el primero de la lista del vehículo 19 con un tiempo de 0.2294 minutos, ahora bien, el mayor tiempo de espera en ser atendidos los pacientes moderados es de 69.588 minutos, el cual corresponde al paciente 287, y el menor tiempo está dado por el paciente 184 con un tiempo de 0.68235 minutos. Los mayores tiempos de espera del primer momento, corresponden a los pacientes código verde, los cuales, pueden esperar en cuanto a la atención médica porque las lesiones que presentan no comprometen la pérdida de la vida, donde el paciente número 754 espera al vehículo 31 un tiempo de 118.14 minutos para ser trasladado

y el paciente 492 permanece menos tiempo en el área de desastre tomando un tiempo de 3.5 minutos en ser recogido por el vehículo.

- **Momento 2: Segundo Triage**

A partir del segundo momento, se ha probado la estrategia de reasignación de vehículos de emergencia, para ello, se tiene en cuenta que las condiciones de salud del paciente pueden evolucionar y cambiar durante el proceso de rescate. En estos casos, los pacientes pueden volverse críticos y, por lo tanto, su prioridad puede crecer, cabe resaltar, que la reasignación no solo se da porque haya un cambio de estado, sino que, una vez transcurre el tiempo en el que se realiza cada triage los pacientes que no son atendidos dentro este tiempo, también deben ser reasignados.

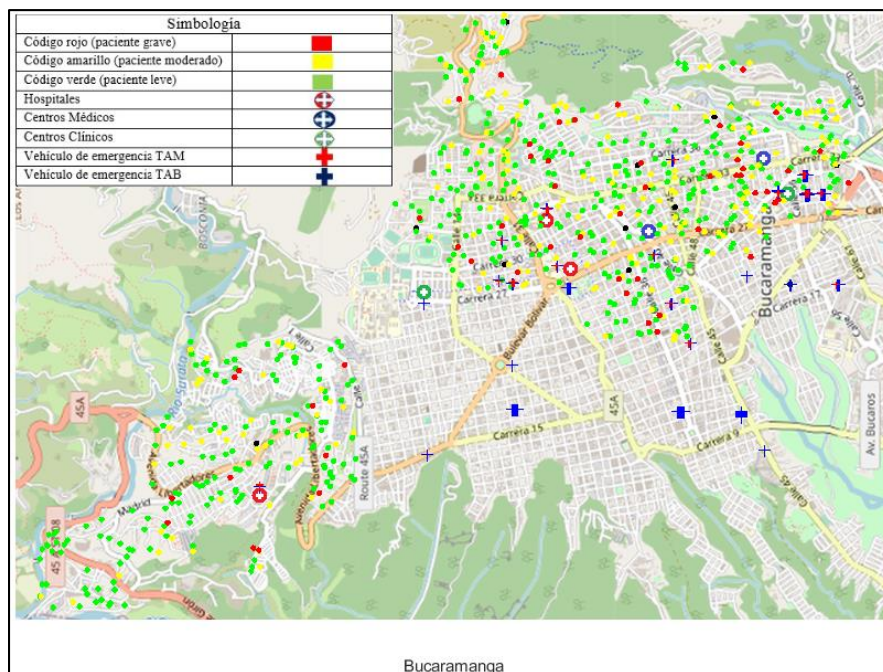
Gracias a la asistencia del personal médico, en el segundo momento tras pasar 8 minutos después de la primera clasificación, se realiza una segunda evaluación de las condiciones de salud del paciente, donde 42 pacientes cambiaron su estado, al pasar 22 pacientes de moderados a graves y 20 pacientes de leves a moderados. El plan de reasignación de vehículos resultante completo se informa (ver apéndice C) y en la Tabla 14 se muestra en detalle el plan de reasignación de los pacientes tomados inicialmente para la ejemplificación, en esta se observa que el paciente no. 210 empeoro su estado al pasar de un código de gravedad amarillo a uno rojo, ya que el paciente espero 31.941 minutos en la asignación inicial, para ser trasladado por el vehículo 8 al hospital 4, y después de la reasignación el paciente no. 210 es llevado por el vehículo TAM 19 al hospital 1, con un tiempo de espera de 15.159 minutos, reduciendo el tiempo de espera en 16.782 minutos. Por otro lado, el paciente no. 357 pasó de ser un código de gravedad verde a un código amarillo, siendo reasignado al vehículo TAM 6 y al hospital 4 con un tiempo de espera de 33.659

minutos. Por último, el paciente no. 822 permanece en código verde, aunque no cambia su estado de severidad para este momento, ha sido reasignado al vehículo TAB 62 y a la Clínica 4 mejorando su tiempo a 49.565 minutos, ya que en el primer momento su tiempo fue de 87.553 minutos.

A Continuación, se presenta la Figura 39 que muestra el contexto completo del segundo momento, es decir, la distribución de los pacientes, la ubicación de los VE y los servicios de salud. Además en la Figura 40 se observa la representación gráfica del plan de reasignación de los pacientes no. 210, 357 y 822 mediante líneas de colores, vino tinto, naranja y morado.

**Figura 39**

Momento 2 Caso Real



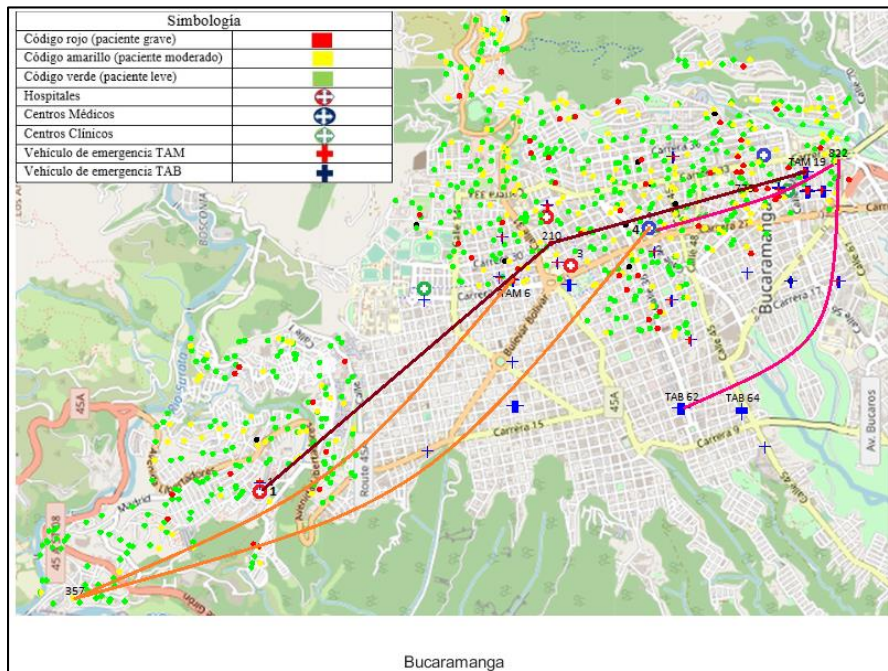
**Tabla 14**

*Resumen Reasignación Caso Real, momento2*

Reasignación de pacientes graves:			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
210	1	19	15.159
Reasignación de pacientes moderados:			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
357	4	6	33.659
Reasignación de pacientes leves:			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
822	4	62	49.565

**Figura 40**

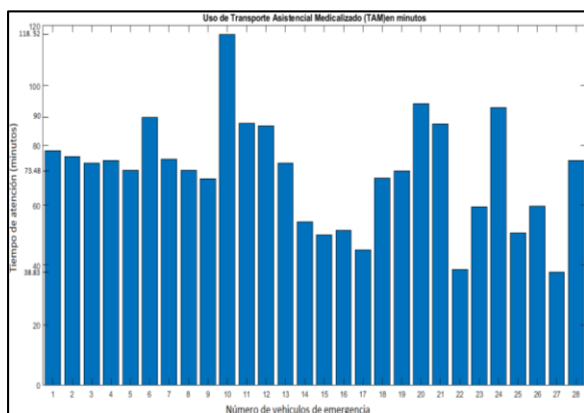
Momento 2 Caso Real



La Figura 41 y la Figura 42 que se presentan a continuación hacen referencia al uso de la flota de los vehículos de emergencia tipo TAM y tipo TAB, estas muestran la solución factible dada por el algoritmo para cada una de los vehículos, donde se aprecia que el tiempo de atención del vehículo 10 es de 118.52 minutos, siendo este el mayor tiempo de atención de los vehículos tipo TAM y el vehículo 27 obtiene el menor tiempo de atención con 38.83 minutos. Para los vehículos tipo TAB, el vehículo 95 es el más representativo de la gráfica, ya que su tiempo es de 99.30 minutos y el menos significativo es el vehículo 31 con 18.42 minutos. Ahora bien el tiempo de atención para los vehículos 6, 19 y 62 tomados como ejemplo en este caso, son de 90, 73.4 y 55.60 minutos respectivamente para realizar sus viajes. Cabe resaltar que, si los vehículos toman más tiempo que otros para llevar a cabo sus viajes, no es porque esté ligado a la cantidad de viajes que realiza, sino que depende más de factores como la distancia entre los nodos. Finalmente, se puede observar que en este segundo momento se hizo uso de todos los recursos para llevar a cabo la lista del plan de reasignación, (ver apéndice C), arrojada por el algoritmo.

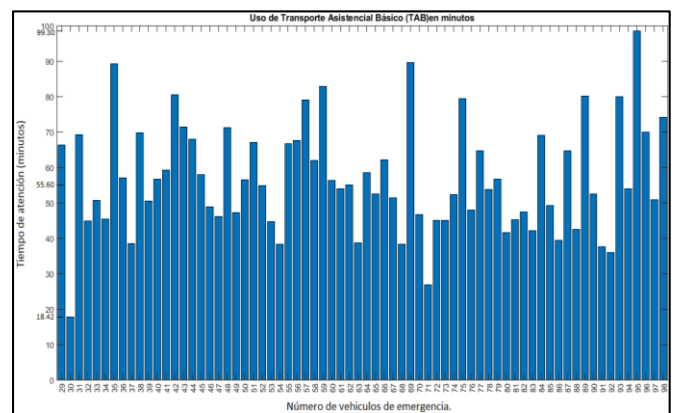
**Figura 41**

Uso de (TAM) Caso Real



**Figura 42**

Uso de (TAB) Caso Real



Como se puede observar (ver apéndice C) para el segundo momento, el tiempo de espera de atención más bajo de los pacientes graves es de 0.1759 minutos el cual pertenece al paciente no 64 y el más alto es de 26.559 minutos que corresponden a los paciente 317, quien en el momento anterior era un paciente moderado, es de mencionar, que este paciente al cambiar de estado no ingresa en la lista de reasignación del siguiente momento como una máxima prioridad, sino que, el algoritmo por probabilidad lo reasigna de una forma factible. Por otra parte para los pacientes moderados y leves los tiempos de espera más representativos son de 0.26471 minutos - 45.135 minutos y 2.7824 minutos - 111.12 minutos respectivamente. Evidenciado de esta forma que los tiempos de espera para la atención de los pacientes graves son menores respecto a los demás, debido a que requieren acceso inmediato al tratamiento, ya que son pacientes muy críticos.

- **Momento 3:**

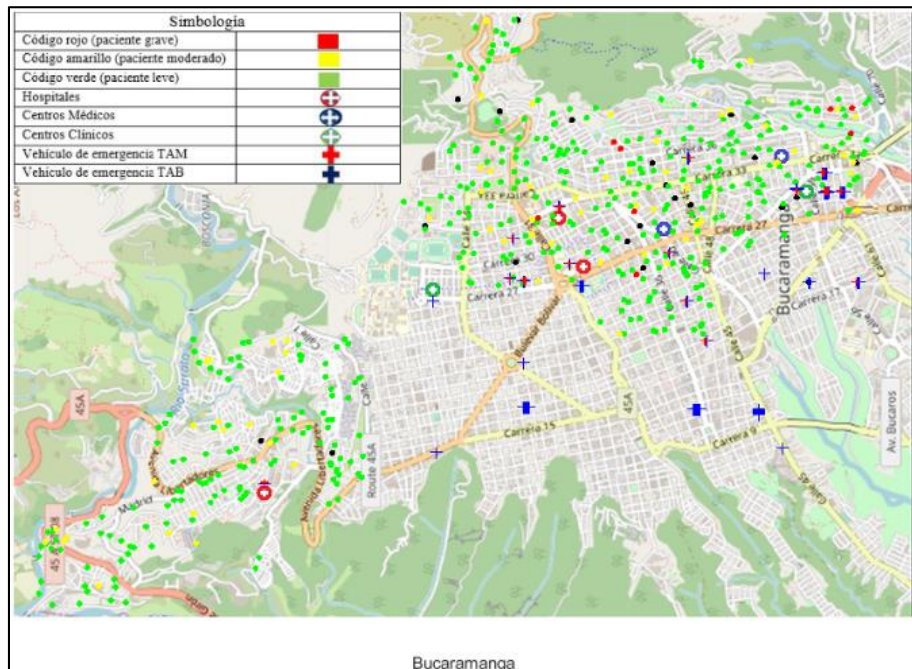
Al transcurrir 16 minutos después de la primera valoración se realiza nuevamente un triage, en el que se asume una alteración en el estado de salud de los lesionados, por lo que 55 pacientes empeoraron, 22 de ellos de moderados a graves y 33 de leves a moderados. En la Figura 43 se muestra la simulación del tercer escenario, evidenciando que el 28.347 % de los pacientes han sido atendidos, esto se ve reflejado en la reducción notable de los puntos (pacientes) presentes en la simulación. Para este momento el paciente 210 considerado aun como paciente grave es reasignado al vehículo TAM 24 y al hospital 1 con un tiempo de espera en la atención de 1.6647 minutos y el paciente 357 continua como paciente moderado siendo reasignado al vehículo TAB 54 y centro médico 5 con un tiempo para recibir atención de 5.5647 minutos. Estos pacientes tomados como ejemplo inicialmente son atendidos durante el momento 3, es decir que serán descargados por el algoritmo y no se tendrán en

cuenta para los momentos restantes, hasta que sean atendidos todos los pacientes. Además el paciente no. 822 empeora al pasar de un código de severidad verde a amarillo, el cual es reasignado a la ambulancia TAB 44 y al centro médico 5 con un tiempo de 23.476 minutos, este paciente continua en la programación en el próximo momento, ya que el tiempo sigue siendo mayor.

El plan de reasignación de vehículos completo se informa (ver apéndice C) y el de la ejemplificación en la Tabla 15, adicionalmente en la Figura 44 se muestra de manera gráfica por medio de líneas de color vino tinto, naranja y morado la reasignación correspondiente del vehículo que asiste y servicio de salud que atiende a cada paciente.

**Figura 43**

Momento 3 Caso Real



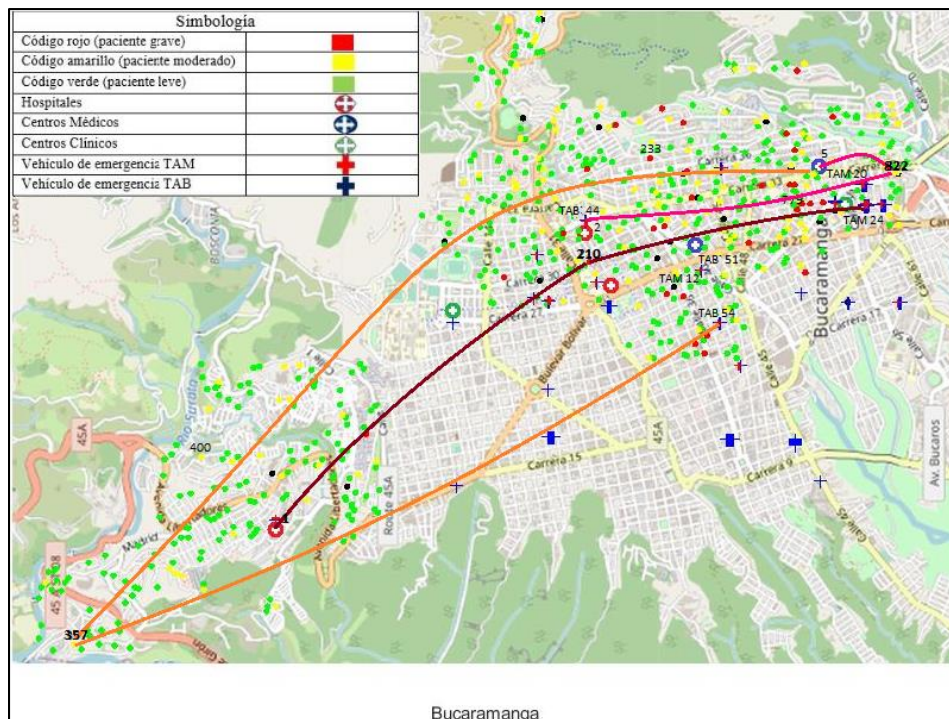
**Tabla 15**

*Resumen Reasignación Caso Real, momento 3.*

Reasignación de pacientes graves:			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
210	1	24	1.6647
Reasignación de pacientes moderados:			
Paciente	Clínica	Ambulancia	Tiempo (min)
357	5	54	5.5647
822	5	44	23.476

**Figura 44**

Momento 3 Resumen Caso Real

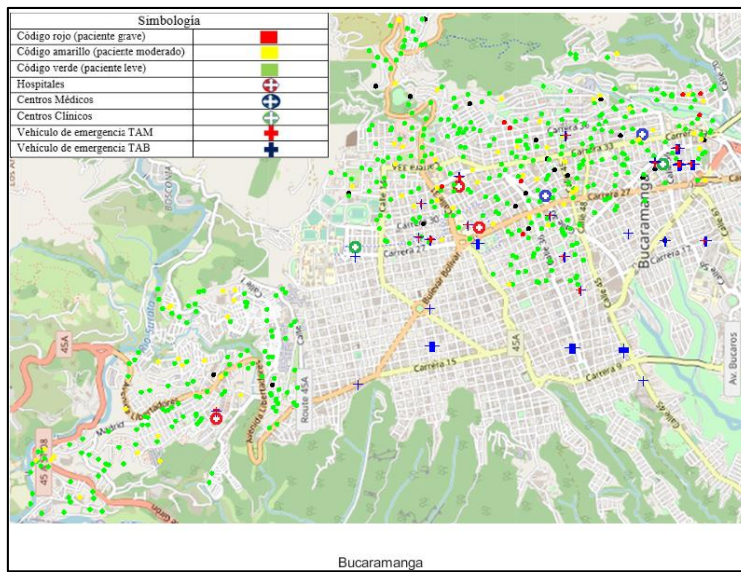


Se puede notar que para cada momento el algoritmo arroja unas gráficas similares, una representado la simulación de cada contexto, es decir, allí se evidencia por medio de una simbología la distribución de las víctimas en las diferentes áreas de desastre y la ubicación tanto de vehículos como de servicios de salud, las otras muestran el comportamiento del uso del transporte asistencial básico y medicalizado, con el fin de analizar el tiempo de viaje de cada vehículo y así saber a quién le tomo más o menos tiempo realizar la tarea. De la Figura 45 a la Figura 49 se presenta una actualización a medida que transcurre el tiempo hasta que todos los pacientes son atendidos, es decir, son descargados por el algoritmo. Finalmente se aprecia que en el momento 8 se atienden 22 pacientes leves, siendo estos los últimos de la solución arrojada por el algoritmo y adicionalmente 21 heridos fallecidos durante toda la ejecución del programa, los cuales están representados por puntos negros. Para mostrar los resultados obtenidos por el programa de los momentos restantes, se compacta la información (ver apéndice C y D), dado que su análisis es semejante a las explicaciones anteriores. A continuación se presentan las gráficas de la escenificación de los momentos restantes y así observar la reducción de los pacientes en el tiempo.

- **Momento 4**

**Figura 45**

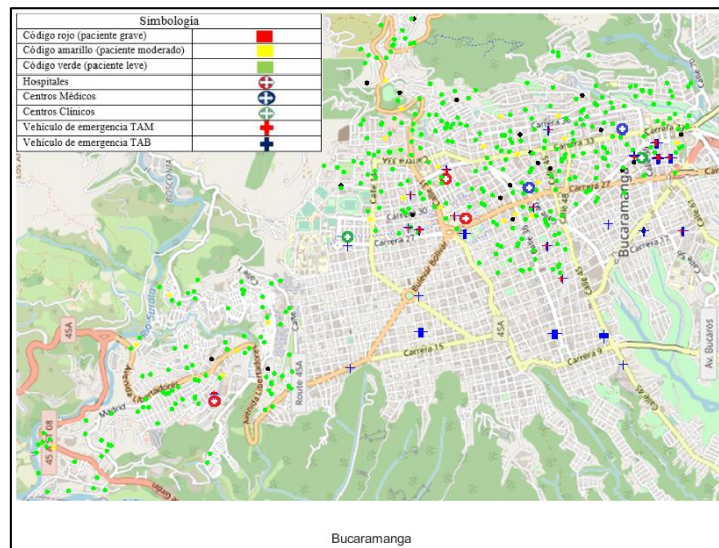
*Momento 4 Caso Real*



- **Momento 5**

**Figura 46**

*Momento 5 Caso Real*

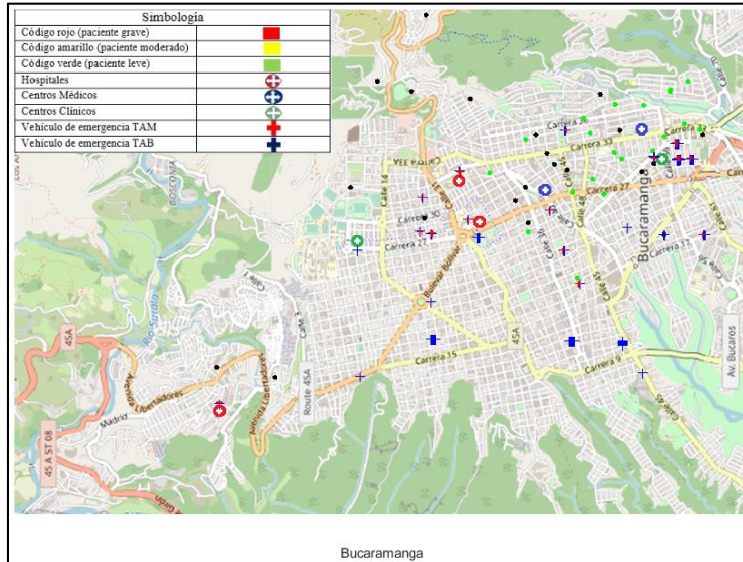




- **Momento 8**

**Figura 49**

*Momento 8 Caso Real*



## 9 Conclusiones

A partir de la revisión de la literatura realizada, se evidencia que el interés académico en la logística humanitaria se ha centrado en modelar sistemas planificados para la respuesta a desastres. Los problemas de asignación son muy recurrentes en este ámbito, dado que en situaciones de emergencia la demanda es un factor que se genera de manera súbita y en cantidades que no se pueden prever, pero son pocos los trabajos de investigación que abordan el tema de asignación y reasignación de vehículos de emergencia, de allí la importancia de esta investigación, por lo cual este proyecto puede ser considerado como una referencia para futuras investigaciones sobre este problema.

Se consideró una versión dinámica del problema de asignación de vehículos de emergencia, teniendo en cuenta una revalorización de las condiciones de salud del paciente, ya que estas pueden evolucionar durante el proceso de rescate.

Desde el punto de vista operativo, el objetivo principal del enfoque desarrollado es garantizar una respuesta rápida de las operaciones de rescate mediante una gestión eficiente de la flota de vehículos. Para este caso, la estrategia propuesta encuentra el mejor plan de asignación y reasignación de vehículos de emergencia, con el fin de salvar la mayoría de vidas. Más en detalle, el modelo utilizado para esta investigación cumplió a cabalidad con el objetivo, teniendo en cuenta las restricciones planteadas, ya que permite saber la ubicación de los pacientes lesionados, el tipo de vehículo de emergencia capacitado para asistirlo y el servicio de salud que tenga las condiciones para atender este paciente, también proporciona la forma en cómo se debe atender estos, es decir, que atiende en primer lugar a los pacientes graves, en segundo lugar a los moderados y por último a los leves.

El algoritmo genético propuesto soluciona el problema de asignación de vehículos de emergencia proporcionando un cromosoma que representa la lista del plan de asignación y reasignación, de manera que los pacientes sean atendidos en el menor tiempo posible; sin embargo, la asignación no siempre se realiza a los hospitales y vehículos más cercanos como se esperaba, debido a que asigna en un orden de prioridad, y a la congestión hospitalaria.

El algoritmo desarrollado para el problema de asignación y reasignación produce resultados factibles en tiempo computacionales cortos.

Con el AG propuesto en esta investigación se evidencia que la asignación de vehículos de emergencia responden a la necesidad de lograr una solución factible de asignación entre la red de nodos y alcanzar una disminución en los tiempos de rescate, lo cual es importante en el desarrollo de una respuesta oportuna ante una emergencia en un desastre natural en este caso un evento sísmico.

En cuanto a la validación del algoritmo, es preciso aclarar que el algoritmo fue contrastado bajo experimentación numérica mediante tres escenarios planteados, ya que en la literatura no se encontraron instancias para validar este problema, donde el primero de ellos no excedía la capacidad hospitalaria y vehicular, el segundo solamente excedía la capacidad hospitalaria y el tercero excedía las dos anteriores. De esto se puede inferir que las soluciones encontradas son aceptables para cada tipo paciente dado que cumple el criterio para la asignación.

## 10 Recomendaciones

Este trabajo proporciona la base para futuros estudios y una de las principales líneas de investigación que resulta directamente interesante de esta investigación se refiere al estudio de la evolución dinámica de la congestión del tráfico y la posibilidad de modificar la asignación inicial de los vehículos de emergencia, basándose en información en tiempo real sobre las condiciones del tráfico.

Adecuar esta investigación a otras ciudades del país, donde el escenario de prueba sea la mayor amenaza natural de cada región en la que se encuentre, de tal manera que se puedan evaluar las condiciones de respuesta actuales de la ciudad y así tomar las medidas necesarias, con el fin de reducir, mitigar, y prevenir esta problemática.

Existen muchas oportunidades para extender este trabajo en algunos aspectos como; abordar a los pacientes por medio de clústeres, considerar la capacidad instalada de los hospitales y discretizar más la clasificación de pacientes, es decir tener en cuenta los tipos de lesión que se presentan y la especialidad médica que requiere, entre otros.

Es importante para el éxito de futuras investigaciones, probar este problema en otros lenguajes de programación como lenguaje Go, Python, Java, entre otros, que sean más amigables con la API de Google, ya que representan resultados más cercanos a la realidad usando datos de georreferencia.

Incentivar el desarrollo de proyectos de grados que aborden investigaciones relacionadas a este problema con sus respectivos variantes, usando otros métodos evolutivos para su solución.

En la actualidad no existen instancias de prueba en la literatura para este tipo de problema, por lo que, gran parte de los autores crean sus propios problemas de verificación, dejando abierta

la posibilidad de crear los parámetros adecuados para la validación y compararlos con los resultados obtenidos aquí como un tema a desarrollar para futuros proyectos de investigación.

### Referencias Bibliográficas

- Aguilar. (2017). *Un modelo multiobjetivo de localización-ruteo para la planeación logística en la fase de preparación a sismos en Bucaramanga*. UIS.
- Aguirre. (2004). Los desastres en Latinoamérica: vulnerabilidad y resistencia. *Revista Mexicana de Sociología*, 66(0188-2503), 485–510.
- Alfonseca. (2000). *La Máquina de Turing*. Revistas didácticas de las matemáticas.
- Alvarez, Arcos, Blanco, Busto, & López. (2006). Asistencia sanitaria en desastres, 1–20.
- Andes, A. (2017). La importante diferencia entre desastres y riesgos. Retrieved from <https://ecapra.org/es/documentos/la-importante-diferencia-entre-desastres-y-riesgos>
- Azimi, Delavar, & Rajabifard. (2018). An optimized multi agent-based modeling of smart rescue operation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3W4), 93–100. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-93-2018>
- Barrera, & Hernandez. (2016). *Un Algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos post-desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga*. UIS.
- Barreto, & Niño. (2016). *Un Algoritmo memético para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga*. UIS.
- Billhardt, Lujak, Sánchez, Fernández, & Ossowski. (2014). Dynamic coordination of ambulances for emergency medical assistance services. *Knowledge-Based Systems*, 70(October 2017),

- 268–280. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2014.07.006>
- Blum, & Roli. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization : Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268–308.
- Cheu, Huang, Y., & Huang, B. (2008). Allocating emergency service vehicles to serve critical transportation infrastructures. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 12(1), 38–49. <https://doi.org/10.1080/15472450701849675>
- Coello. (1995). Algoritmos Genéticos y sus Aplicaciones 1. *Soluciones Avanzadas. Tecnologías de Información y Estrategias de Negocios*, 3(17), 5–11.
- Contreras, & Martínez. (2016). *Un problema de localización multiobjetivo en la fase de preparación para desastres por sismos en la ciudad de Bucaramanga*. UIS.
- Cruz, Moreno, & Peralta. (2014). Aplicación de la teoría de la complejidad en optimización combinatoria. *Narraciones de La Ciencia y La Tecnología INVENTIO*, (2007–1760).
- Dorado, Gestal, Rivero, Rabuñal, & Pazos. (2010). *Introducción a Los Algoritmos Genéticos. Digitalia*.
- Federation, I. (2017). ¿Qué es un desastre? Retrieved from <https://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/sobre-desastres/que-es-un-desastre/>
- Goldberg. (1989). Operations Research Models for the Deployment of Emergency Services Vehicles, 1(1).
- Gómez. (2007). Las metaheurísticas : tendencias actuales y su aplicabilidad en la ergonomía.

*Actualidad y Nuevas Tendencias*, IV(12), 108–120.

GOYES, & SALAZAR. (2016). *LOGÍSTICA HUMANITARIA: SEGURIDAD AGROALIMENTARIA*. UNIVERSIDAD DEL ROSARIO.

Holland. (1975). Adaptación en Sistemas Naturales y Artificiales. *Prensa de La Universidad de Michigan*, 2(2019), 3–4.

Ibri, S., Nourelfath, M., & Drias, H. (2011). A multi-agent approach for integrated emergency vehicle dispatching and covering problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(3), 554–565. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.10.003>

Kovács, & Spens. (2007). Humanitarian logistics in disaster relief operations. *Internacional Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37, 99–114.

Lima. (2014). *Aplicación de algoritmos heurísticos para optimizar el coste de doblaje de películas*.

Ma, X., Song, Y., & Huang, J. (2010). Min-max robust optimization for the wounded transfer problem in large-scale emergencies. *2010 Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2010*, (70671098), 901–904. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2010.5498096>

Maldonado. (2016). Un Problema Fundamental De La Investigación: Los Problemas P vs NP (A Fundamental Problem in Research: P vs NP Problems). *Ssrn*, 4(2), 10–20;15. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2738938>

Maldonado, E., & Chio, G. (2005). IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS SÍSMICAMENTE MÁS VULNERABLES EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA, (2).

Mancini, Pani, Fadda, & Fancello. (2017). An emergency vehicles allocation model for major industrial disasters disasters. *Transportation Research Procedia*, 25, 1164–1179.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.134>

Meléndez. (2015). Conceptos básicos de gestión de riesgos. *Ayuda Humanitaria y Prtección Civil*.

Nacional, G. LEY 1523 DE 2012, 2012 § (2012).

Newton, P. de matemáticas I. (2009). N ú m e r o s. *Revista de Didácticas de Las Matemáticas*, 71, 1–161.

Organización Panamericana de la Salud. (2003). Desarrollo de los Sistemas de Emergencia, 229.

Retrieved from [https://clea.edu.mx/biblioteca/Desarrollo de sistemas de servicios de emergencias medicas.pdf](https://clea.edu.mx/biblioteca/Desarrollo%20de%20sistemas%20de%20servicios%20de%20emergencias%20medicas.pdf)

Peréz. (2018). Diccionario de Acción Humanitaria y Cooperación al Desarrollo. Retrieved from

<http://www.dicc.hegoa.ehu.es/listar/mostrar/119>

Peréz, & Sancho. (2003). Máquinas moleculares basadas en ADN. Retrieved from

<http://goo.gl/TNprv>

Pineda, J. (2017). Impacto de los Fenómenos Naturales. Retrieved from

<https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/impacto-fenomenos-naturales/>

Pulido. (2014). *Resolución de problemas de optimización combinatoria utilizando técnicas de computación evolutiva . Una aplicación a la biomedicina*.

Quintero, & Coello. (2006). *Una introducción a la Computación Evolutiva y alguna de sus*

*aplicaciones en Economía y Finanzas. An Introduction to Evolutionary Computation and some of its Applications in Economics and Finance.*

Repoussis, Paraskevopoulos, Vazacopoulos, & Hupert. (2016). Optimizing emergency preparedness and resource utilization in mass-casualty incidents. *European Journal of Operational Research*, 255(2), 531–544. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.05.047>

Rodríguez, Osorno, & Maya. (2016). Relocalización de vehículos en servicios de emergencias médicas: una revisión. *Ingeniería y Ciencia*, 12(23), 163–202. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.23.9>

Sánchez. (2012). *Optimización combinatoria. Revista de didácticas de las matemáticas.*

Sharif, & Salari. (2015). A GRASP algorithm for a humanitarian relief transportation problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41, 259–269. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.02.013>

Spens, & Kovács. (2009). Identifying challenges in humanitarian logistics. *International Journal of Physical*, 39, 506–528. <https://doi.org/10.1108/09600030910985848>

Thomas, & Mizushima. (n.d.). Logistics training : necessity or luxury ? *Forced Migration Review.*

TY, & HU. (2002). Sistemas de información geográfica distribuidos basados en CORBA para el transporte de servicios médicos de emergencia. *REGISTRO DE INVESTIGACIÓN DE TRANSPORTE*, 1, 27–34.

UNGR - Colombia. (2013). PLAN MUNICIPAL DE GESTION DEL RIESGO DE DESASTRE

, PMGRD DE BUCARAMANGA.

UNGR - Colombia. (2016). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo: una estrategia de desarrollo 2015-2025. Plan Nacional de Gestión del Riesgo: una estrategia de desarrollo 2015-2025.*

Viera, & Moscatelli. (2012). Logística Humanitaria Y Su Aplicación en Uruguay. *Facultad de Ingeniería, 11*, 47–56.

Wordpress.com. (2008). Efectos de los desastres naturales. Retrieved from

[https://pparis.wordpress.com/category/efectos-de-los-desastres-naturales/?fbclid=IwAR05fc\\_SZps\\_Wj71diFDDfAvPW0AF148MPN6ywFZhF18z2Xhvlhz-fBuLY](https://pparis.wordpress.com/category/efectos-de-los-desastres-naturales/?fbclid=IwAR05fc_SZps_Wj71diFDDfAvPW0AF148MPN6ywFZhF18z2Xhvlhz-fBuLY)

Yang, Hamedi, & Haghani. (2004). Integrated Approach for Emergency Medical Service Location and Assignment Problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1882*(1), 184–192. <https://doi.org/10.3141/1882-22>

Yang, W., Guo, T., Liu, T., & Huang, J. (2009). Multi-period allocation of ambulances to casualty cluster in a disaster relief operation with uncertain demand. *IEEM 2009 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1632–1636. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2009.5373120>

Yolis, Britos, Perichisky, & García. (2003). Algoritmos Genéticos Aplicados a la Categorización Automática de Documentos.

Yusoff, Ariffin, & Mohamed. (2015). DPSO based on a min-max approach and clamping strategy for the evacuation vehicle assignment problem. *Neurocomputing, 148*, 30–38.

<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.12.083>