

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que los autores han autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea del CRAI-Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la CRAI-Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**Programación de Equipos de Emergencia y Rescate en Operaciones de Socorro Aplicado
en la Ciudad de Bucaramanga ante un Desastre Sísmico.**

José Gabriel Ardila Martínez, Natalia Andrea Forero Bejarano

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Industrial

Directora

MSc. Karin Julieth Aguilar Imitola

Ingeniera Industrial

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Industrial

2018

Dedicatoria

A Dios por sus bendiciones, por ser mi guía y fortaleza.

*A mi mamá por brindarme su apoyo, su confianza y amor, por ser mi motivación a diario,
porque gracias a ella todo esto fue posible.*

A mi papá por el apoyo durante toda mi carrera.

A mis familiares que creyeron en mí y conté con su apoyo durante este proceso.

A todos mis profesores por mi formación académica e integral.

A mis amigos y compañeros por su amistad desde el inicio.

Natalia Andrea Forero Bejarano

A Dios por permitirme tener y disfrutar de este logro, resultado de su ayuda.

A mi madre por su comprensión, amor y apoyo incondicional.

*A mi padre, por haberme enseñado que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se puede
lograr.*

A mis hermanos por ser uno de los motivos más grandes para lograr esta meta.

A mis familiares por su apoyo y por siempre haber creído en mí.

A mis amigos y compañeros de clase con los que he compartido muy buenos momentos.

A todos aquellos que siguen estando cerca de mí y que le dan a mi vida algo de ellos.

Jose Gabriel Ardila Martínez

Agradecimientos

A Dios por permitir la finalización de nuestros estudios y este proyecto.

A nuestros padres por el constante apoyo durante toda la carrera.

A la Ingeniera Karin Aguilar por su paciencia, dedicación, tiempo y todo el apoyo para la culminación de este proyecto.

A Javier Chacón por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

Contenido

Introducción	14
1 Título del trabajo.....	17
1.1 Definición del Problema	17
1.1.1 Descripción del problema.....	17
1.2 Formulación del problema.....	19
1.3 Justificación	20
1.4 Objetivos.....	21
1.4.1 Objetivo general	21
1.4.2 Objetivos específicos.....	21
2 Marco Referencial.....	23
2.1 Marco teórico.....	23
2.1.1 Asistencia Humanitaria	23
2.1.2 Asignación de recursos.....	23
2.1.3 Modelos en logística.....	24
2.1.4 Líneas de búsqueda y rescate	26
2.1.5 El problema de Scheduling	27
2.1.6 Optimización combinatoria	26
2.1.7 Complejidad computacional.....	29
2.1.8 Métodos de solución de un problema de optimización combinatoria	31

2.1.9	Computación evolutiva	32
2.2	Marco conceptual	37
2.2.1	Logística Humanitaria y gestión de desastres	37
2.2.2	Desastres.....	39
2.2.3	Desastres sísmicos.....	40
2.3	Estado del Arte	41
3	Formulación del modelo matemático.....	48
4	Diseño del Algoritmo.....	53
4.1	Descripción detallada del algoritmo genético propuesto.....	53
4.1.1	Representación genética de los individuos.....	55
4.1.2	Generación de la población inicial.....	56
4.1.3	Operador de selección	57
4.1.4	Operador de cruce	57
4.1.5	Operador de mutación	60
5	Estudio de caso	65
5.1	Especificación del caso.....	65
5.1.1	La Red de emergencia	65
5.1.2	Estimación de las zonas de emergencia	69
5.2	Pesos de las operaciones.....	70
5.3	Generación de escenarios	72

5.3.1	Nodos de la red de emergencia	72
5.3.2	Tiempos	73
6	Resultados Computacionales	76
6.1	Resultados escenarios	76
7	Conclusiones	85
8	Recomendaciones	86
	Referencias Bibliográficas	87
	Apéndices	95

Lista de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de 9 operaciones con 9 máquinas..... 62

Tabla 2. Zonas más afectadas de acuerdo con los escenarios..... 70

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Relación entre las clases de Schedule.....	29
<i>Figura 2.</i> Componentes principales de la programación evolutiva	33
<i>Figura 3.</i> Fases de un algoritmo genético.....	34
<i>Figura 4.</i> Diagrama de flujo de la descripción del algoritmo genético.	54
<i>Figura 5.</i> Ejemplo de programación de un individuo. (EE: Equipo de emergencia PI: Punto de partida PE: Punto de emergencia).....	56
<i>Figura 6.</i> Cromosomas de los padres. P1: Padre 1; P2: Padre 2	59
<i>Figura 7.</i> Generación de hijos mediante el operador de cruce aleatorio.	60
<i>Figura 8.</i> Proceso de mutación por malla binaria.....	61
<i>Figura 9.</i> Individuo.....	62
<i>Figura 10.</i> Diagrama de Gantt para el ejemplo de la Tabla1.....	64
<i>Figura 11.</i> Componentes de la red de emergencia	67
<i>Figura 12.</i> Zonas afectadas según zonificación geomórfica.	69
<i>Figura 13.</i> Tiempo de recorrido de una localidad a otra por medio de la API de Google Maps.	74
<i>Figura 14.</i> Mapa de zonas afectadas en un sismo de magnitud 6.....	77
<i>Figura 15.</i> Representación de los resultados computacionales por medio de una gráfica tridimensional en el escenario con magnitud sísmica 6.....	78
<i>Figura 16.</i> Resultados de la asignación de equipos de emergencia en cada localidad con el tiempo total ponderado de las operaciones de emergencia para una magnitud sísmica de nivel 6.	79
<i>Figura 17.</i> Mapa de zonas afectadas en un sismo de magnitud 8.....	81
<i>Figura 18.</i> Representación de los resultados computacionales por medio de una gráfica tridimensional en el escenario con magnitud sísmica 8.....	82

Figura 19. Resultados de la asignación de equipos de emergencia en cada localidad con el tiempo total ponderado de las operaciones de emergencia para una magnitud sísmica de nivel 8. 83

Lista de Apéndices

Apéndice A. Pseudocódigo algoritmo genético.....	95
Apéndice B. Pseudocódigo generación de la población inicial	96
Apéndice C. Pseudocódigo operador selección	97
Apéndice D. Pseudocódigo operador cruce	97
Apéndice E. Pseudocódigo operador mutación	99
Apéndice F. Tiempos de viaje desde puntos de comando a localidades en emergencia	(Ver Archivo Excel)
Apéndice G. Tiempos de procesamiento de cada equipo de emergencia en cada operación	(Ver Archivo Excel)
Apéndice H. Tiempos de viaje entre localidades por cada equipo de emergencia(Ver	Archivo Excel)
Apéndice I. Artículo Programación de Equipos de Emergencia y Rescate en Operaciones de Socorro Aplicado en la Ciudad de Bucaramanga ante un Desastre Sísmico...	(Ver Archivo Word)

Resumen

Para habilitar la programación de emergencias posterior a un desastre sísmico, en la presente investigación se propone un modelo de programación de equipos de emergencia sujetos a áreas prioritarias de desastre y recursos limitados, con el propósito de minimizar el tiempo total ponderado de finalización de operaciones de rescate. Se adapta un algoritmo genético (GA) para resolver el modelo propuesto considerado como un problema de optimización combinatoria que asigna a cada localidad en amenaza el equipo para suplir las operaciones de emergencia generadas. Se presenta un caso de estudio para simular la solución al modelo propuesto y evaluar los resultados del algoritmo genético diseñado, Para el caso de estudio se realizó una revisión de literatura y se reunió información para estimar las localidades afectadas ante un sismo con magnitud determinada, por último, el modelo es ejecutado para situaciones posteriores a un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. Para la presentación de las soluciones se elaboró un prototipo de software en el lenguaje de programación de Python. Los resultados pueden ayudar a los responsables de la toma de decisiones a tener un mejor juicio cuando se trata de una emergencia sísmica con diferentes magnitudes, asignando el equipo de emergencia de manera inmediata.

Palabras clave: equipo de emergencia; desastre sísmico; algoritmo genético; simulación.

Abstract

In order to enable immediate and efficient emergency programming after a seismic disaster, the present investigation proposes an emergency emergency programming model. rescue. A genetic algorithm (GA) is adopted to solve the problem of combinatorial optimization that is assigned to each locality in the threat of the equipment for the supply of generated emergency tasks. A case study is presented to simulate the solution for the model and the genetic algorithm

designed, for the case of the study a review of the literature is made and the information is collected to estimate the localities. The model is executed for situations following a seismic disaster in the city of Bucaramanga. For the presentation of the solutions, a software prototype was developed in the Python programming language. The results can help the decision-makers to have a better judgment when dealing with a seismic emergency with different magnitudes, assigning emergency equipment immediately.

Key Word: Emergency programming; seismic disaster; genetic algorithm; simulate.

Introducción

La respuesta a emergencias ante un evento sísmico es una de las etapas clave que contribuye en gran medida a salvar vidas y disminuir el daño por medio de la gestión y planificación de operaciones de rescate. Ya que los eventos sísmicos son fenómenos impredecibles, en la mayoría de los casos, las operaciones de búsqueda y rescate dependen de los recursos disponibles y su capacidad para llevar a cabo las operaciones de emergencia en las áreas operativas [1]. Dentro de los desastres más destructivos y catastróficos de los últimos años se encuentran: el terremoto en Haití el 12 de enero de 2010 con magnitud 7 y el epicentro localizado a 15 Km de la capital, Puerto Príncipe que a su paso dejó 316.000 muertos, el terremoto originado en el pacífico que sacudió el centro-sur de Chile 27 de febrero de 2010 con magnitud de 8,8 dejando 500 personas fallecidas y dos millones de personas damnificadas[2] el sismo que sacudió a Nepal en abril de 2015 con una magnitud de 7,8 que dejó un saldo de casi 9.000 muertes y 22.000 damnificados [3] y el más reciente en la zona costera de Ecuador con magnitud 7,8 que dejó 673 víctimas fatales y más de 25.000 damnificados, convirtiéndose en la segunda catástrofe mortal en Suramérica después del sismo en Colombia en 1999 que dejó cerca de 1.000 muertes [4].

Colombia hace parte del cinturón de fuego del pacífico donde confluyen las placas Nazca y suramericana, lo que nos hace entrar en la categoría de los países con alta vulnerabilidad en el mundo [5]. Además de esto, la ciudad de Bucaramanga se encuentra ubicada a 50km del denominado “nido sísmico de Bucaramanga” localizado en el municipio de Los Santos, Santander, siendo uno de los nidos sísmicos de mayor actividad en todo el mundo.

Una de las causas en el aumento de los riesgos y pérdidas considerables en un desastre sísmico es el incremento de la población, cuya consecuencia lleva directamente a la urbanización en zonas no aptas para construir viviendas, evidenciando la falta de planificación que pone en peligro la

vida de los habitantes y se eleva la vulnerabilidad de afectación ante la ocurrencia de un desastre sísmico.

Debido a las consecuencias devastadores de los desastres sísmicos, las organizaciones gubernamentales en su objetivo de mejorar la respuesta de manera eficaz y eficiente hacen uso de herramientas de optimización y el desarrollo de procedimientos que favorezcan y mejoren la toma de decisiones y la reducción de tiempo de respuesta ante una emergencia [6]. La ONU ha desarrollado simulacros en Latinoamérica que consisten en ejercicios de simulación donde se representa un sismo de gran magnitud en una zona geográfica determinada y a partir de esto los participantes ponen en práctica planes, procedimientos, protocolos y metodologías de coordinación que mejoran los procesos en la toma de decisiones y fortalezca las capacidades de respuesta frente a un escenario real. En el año 2016 en Colombia, la ONU junto a la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo y Desastres desarrollaron un simulacro con sede en Bogotá.

En esta investigación se propone el diseño de un algoritmo genético que se pondrá a prueba en dos escenarios con magnitudes sísmicas diferentes en la ciudad de Bucaramanga, donde se aborda el problema de programación y asignación de equipos de emergencia y rescate, sujetos a la disponibilidad, capacidad y el tipo de emergencia que se genere, las cuales pueden ser de despeje de área, servicio médico y búsqueda y rescate de víctimas, minimizando el tiempo total de finalización ponderado de las operaciones a realizar como respuesta a situaciones post-desastre.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 1 se presenta la justificación, definición del problema, formulación del problema y los objetivos de la presente investigación; la sección 2 presenta el marco referencial donde se presentan los conceptos y la terminología del proyecto; la sección 3 muestra la formulación del modelo matemático, la sección 4 presenta el diseño del algoritmo; la sección 5 define el estudio de caso de la investigación; la

sección 6 muestra los resultados computacionales obtenidos por medio del prototipo de software mediante el modelamiento de un escenario; las secciones 7 y 8 presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas por medio de la investigación.

1 Título del trabajo

Programación de equipos de emergencia y rescate en operaciones de socorro aplicado en la ciudad de Bucaramanga ante un desastre sísmico.

1.1 Definición del Problema

1.1.1 Descripción del problema

Pese a los avances económicos, tecnológicos, sociales entre otros, los desastres naturales provocados por el hombre (como los sismos) influyen ampliamente en el progreso de las actividades debido a que hay regiones susceptibles a este daño que ocurre de manera imprevista; solo apenas el año pasado algunos desastres dejaron un gran número de muertes según la EM-DAT.

Los sismos han afectado a diversos países del mundo entre ellos Colombia el cual posee 7 desastres reportados y 384 muertes por desastres, encontrándose entre los 10 países más afectados del mundo según la EM-DAT [7], esto ha dejado devastadoras secuelas en estructuras civiles y significativas amenazas a la vida humana. A lo largo de múltiples eventos sísmicos se han ampliado las investigaciones para desarrollar un plan para la gestión de la preparación ágil, eficaz y eficiente que logre asignar recursos escasos a operaciones complejas y atender todo tipo de necesidades al momento de este tipo de desastres naturales, con el fin de aminorar la pérdida y el daño y facilitar la toma de decisiones tanto para el gobierno como para las organizaciones humanitarias.

Considerando las condiciones climáticas y geográficas del país, este se enfrenta a diversas amenazas naturales como terremotos, inundaciones y deslizamientos que provocan grandes daños a las zonas más vulnerables. Sin embargo, el riesgo no solo se encuentra relacionado con la amenaza sísmica de la zona, también depende de la preparación que la zona tiene para afrontar

este tipo de desastre, dado que si existe un buen plan de gestión de riesgo los daños se podrían reducir significativamente.

Bucaramanga es una ciudad que se encuentra en una zona de alta actividad sísmica, debido a que está localizada a solo 50 km del nido sísmico de Los Santos, en el departamento de Santander. El 10 de marzo de 2015 se vivió el terremoto más fuerte en los últimos 50 años en la ciudad de Bucaramanga con una magnitud de 6,6 grados en la Escala de Richter, a 161 kilómetros de profundidad con epicentro en el municipio de Los Santos. El Servicio Geológico Colombiano ha registrado en el último año 26 temblores ocurridos con magnitudes que varían entre 4,4 y 5,5 en la región de Santander.

El gobierno es responsable de gestionar y suministrar ayudas humanitarias, como la definición de planes de desarrollo urbano que consideran planes de acción para situaciones de emergencia[8]; no obstante, es responsabilidad de organizaciones externas como La Unidad Nacional de Gestión de Riesgo (UNGRD), la ONU entre otras, que brindan ayuda humanitaria a las víctimas de un desastre. De este modo, es importante que el gobierno local y nacional gestione planes efectivos ante una situación de riesgo como lo son los desastres sísmicos, en conjunto con organizaciones de ayuda humanitaria. Es por esto por lo que Bucaramanga necesita mejorar sus planes para la gestión de riesgo y obtener métodos que faciliten la toma de decisiones más asertivas como herramientas cuantitativas que proporcionen la asignación a tiempo y eficaz de recursos necesarios a cada una de las áreas implicadas posterior a un desastre. Como resultado final se desarrollará y validará un algoritmo, que permita la simulación de un escenario de desastre sísmico en Bucaramanga, donde la asignación de recursos se realice de manera acertada de acuerdo con la magnitud del desastre.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se pueden programar los equipos de apoyo de emergencias ante un desastre sísmico mediante técnicas de optimización?

1.3 Justificación

A través de los últimos años se ha evidenciado el incremento de desastres naturales causados por el hombre en todo el mundo. En este tipo de desastres se puede registrar la duración, la magnitud, entre otros datos que son posibles posterior al desastre con margen de incertidumbre. Pero previo al desastre no se puede definir de manera precisa el lugar o momento del daño y la cantidad de víctimas que provocará dicho evento. Es por eso por lo que los planes de logística humanitaria son imprescindibles para reducir, mitigar las pérdidas y los impactos a las poblaciones afectadas de acuerdo a la magnitud del desastre por medio de la planificación y programación de los recursos y equipos de apoyo con el fin de generar una ayuda a tiempo y eficiente.

Alrededor del 36% de territorio nacional en Colombia se encuentra expuesto a amenaza sísmica alta principalmente en las regiones Pacífica y Andina, lo que significa que cerca del 86% de la población del país está expuesta a una amenaza sísmica alta y media, causa representativa de un riesgo potencial para el desarrollo social y económico del país, afirma el banco mundial[5]. La ciudad de Bucaramanga (Santander) tiene una alta actividad sísmica debido a su ubicación, que cuenta con una gran concentración de epicentros, la cual está relacionada al movimiento de las placas tectónicas de la cordillera oriental y se considera el “Nido de Bucaramanga” con terremotos registrados a profundidades entre 140 y 180 kilómetros [9].

El Plan de Ordenamiento Territorial de Bucaramanga 2013-2027 y el Plan Municipal de la Gestión del Riesgo de Desastres reafirman que la ciudad se encuentra con altas probabilidades de sufrir un fuerte sismo, afectando la infraestructura y la vida humana [10], de esta manera es evidente que se debe realizar la implementación de planes en logística humanitaria para encontrar soluciones efectivas que den como resultado mejoras en los sistemas preventivos de desastres sísmicos.

Estos planes pueden utilizarse tanto para respuestas inmediatas como para medidas a largo plazo. Los planes en logística humanitaria deben ser coherentes y eficientes para ayudar a tomar buenas decisiones, en vista de que en estos se constituye la preparación necesaria para el tipo de emergencia, el apoyo para la asignación adecuada y eficiente de recursos, equipo y refugios, en el menor tiempo posible y con la mejor calidad en la prestación del servicio.

Este proyecto busca el desarrollo de sistemas en logística humanitaria, específicamente en la programación de equipo de emergencias, para responder a desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga, dado que como se mencionó anteriormente la ciudad está en riesgo de sufrir este tipo de desastres y actualmente en la región no se cuenta con este tipo de herramientas, que soportan la toma de decisiones y la capacidad de dar respuesta oportunamente.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un algoritmo evolutivo de programación de equipos de emergencia y rescate en operaciones de socorro aplicado en la ciudad de Bucaramanga ante un desastre sísmico como apoyo a la toma de decisiones.

1.4.2 Objetivos específicos

- Revisar la literatura sobre el problema de programación de recursos y su aplicación en la gestión de desastres
- Construir un modelo matemático para la programación de equipos de emergencia y rescate para la ciudad de Bucaramanga ante un desastre sísmico.
- Diseñar un algoritmo genético que permita obtener una solución que mejore la asignación de equipos de emergencia ante desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga.

- Evaluar el algoritmo propuesto mediante la generación de dos escenarios sísmicos con diferente magnitud en la ciudad de Bucaramanga.

2 Marco Referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Asistencia Humanitaria

La gestión de la cadena de suministros representa uno de los principales problemas a la hora de una emergencia, debido a la obstaculización para el acceso al lugar y la incertidumbre en necesidades de suministros. El sistema de distribución de recursos tiene una tarea compleja, ya que en algunos casos se requieren decenas de puntos de distribución, así como personas capacitadas, así también, la incertidumbre en la demanda, ya que en estos casos la no satisfacción de la demanda representa altas tasas de mortalidad, asociado a un alto costo social.

Según L. N. Van Wassenhove [11] la cadena de suministro humanitaria cuenta con restricciones particulares de un evento después del desastre, la falta de infraestructura para distribuir la asistencia humanitaria, no se cuenta con los recursos suficientes, se desconoce la demanda en cuanto a asistencia médica, psicológica entre algunas otras calamidades que se presentan en estas situaciones. Todo esto hace que la cadena de suministro no esté dentro de un presupuesto para el costo social.

Una parte esencial del éxito en cualquier cadena de suministro es la gestión adecuada de los inventarios en cada escalón de esta.

2.1.2 Asignación de recursos

En los primeros días de la crisis, la mayor parte de las solicitudes están relacionadas con la respuesta misma (lo que es lógico, porque sin estos suministros la respuesta no puede tener lugar).

Para iniciar con la asignación eficiente de recursos se hace necesario hacer un pronóstico de la vulnerabilidad de la población afectada, la magnitud del desastre y los puntos de organizaciones

humanitarias y de suministro de equipos de emergencia que estén más próximos al desastre. Por otro lado, a la hora de la asignación o distribución de recursos, la participación de voluntarios es esencial como lo afirma J. Holguín-Veras *et al* [12], debido a que sino fuera por los voluntarios, las operaciones no tendrían éxito o no se podría continuar con la ayuda humanitaria.

Gracias a la asignación de recursos la respuesta a situaciones posteriores al desastre son más efectivas, porque dentro de esta se evalúa la situación y dependiendo de esto se puede asignar los recursos correctos, en el lugar correcto, las vías de acceso y mejorar la calidad del servicio a prestar, todo esto por medio de las decisiones operacionales priorizando los daños y la vulnerabilidad de la población afectada. Para un seguimiento de los recursos a asignar en la gestión de desastres, el Comité Interagencial (foro único interinstitucional para la coordinación de ayuda humanitaria) definió clúster o grupo y líderes de estos grupos con el fin de asignar a las organizaciones especializadas la responsabilidad y la coordinación de operaciones a la hora de atender un desastre sísmico [13].

2.1.3 Operaciones en logística humanitaria

2.1.3.1 Planificación y programación de emergencias

Uno de los factores más relevantes en la logística humanitaria es la planificación y programación de emergencias debido a que los terremotos son considerados desastres altamente destructivos para los seres humanos puesto que dependiendo de su magnitud pueden llegar a destruir completamente el entorno y medio ambiente de una población, así como el terremoto de Nepal al cual solo le llevo 20 segundos para acabar con las vidas y hogares de sus habitantes, donde “hubo más de 7 mil víctimas y casi medio millón de casas fueron destruidas o dañadas, dejando alrededor de 8.1 millones de personas que recibirán asistencia con al menos las necesidades básicas”[14]. Como esta catástrofe ocurrida en Nepal existen muchas similares las

cuales dejaron un gran número de víctimas por año debido a “desastres naturales o provocados por el hombre, dejando a las instituciones humanitarias locales e internacionales con el mayor reto de apoyar a una población afectada para que se recupere de la emergencia y ayudarlos a volver a sus vidas normales”[14]. es por ello que en la actualidad es muy importante la búsqueda de soluciones para la reducción del impacto que se obtiene ante este tipo de desastres y la prevención de los daños ocasionados por el mismo, por lo tanto la planificación y programación es un método que trata de buscar todas las formas de responder de la manera más eficiente al momento de presentar un evento como este por lo que una herramienta muy útil ha sido “El análisis del riesgo sísmico y la posterior estimación de la pérdida del terremoto inducida por eventos probables son dos aspectos clave para la planificación y preparación de acciones de mitigación en regiones con alta sismicidad”[15]. Para ello se desarrolló una metodología propuesta por Chen y Chan en 1998, la cual principalmente determina el riesgo sísmico por medio de un enfoque probabilístico y también se basa en un mapa de riesgo sísmico los cuales se encargan de indicar la intensidad macrosísmica global basado en el desarrollo de mapas similares [16].

2.1.3.2 Programación de equipos de emergencia y rescate

La programación de equipos de emergencia y rescate se da mediante planes, protocolos, procedimientos y metodologías de coordinación que mejoran los procesos en la toma de decisiones y fortalece las capacidades de respuesta frente a un desastre. Este proceso consiste en planificar y organizar las acciones con relación a las actividades que se deben realizar por medio de la maquinaria y equipo requerido para responder ante una emergencia; además la preparación de máquinas es importante para que estas cumplan determinada tarea en el momento que se requiera; la elaboración de programas para realizar una programación de equipos es necesario para la solución de este tipo de problemas. Ya que actualmente la programación es muy relevante para la

creación de diferentes aplicaciones informáticas, para esta investigación el creador desarrolla un programa con el apoyo de dos herramientas: una que le permita escribir el código, el cual puede estar en varios tipos de lenguaje (Python, Java, C++, entre otros), y otra que le permita traducir el código para que el programa funcione.

Para planes de logística humanitaria se encuentra asociada la programación de equipos de emergencia, ya que por medio de un programa capaz de ejecutar adecuadamente la elaboración de las operaciones de estos equipos se podría realizar una mejor asignación de los recursos existentes para evitar pérdidas importantes en el sistema de apoyo y respuesta ante una eventualidad sísmica, y de esta forma reducir o mitigar la pérdida e impacto ocasionado por el desastre [17].

2.1.4 Líneas de búsqueda y rescate

Las líneas de búsqueda y rescate hacen referencia principalmente al conjunto de actividades para evacuar a la población en una zona afectada, que incluye la creación de planes de evacuación, rutas de búsqueda y rescate a víctimas, con el apoyo de equipos de rescate los cuales son los diferentes dispositivos que se utilizan para el rescate o salvamento con el fin de recuperar personas de zonas de alto riesgo para evitar la pérdida de vidas y reducir los danos en las zonas afectadas.

El problema a resolver por medio de las líneas de búsqueda se resume a encontrar uno o varios caminos que ayuden al rescate de víctimas de la forma más oportuna posible, teniendo en cuenta la toma de decisiones de los encargados de la logística del rescate para completar una labor efectiva [18].

2.1.5 Optimización combinatoria

2.1.5.1 Problemas de optimización combinatoria

Un modelo de optimización combinatoria puede definirse así [19]:

- Un conjunto de variables $X = \{x_1, \dots, x_n\}$
- Un dominio de las variables $D_1, \dots, D_n$
- Restricción entre variables

Una función objetivo f para ser maximizada o minimizada, Donde $f : D \rightarrow R^*$ El conjunto de todas las posibles asignaciones factibles es [20]: $S = \{s = (X_1, V_1), \dots, (X_n, V_n)\}$

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

2.1.6 El problema de *Scheduling*

Un programa o *Schedule* es una asignación de máquinas o recursos a trabajos en un tiempo determinado, organizar los trabajos que deben realizar las maquinas requiere de la elaboración de programas para organizar los datos y realizar una adecuada programación de los equipos, necesario para la solución de este tipo de problemas. El *Scheduling* es una tarea con alto nivel de complejidad y relevancia en la necesidad del cálculo para el desarrollo de distintas áreas de aplicación [21].

Los problemas de *scheduling* poseen gran diversidad y son dependientes de la manera en que se desarrolla el problema. Estos problemas se han estudiado con determinadas características de procesamiento y funciones objetivo. Un gran número de este tipo de problemas no tuvo en cuenta “la naturaleza imprecisa de algunas variables que intervienen en su formulación”[21]. Para estos problemas se implementó la optimización combinatoria con la que se abarco en primera instancia los métodos exactos, sin embargo, a pesar de que estos podían generar una solución óptima, se consideraban inviables. Por lo tanto, las nuevas investigaciones generaban diferentes combinaciones de varias metodologías, a lo que se le denominan los algoritmos híbridos [22] [23].

2.1.6.1 *Parámetros del problema de Scheduling*

Un problema Scheduling puede ser formulado como un cuarteto de forma $k = (J, M, R, \alpha)$, Donde J representa n trabajos denominados $J_1, J_2, J_3, \dots, J_n$. El trabajo J_i , $1 \leq i \leq n$, se conforma de n_j operaciones $O_{1j}, O_{2j}, \dots, O_{nj}$, para cada operación se define el tiempo de procesamiento de la operación, donde se define el tiempo de preparación r_j , fecha límite d_j y un peso w_j . Además se pueden encontrar restricciones entre las operaciones con respecto al orden de ejecución de estas que pueden ser desarrolladas en serie, paralelo, cadena, acíclicas o árbol [22].

2.1.6.2 *Parámetros de las máquinas*

Las tareas se conforman por elementos del conjunto M (máquinas), por lo tanto, en los problemas Scheduling que incluyen sistemas computacionales existen m máquinas que se denotan por $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ [22].

2.1.6.3 *Tipos de Schedule*

Teniendo en cuenta la necesidad del problema de optimización, un problema de Scheduling se divide en [24]:

- **Schedule factible:** El Schedule factible es aquel que cumple con todas las restricciones del problema.
- **Schedule óptimo:** La programación es óptima si su valor de criterio de optimización es óptimo.
- **Schedule activo:** Aplica cuando ninguna de las tareas puede finalizar en corto tiempo sin que sea modificado el tiempo de otra tarea.

- ***Schedule Semi- activo:*** Un Schedule semiactivo se establece cuando ninguna tarea puede terminarse en menor tiempo sin tener que cambiar la secuencia de las tareas en las máquinas.
- ***Schedule non-delay:*** Ocurre cuando las máquinas están en espera de realizar la próxima tarea a ejecutarse, sin embargo, no ocasiona que estén dentro de los Schedule sin retraso.

La Figura 1 muestra la relación entre las clases de Schedule, se puede observar que las soluciones óptimas pueden hacer parte de los Schedule activos y semi-activos. sin embargo, no ocasiona que estén dentro de los Schedule sin retraso.

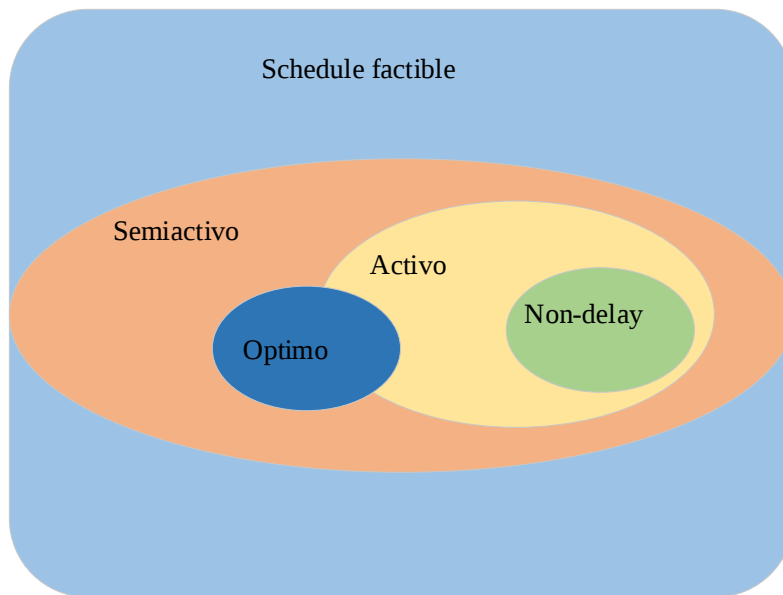


Figura 1. Relación entre las clases de Schedule. Adaptado de: “Un algoritmo memético para la minimización del makespan en el problema del Job Shop Scheduling” por K. J. Aguilar Imitola and Y. T. Perez Diaz

2.1.7 Complejidad computacional

La complejidad computacional muestra la eficiencia del algoritmo en la solución del problema. Se pueden diferenciar principalmente dos criterios de eficiencia: tiempo y espacio, los cuales son

recursos computacionales obligatorios para su generación o calculo[25]. Teniendo en cuenta esto, matemáticamente los problemas pueden ser categorizados por el grado de dificultad de acuerdo con la complejidad computacional del algoritmo que permite establecer su resolución. De esta manera los problemas pueden ser clasificados en problema NP Y NP-Hard.

2.1.7.1 Problemas NP

“Un problema **p** es NP completo si $p \in NP$ y todos los problemas de clase NP pueden ser reducidos a un problema **p** en un tiempo polinomial, esto implica que son problemas dentro de la clase NP difíciles de resolver” [26].

2.1.7.2 Problemas NP-Hard

Al demostrar que un problema de optimización combinatoria en problemas de decisión pertenece a la clase NP completa, entonces es NP-Hard. La complejidad computacional determina si todos los problemas no tratables (Problemas NP) podrán llegar a ser tratables (Problemas P). A diferencia de los anteriores los NP-Hard son complejos de resolver.

Dentro de los problemas NP-Hard se encuentran los problemas de optimización combinatoria para programación de recursos. Debido a la complejidad, los métodos de optimización exactos no pueden dar ninguna solución óptima dentro de un rango de tiempo, de modo que de unos años para acá se han desarrollado procedimientos que buscan buenas soluciones en tiempo razonable, también llamados métodos aproximados, entre estos se encuentran las heurísticas y metaheurísticas.

2.1.8 Métodos de solución de un problema de optimización combinatoria

Debido a la complejidad computacional de los modelos de optimización combinatoria, existen diferentes métodos para dar solución a este tipo de problemas. Los métodos se pueden clasificar en:

2.1.8.1 Algoritmos exactos

“A través de estos se encuentra la solución óptima para cualquier instancia de cualquier problema en un tiempo determinado”[27], no obstante tiene desventajas cuando se trata de un problema de optimización combinatoria de la clase NP-Hard, el tiempo empleado para dar solución aumenta exponencialmente en relación a la dimensión del problema.

2.1.8.2 Algoritmos heurísticos

“Son procedimientos que se usan para resolver problemas de optimización mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza para obtener una excelente solución” [28]. Existen heurísticas constructivas y métodos de búsqueda local.

2.1.8.3 Heurísticas constructivas

“Determinan las soluciones mediante un procedimiento que incorpora iterativamente elementos a una estructura inicialmente vacía, hasta obtener una solución completa, satisfaciendo las restricciones. Estos tipos de heurísticas se pueden utilizar siempre y cuando el problema se pueda resolver mediante decisiones sucesivas, como rutas, líneas de montaje, entre otras” [29].

2.1.8.4 Métodos de búsqueda local

El procedimiento empieza con una solución inicial, y con un operador construye un vecindario, de este modo avanza en busca de mejoras hasta construir una mejor solución en el vecindario, que

reemplaza la actual. Se emplea el concepto de óptimo local, el cuál es como una solución mejor o igual que cualquier otra solución del vecindario [30].

2.1.8.5 Algoritmos metaheurísticos

“Esta metodología explora de forma eficiente y efectiva el espacio de búsqueda a través del movimiento evitando quedar atrapado en óptimos locales, es decir son una forma inteligente de explorar los espacios de búsqueda. El término metaheurística introducido por Glover” [31], es una guía y cambia otras heurísticas dando soluciones más desarrolladas que las encontradas por el óptimo local, estas a su vez son más fácil de implementar y necesitan información especial del problema a resolver.

2.1.9 Computación evolutiva

Este concepto se introduce a partir del principio de Charles Darwin “Supervivencia del más apto”, siendo una rama de la computación y la inteligencia artificial que abarca métodos de búsqueda y aprendizaje automatizado desde los mecanismos de la evolución natural.

Las técnicas de computación evolutiva usan algoritmos que se usan para buscar soluciones óptimas a un problema, donde tienen como objetivo encontrar la mejor solución en un tiempo dado [32].

2.1.9.1 Programación evolutiva

“Lawrence J. Fogel fue el padre de la programación evolutiva: el uso de la evolución simulada en la solución de problemas reales” [33].

Entre algunos conceptos se encuentra [33]:

- Evolución simulada como proceso de aprendizaje con el objetivo de generar “inteligencia artificial” (entendida como comportamiento adaptativo).

- La realización de predicciones acerca del entorno se consideró un requisito previo al comportamiento adaptativo.
- Por tanto, la capacidad de realizar predicciones se considera clave para la inteligencia.

El algoritmo básico de la programación evolutiva es:

1. Generar aleatoriamente una población inicial (N padres)
2. Se aplica la mutación de cada uno de ellos para obtener la descendencia N
3. Se calcula la aptitud de cada hijo y se usa un proceso de selección mediante torneo (normalmente estocástico) para determinar cuáles serán las soluciones que se retendrán.

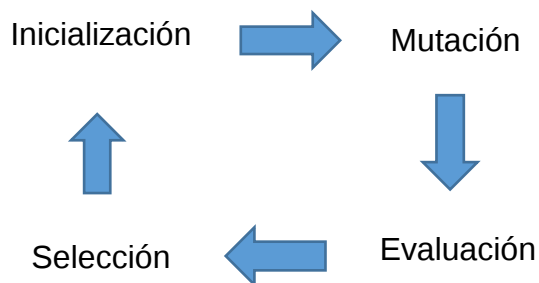


Figura 2. Componentes principales de la programación evolutiva

2.1.9.2 Estrategia evolutiva (ES)

Se trabaja con vectores de número reales, con desviación estándar que codifica las posibles soluciones a problemas numéricos. Usa un cruce (*crossover* aritmético), mutación y la operación de selección, ya sea determinística o probabilística, elimina las peores soluciones de la población y no crea copia de aquellos individuos con un desempeño por debajo del desempeño promedio. Cada individuo es representado por bloques de construcción genética y un conjunto de parámetros que modela el desempeño de los individuos en su entorno, en este proceso las características genéticas se moldean por los parámetros [34].

2.1.9.3 Algoritmos genéticos

El procedimiento a grandes rasgos que se lleva a cabo en el algoritmo genético inicia en la selección de la población realizada mediante un conjunto de cromosomas generados de forma aleatoria. Los cromosomas, también conocidos como los genotipos son los códigos de una solución que se representa generalmente como una cadena de números y cada uno de ellos es denominado *gen*. Se evalúa la función objetivo de todos los cromosomas para formar una nueva población, este ciclo de una población a otra es llamado generación. De acuerdo con la función objetivo se seleccionan los cromosomas actuales y posteriormente son aplicados los operadores de cruce y mutación. Después que se ha desarrollado durante varios ciclos el sistema genético se codifica el cromosoma que representa la solución óptima del problema [33].

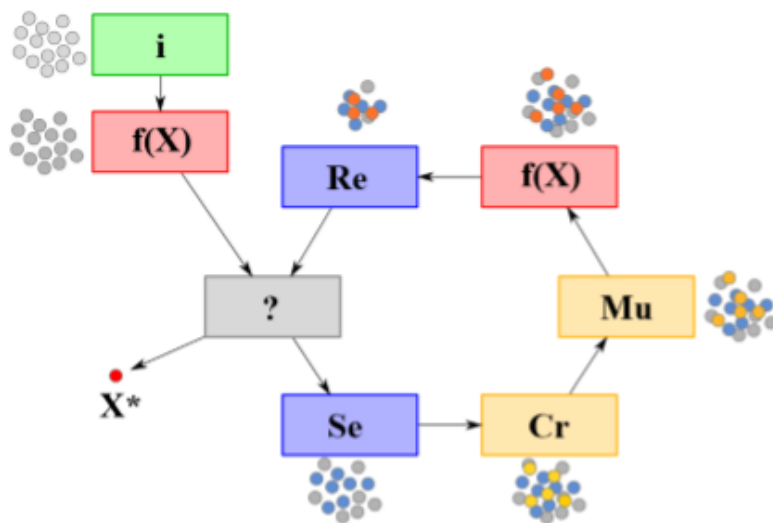


Figura 3. Fases de un algoritmo genético. Adaptado de: “Computación Evolutiva” por F. Berzal Jiménez.

Fases:

- **i**=Inicialización

- $f(X)$ =Evaluación

Repetición

- ρ =Selección
- Cr =Cruce
- Mu =Mutación
- $F(X)$ Evaluación
- Re =Reemplazo

2.1.9.3.1 Operaciones de los algoritmos genéticos.

Todos los operadores utilizados por un algoritmo genético se aplican sobre los cromosomas o poblaciones de ellos, previamente identificados y codificados. Las soluciones de un cromosoma compiten por ser la mejor solución, de tal forma que esta solución (que resuelva mejor el problema) logre transmitir su material genético a las siguientes generaciones. “Por lo tanto, un algoritmo genético consiste en hallar de qué parámetros depende el problema, codificarlos en un cromosoma, y aplicar los métodos de la evolución: selección y reproducción sexual con intercambio de información y mutaciones que generen diversidad” [35].

- **Codificación de las variables:** “Los cromosomas de alguna manera deberán contener información acerca de la solución que representa. La codificación se puede realizar de varias formas, la más utilizada es mediante una cadena de números binarios (1s o 0s)” [35]. La codificación está sujeta al problema al cual se le va a dar solución, así que es importante estudiar la codificación más óptima de acuerdo al caso en estudio.
- **Selección:** Una vez evaluado cada cromosoma y obtenida su puntuación, se crea la nueva población teniendo en cuenta que esos individuos de la nueva población provienen de

padres con mayor aptitud, es decir, que cuenta con los buenos rasgos los cuales se transmitirán a ésta. Los tres esquemas de selección más común son: Tournament selection, random selection y roulette wheel selection.

Tournament selection: Consiste en elegir dos cromosomas del grupo que está disponible de forma aleatoria, luego se realiza la comparación entre ellos mediante la evaluación de la función objetivo. El cromosoma que posea el mayor valor es seleccionado y es apto para ser reproducido.

Random selection: Este método selecciona al azar los padres de un cromosoma de los que están disponibles. Se evalúa cada uno de ellos tomando en cuenta el valor de la función objetivo y el que tome un valor por debajo del establecido es removido inmediatamente de la población.

Roulette wheel selection: Consiste en seleccionar los mejores individuos de acuerdo con la aptitud (función objetivo) relativa que presente el cromosoma respecto a la población y que estos tengan mayor probabilidad de ser reproducidos. Es decir, si el valor de la función objetivo de un cromosoma es el doble comparado con otro, éste tendrá el doble de probabilidad de ser reproducido respecto al otro, no obstante como el proceso es probabilístico pueden ser elegidos los individuos con peores funciones objetivo [36].

- **Reproducción o Cruce:** Se encuentra en la clasificación de operadores de reproducción, este proceso consiste en la creación de nuevas líneas y mejores generaciones o descendencia a partir de los padres representados en cromosomas a través del intercambio de características genéticas provenientes de los mismos. Existen 3 clases principales de cruces:

Asexual: Un padre genera una descendencia.

Sexual: Se genera una o dos descendencias a partir de los padres.

Multi-recombinación: Se generan dos o más generaciones a partir de dos o más padres.

- **Mutación:** Posterior al cruce se da la mutación, que depende de la codificación y de la reproducción. La mutación “consiste en modificar ciertos genes de forma aleatoria atendiendo a la probabilidad de mutación establecida con anterioridad” [35]. “Si se abusa de la mutación podemos caer en el uso del algoritmo genético como una simple búsqueda aleatoria”[35] es por eso que es importante que antes de incrementar las mutaciones, es conveniente estudiar las alternativas de solución que proporcionen diversidad a la población. La mutación se realiza como un complemento del operador cruce aplicando cierta probabilidad P_m a cada gen.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Logística Humanitaria y gestión de desastres

2.2.1.1 Logística humanitaria

La logística humanitaria es un aspecto fundamental para la gestión de desastres ya que gracias a esta se pueden determinar los múltiples elementos y procesos como la planeación, ejecución, seguimiento y evaluación para determinar el riesgo, lo cual ayuda a la toma de decisiones ante una eventualidad de este tipo. Thomas y Mizushima definen la Logística Humanitaria 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”[37], mientras que Van Wassenhove y Martínez (2012) señalaron que “la logística humanitaria tiene el desafío de asignar recursos escasos a operaciones complejas de manera eficiente” [38], atendiendo todo tipo

de desastres desde naturales hasta terroristas, lo que conlleva a innumerables retos para las víctimas y todas las organizaciones encargadas de atender este tipo de daños.

La logística humanitaria cuenta con cuatro fases tanto para las operaciones previas al desastre como para las posteriores, las cuales son: “1) Mitigación y 2) Preparación para el pre-desastre, 3) Respuesta y 4) Recuperación para el post-desastre” [39].

La logística humanitaria va de la mano con la gestión de desastres puesto que esta es la encargada de incluir un sistema de respuesta el cual está conformado por una serie de actividades que requieren de sistemas de apoyo como las comunicaciones y el transporte, lo que busca principalmente es la recuperación de la zona afectada, además para que estos sistemas puedan responder de la manera esperada se necesita de un manejo y capacitación por parte de los encargados del manejo de estos [40]. Para ello se deben identificar siete componentes clave: “los objetivos perseguidos, el origen de la mercancía, flujos a transportar, conocimiento de la demanda, estructura de toma de decisiones, periodicidad y volumen de actividades logísticas, y el estado de las redes sociales y los sistemas de apoyo” [41].

Sin embargo, puede existir fallas en el sistema de respuesta incluso teniendo en cuenta los parámetros e investigaciones las cuales “deben cubrirse para mejorar tanto la eficiencia de la logística humanitaria como el realismo de los modelos matemáticos diseñados para apoyarlo”. [14]. Este tipo de problemas pueden hacer referencia a las “decisiones a largo plazo sobre la localización los refugios de emergencia, ubicando el suministro y los centros médicos, y mantener flotas de ambulancias y vehículos de transporte” [15], para tener una respuesta efectiva con los afectados. Además, es importante tener en cuenta la ejecución de la cadena de suministro para la gestión del desastre en consecuencia de que si esta gestión se realiza de la forma más eficiente puede beneficiar a los afectados tanto en salud, refugio, medicina, servicios vitales y recuperación.

El sector privado también hace parte del sistema de respuesta el cual necesita comprender las “capacidades básicas de la logística humanitaria” [41], por ello se debe comprender la importancia del manejo del suministro en entornos humanitarios. Además, debe tener en cuenta el aprendizaje adquirido para las de ayudas de emergencia, “así como las posibilidades de involucrarse a través de la responsabilidad social corporativa” [41].

2.2.2 Desastres

El término desastre se refiere a “un evento no rutinario que excede la capacidad del área afectada para responder a él de manera tal que salve vidas; para preservar la propiedad; y para mantener la estabilidad social, ecológica, económica y política de la región afectada [42]. En los desastres no catastróficos, las poblaciones locales y todas las organizaciones involucradas pueden dar solución a los daños causados, entre esos la destrucción de la infraestructura dando uso a los recursos presentes en el incidente, que servirán como primer auxilio a las víctimas. Contrario que la catástrofe sea mayor, ya que toda la infraestructura social, física resulta comprometida y no pueden cumplir su responsabilidad humanitaria.

Los desastres son fenómenos los cuales pueden ocurrir por la acción de la naturaleza o por los daños que el hombre provoca al medio ambiente. Según la Agencia Federal para la Gestión de Emergencia desastre se define como un evento que causa 100 muertes o 100 víctimas humanas o daños por el valor de US\$1 MILLON, mientras que este término se aplica a una situación de ruptura del funcionamiento normal de un sistema o comunidad que causa fuerte impacto sobre las personas, sus obras y su ambiente según la Organización Panamericana de la Salud.

Según la ley 1523 de 2012 los desastres Corresponden a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son

determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Un desastre además del gran número de víctimas que genera deja diversos efectos dependiendo del grado de impacto que haya tenido este y como se vio afectada la zona, uno de los efectos más grandes es la pérdida de los servicios vitales que necesitamos los seres humanos como el agua y la energía eléctrica. Por lo tanto, es muy importante contar con un buen plan de gestión de desastres ante una eventualidad de tipo catastrófica y así evitar tener grandes daños en la zona y evitar los efectos desfavorables.

2.2.3 Desastres sísmicos

Los sismos son fenómenos causados por la naturaleza o labor del ser humano que provocan fuertes temblores los cuales aplican movimientos bruscos en el suelo de la zona afectada por la acción de ondas sísmicas que liberan su energía acumulada extendiendo las vibraciones en todas las direcciones desde su epicentro, que es el punto en el que se origina el temblor y por lo tanto el punto en donde posee mayor intensidad el temblor. Además, se ha estudiado que la mayoría de los temblores se producen a lo largo de los bordes de las placas tectónicas que también son lugares que poseen actividad volcánica.

La pérdida o el riesgo de un desastre sísmico está relacionada directamente con el medio ambiente, el peligro, la exposición y la capacidad regional de represión. Identificar con exactitud en qué medida estos factores contribuyen a la pérdida del desastre sería un gran desafío. La amplificación y atenuación del efecto de desastre, su entorno formativo y la exposición en un terremoto de la misma magnitud, son de gran importancia para guiar el trabajo de evaluación y rescate posterior al desastre que ocurre en un período de tiempo lacónico.

2.3 Estado del Arte

En los últimos años el tema de gestión de desastres y logística humanitaria ha adquirido relevancia, atrayendo el interés de investigadores y practicantes en desarrollar sistemas logísticos que cada vez generen mayor y eficaz respuesta. Y todo esto se hace razonable debido a las trágicas consecuencias de los desastres ocurridos en los últimos años a nivel mundial. Para un acercamiento de estos temas se tomó como referencia principal el artículo “Emergency scheduling of engineering rescue tasks in disaster relief operations and its application in China” [43], donde mencionan que los estudios del tema de programación de rescate en la literatura son muy pocos, sin embargo, se recopilaron algunos artículos de la colección principal de la Web of Science. A continuación, se presenta una recopilación de las investigaciones relacionadas con la programación de equipos de emergencia posteriores a un desastre sísmico, para conocer las contribuciones previas y actuales tomadas como referencia para la ejecución del tema propuesto.

C. Mejia-Argueta *et al.* [44] aborda las inundaciones frecuentes y previsibles en la preparación a corto plazo de un evento inminente, utilizando un modelo de optimización multicriterio integrado con un sistema de información geográfica para simular los niveles de inundación, determinar las mejores estrategias y actualizar la información. Se tiene en cuenta las cuatro principales operaciones de socorro: ubicación de instalaciones de emergencia, preposicionamiento de la ayuda humanitaria, evacuación y distribución de ayuda humanitaria en donde se pretende minimizar los tiempos de evacuación, de distribución y el costo total de las operaciones de ayuda. Todo se logra por medio de la programación multiobjetivo y el uso de software comercial.

José Holguín-Veras *et al.* [45] investigaron sobre los esfuerzos logísticos humanitarios después de los desastres que impactaron la región de Tohoku después del terremoto ocurrido

en Japón el 11 de marzo de 2011. A través de una combinación de entrevistas con los participantes en la ayuda de socorro, se destacó la necesidad de suministros suficientes desde el exterior al área afectada como proceso de respuesta, la importancia de puntos de suministros, la importancia de gestionar y controlar todos los mecanismos de suministro inherentes al nivel de prioridad y en general la distribución local, como el trabajo en conjunto de la sociedad, la sociedad civil, instituciones militares, sector público, comercial, para garantizar respuestas eficaces según las circunstancias.

L. N. Van Wassenhove [11] Se basa en la idea de que la logística del sector privado puede y debe aplicarse para mejorar el desempeño de la logística de desastres, pero antes de esto, el sector privado necesita comprender las capacidades básicas de la logística humanitaria. El autor presenta la complejidad de administrar cadenas de suministro a la hora de un desastre. Así mismo, nombra las estrategias para una óptima preparación y la necesidad de que las cadenas de suministro sean rápidas, y se adapten al nivel del impacto. El artículo resalta la importancia de la colaboración entre trabajadores humanitarios, empresas y académicos para lograr cadenas de suministro más efectivas que respondan a cualquier tipo de complejidad.

L. S. Reyes-rubiano *et al.* [46] desarrollaron un modelo matemático para la programación de grupos de personas especializadas en logística humanitaria posterior a un desastre, mediante la programación lineal entera mixta, buscando disminuir el tiempo de la operación teniendo en cuenta como factores principales el tiempo de viaje del vehículo, el tiempo de alistamiento y el tiempo de descarga, con el propósito de satisfacer de manera rápida y eficiente la demanda de la población afectada en caso de un desastre. Para solucionar el problema es necesario definir algunos parámetros que garanticen una óptima solución, en la elaboración de este proyecto se localizó un depósito y varios albergues donde serán llevadas las personas afectadas después del desastre para

brindarles asistencia médica, con calidad en la prestación del servicio. Conjuntamente, en el modelo se considera que no existe incertidumbre en la seguridad de las vías porque se parte del supuesto de que la logística relacionada con la programación del personal se desarrolla en un lugar seguro.

Felix Wex *et al.*[47] definieron los desastres como causantes de grandes daños difíciles de reparar. Sin embargo con el propósito de disminuir los errores y pérdidas económicas al momento de atender a las víctimas, los autores proponen asignar unidades de rescate las cuales realizan cada una de sus funciones programadas de la forma más eficiente, en donde los autores realizan un modelo que facilita la toma de decisiones con el fin de minimizar los errores mencionados en cuanto a los tiempos de ejecución de las actividades por medio de la programación de máquinas que optimizan el tiempo de ejecución de actividades en donde el daño general se puede reducir hasta en un 81,8%; abordando los problemas de la asignación y programación de equipos de rescate importantes para poder responder de la manera más efectiva ante una emergencia basado en la literatura de programación y enrutamiento ampliando el conocimiento computacional, de construcción y mejora a la atención evaluados por medio de un software el cual arroja valores encontrados por GREEDY, el cual es muy importante en cuanto a la logística humanitaria dado que este representa las mejores formas de aplicar cada aspecto logístico, reduciendo las pérdidas desde un 42% hasta máximo 81,8%. Permitiendo que los recursos ahorrados puedan ser utilizados para otras causas relacionadas con la ayuda a las víctimas lo que hace rendir los recursos significativamente.

Zheng *et al.* [48] describen un modelo matemático del problema de programación de mantenimiento de equipos de emergencia, particularmente en operaciones de rescate de desastres, donde su objetivo es alcanzar un equilibrio entre la capacidad operativa lograda por

mantenimiento, costo-efectividad, riesgos de mantenimiento y capacidad de mantenimiento para operaciones sostenibles. Diseñaron una codificación de una solución que facilita el proceso de búsqueda, junto a eso desarrollaron un algoritmo de búsqueda tabú multi-objetivo que desarrolla un conjunto de soluciones. Mediante los resultados de aplicaciones en casos reales se demostró la efectividad del enfoque.

Christian Fikar *et al.* [49] proponen “un sistema de apoyo a la decisión (DSS) basado en simulación y optimización para facilitar la coordinación de alivio de desastres entre organizaciones privadas y de socorro”. El DSS permite simular los desastres y programa envíos de equipos de apoyo y de socorro a través de puntos de suministro a puntos de demanda en el área afectada. Los puntos de suministro o transferencia son de los aspectos más importantes a tener en cuenta, pues, por medio de estos se mejora la distribución de socorro en tiempos eficientes, el desarrollo del DSS ayuda a determinar puntos de suministro potenciales de manera rápida y eficiente, permitiendo además la prueba de las diferentes magnitudes del desastre para coordinar los envíos. Este sistema es muy útil para la toma de decisiones de los responsables, analizando los recursos disponibles, el ruteo de camiones, vehículos entre otras. En esta investigación se aplica una programación entera, una simulación basada en agentes, un procedimiento de planificación y enrutamiento basado en heurística, así como una metaheurística de búsqueda Tabu para analizar el problema de decisión dado. El trabajo en conjunto entre las organizaciones humanitarias y privadas resulta ser beneficioso entre otras cosas frente al paso obstaculizado de carreteras y la demanda desconocida de víctimas.

Yu-Jun Zheng *et al.* [43] establecen un modelo de programación de emergencia de tareas de rescate en operaciones de socorro, también proponen un método basado en la

optimización basada en la biogeografía, desarrollando operadores efectivos de migración y mutación, y empleando un enfoque de optimización multiobjetivo para proporcionar un conjunto de soluciones candidatas para el soporte de decisiones. Todo esto demuestra un rendimiento competitivo, como lo prueba el éxito de esta aplicación al terremoto Dingxi.

Yaping Ren *et al.* [50] en su trabajo para la habilitación de programación de emergencia inmediata durante un incendio, propone un nuevo modelo de programación para tales incendios con condiciones como recursos limitados de equipo y áreas prioritarias, para minimizar la distancia total de viaje para los equipos de rescate. Adicional a esto, se adopta un algoritmo inteligente híbrido que integra el algoritmo genético (GA) y la optimización del enjambre de partículas (PSO) para resolver el modelo propuesto. Los resultados teóricos y los de simulación demuestran que el modelo propuesto puede realizar eficazmente el análisis cuantitativo de una emergencia relacionada con incendios forestales.

Fu-Sheng Chang *et al.* [51] desarrollan un algoritmo genético basado en búsquedas codiciosas y multiobjetivo capaz de regular la distribución de recursos disponibles y generar automáticamente una variedad de *Schedule* de logística de emergencia factibles para los encargados de la toma de decisiones. El algoritmo se ajusta dinámicamente a las programaciones de distribución de varios puntos de suministro dependiendo de los puntos de demandas, con el fin de minimizar la demanda insatisfecha de recursos, el tiempo de entrega y los costos de transportes. El algoritmo propuesto se aplicó al caso del terremoto de Chi-Chi en Taiwán para poner a prueba su funcionalidad. Los resultados de algoritmo superan a otros algoritmos en ‘tiempo de entrega’ en un promedio de 63,57% basado en 10.000 iteraciones.

Felix Wex *et al.* [52] desarrollaron un modelo de apoyo a decisiones correspondiente que

minimiza la suma de los tiempos de finalización de incidentes según su nivel de priorización, por medio de una heurística de mejora y la metaheurística GRASP. El problema propuesto es una generalización del problema de programación de máquina paralela con máquinas no relacionadas, tiempos de configuración dependientes de la secuencia y una suma ponderada de tiempos de finalización.

Cejun Cao *et al.* [53] diseñaron estrategias optimizadas de asignación para la organización de emergencia con respecto a la sostenibilidad para reducir varias pérdidas y mejorar la eficiencia de la respuesta a desastres. En el desarrollo se tiene en cuenta elementos como la organización de emergencias, las tareas, los agentes de decisión, el medio ambiente y sus relaciones. Luego, se formula un problema multiobjetivo para minimizar los tiempos totales de finalización, las emisiones totales de carbono y los costos totales de emergencia.

Yu-Jun Zheng *et al.* [54] proponen un problema difuso de optimización multiobjetivo de la programación de tareas de rescate, cuyo objetivo es maximizar simultáneamente la eficiencia de la programación de tareas y minimizar el riesgo de operación para el equipo de rescate. Posterior a eso desarrollaron un algoritmo de optimización basado en biogeografía multiobjetivo para resolver el problema propuesto. Los experimentos computacionales muestran que el algoritmo propuesto supera a algunos algoritmos de optimización de última generación y se ha aplicado con éxito a varias operaciones de rescate de desastres del mundo real en los últimos años.

En esta revisión basada en los sistemas de gestión de desastres y logística humanitaria para la programación de equipos de emergencia se encontró investigaciones que proponen problemas de optimización multiobjetivo y multicriterio, basados en sistemas de biogeografía donde se han aplicado problemas para la programación de las tareas basadas en la respuesta a emergencias y la

toma de decisiones para una respuesta eficaz, eficiente y a tiempo, además el desarrollo de algoritmos genéticos realizados con el objetivo de distribuir los recursos necesarios post-desastre y la elaboración de diferentes modelos de apoyo de la toma de decisiones correspondiente a las personas encargadas de gestionar el sistema de apoyo y respuesta ante la presencia de una catástrofe.

3 Formulación del modelo matemático

Con base en la formulación del modelo matemático presentado por Zheng *et al.* [54] se desarrolló una adaptación para el problema de programación de equipos de emergencia del caso de estudio de la presente investigación.

A continuación, se presentan los supuestos principales del modelo matemático propuesto.

- El número de operaciones puede ser relativamente grande.
- Las operaciones y disponibilidad de equipo se conocen.
- En condiciones de emergencia, el tiempo de respuesta para las(s) solución(es) para la toma de decisiones es muy limitado, y el problema puede estar sujeto a cambios frecuentes del entorno [52]
- La decisión final debe lograr una buena compensación entre la maximización de la eficiencia de rescate y la minimización del tiempo total ponderado de las operaciones.
- La importancia del peso de las operaciones, el procesamiento y los tiempos de viaje, y el riesgo de operación, siempre son difíciles de estimar con precisión.
- Todas las máquinas (equipos de emergencia) parten a realizar su primera operación asignada del punto de inicio al mismo tiempo.

Los índices del modelo son:

m La cantidad de equipos de rescate (máquinas)

n El número de objetivos de rescate (operaciones).

w_i El peso de la operación i

$t_{i,j}$ El tiempo de procesamiento de la operación i en el equipo (máquina) j

Parámetros:

$t_{i,i'}^j$ El tiempo de viaje de la máquina j desde la operación i hasta la operación i'

B_i^j El tiempo de comienzo la operación i en la máquina j en el *Schedule*

C_i^j El tiempo de finalización de la operación i en la máquina j en el *Schedule*

$\theta(\pi)$ El tiempo de finalización total ponderado

En el problema ilustrado por el caso de estudio, el equipo de rescate se puede considerar como un conjunto de máquinas m cuyas operaciones de emergencia se conocen previamente. En este caso la retroexcavadora sería la primera máquina, la motoniveladora la segunda máquina y las volquetas la tercera máquina; las ambulancias TAM y TAB la cuarta máquina, los vehículos de la cruz roja la quinta máquina, defensa civil sexta máquina, Policía Nacional séptima máquina, Ejército Nacional octava máquina y el cuerpo de bomberos la novena máquina. Por lo tanto, tenemos $m=9$. Las máquinas en el mismo equipo deben seguir la misma ruta de soluciones.

Para un problema con m máquinas y n objetivos de rescate (operaciones de emergencia), cualquier solución factible es una permutación de operaciones $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ de $\{1, 2, \dots, n\}$. Cada operación tiene un peso w_i que se secuenciarán a través de m máquinas (equipos de emergencia), el tiempo de procesamiento de la operación i en la máquina j está dado por $t_{i,j}$ y el tiempo requerido por la máquina j que viaja del objetivo i a i' es $t_{i,i'}^j (i, i' \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\})$. El tiempo de viaje desde las ubicaciones iniciales de la máquina j hasta la operación i es $t_{0,i}^j$.

Para la maquinaria amarilla (máquina 1,2 y 3), por trabajar en conjunto siguiendo las mismas rutas, los tiempos se calculan así:

$$B_1^1 = t_{0,1}^1 \quad (1)$$

$$C_1^1 = B_1^1 + t_{1,1} \quad (2)$$

$$B_1^2 = t_{0,1}^2 + t_{1,1} \quad (3)$$

$$C_1^2 = B_1^2 + t_{1,2} \quad (4)$$

$$B_1^3 = t_{0,1}^3 + t_{1,1} \quad (5)$$

$$C_1^3 = B_1^3 + t_{1,3} \quad (6)$$

La ecuación (1) representa el tiempo de inicio de la maquina 1 en la operación 1, calculada como el tiempo que le toma llegar desde el punto de comando a la ubicación de la primera operación, esto se cumple para las ecuaciones (3) y (5). La Ecuación (2) es el tiempo de finalización de la maquina 1 constituida por el tiempo de inicio de la operación sumado al tiempo de procesamiento de la operación. Esto mismo se considera para las ecuaciones (4) y (6).

Luego, los tiempos de inicio y finalización de la operación 1 en la máquina 1 de las operaciones de servicio médico y de rescate a víctimas se calculan de la siguiente manera:

$$B_1^1 = t_{0,1}^1 \quad (7)$$

$$B_i^1 = \max(C_{i-1}^1, t_{0,i}^1) \quad 2 \leq i \leq n \quad (8)$$

$$C_i^1 = B_i^1 + t_{i,j} \quad 1 \leq j \leq m \quad (9)$$

La ecuación (7) indica que el tiempo de comienzo de la primera máquina en su primera operación de emergencia es igual al tiempo de viaje de la máquina desde el punto de inicio hasta la

emergencia. La ecuación (8) representa el máximo tiempo de comienzo de una tarea i en la primera máquina, descrita por el máximo tiempo de finalización de la tarea anterior $i-1$ y el tiempo de viaje de la máquina desde el punto de inicio hacia la emergencia i , con un rango de operaciones entre 2 y n . Por último, el tiempo de finalización, ecuación (9) de cualquier tarea i para la primera máquina es el tiempo de comienzo más el tiempo de procesamiento de la máquina en la emergencia i , con un rango para las máquinas entre 1 y m .

Y el tiempo de inicio y de finalización de la operación i en la máquina j , se calculan de la siguiente manera (para todos los $2 \leq i \leq n$).

$$B_i^j = t_{0,i}^j \Leftrightarrow i \text{ sea la primera tarea programada en la máquina } j \quad (10)$$

$$B_i^1 = C_{i-1}^1 + t_{i-1,i}^1 \quad (11)$$

$$B_i^j = \max(C_i^j, C_{i-1}^j + t_{i-1,i}^j) \quad 2 \leq j \leq m \quad (12)$$

$$C_i^j = B_i^j + t_{i,j} \quad 1 \leq j \leq m \quad (13)$$

La ecuación (10) describe que el tiempo de comienzo de cualquier máquina j para una operación de emergencia i es igual al tiempo de viaje de la máquina j desde el punto de inicio hasta la operación i , pero sólo aplica para la primera tarea programada en esa máquina. La ecuación (11) indica que para cualquier operación i en la primera máquina se describe como el tiempo de finalización de la tarea anterior $i-1$ en la máquina 1 más el tiempo de viaje de la máquina 1 desde la operación anterior $i-1$ hasta la operación i . La ecuación (12) indica que el tiempo de comienzo de una máquina j en una operación i se da por el máximo tiempo de finalización de: el tiempo de finalización de la máquina j en la operación i , el tiempo de finalización de la máquina j en la operación anterior más el tiempo de recorrido de la máquina j desde la operación $i-1$ hasta la operación i , con un rango para las máquinas de 2 a m . Por último, el tiempo de finalización de la

operación i en la máquina j es el tiempo de comienzo de la máquina j en la operación i más el tiempo de procesamiento de la máquina j en la operación i .

El objetivo es encontrar una secuencia las operaciones de rescate para minimizar el tiempo total de finalización ponderado de las operaciones:

$$\min \theta(\pi) = \sum_{i=1}^n w_i C_i^m$$

4 Diseño del Algoritmo

Teniendo en cuenta el algoritmo propuesto por Y. Ren [50] para la solución de la programación de recursos con áreas clasificadas según su nivel de priorización y equipo de emergencia limitado, se propone un algoritmo genético para resolver el modelo propuesto.

4.1 Descripción detallada del algoritmo genético propuesto

El procedimiento inicia con la generación de la población inicial, que es un conjunto de cromosomas generados de forma aleatoria, allí se evalúa la función objetivo con el fin de ir evolucionando tal población por medio de nuevas generaciones con los operadores genéticos, cada vez que se evalúa un cromosoma en cada generación, las mejores soluciones obtenidas se guardan. Después de 20 generaciones (el cual es un número arbitrario modificable proporcionado a criterio) el sistema genético codifica el cromosoma que representa la solución óptima del problema. En la Figura 4 se muestra los pasos de dicha estrategia de manera más detallada por medio de un diagrama de flujo.

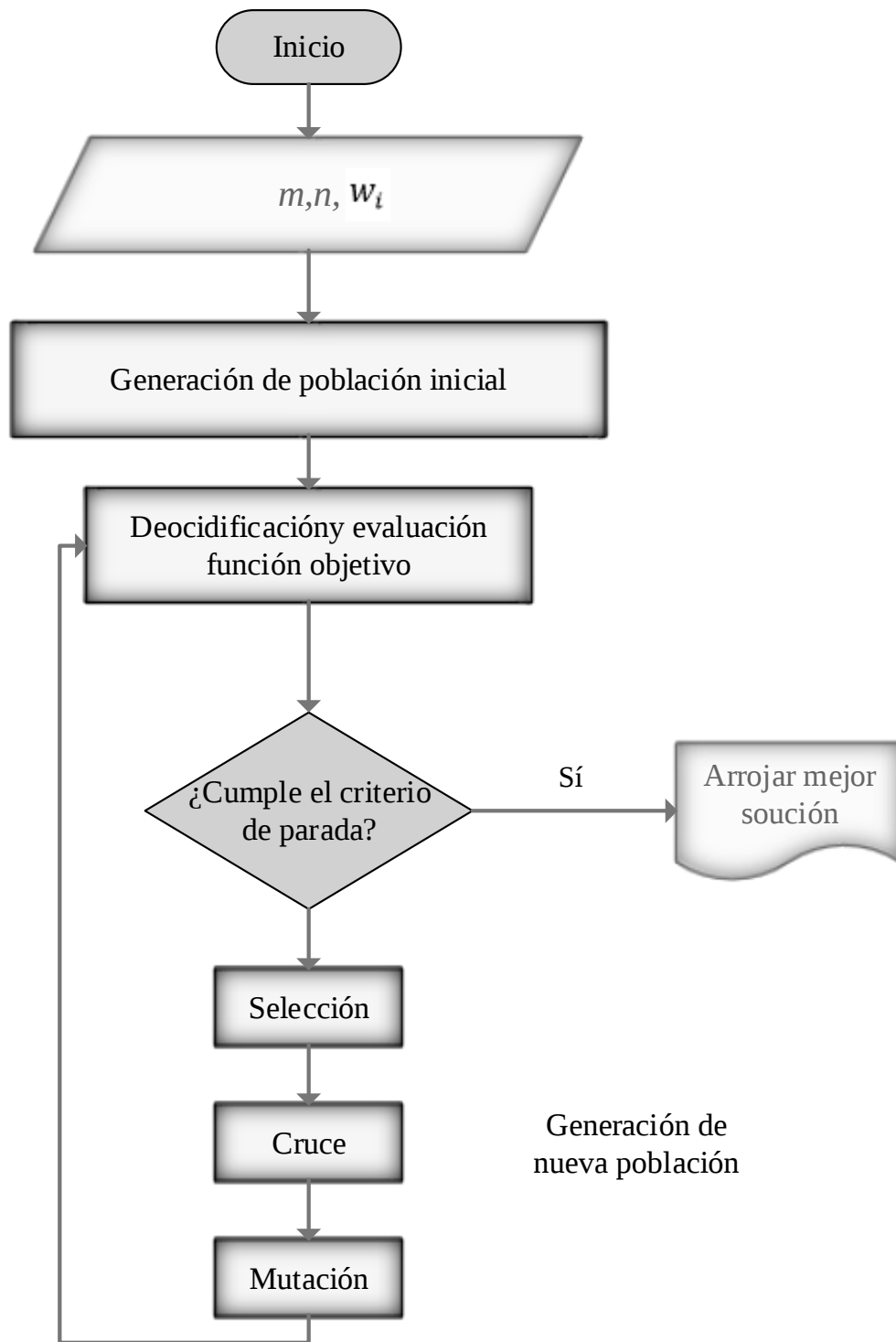


Figura 4. Diagrama de flujo de la descripción del algoritmo genético.

4.1.1 Representación genética de los individuos

La representación de los cromosomas en el algoritmo genético tiene como finalidad generar soluciones factibles adaptadas a los operadores genéticos y así reducir los espacios de búsqueda los cuales no generan soluciones apropiadas. En esta investigación se usa la representación basada en operaciones que permite codificar un *Schedule* como una secuencia de operaciones, la codificación se conoce como cromosoma o genotipo que tienen cadenas de números, cada número es un gen y cada gen del cromosoma representa una operación programada.

Para un problema de n operaciones y m equipos de emergencia (máquinas), un cromosoma es una permutación con repetición de las máquinas, cuyo tamaño es n . Al leer el cromosoma de izquierda a derecha, cada aparición de un mismo número quiere decir que esa máquina ha sido asignada a una operación dentro de la secuencia de programación, la última aparición de un mismo valor indica que esa es la última operación asignada para ese equipo. Este tipo de representación generalmente da como resultado programas factibles. Por ejemplo, si se tiene $m=9$ (equipos de emergencia), $n=9$ (operaciones de emergencia) un individuo seleccionado aleatoriamente será $[2\ 1\ 3\ 6\ 5\ 5\ 8\ 8\ 7]$, de estos equipos de emergencia de 1 a 3 corresponden a operaciones de despeje, de 4 a 6 corresponden a operaciones de servicio médico y de 7 a 9 son operaciones de rescate a víctimas, con pesos $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8, w_9$, es presentado como se observa en la Figura 5, donde las primeras 3 operaciones corresponden a operaciones de despeje, de la cuarta a la sexta operación corresponden a operaciones de servicio médico y de la séptima a la novena posición son operaciones de rescate de víctimas. De acuerdo con el tipo de operación se asignará una máquina correspondiente a la labor por realizar.

Ejemplo:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Individuo	2	1	3	6	5	5	8	8	7



m	Programación			
1	EE1	PI→	PE2(P_2)	--
2	EE2	PI→	PE1(P_1)	--
3	EE3	PI→	PE3(P_3)	--
4	EE4	--	--	--
5	EE5	PI→	PE5(P_5)	PE6(P_6)
6	EE6	PI→	PE4(P_4)	
7	EE7	PI→	PE9(P_9)	
8	EE8	PI→	PE7(P_7)→	PE8(P_8)
9	EE9	--	--	--

Figura 5. Ejemplo de programación de un individuo. (EE: Equipo de emergencia PI: Punto de partida PE: Punto de emergencia)

Al leer el cromosoma de izquierda a derecha, el primer gen representa la primera operación y debe ser realizado por el equipo (máquina) 2, el valor de 1 en el segundo gen indica que la segunda operación fue asignada al equipo 1 y el tercer gen con el valor de 3 muestra que el equipo 3 fue asignado a la tercera operación. De esta forma el cromosoma $|2\ 1\ 3\ 6\ 5\ 5\ 8\ 8\ 7|$ es una secuencia de operaciones programadas. La descripción de las operaciones asignadas para cada equipo se representa en la Figura 5, por ejemplo, el equipo 5 inicia su programación en el punto de inicio, posteriormente realiza la operación 5 y finalmente la operación 6.

4.1.2 Generación de la población inicial

La heurística es uno de los métodos utilizados para la inicialización de la población inicial, pero estos consumen mayor tiempo computacional, por tal motivo en esta investigación se utiliza la generación de individuos de forma aleatoria ya que cualquier permutación de operaciones será un *Schedule* permitido debido al tipo de representación empleada. Un cromosoma es un vector que

contiene 9 posiciones y se genera asignando de forma aleatoria un número entre 1 y m , se crean individuos hasta que se complete el tamaño de la población. Para la compresión de este operador ver Anexo B.

4.1.3 Operador de selección

Este operador tiene como función elegir los individuos que se cruzaran para obtener descendientes. Los tipos de selección son: selección por torneo, aleatoria y de ruleta. En la presente investigación se adapta un diseño que combina la selección por torneo y de ruleta. Lo cual consiste en seleccionar padres por medio de un porcentaje de selección con los mejores individuos de la población, pero dando cabida a que algunos individuos no tan apropiados funcionalmente puedan ser parte de los seleccionados.

Una matriz de la población son los posibles padres, tal matriz se ordena de menor a mayor de acuerdo con el valor del tiempo total para llevar a cabo las operaciones (función objetivo). Se aplica el porcentaje de selección a la primera mitad de la matriz ordenada que son los mejores individuos, generalmente se establece por encima del 70%, el complemento de tal porcentaje se aplica a la segunda mitad de la matriz, para poder diversificar la población de padres, de ese modo la mitad de la población es elegida para hacer parte de los progenitores y constituyen la matriz de padres. Si el número de individuos seleccionados es impar se elige un cromosoma aleatoriamente y se descarta ya que es necesario que el número de padres sea par para poder llevar el operador de cruce. Para la compresión de este operador ver Anexo C.

4.1.4 Operador de cruce

El operador de cruce es un método que facilita compartir la información entre cromosomas por medio de dos individuos para conseguir una descendencia de estos. Los cromosomas son elegidos de manera aleatoria de la matriz de los padres, luego, estos cromosomas son apareados para generar

hijos que tendrán información compartida con los padres. Para este estudio se utiliza un operador de cruce aleatorio. En este operador se genera un numero aleatorio entre 1 y $n-5$, lo que representa un máximo de 4 posiciones a cruzar, esto con el fin de que el hijo no copie todos los genes del padre, sólo el 50% o menos. Este valor va a indicar la cantidad de posiciones que se heredaran del padre 1 (P1) al hijo 1 (S1), las cuales son elegidas aleatoriamente y copiadas en S1 en la misma posición en la que se encuentra en P1, los demás genes del hijo 1 son heredados del padre 2 copiando las posiciones faltantes. Para el segundo hijo (S2) se genera un número aleatorio entre 1 y $n-5$, para indicar la cantidad de posiciones a heredar del padre 2 (P2) y se repite el procedimiento descrito para el hijo 1.

Un ejemplo para dicho método es considerar que existen dos padres P1 [2 1 3 6 5 5 8 8 7] y P2[1 3 2 4 6 5 7 7 9] (Figura 6) los cuales generan dos hijos S1 y S2 con base a la utilización del operador de cruce aleatorio:

- Se selecciona aleatoriamente un número dentro del conjunto de números de operaciones (1,2, 3, ..., n) considerando que dicho valor debe estar entre 1 y $n-5$.
- Este número entre 1 y $n-5$, va a indicar la cantidad de genes que se heredarán, posteriormente de acuerdo con esta cantidad, se generarán aleatoriamente las posiciones que se van a heredar del padre al hijo.
- Para el primer hijo (S1) se heredarán las posiciones asignadas previamente de manera aleatoria del padre 1 (P1) y las demás posiciones faltantes se heredarán con los genes del segundo padre (P2), conservando las mismas posiciones.
- Para el segundo hijo (S2) se heredarán las posiciones asignadas previamente de manera aleatoria del padre 2 (P2) y las demás posiciones faltantes se heredarán con los genes del primer padre (P1), conservando las mismas posiciones.

Teniendo en cuenta P1 y P2 son los cromosomas [2 1 3 6 5 5 8 8 7] y [1 3 2 4 6 5 7 7 9], para el hijo 1 el número aleatorio generado entre 1 y $n-5$ es 2, por lo tanto, se debe heredar 2 posiciones del P1 a S1, aleatoriamente se determina que estas posiciones son la 5 y la 7. Podemos apreciar que S1 conserva las mismas posiciones del P1 los otros genes pertenecen a P2. Para el hijo 2 se elige aleatoriamente un número entre 1 y $n-5$ el cual da como resultado 3 posiciones aleatorias, 1, 3 y 6, las cuales se heredarán de P2, los genes faltantes se toman de P1 en la posición en la que se encuentran los espacios por completar, este proceso se puede apreciar en la Figura 7.

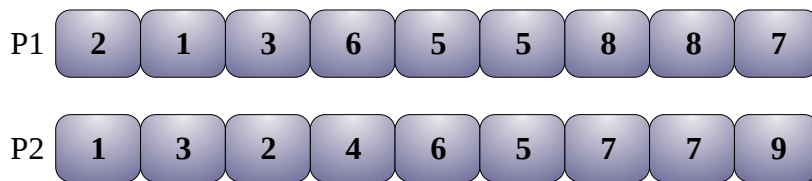


Figura 6. Cromosomas de los padres. P1: Padre 1; P2: Padre 2

Para continuar el proceso genético, los hijos generados por este método son decodificados y el mejor valor obtenido para la función objetivo es guardado con el propósito de prevenir que se pierda, si el individuo es mutado al siguiente paso. Para la comprensión de este operador ver Anexo D.

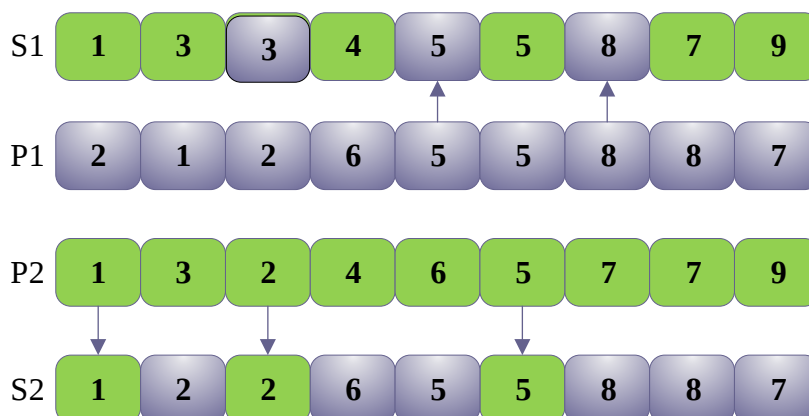


Figura 7. Generación de hijos mediante el operador de cruce aleatorio.

4.1.5 Operador de mutación

El operador de mutación se utiliza para diversificar las características de la población por medio de la modificación de algunos de sus genes de forma aleatoria. Para la presente investigación se utiliza un operador de mutación teniendo en cuenta una técnica la cual implica la generación de una malla binaria aleatoria con valores entre 1 y 0. Por tanto si en una de las posiciones de la malla se encuentra el número 1, el gen en esa posición será mutado de acuerdo a la restricción de tipo de equipo que se puede usar en cada operación, donde las operaciones de despeje solo pueden mutar entre valores de 1 a 3, ya que estas máquinas son las encargadas de llevar a cabo estas operaciones (operaciones de despeje); para las operaciones de servicio médico solamente podrán ser mutadas por valores entre 4 a 6, ya que estas tres máquinas son las únicas que pueden desempeñar este tipo de actividad. Finalmente, para el grupo de operaciones de rescate a víctimas, en la malla solo pueden ser mutadas por valores entre 7 a 9 para cumplir con la restricción. Al culminar la mutación de los individuos, el conjunto de hijos es convertido en la población inicial para la generación próxima. En la Figura 8 se observa cómo se realiza la mutación de S1.

De acuerdo con la técnica de malla binaria se generan valores entre 0 y 1, donde cada posición en la malla que se encuentre con el número 1 será mutada de acuerdo con una restricción donde de 1 a 3 son operaciones de despeje, 4 a 6 operaciones de servicio médico y 7 a 9 operaciones de rescate a víctimas. Y donde se encuentre el número 0 en la malla se deja el mismo valor generado originalmente. De esta manera un hijo es mutado y el *Schedule* se modifica como se muestra en la Figura 8. Para la compresión de este operador ver Apéndice E.

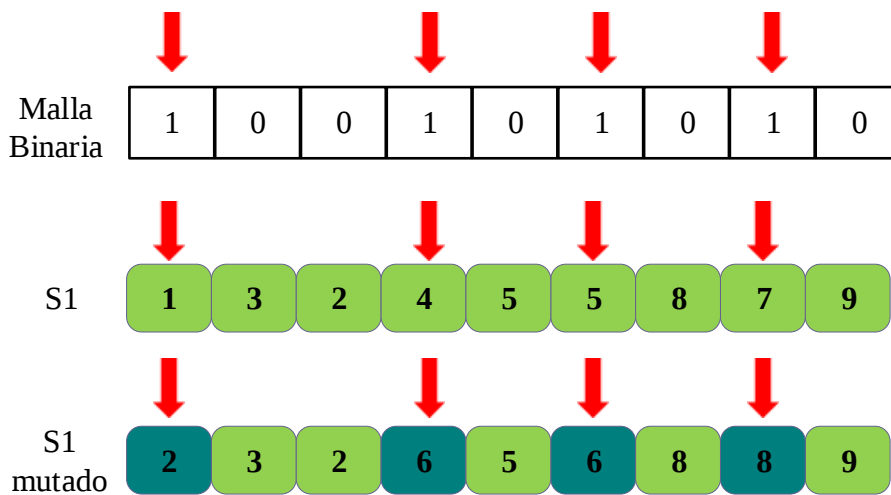


Figura 8. Proceso de mutación por malla binaria.

Finalizada la mutación de los individuos, la matriz de los hijos se convierte en la población inicial para la siguiente generación.

4.1.6 Decodificación del individuo

Una vez se genere un individuo (cromosoma) óptimo, con las operaciones asignados a cada grupo de máquinas se decodifica en un diagrama de gannt y se evalúa la función objetivo, el tipo de representación genética siempre genera cromosomas factibles, por tanto, es posible usar un método aleatorio para la creación de poblaciones iniciales, con el propósito de generar diversificación.

La Figura 9 muestra un individuo con las máquinas previamente programadas para 9 operaciones asignadas ($i=9$), donde las primeras 3 posiciones del individuo indican operaciones de despeje, de la posición 4 a 6 indican operaciones tipo médicas y las posiciones 7 a 9 se refieren a operaciones de rescate a víctimas. Se aprecia que las máquinas 4 y 9 no tiene operaciones asignadas, por lo tanto no aparece en el cromosoma ($m=7$). La Tabla 1 presenta las operaciones por hacer y la secuencia de máquinas conforme al orden de las operaciones.



Figura 9. Individuo

Tabla 1.

Ejemplo de 9 operaciones con 9 máquinas

Operaciones	Secuencia de máquinas
1-2-3	$m_2-m_1-m_3$
4-5-6	$m_6-m_5-m_5$
7-8-9	$m_8-m_8-m_7$

Nota: Cantidad de operaciones de emergencia junto a la secuencia de máquinas asignadas a cada una de las operaciones.

Las máquinas (retroexcavadora $m=1$, motoniveladora $m=2$ y volquetas $m=3$) correspondientes a las operaciones de despeje, realizan las operaciones de emergencia en conjunto, siguiendo la misma ruta. Las máquinas inician el recorrido desde el punto de comando hasta la emergencia simultáneamente, pero no inician sus operaciones asignadas al mismo tiempo ya que el desarrollo de las operaciones de despeje dependen una de la otra según la asignación, de tal manera que las máquinas no pueden iniciar operaciones al mismo tiempo, a diferencia de las máquinas de servicio

médico y rescate a víctimas, ya que estas máquinas no tienen dependencia inician operaciones de emergencia a la vez.

Para el ejemplo del Diagrama de Gantt de la Figura 10, la primera operación de emergencia($i=1$) está asignada a la máquina número 2 ($j=2$) con un peso w_2 , por ser la primera operación programada para esa máquina, la máquina tendrá un tiempo de viaje desde el punto de comando hasta la operación de emergencia asignada $t_{0,1}^1$, que será igual al tiempo de comienzo de la máquina número 1 en la primera operación B_1^1 , seguidamente tendrá un tiempo de procesamiento $t_{1,1}$, por último el tiempo de finalización C_1^1 será igual al tiempo de comienzo más el tiempo de procesamiento. Al evaluar en la función objetivo se multiplica el peso w_2 por el tiempo de finalización de la máquina $w_2 * C_1^1$. Enseguida la segunda operación de emergencia correspondiente a la máquina número 1 ($j=1$) con un peso w_1 , tendrá un tiempo de viaje desde el punto de comando hasta la operación de emergencia $t_{0,1}^1$, que es igual al tiempo de comienzo de la primera operación de la máquina número 2 B_1^2 , como la operación de la máquina número 2 depende de la finalización de la máquina número 1, se adiciona el tiempo de procesamiento de la máquina 1 en la primera operación de la máquina 1 $t_{1,1}$, del mismo modo se adiciona el tiempo de procesamiento de la máquina 2 $t_{1,2}$, finalmente el tiempo de finalización de la máquina dos en su primera operación programada C_1^2 será igual al tiempo de comienzo B_1^2 más los tiempos de procesamiento $t_{1,1}$ y $t_{1,2}$, asimismo se multiplica el peso w_1 por el tiempo de finalización C_1^2 . Para la tercera operación de emergencia correspondiente a la máquina 3 se realiza el mismo procedimiento.

La máquina 6 ($j=6$) va a realizar la cuarta operación y la máquina 5 ($j=5$) las operaciones 5 y 6 ($i=2$), por último la máquina 8 tiene asignadas las operaciones 7 y 8 ($i=2$) y la máquina 7 la

última operación ($i=1$). Tal método se puede detallar mediante el siguiente ejemplo en la Figura 10:

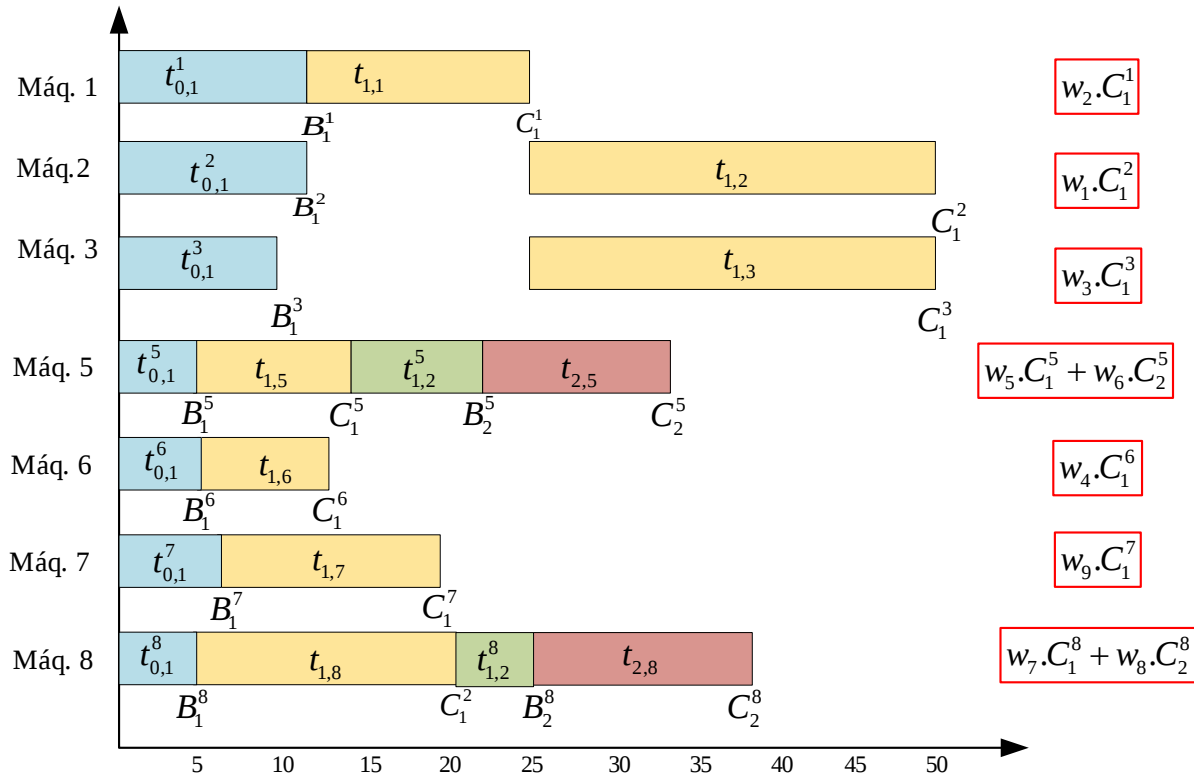


Figura 10. Diagrama de Gantt para el ejemplo de la Tabla 1.

5 Estudio de caso

Para determinar la validez del modelo de solución propuesto, se genera un escenario de un caso de sismo para evaluar la planificación de equipo de emergencia y rescate en la ciudad de Bucaramanga, Santander.

5.1 Especificación del caso

El escenario se centra en la capital del departamento de Santander, la ciudad de Bucaramanga. La ciudad está localizada al Nororiente de Colombia, dentro de una región de alta amenaza sísmica debido a “la existencia de fallas activas que cruzan directamente por ella, la geología de los materiales y la morfología de las altas montañas”[55] además por su proximidad al denominado “nido sísmico” donde hay en promedio 85 micro-sismos diarios según el servicio geológico colombiano [56] [57].

De las 17 comunas en las que se encuentra dividida la ciudad de Bucaramanga, en el caso de estudio, se abarcan 8 de las 17 comunas en Bucaramanga, donde “hay 17 comunas, comuna Nororiental(2), Occidental(4), La Concordia(6), Cabecera del llano(12), Oriental(13), Morrorico(14), Centro(15) y Lagos del Cacique(16)” [58].

5.1.1 La Red de emergencia

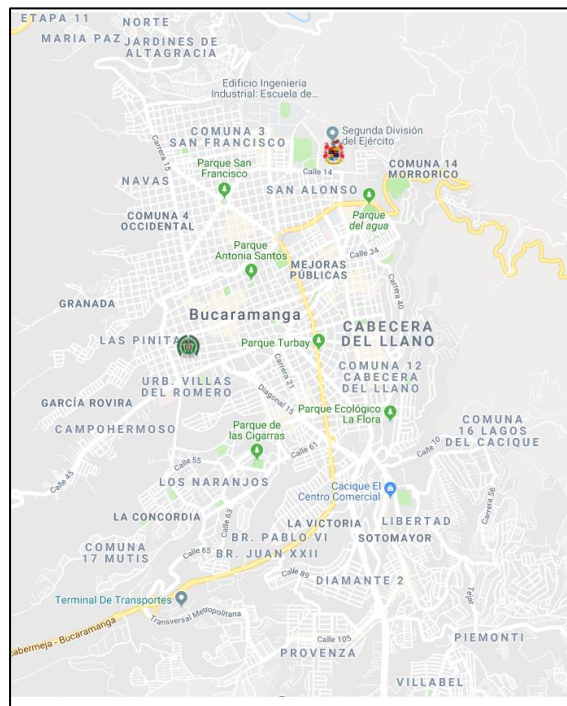
Dentro de la red de emergencia del caso de estudio, se utilizó el sistema de información geográfico de la API de Google Maps, la cual es una herramienta que da acceso a la geolocalización de los puntos para tener en cuenta en la red, sentidos de circulación vial y una representación de la solución en los dos escenarios que se van a generar, cada uno con magnitud sísmica diferente. La información contenida en la red, fue desarrollada gracias a las previas investigaciones de Barrera y Gomez [59], Barreto y Niño [60], Contreras y Martínez [61] y Aguilar [24].

Se determinaron las ubicaciones de los puntos de comando(Figura 11a), las fallas geológicas (Figura 11b), las rutas de emergencia(Figura 11c) y las comunas(Figura 11d) sobre el mapa de la ciudad de Bucaramanga y se hizo énfasis en las zonas que se verían afectadas antes sismos de diferente magnitud con la zonificación geomórfica(Figura 11e) de acuerdo a Maldonado y Chio[62].

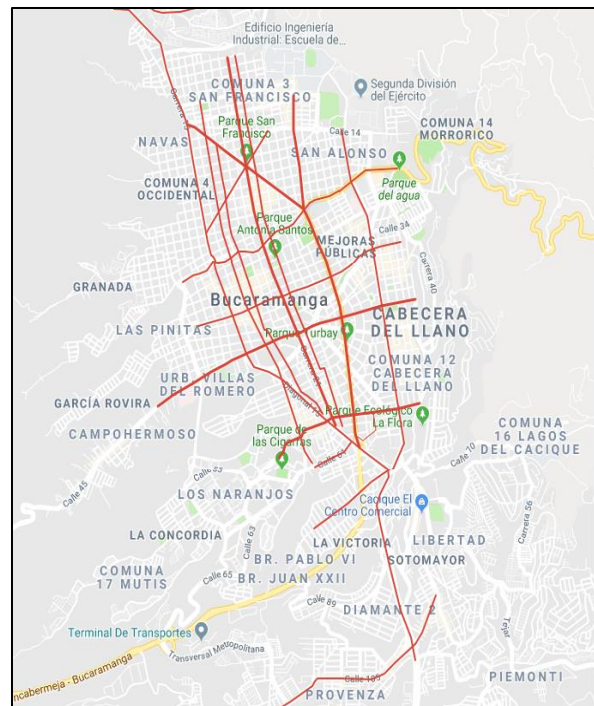
En la presente investigación se tienen en cuenta dos puntos de comando, de donde se asume que la Unidad Municipal de Gestión de Riesgos notifica de las emergencias que se generan. En los puntos de comando, con las operaciones de emergencia, se asignarán a los equipos disponibles, los cuales parten de dichos puntos con sus operaciones asignadas.

Esta red puede ser consultada en el siguiente enlace: [Red Emergencia](#)

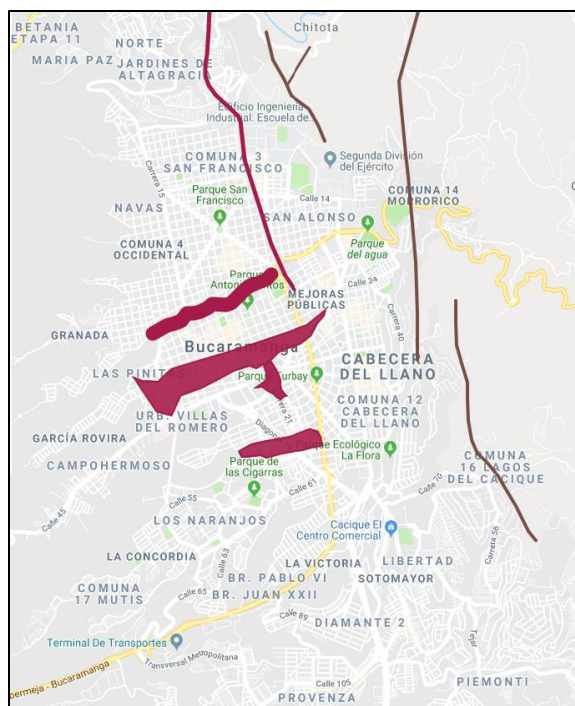
Figura 11. Componentes de la red de emergencia



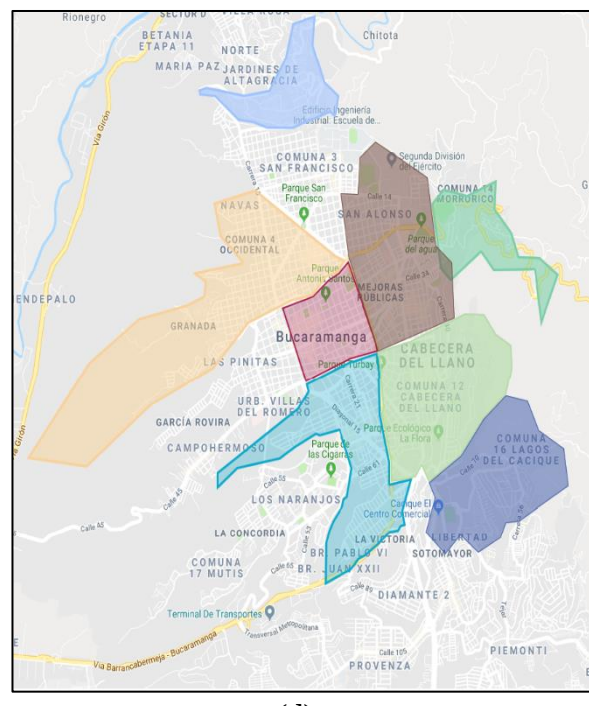
(a)



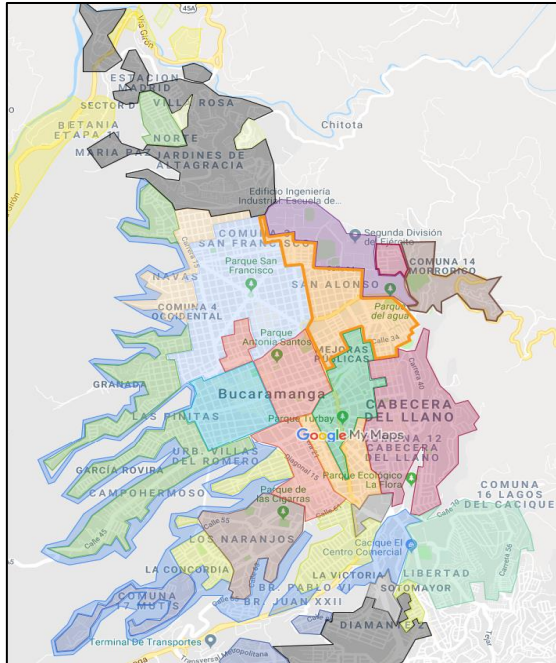
(b)



(c)



(d)



(e)

De acuerdo a la investigación de Maldonado y Chio [62], los escenarios a los que se les dará solución están relacionados con las zonas sísmicas más vulnerables en Bucaramanga como lo muestra la Tabla 2 donde por magnitud se identifican las zonas con un nivel de afectación. De este modo, esta investigación asume 2 escenarios, el primero con nivel de intensidad de 6 donde se generan operaciones de emergencia la Zona 12, Zona 9ª y 11 y el segundo con nivel de intensidad 8 que atiende las emergencias creadas en la Zona 12, Zona 11 y Zona 8, como se muestra en la Figura 12.

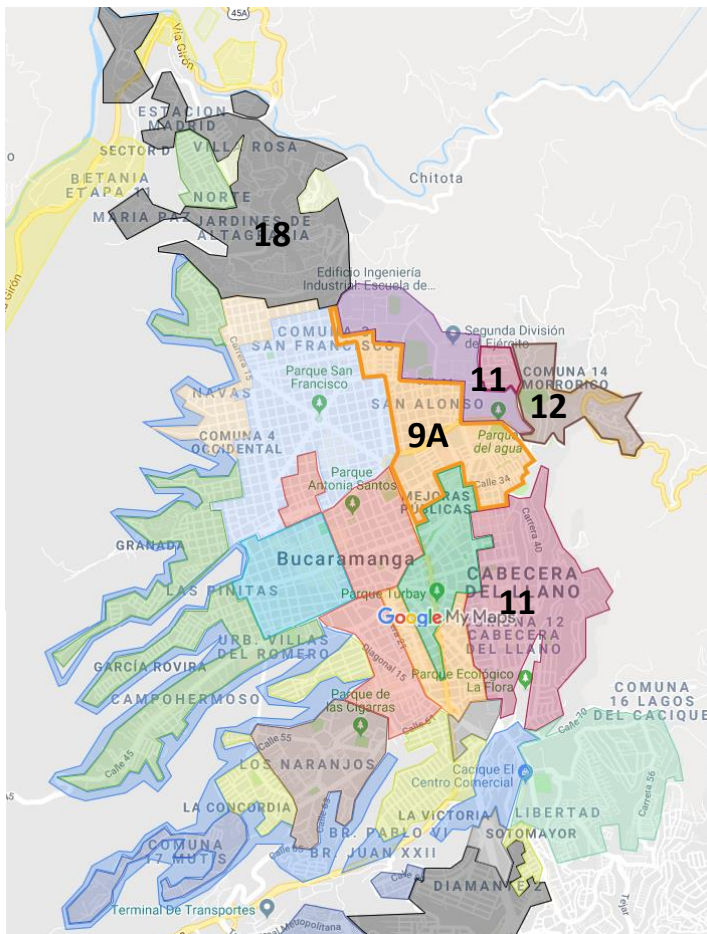


Figura 12. Zonas afectadas según zonificación geomórfica.

Tabla 2.

Zonas más afectadas de acuerdo a los escenarios

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 nivel de sismo y nivel de afectación. Adaptado de: “Identificación de las zonas sísmicas más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga” por Maldonado y Chio

Así mismo, el número de emergencias que se generan en cada área también se establecen de acuerdo con el nivel de intensidad y cercanía a las fallas geológicas.

5.2 Pesos de las operaciones

Este parámetro se refiere al nivel de priorización y complejidad de las operaciones de emergencia que se generan y está sujeto al índice de vulnerabilidad promedio de las edificaciones de Bucaramanga de acuerdo con la información de la zonificación geomórfica realizada por Maldonado y Chio [63]. Como se asume que las operaciones son conocidas, se establece el peso para el tipo de operación de emergencia.

Para la presente investigación, las operaciones han sido clasificadas para cada grupo de máquinas y se establecen pesos para cada operación los cuales son difíciles de estimar con precisión, por esta razón en esta investigación se asignan a cada una de las operaciones

previamente conocida un peso en una escala de 1 a 5, con el propósito de determinar la importancia de cada uno de los puntos de emergencia generados en los escenarios de prueba, siendo $w=5$ un peso de nivel alto y $w=1$ un peso de nivel bajo.

Por lo que para las zonas con pesos de 1 a 3 no se requiere una presencia inmediata de las maquinas establecidas en el problema, a diferencia de los pesos de 4 y 5, que requieren atención inmediata de los recursos para mitigar el daño ocasionado por el desastre sísmico. Con la determinación de dichos pesos se pueden obtener mejores resultados al momento de ejecutar el programa ya que con esta clasificación se puede tener una aproximación a operaciones por hacer post-desastres. Los pesos se establecieron de acuerdo con la cercanía de las localidades a las fallas geológicas y las zonas más vulnerables según Maldonado *et al.* [62] a sufrir daños caso de un sismo en la ciudad de Bucaramanga.

Las operaciones para esta investigación fueron establecidas según la opinión de expertos pertenecientes a organismos de socorro, por lo tanto, se asume que las operaciones de emergencia son conocidas y se describen así: la maquinaria amarilla (retroexcavadora, motoniveladora y volquetas) llevan a cabo operaciones de despeje de camino con peso $w=4$ y despeje de área con peso $w=4$, estos pesos se definen de acuerdo con el nivel de dificultad para operar, siendo despeje de caminos una operación que implica la acción de desocupar la ruta para llegar a la zona afectada y despeje de área que se relaciona con la liberación de espacios a atender en la emergencia para realizar el rescate oportuno a las víctimas. De la misma forma se realiza este procedimiento para establecer los tipos de operaciones de emergencia para rescate a víctimas (Policía Nacional, Ejército nacional y Bomberos Bucaramanga), los cuales son: rescate urbano, que implica el rescate a víctimas que se encuentran en las distintas zonas en amenaza de la ciudad, rescate en alturas, que se define como el tipo de rescate en el que la víctima se encuentra en condición de ser auxiliada y

se encuentre a determinada altura y rescate en estructuras colapsadas que hace referencia al rescate que se debe realizar a una víctima que se encuentre en condición de atrapamiento bajo una estructura demolida, todas tienen un peso $w=4$. Para las emergencias médicas (Ambulancias, defensa civil y cruz roja) se definen 3 tipos: conato de emergencia, que se enuncia como un accidente el cual puede ser valorado y controlado de forma sencilla, es decir la víctima no sufre lesiones graves si no superficiales, establecida con un peso $w=3$, otro de los tipos de emergencia médica es la emergencia parcial que hace referencia a un accidente que para ser controlado necesita de la actuación de equipos especiales del centro médico y de los organismos públicos, con un peso $w=4$, y finalmente se encuentra la emergencia General la cual implica de la actuación de todos los equipos médicos debido a la magnitud de la emergencia a atender, definida con un peso $w=5$.

5.3 Generación de escenarios

En la presente investigación, el algoritmo propuesto da solución a dos escenarios de prueba, el primero con magnitud 6 y el segundo con magnitud 8 de acuerdo con la escala Mercalli. Los escenarios se desarrollan teniendo en cuenta la información expuesta anteriormente en esta sección.

5.3.1 Nodos de la red de emergencia

La red consiste en el esquema de transporte, donde se tiene en cuenta la información disponible en Google Maps para los sentidos viales y se asume que las vías de emergencia se encuentran en buen estado para transitar. En la red se consideran la ubicación de los puntos de comando y las ubicaciones donde se generan operaciones de emergencia, así:

Puntos de comando: Se consideran dos puntos de comando, en donde se encuentran los equipos de emergencia preparados para llevar a cabo las operaciones de emergencia asignado a

cada uno. El primer punto es el Comando de policía ubicado en la calle 41 No. 11-44 el segundo es el Batallón Quinta Brigada ubicado en la Carrera 33ª No. 18-09

Puntos de emergencia: Se consideran 8 puntos de emergencia con determinadas operaciones, de acuerdo con el nivel de afectación ante la magnitud del sismo, la vulnerabilidad de Bucaramanga y la proximidad a las fallas geológicas. Así para el escenario con magnitud sísmica 6 se tienen las siguientes operaciones: despeje de área, conato de emergencia, emergencia parcial, emergencia general, rescate urbano, rescate en estructuras colapsadas y rescate en alturas. Para el escenario con magnitud sísmica 8 se tienen las operaciones: despeje de área, despeje de caminos, conato de emergencia, emergencia parcial, emergencia general, rescate urbano, rescate en estructuras colapsadas y rescate en alturas.

5.3.2 Tiempos

Se definieron los tiempos de viaje desde el punto de comando a cada punto de emergencia (Ver Apéndice F), para ello se tuvo en cuenta el tiempo establecido por la API de Google Maps, en el cual se muestra en detalle la distancia recorrida por un vehículo hacia cada localidad teniendo en cuenta los sentidos viales para realizar el recorrido y el tiempo requerido para llegar al destino solicitado. En la figura 13 se muestra un ejemplo de la toma del tiempo desde uno de los puntos de comando establecidos hacia una localidad:



De la misma forma se realiza este procedimiento para establecer los tiempos de recorrido por las máquinas al viajar de un punto de emergencia a otro (Ver Apéndice H), es decir se utiliza dicha herramienta para la toma del tiempo requerido para cada una de las maquinas teniendo en cuenta la velocidad máxima de cada una y de esta manera dar finalización con todas las operaciones requeridas por las maquinas en cada uno de los puntos que las soliciten. A pesar de que la distancia sea la misma para todas las maquinas no todas tardan el mismo tiempo de viaje, ya que además de tener en cuenta el tiempo estándar establecido por la aplicación de Google se tuvo en cuenta el peso y velocidad promedio de las máquinas para calcular cuánto tiempo se debía adicionar al estándar y definir el tiempo de viaje de las máquinas de la forma más exacta posible, muchos de los datos fueron facilitados por un experto en maquinaria amarilla, el señor Jose Luis Martínez

Serrano, quien es uno de los directores de obras en la constructora PH de la ciudad de Bucaramanga y el Capitán Ángelo Pedraza, director del cuerpo de bomberos de la ciudad de Bucaramanga.

Adicional a los tiempos mencionados anteriormente para este problema, también se requirió el cálculo de cada uno de los tiempos de procesamiento de las maquinas en cada una de las operaciones a realizar (Ver Apéndice G), es decir se realizó una toma de tiempos para establecer de la manera más precisa posible el tiempo que se toma cada una de las maquinas en culminar con sus operaciones en las zonas afectadas, para ello también se tomó en cuenta la opinión de expertos mencionados en el párrafo anterior, los cuales se encuentran capacitados para la manipulación de las máquinas involucradas en el problema y además cuentan con la experiencia de trabajo en estas. En donde el señor Jose Luis Martínez aportó información necesaria para establecer los tiempos de maquinaria amarilla teniendo en cuenta la capacidad de procesamiento de cada una de las estas, del mismo modo, el capitán Ángelo Pedraza brindó información estimada del tiempo máximo de procesamiento de las máquinas de bomberos ante la respuesta a emergencias.

6 Resultados Computacionales

Según el caso de estudio especificado en el ítem anterior, se elaboraron 2 escenarios para evaluarlo, los cuales tienen magnitud sísmica de 6 y 8 según la escala de Mercalli. En dichos escenarios se ejecuta el algoritmo genético propuesto en la sección 4.

Los resultados del algoritmo se dan mediante la exploración del espacio de solución, el cual encuentra una solución factible representada mediante un cromosoma, cuyo tiempo de finalización ponderado representa el mínimo local óptimo del problema. La solución representa una secuencia de máquinas asignadas a cada operación de emergencia en las localidades que demandan.

6.1 Resultados escenarios

A los dos escenarios de prueba se les dio solución mediante el algoritmo genético propuesto. Para la ejecución del algoritmo genético se tiene tiempos de viaje desde los puntos de comando a cada localidad en emergencia (Ver Apéndice F), tiempos de procesamiento de cada equipo de emergencia en cada operación (Ver Apéndice G), tiempos de viaje de los equipos entre localidades (Ver Apéndice H), también se tuvo en cuenta el inventario de equipos de emergencia en existencia y funcionamiento en la ciudad de Bucaramanga, donde se cuenta con 3 retroexcavadoras, 3 motoniveladoras, 20 volquetas, 61 ambulancias, 5 vehículos de defensa civil, 5 vehículos de la cruz roja, 12 vehículos de la Policía Nacional, 13 vehículos de Ejército Nacional y 13 máquinas de bomberos.

- **Escenario 1: Sismo nivel 6**

Para el escenario con intensidad sísmica 6 se consideran 4 localidades (Figura 14.): localidad 1 (Barrio los pinos), localidad 2 (Barrio Cabecera del Llano), localidad 3 (Barrio Morrórico) y la localidad 8 (Zona norte), donde en cada localidad se generan emergencias de tipo despeje

(maquinaria amarilla), médicas (ambulancias, cruz roja, defensa civil) y rescate a víctimas (Policía Nacional, Ejército Nacional, Bomberos) las cuales son: despeje de área, conato de emergencia, emergencia parcial, emergencia general, rescate urbano, rescate en estructuras colapsadas y rescate en alturas.

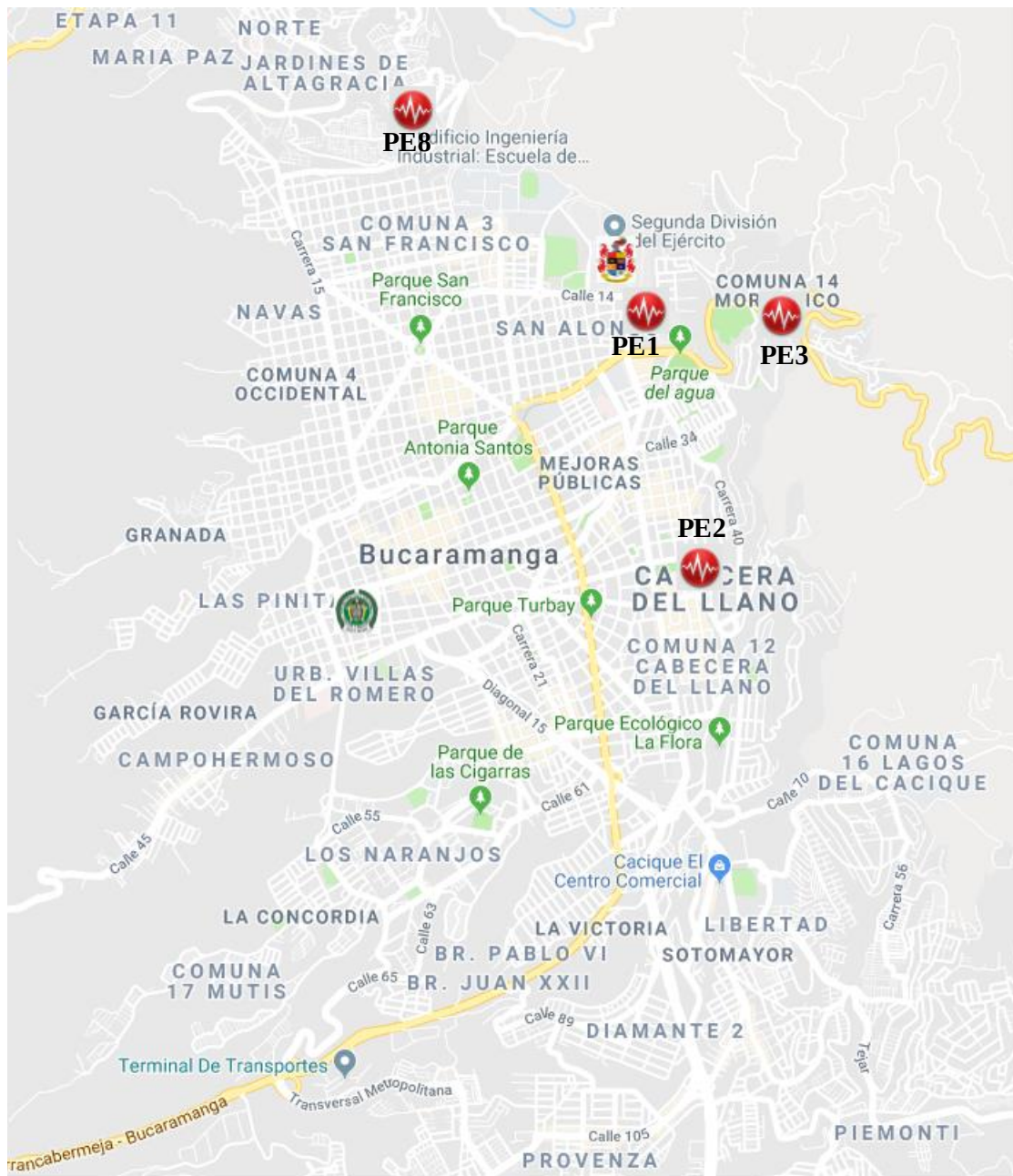


Figura 14. Mapa de zonas afectadas en un sismo de magnitud 6.

Una vez ejecutado el algoritmo, este genera soluciones que se interpretan genéticamente como un cromosoma de tamaño 9, este tamaño está sujeto a la cantidad de operaciones de emergencia previamente conocidas, donde las primeras 3 posiciones del individuo indican operaciones de despeje, de la posición 4 a 6 indican operaciones tipo médicas y las posiciones 7 a 9 se refieren a operaciones de rescate a víctimas. Como uno de los resultados finales de la ejecución del algoritmo, se obtiene una gráfica tridimensional que describe la cantidad de localidades (eje x), la cantidad de generaciones (eje y) y el tiempo (eje z) como se ve en la Figura 15.

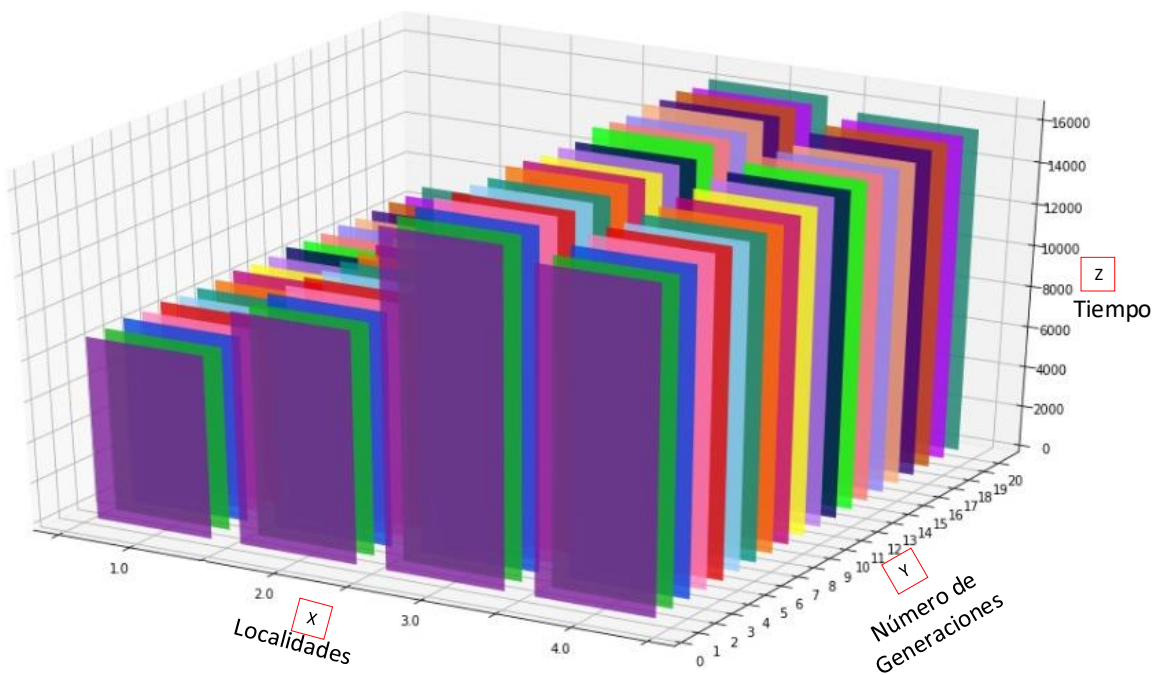


Figura 15. Representación de los resultados computacionales por medio de una gráfica tridimensional en el escenario con magnitud sísmica 6.

El cromosoma presenta una secuencia de máquinas cuya solución es la asignación de estas, como se puede ver en la Figura 15, que indica las máquinas que llevan a cabo las operaciones de emergencia para cada localidad (Punto de Emergencia) con un tiempo de finalización total ponderado.

SOLUCIÓN		
Punto de Emergencia	Cromosoma	Tiempo Total
PE1 		$: \sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 9036 \text{ s} \rightarrow 2,51 \text{ h}$
PE2 		$: \sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 11366 \text{ s} \rightarrow 3,15 \text{ h}$
PE3 		$: \sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 16340 \text{ s} \rightarrow 4,53 \text{ h}$
PE8 		$: \sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 15758 \text{ s} \rightarrow 4,54 \text{ h}$

Figura 16. Resultados de la asignación de equipos de emergencia en cada localidad con el tiempo total ponderado de las operaciones de emergencia para una magnitud sísmica de nivel 6.

Se aprecia que el cromosoma tiene la misma asignación de máquinas para cada una de las localidades debido a que al realizar las 20 iteraciones (generaciones) el algoritmo converge a ese cromosoma el cual representa en la función objetivo el mínimo local óptimo.

Para cada punto de emergencia (PE) se necesita 1 motoniveladora y 2 volquetas para operaciones de despeje de área, 2 ambulancias y un equipo de la cruz roja, para operaciones de servicio médico, por último 2 equipos de la Policía Nacional y un equipo de bomberos, para el rescate a víctimas. El punto de emergencia 1 (Barrio los pinos) requiere un tiempo de 2,51 horas, el punto de emergencia dos (Barrio Cabecera del Llano) toma un tiempo de 3,15 horas, el punto de emergencia tres (Barrio Morrorico) 4,53 horas y el punto de emergencia ocho (Zona norte) 4,54 horas.

Cabe resaltar que los tiempos de finalización están sujetos a los pesos de cada una de las operaciones de emergencia, la disponibilidad de los equipos de emergencia, los tiempos de recorrido de una localidad a otra si se requiere y los tiempos de viaje de cada máquina asignada desde el punto de comando donde esta se encuentre hasta los puntos de emergencia que demanden.

El tomador de decisiones puede considerar a criterio la cantidad de veces que puede ejecutar el algoritmo para obtener una solución.

- **Escenario 2: Sismo nivel 8**

Para el escenario con intensidad sísmica 8 se consideran 8 localidades (Figura 14.): localidad 1 (Barrio los pinos), localidad 2 (Barrio Cabecera del Llano), localidad 3 (Barrio Morrórico), localidad 4 (Zona centro Av. Quebradaseca), localidad 5 (Zona Av. La rosita), localidad 6 (Barrio Sotomayor), localidad 7 (Barrio Lagos del cacique) y la localidad 8 (Zona norte), como se aprecia en la Figura 17, donde en cada localidad se generan emergencias de tipo despeje (maquinaria amarilla), médicas (ambulancias, cruz roja, defensa civil) y rescate a víctimas (Policía Nacional, Ejército Nacional, Bomberos) las cuales son: despeje de área, despeje de caminos, conato de emergencia, emergencia parcial, emergencia general, rescate urbano, rescate en estructuras colapsadas y rescate en alturas.

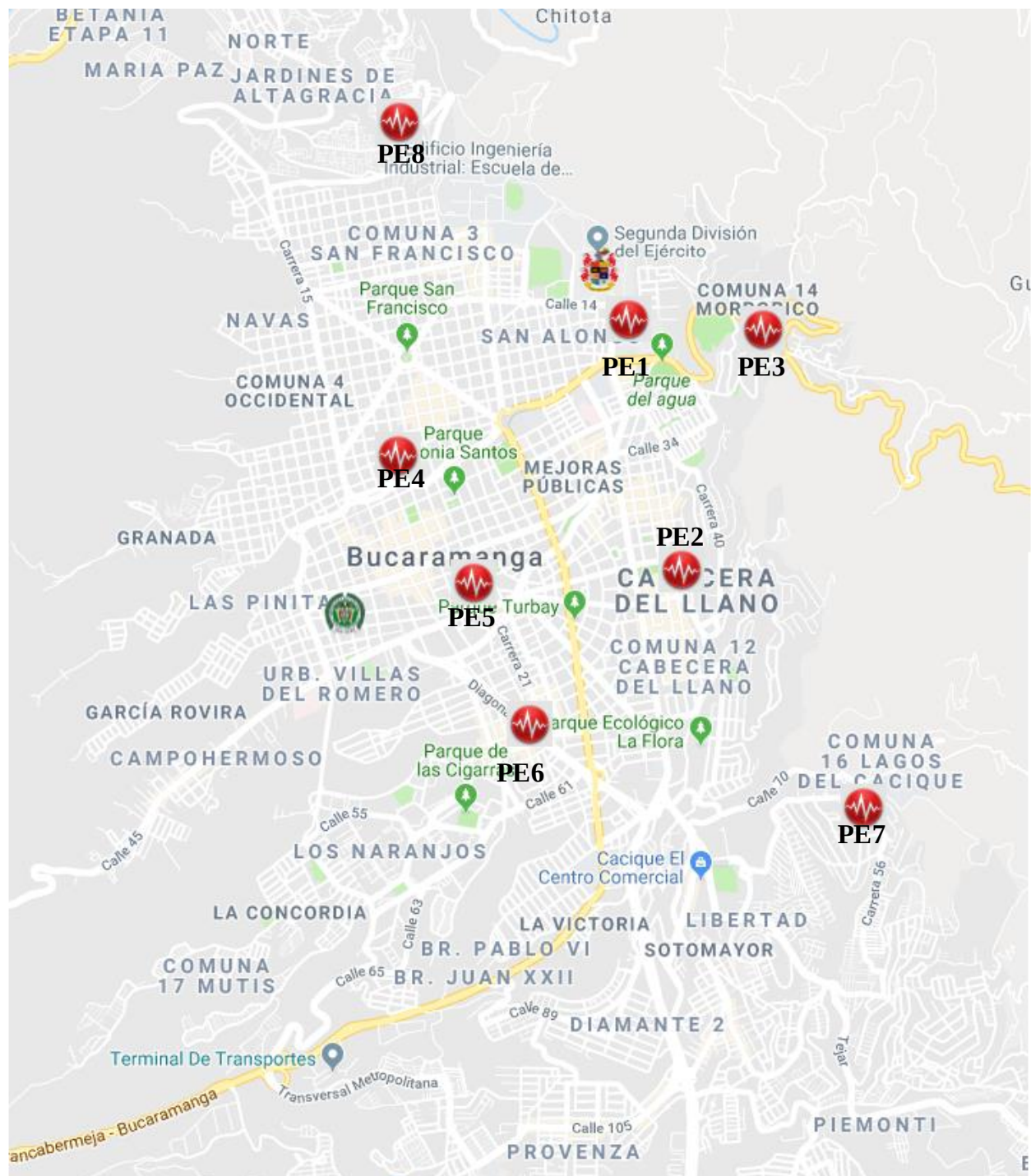


Figura 17. Mapa de zonas afectadas en un sismo de magnitud 8.

Una vez ejecutado el algoritmo, este genera soluciones que se interpretan genéticamente como un cromosoma de tamaño 12 donde las primeras 6 posiciones del individuo

indican operaciones de despeje de área y de caminos, de la posición 4 a 6 indican operaciones tipo médicas y las posiciones 7 a 9 se refieren a operaciones de rescate a víctimas.

Como uno de los resultados finales de la ejecución del algoritmo, se obtiene una gráfica tridimensional que describe la cantidad de localidades (eje x), la cantidad de generaciones (eje y) y el tiempo (eje z) como se ve en la Figura 18.

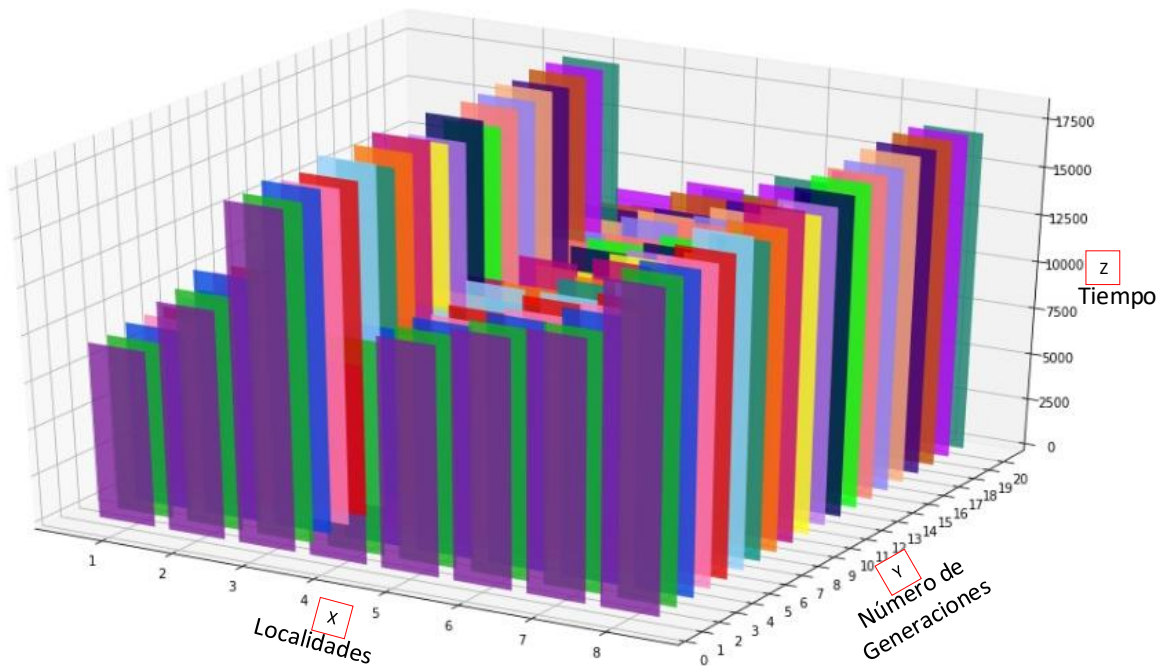


Figura 18. Representación de los resultados computacionales por medio de una gráfica tridimensional en el escenario con magnitud sísmica 8.

El cromosoma presenta una secuencia de máquinas cuya solución es la asignación de estas, como se puede ver en la Figura 18, que indica las máquinas que llevan a cabo las operaciones de emergencia para cada localidad (Punto de Emergencia) con un tiempo de finalización total ponderado.

SOLUCIÓN		
Punto de Emergencia	Cromosoma	Tiempo Total
PE1 		$\sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 9472 \text{ s} \rightarrow 3,63 \text{ h}$
PE2 		$\sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 12398 \text{ s} \rightarrow 3,44 \text{ h}$
PE3 		$\sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 17889 \text{ s} \rightarrow 4,96 \text{ h}$
PE4 		$\sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 10551 \text{ s} \rightarrow 2,93 \text{ h}$
PE5 		$\sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 11992 \text{ s} \rightarrow 3,33 \text{ h}$
PE6 		$\sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 13206 \text{ s} \rightarrow 3,66 \text{ h}$
PE7 		$\sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 13827 \text{ s} \rightarrow 3,84 \text{ h}$
PE8 		$\sum_{i=1}^n w_i C_i^m = 16972 \text{ s} \rightarrow 4,71 \text{ h}$

Figura 19. Resultados de la asignación de equipos de emergencia en cada localidad con el tiempo total ponderado de las operaciones de emergencia para una magnitud sísmica de nivel 8.

Se aprecia que el cromosoma tiene la misma asignación de máquinas para cada una de las localidades debido a que al realizar las 20 iteraciones el algoritmo converge a ese cromosoma el cual representa el mínimo local óptimo.

Para cada punto de emergencia (PE) se necesita 1 retroexcavadora, 2 motoniveladora y 3 volquetas para operaciones de despeje de área, 2 equipos de defensa civil y 1 ambulancia para operaciones de servicio médico, por último 2 equipos de Bomberos y un equipo de Ejército Nacional y un equipo de bomberos, para el rescate a víctimas. El punto de emergencia 1 (Barrio

los pinos) requiere un tiempo de 3,63 horas, el punto de emergencia dos (Barrio Cabecera del Llano) toma un tiempo de 3,44 horas, el punto de emergencia tres (Barrio Morrórico) toma 4,96 horas, el punto de emergencia cuatro (Zona Centro) 2,93 horas, el punto de emergencia cinco (Zona Av. La Rosita) 3,33 horas, el punto de emergencia seis (Barrio Sotomayor) 3,66 horas, el punto de emergencia siete (Barrio Lagos del Cacique) 3,84 horas y por último el punto de emergencia ocho (Zona norte) 4,71 horas.

Cabe resaltar que los tiempos de finalización están sujetos a los pesos de cada una de las operaciones de emergencia, la disponibilidad de los equipos de emergencia, los tiempos de recorrido de una localidad a otra si se requiere y los tiempos de viaje de cada máquina asignada desde el punto de comando donde esta se encuentre hasta los puntos de emergencia que demanden.

7 Conclusiones

Se desarrollo un prototipo de software basado en la metodología de algoritmo genético que busca la optimización del tiempo de respuesta ante un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga mediante la programación de equipo de emergencia, que va dirigido a entes gubernamentales encargados de la gestión de riesgos para el apoyo a la toma de decisiones.

Considerando las características propias del problema, se tuvo en cuenta en el modelo matemático aspectos que permitieran asemejar el modelo a la realidad de un problema de programación de equipo de emergencia de acuerdo con un número de equipos limitado para la ciudad de Bucaramanga ante un desastre sísmico.

Por medio del algoritmo genético desarrollado se concluyó que, en la solución, el algoritmo aprovecha la capacidad de exploración y logra converger al mínimo local óptimo dando respuesta al objetivo planteado.

Se propuso un operador de cruce basado en generación de posiciones a cruzar aleatorias, y un operador de mutación basado en una malla binaria generada aleatoriamente logrando una mayor diversificación en los individuos.

Los valores de solución no varían mucho en cada generación, sin embargo, se notan disminuciones en el tiempo después de varias iteraciones.

Debido al tamaño reducido de la ciudad de Bucaramanga (aproximadamente 528.683 habitantes [64]), es posible obtener respuestas eficientes y realistas del problema en cuestión.

La ciudad de Bucaramanga cuenta con un equipo apto para responder ante una emergencia sísmica, sin embargo, se evidenció que la disponibilidad de maquinaria amarilla es baja, por lo tanto, las operaciones correspondientes a despeje de área emplean mayor tiempo.

8 Recomendaciones

Realizar un diseño de experimentos que permita identificar cuales parámetros del algoritmo son significativos en el desempeño de la solución. De manera que estos puedan ser ajustados a valores que mejoren los resultados encontrados.

Caracterizar las zonas más vulnerables de la ciudad de Bucaramanga por medio de cuadrantes para socializar con la comunidad planes de emergencia y realizar simulacros con el apoyo de la unidad municipal de gestión de riesgos y desastres para generar concientización y lograr resultados favorables ante un desastre sísmico.

El código de programación del problema queda abierto al público para que se use en el desarrollo de otros métodos y para su libre modificación que permitan reducir costos computacionales en la determinación de soluciones.

Promover la realización de trabajos y proyectos de grado en el área de investigación de operaciones utilizando algoritmos genéticos y evolutivos en más estudiantes.

Desarrollar soluciones a la medida para las pequeñas, mediana y grandes organizaciones usando algoritmos similares al propuesto como una alternativa de bajo coste y eficiente para la asignación de operaciones.

Fomentar el aprendizaje de lenguajes de programación en estudiantes de ingeniería industrial y demás carreras asociadas que les permitan crear interés en este campo de investigación para proyectos futuros.

Adaptar esta investigación a ciudades más grandes donde sea más precaria la atención a situaciones de personas afectadas en diversas emergencias, donde afecte más el desperdicio de tiempo debido al transporte o tiempos de ejecución de operaciones.

Referencias Bibliográficas

- [1] F. Fiedrich, F. Gehbauer, and U. Rickers, “Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters,” *Saf. Sci.*, vol. 51, no. 1–3, pp. 41–57, 2000.
- [2] BBC News Mundo, “Los 10 terremotos más potentes y mortíferos de la historia en América Latina,” 21-Sep-2017.
- [3] EL PAÍS, “Un potente terremoto causa más de 1.800 muertos en Nepal,” 26-Apr-2015.
- [4] BBC News Mundo, “Terremoto de magnitud 7,8 en la zona costera de Ecuador deja más de 600 muertos,” 20-Apr-2016.
- [5] Banco Mundial, “Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas,” *Sist. Nac. Inf. para la Gestión del Riesgo Desastr.*, p. 438, 2012.
- [6] P. K. Freeman, L. A. Martin, J. Linnerooth-Bayer, K. Warner, and G. Pflug, “Gestión de riesgo de desastres naturales,” *Sist. Nac. para la Gestión Integr. del Riesgo Desastr. Estrategias Financ. para la Reconstrucción en Caso Desastr. Nat.*, p. 84, 2003.
- [7] CRED, “Base de datos del Centro de Investigación sobre Epidemiología de los Desastres CRED.” [Online]. Available: <http://www.emdat.be/database>.
- [8] C. D. E. L. C. De, “ALCALDIA DE BUCARAMANGA Secretaria del Interior Gestión del Riesgo de Desastres Contiene : Respuesta a la proposición.”
- [9] E. S. Hurtado and C. C. Gomez, “Atenuacion De Intensidades Sismicas En El Territorio Colombiano,” *Rev. Geofis. Colomb.*, vol. 2, no. 3, pp. 37–44, 1995.
- [10] BUCARAMANGA. SECRETARIA DE PLANEACIÓN, “Plan de Ordenamiento

- Territorial de Segunda Generación.” p. 296, 2014.
- [11] L. N. Van Wassenhove, “Blackett memorial lecture humanitarian aid logistics: Supply chain management in high gear,” *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 57, no. 5, pp. 475–489, 2006.
- [12] J. Holguín-Veras, M. Jaller, L. N. Van Wassenhove, N. Pérez, and T. Wachtendorf, “On the unique features of post-disaster humanitarian logistics,” *J. Oper. Manag.*, vol. 30, no. 7–8, pp. 494–506, 2012.
- [13] L. CORNEJO, C; VARGAS, F y ARAGON, “Localización de almacenes y distribución de ayuda humanitaria para atención de damnificados en caso de desastre natural,” *Innov. Eng. Technol. Educ. Compet. Prosper.*, pp. 1–10, 2013.
- [14] E. I. Mora-ochomogo, J. Mora-vargas, and M. Serrato, “A Qualitative Analysis of Inventory Management Strategies in Humanitarian Logistics Operations,” *Int. J. Comb. Optim. Probl. Informatics*, vol. 7, no. 1, pp. 40–53, 2016.
- [15] C. Yong, C. Ling, F. Güendel, O. T. a Kulháněk, and L. I. Juan, “Seismic Hazard and Loss Estimation for Central America,” *Nat. hazards*, pp. 161–175, 2002.
- [16] K. Panapinun and P. Charnsethikul, “Vehicle Routing and Scheduling Problems: a Case Study of Food Distribution in Greater Bangkok,” *Veh. Routing Probl. Latest Adv. New Challenges*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, 2007.
- [17] F. Sandoval, L. Sancho, T. Universidad, and F. A. Sandoval, “Emergency-Route , Buscador de rutas de evacuación para escenarios de emergencia y rescate,” no. March 2015, 2014.
- [18] D. C. Colombiana, D. General, D. D. E. Operaciones, and P. D. E. Emergencia, “dl . .,(2.,” 1991.

- [19] M. Gendreau and J. Y. Potvin, “Metaheuristics in combinatorial optimization,” *Ann. Oper. Res.*, vol. 140, no. 1, pp. 189–213, 2005.
- [20] C. Blum and A. Roli, “Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 35, no. 3, pp. 189–213, 2003.
- [21] V. M. E. Lazo Eche Edwin, Segura Gutierrez Fabio, “Un algoritmo eficiente para problemas single machine con tiempos de procesamiento difusos,” vol. 10, 2016.
- [22] S. Gawiejnowicz, “Basics of the scheduling theory,” vol. Springer B, no. Scheduling, pp. 35–46, 2008.
- [23] L. F. Moreno, “Desarrollo de una herramienta analítica - heurística para resolver el problema de la programación de tareas (scheduling),” *Inf. año Sabático, Univ. Nac. Colomb. - Sede Medellín.*, 2005.
- [24] K. J. Aguilar Imitola and Y. T. Perez Diaz, “Un algoritmo memético para la minimización del makespan en el problema del Job Shop Scheduling,” Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [25] Mario de J. Pérez Jiménez; Fernando Sancho Caparrini, *Máquinas moleculares basadas en ADN*, Editorial. 2003.
- [26] W. Härmäläinen, “Class NP, NP-complete, and NP-hard problems.”
- [27] J. F. Chicano García, “Metaheurísticas e Ingeniería del Software,” p. 281, 2007.
- [28] A. Díaz *et al.*, “Optimización Heurística Y Redes Neuronales En Dirección De Operaciones E Ingeniería,” p. 235, 1996.
- [29] P. García, J. Maheut, P. Garcia, and J. Maheut, “Modelos y métodos de Investigación de

- operaciones,” *Univ. Politécnica Val.*, 2011.
- [30] I. Artificial, A. Garc, S. Editorial, and I. A. Valencia, “Inteligencia Artificial . Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial,” vol. 7, 2003.
- [31] F. Glover, “Paths for Integer Programming,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 13, no. 5, pp. 533–549, 1986.
- [32] A. S. Pérez, “Una introducción a la Computación Evolutiva.,” 1996.
- [33] F. Berzal Jiménez, “Computación Evolutiva,” *Intel. Artif. Métodos, técnicas y Apl.*, p. 88, 2008.
- [34] A. Hermosilla and B. Barán, “Comparación de un sistema de colonias de hormigas y una estrategia evolutiva para un Problema Multiobjetivo de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo,” *30ma Conf. Latinoam. Informática*, pp. 379–388, 2004.
- [35] J. Arranz de la Peña and A. Parra Truyol, “Algoritmos Genéticos,” *Asign. Intel. en Redes Comun. , Prof Julio Villena Román, Trab. del curso 06/07*, vol. SESIÓN 1b, p. 8, 2007.
- [36] John Henry Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, 1975.
- [37] A. S. Thomas and M. Mizushima, “Logistics training: Necessity or luxury?,” *Forced Migr. Rev.*, vol. 22, pp. 60–61, 2005.
- [38] Y. J. Zheng, H. F. Ling, X. L. Xu, and S. Y. Chen, “Emergency scheduling of engineering rescue tasks in disaster relief operations and its application in China,” *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 22, no. 3, pp. 503–518, 2015.
- [39] D. McLoughlin, “A Framework for Integrated Emergency Management,” *Public Adm. Rev.*,

- vol. 45, no. May, p. 165, 1985.
- [40] Q. Wang and Z. Ren, “Emergency logistics programming in natural disasters,” *2nd Int. Conf. Inf. Sci. Eng. ICISE2010 - Proc.*, pp. 218–221, 2010.
- [41] Group Esmerald, “Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management.” 2016.
- [42] F. Pérez-Galarce, L. J. Canales, C. Vergara, and A. Candia-Véjar, “An optimization model for the location of disaster refuges,” *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 59, pp. 56–66, 2017.
- [43] Y. J. Zheng, H. F. Ling, X. L. Xu, and S. Y. Chen, “Emergency scheduling of engineering rescue tasks in disaster relief operations and its application in China,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 22, no. 3, pp. 503–518, 2015.
- [44] C. Mejia-Argueta, J. Gaytán, R. Caballero, J. Molina, and B. Vitoriano, “Multicriteria optimization approach to deploy humanitarian logistic operations integrally during floods,” *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 25, no. 3, pp. 1053–1079, 2018.
- [45] J. Holguín-Veras, E. Taniguchi, M. Jaller, F. Aros-Vera, F. Ferreira, and R. G. Thompson, “The Tohoku disasters: Chief lessons concerning the post disaster humanitarian logistics response and policy implications,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 69, pp. 86–104, 2014.
- [46] L. S. Reyes-rubiano, C. L. Quintero-araújo, and A. F. Torres-ramos, “Modelo Matemático para la Programación de Personal Especializado en Logística Humanitaria- Post-Desastre,” *Lacpei 2014*, no. JANUARY, pp. 1–7, 2014.
- [47] P. Van Hentenryck, R. Bent, and C. Coffrin, “Strategic planning for disaster recovery with

- stochastic last mile distribution,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 6140 LNCS, pp. 318–333, 2010.
- [48] Y. Zheng, S. Chen, and H. Ling, “Efficient multi-objective tabu search for emergency equipment maintenance scheduling in disaster rescue,” *Optim. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 89–100, 2013.
- [49] C. Fikar, M. Gronalt, and P. Hirsch, “A decision support system for coordinated disaster relief distribution,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 57, pp. 104–116, 2016.
- [50] Y. Ren, “Emergency Scheduling for Forest Fires Subject to Limited Rescue Team Resources and Priority Disaster Areas,” 2016.
- [51] F. S. Chang, J. S. Wu, C. N. Lee, and H. C. Shen, “Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp. 2947–2956, 2014.
- [52] F. Wex, G. Schryen, S. Feuerriegel, and D. Neumann, “Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 235, no. 3, pp. 697–708, 2014.
- [53] C. Cao, C. Li, Q. Yang, and F. Zhang, “Multi-objective optimization model of emergency organization allocation for sustainable disaster supply chain,” *Sustain.*, vol. 9, no. 11, 2017.
- [54] Y.-J. Zheng, H.-F. Ling, and J.-Y. Xue, “Disaster rescue task scheduling: An evolutionary multiobjective optimization approach,” *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–1, 2014.
- [55] P. Asociado, “IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS SÍSMICAMENTE MÁS

VULNERABLES EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA,” no. 2, 2005.

- [56] “RiesgoSismicoAcueductoBucaramanga(Almeyda_2002).pdf.” .
- [57] SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, “Últimos sismos en Colombia,” 2018, 2018.
[Online]. Available: <https://www2.sgc.gov.co/sismos/sismos/ultimos-sismos.html>.
- [58] K. J. Aguilar Imitola, “Un Modelo Multiobjetivo De Localización-Ruteo Para La Planeación Logistica En La Fase De Preparación a Sismos,” *Univ. Ind. Santander*, p. 95, 2017.
- [59] A. Barrera Navarro and A. Gomez Hernandez, “Un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos post-desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga,” Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [60] M. Barreto Robles and P. Niño Niño, “Un algoritmo memético para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga.,” Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [61] M. A. Contreras Arevalo and A. Martinez Galvis, “Un problema de localización multiobjetivo en la fase de preparación para desastres por sismos en la ciudad de Bucaramanga.,” 2016.
- [62] E. Maldonado and E. Chio, *Identificación de las zonas sísmicas más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga.*, UIS Ingeni. 2005.
- [63] E. Maldonado and E. Chio, *Vulnerabilidad sísmica en centros urbanos.* Bucaramanga, Santander, 2008.
- [64] DANE, “Resultados y proyecciones (2005-2010),” 2005. [Online]. Available:

http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/ProyeccionMunicipios2005_2020.xls.

Apéndices

Apéndice A. Pseudocódigo algoritmo genético.

Entrada n: Numero de generaciones a evaluar

Salida: Soluciones optimas

Inicio

i=0

Paso 1. Generar población inicial P(S) usando el método (gen_Pob_Ini_Maq)

Paso 2. Generar escenario según magnitud de sismo

Paso 3. Evaluar función objetivo: $\min \theta(\pi) = \sum_{i=1}^n w_i C_i^m$

Paso 5. Para i desde 1 hasta n:

Paso 5.1 Aplicar operador de selección

Paso 5.2 Aplicar operador de cruce

Paso 5.3 Aplicar operador de mutación

Paso 5.4 Aplicar operador de evaluar escenario

Paso 5.5 Guardar los primeros mejores resultados

Paso 5.6 i = i+1

Paso 5.7 Fin del ciclo

Paso 6. Retornar salida: soluciones optimas

Fin

Apéndice B. Pseudocódigo generación de la población inicial

Entrada I: Numero de generaciones a evaluar

Salida: Generaciones evaluadas

Inicio

i=0

Paso 1 Variable TMAC1= [1,2,3];

Paso 2 Variable TMAC2= [4,5,6];

Paso 3 Variable TMAC3= [7,8,9];

Paso 4 Variable PROD1= Producto cartesiano (TMAC1);

Paso 5 Variable PROD2= Producto cartesiano (TMAC2);

Paso 6 Variable PROD3= Producto cartesiano (TMAC3);

Paso 7 Variable PRODG= [];

Paso 8 Para i=1: Tamaño (PROD1)

 Para j=1: Tamaño (PROD2)

 Para k=1: Tamaño (PROD3)

 PROG.ARREGLAR (i+j+k);

Paso 9 Desordenar aleatoriamente (PRODG);

Paso 10 VARIABLE PRODGPEQ= PRODG [1,n];

Paso 11 Retornar PROGPEQ;

Fin

Apéndice C. Pseudocódigo operador selección

Entrada S: Soluciones preóptimas

Salida: Soluciones preóptimas seleccionadas

Inicio

Paso 1. Ordenar entrada según tiempo de solución

Paso 2. Dividir entrada ordenada a la mitad y guardar la primera mitad en una variable y la segunda mitad en otra variable

Paso 3 Guardar la primera mitad en la variable 1

Paso 4 Guardar la segunda mitad en la variable 2

Paso 5 Desordenar aleatoriamente soluciones en variable 1

Paso 6. Desordenar aleatoriamente soluciones en variable 2

Paso 7. Guardar en variable 3 el 70% inicial de variable 1

Paso 8 Guardar en variable 4 el 30% inicial de la variable 2

Paso 9 Concatenar soluciones de la variable 3 con soluciones de la variable 4 y guardarlas en la variable 5

Paso 10 Retornar variable 5

Fin

Apéndice D. Pseudocódigo operador cruce

Entrada C: Soluciones seleccionadas preóptimas

Salida: Soluciones cruzadas preóptimas

Inicio

Paso 1 Variable n= (número de máquinas en un cromosoma- 5)

Paso 2 Tamaño (entrada)

Paso 3 Para i= 1:2:T-1 Variable 1= Aleatorio (1,n)

Paso 4 Variable VECPOS 1= [] (vector vacío)

Paso 5 Variable VECPOS 2= []

Paso 6 Para j=1: Variable 1

VECPOS1.AGREGAR(ALEATORIO(1,n+5));

Paso 7 Aleatorio(1,n)

Paso 8 Para 1: Variable 2

VECPOS2.AGREGAR(ALEATORIO (1, n+5));

Paso 9 Para cada j en VECPOS 1:

HIGO1= SWAP (ENTRADA[i][j], ENTRADA[i+1][j])

Paso 10 Para cada j en VECPOS2:

HIGO2= SWAP(ENTRADA[i+1][j], ENTRADA [i][j])

Paso 11 Salida. Agregar (HIJO 1, HIJO2);

RETORNAR SALIDA

Fin

Apéndice E. Pseudocódigo operador mutación

Entrada M: Hijos de soluciones cruzadas

n= Tamaño M

Salida M (mutado)

Inicio

T= Tamaño (C[1])

Paso 1 Para i= 1:n

 m= Generar malla binaria(T);

Paso 2 Para j=1:T

 Si m[j]= 1

 Si $j \leq 3$:

 C [i][j] = ALEATORIO (1,3);

 Si $j > 3$ & $j \leq 9$:

 C[i][j] = ALEATORIO (7,9);

 Fin Para j;

 Fin Para i;

 Retornar M;

Fin

