

Algoritmo genético de base biológica para la solución del problema de asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos en escenarios inciertos.

Camila Andrea González Aldana

Daniela Chaverra Palacio

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero industrial

Director: Karin Julieth Aguilar Imitola

M.Sc. Ingeniería Industrial

Codirector: Javier Eduardo Arias Osorio

Magister en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

En primer lugar, quiero agradecer a Dios y a la Virgen por guiar mi camino y darme la fortaleza en mis momentos de debilidad para afrontar cada nuevo reto que mi formación académica colocaba ante mí.

A mi hija Ana Lucia, mis padres y mis hermanos quienes son el motor de mi vida, mi constante apoyo y mi polo a tierra, pues sin ellos el camino que he recorrido hasta el momento hubiese sido imposible sin su constante e incondicional amor.

A mi compañera de tesis Daniela, quien me apoyó en mi formación y con quien trabajé en este proyecto, quien aportó lo mejor de sí para lograr culminar de la mejor manera este proyecto.

A los docentes que guiaron mi proceso formativo, quienes me ayudaron a expandir mis conocimientos.

A todos aquellos que en algún momento me guiaron con sus consejos y me apoyaron en mi proceso formativo.

Camila Andrea González Aldana

Dedicatoria

*Primero a Dios, por ser mi guía y mi fortaleza para superar cada obstáculo, por darme
fuerzas para nunca desistir.*

*A mis padres Olga Lucia y José Raúl por su gran amor, dedicación y esfuerzo para poder
brindarme un mejor futuro. A ellos, que son mi motor y mis ganas de seguir luchando cada día
por ser mejor. A mi nona, mi hermana y mis sobrinos que siempre han estado para mí,
brindándome su amor incondicional y llenando mi vida de alegría.*

*A mi hija Sara Lucia y a mi esposo Andy Quintero que ha sido un gran ejemplo y guía en
mi formación profesional y laboral.*

*A la psicóloga Paola Andrea Rueda Rodríguez que fue un gran apoyo y gran consejera
en momentos de dificultad.*

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

A todas las personas que hicieron parte de mi formación personal y profesional.

Daniela Chaverra Palacio

Agradecimientos

Al grupo de investigación OPALO, por brindarnos las herramientas necesarias para la ejecución de nuestro proyecto.

A nuestra profesora y directora del proyecto, Karin Julieth Aguilar Imitola, por brindarnos su confianza, entusiasmo, tiempo y dedicación, además de compartir sus amplios conocimientos.

Al profesor Javier Eduardo Arias Osorio, por la asesoría brindada durante el desarrollo de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	15
1 Generalidades del proyecto	18
1.1 Planteamiento del problema.	18
1.2 Justificación del proyecto	22
1.3 Objetivos.....	24
1.3.1 Objetivo general	24
1.3.2 Objetivos específicos.....	24
1.4 Metodología.....	24
2 Revisión de la literatura.	26
2.1 Análisis bibliométrico.....	26
2.2 Análisis preliminar de la literatura	31
3 Marco teórico.....	38
3.1 Logística Humanitaria	38
3.2 Desastres naturales	39
3.3 Gestión de desastres.....	39
3.3.1 Mitigación.....	40
3.3.2 Preparación	40
3.3.3 Respuesta	40
3.3.4 Recuperación	40
3.4 Optimización	40
3.4.1 Variables	41

3.4.2	Función objetivo	41
3.4.3	Restricciones.....	41
3.5	Optimización estocástica	41
3.6	Optimización multiobjetivo	42
3.7	Métodos de solución de un problema de optimización combinatoria	42
3.7.1	Algoritmos exactos	43
3.7.2	Algoritmos heurísticos.....	43
3.7.3	Heurísticas constructivas	43
3.7.4	Algoritmos metaheurísticos.....	43
3.7.5	Algoritmo Genético	44
3.7.6	Algoritmo genético de base biológica BGA.....	46
3.7.7	Problema de asignación	49
3.7.8	Modelo del problema de asignación	50
3.7.9	Complejidad computacional	51
3.7.10	Clases de complejidad	51
4	Modelo matemático	52
5	Diseño del Algoritmo genético de base biológica	60
5.1	Representación de los individuos	65
5.2	Mejora de la solución mediante operadores genéticos	66
5.3	Migración.....	67
5.4	Operadores de selección	67
5.4.1	Selección por el método de la ruleta.....	68
5.5	Operador de cruce.....	69

5.5.1	Operador de cruce uniforme	70
5.6	Operador de mutación	71
5.6.1	Mutación por inserción.	71
5.7	Actualización de las mejores soluciones	72
6	Resultados.....	72
6.1	Implementación del BGA al escenario de desastres simultáneos en Santander	72
6.1.1	Levantamiento de la información	73
6.1.2	Escenario de prueba.....	76
6.2	Análisis del comportamiento generacional del algoritmo	76
6.3	Análisis de varianza para el número de generaciones	77
6.4	Resultados de la implementación del algoritmo al escenario de Santander	82
7	Conclusiones.....	88
8	Recomendaciones	89
	Referencias Bibliográficas	90

Lista de Figuras

Figura 1 Zonas con probabilidad de remoción en masas en el departamento de Santander.	
Adaptado de GFDRR.....	19
Figura 2 Zonas con probabilidad de inundaciones en el departamento de Santander. Adaptado de GFDR.....	19
Figura 3 Planificación de la metodología del proyecto de grado. Autoría propia	24
Figura 4 Publicaciones realizadas por año. Adaptado de biblioshiny (2020).....	27
Figura 5 Producción de autores a lo largo del tiempo. Adaptado de biblioshiny (2020)	28
Figura 6 Número de publicaciones por fuentes relevantes. Adaptado de biblioshiny (2020)	28
Figura 7 Publicaciones realizadas por países. Adaptado de biblioshiny (2020).....	29
Figura 8 Palabras claves. Adaptado de biblioshiny (2020).....	30
Figura 9 Proceso del BGA adaptado (Jui Sheng Chou, 2014).....	49
Figura 10 Ciclo algoritmo BGA. Tomada de (Jui Sheng Chou, 2014).....	61
Figura 11 vector 1 número de clúster, autoría propia	66
Figura 12 vector 2 cantidad de ciudades de cada clúster, autoría propia.....	66
Figura 13 Cruce uniforme.....	71
Figura 14 Mutación por inserción.....	72
Figura 15 : Mapa de susceptibilidad a fenómenos de inundación en el departamento de Santander. Tomada de Dirección de Gestión del Riesgo de Santander.....	73
Figura 16 Mapa de amenaza por fenómenos de movimientos en masa en el departamento de Santander. Tomada la Dirección de Gestión del Riesgo de Santander.....	74
Figura 17 Resultado de costo versus número de generaciones para las ciudades donde ocurren desastres. Tomado del software Python (2021)	77

Figura 18 Grafico de intervalo de costo vs iteraciones. Adaptado de Excel	80
Figura 19 Diferencias de las medias para costo. Adaptado de Excel	81
Figura 20 Grafica de costo del escenario en Santander. Adaptado de Python	83

Lista de Tablas

Tabla 1 Comparación de supuestos. Autoría propia	36
Tabla 2 Tabla de unidades	56
Tabla 3 Tipo de maquinaria. Autoría propia.....	75
Tabla 4 Costos de viaje y operación. Autoría propia.....	76
Tabla 5 Municipios donde ocurren desastres en el escenario de prueba. Autoría propia	76
Tabla 6 Número de iteraciones vs costo	78
Tabla 7 resumen análisis de varianza ANOVA. Adaptado de Excel.....	79
Tabla 8 tabla ANOVA. Adaptado de Excel.....	79
Tabla 9 prueba tukey entre niveles. Adaptada de Excel	81
Tabla 10 Asignación maquinaria a cimitarra tipo de desastre remoción en masa. Adaptado de Python	83
Tabla 11 Asignación de maquinaria a cimitarra tipo de desastre inundación. Adaptado de Python	84
Tabla 12 Asignación de maquinaria a Puerto Wilches para desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python.....	85
Tabla 13 Asignación de maquinaria a Puerto Wilches para desastres tipo inundación. Adaptado de Python	85
Tabla 14 Asignación de maquinaria para Vélez desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python	86
Tabla 15 Asignación de recursos a Málaga para desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python	86

Tabla 16 Asignación de maquinaria a Bolívar para desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python.	87
Tabla 17 Asignación de maquinaria a Bolívar para desastre tipo inundación. Adaptado de Python	87
Tabla 18 Asignación de maquinaria a Hato para desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python	88

Lista de Apéndices**Ver documentos adjuntos en la base de datos de la Biblioteca**

Apéndice A. población de Santander según censo 2018 y cantidad por tipo de maquina en cada ciudad de Santander

Apéndice B. Total de maquinaria en cada ciudad por tipo de desastre y capacidad total que existe en cada ciudad.

Apéndice C. Tiempos de viaje entre ciudades de maquinaria para atendedor desastres de tipo remoción en masa.

Apéndice D. Tiempos de viaje entre ciudades de maquinaria para atendedor desastres de tipo inundación.

Apéndice E. Coordenadas de cada municipio de Santander en términos de latitud y longitud.

Apéndice F. Análisis de varianza con tabla ANOVA Y TUKEY

Apéndice G. Capacidades de diferentes tipos de maquinaria Amarilla.

Apéndice H. Artículo de carácter tipo publicable sobre el proyecto titulado Algoritmo genético de base biológica para la solución del problema de asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos en escenarios inciertos.

Apéndice I. Construcción en Python del algoritmo BGA para dar solución al problema de asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos.

RESUMEN

TÍTULO: ALGORITMO GENÉTICO DE BASE BIOLÓGICA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS AL PLANIFICAR DESASTRES NATURALES SIMULTÁNEOS EN ESCENARIOS INCIERTOS.*

AUTORES: CHAVERRA PALACIO, DANIELA **

GONZÁLEZ ALDANA, CAMILA ANDREA **

PALABRAS CLAVE: ALGORITMO EN BASE BIOLÓGICA, ALGORITMO GENÉTICO, ASIGNACIÓN DE RECURSOS, DESASTRES SIMULTÁNEOS, MIGRACIÓN, ÁREA DE RESERVA ELITE

DESCRIPCIÓN

En esta investigación se implementa un algoritmo en base biológica para dar solución al problema de asignación de maquinaria a la hora de atender desastres simultáneos de tipo remoción en masa e inundación que se presentan en el departamento de Santander. Para abordar este problema, se formula un modelo matemático que contempla el comportamiento estocástico de los desastres naturales mediante la probabilidad de que ocurran este tipo de escenarios. Este modelo tiene como objetivo minimizar el costo total, considerando la penalización cuando se exceda el tiempo mínimo para responder o no se cumpla con la demanda contemplando tres costos: el costo total de transportar maquinaria, el costo total de operación de la maquina y el costo total de penalización por unidad de demanda insatisfecha. Por otra parte, se realiza una revisión de literatura sobre investigación de asignación de recursos al planificar desastres simultáneos en escenarios inciertos. Dicha información es usada para que el algoritmo determine la mejor propuesta de asignación de maquinaria en el escenario de desastres simultáneos que ser presente en Santander. En este algoritmo, se aplican conceptos puntuales de selección por ruleta, cruce y mutación los cuales son comunes en al algoritmo genético tradicional, adicional se implementan conceptos como área de reserva elite y migración, los cuales representan el adicional que da el algoritmo en base bilógica.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director MS.c Karin Julieth Aguilar Imitola.
Codirector MS. Javier Eduardo Arias Osorio

Abstract

TITLE: BIOLOGICAL-BASED GENETIC ALGORITHM FOR THE SOLUTION OF THE RESOURCE ALLOCATION PROBLEM WHEN PLANNING SIMULTANEOUS NATURAL DISASTERS IN UNCERTAIN SCENARIOS*

AUTHORS: CHAVERRA PALACIO, DANIELA**

GONZÁLEZ ALDANA, CAMILA ANDREA**

KEY WORDS: BIOLOGICAL BASED ALGORITHM, GENETIC ALGORITHM, RESOURCE ALLOCATION, SIMULTANEOUS DISASTERS, MIGRATION, ELITE RESERVE AREA

DESCRIPTION

In this research, a biological-based algorithm is implemented to solve the problem of machinery allocation when dealing with simultaneous disasters of the mass removal and flood type that occur in the department of Santander. To address this problem, a mathematical model is formulated that contemplates the stochastic behavior of natural disasters through the probability of these types of scenarios occurring. The objective of this model is to minimize the total cost, considering the penalty when the minimum time to respond is exceeded or the demand is not met, considering three costs: the total cost of transporting machinery, the total operating cost of the machine and the cost total penalty per unit of unsatisfied demand. On the other hand, a literature review is conducted on resource allocation research when planning simultaneous disasters in uncertain scenarios. This information is used for the algorithm to determine the best machinery allocation proposal in the scenario of simultaneous disasters to be present in Santander. In this algorithm, specific concepts of selection by roulette, crossing and mutation are applied, which are common in the traditional genetic algorithm, additional concepts such as elite reserve area and migration are implemented, which represent the additional that the algorithm gives on a biological basis.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director MS.c Karin Julieth Aguilar Imitola. Codirector MS. Javier Eduardo Arias Osorio

Introducción

Los desastres naturales como incendios, huracanes, terremotos, inundaciones, remoción en masa, entre otros, son producto de varios factores que contribuyen a su aparición, la mayoría de estos son causados por los seres humanos, debido a que, por actividades como la contaminación, la explotación indiscriminada de recursos naturales como minerales, bosques y suelos, y la construcción de viviendas en zonas urbanas, afectan el medio ambiente. Según la ONU, la frecuencia de desastres relacionados con el clima está aumentando constantemente, dado que en los últimos 20 años se han presentado aproximadamente un promedio de 30.000 fallecidos y más de 4.000 millones de heridos o damnificados. Este tipo de eventos ocasiona un impacto negativo en el sector social, ambiental, de infraestructura, y humanitario.

Entre los peores desastres registrados alrededor del mundo se encuentran: El *huracán Katrina, Estados Unidos*, con aproximadamente 836 muertos el 28 de agosto de 2005 en la ciudad de Nueva Orleans. Trajo consigo casas destruidas, calles inundadas, y escenas impactantes que tuvieron que enfrentar los habitantes de un sector representativo para el país. El *tsunami de 2011, Japón*, a 100 km de la costa, las placas tectónicas empujaron una masa de agua que se llevó a personas, calles, casas, siendo uno de los peores escenarios de desastres naturales al rededor del mundo y una de las catástrofes climáticas más graves del siglo XXI.

Al igual que muchos países en América latina, Colombia enfrenta retos como el desplazamiento de población en zonas rurales a las zonas urbanas, la degradación ambiental y el cambio acelerado del uso del suelo. Estas condiciones hacen que el país sea propenso a ocurrencia de fenómenos naturales como sismos, inundaciones y deslizamientos; la materialización de estos riesgos en desastres, afectan el desarrollo del país e impiden y retrasan las metas de bienestar

social. Colombia ha sido pionera en América latina en el desarrollo de una visión más integral frente al tratamiento de los riesgos y desastres, pese a estos esfuerzos las amenazas por los fenómenos naturales cada vez son más amplio, dado que se estima que entre el 2000 y 2007 se perdieron aproximadamente más de 2 millones de hectáreas de bosque en el país, lo cual es un factor importante de la degradación de los suelos, que genera una susceptibilidad a inundaciones y deslizamientos. (Ana Campos G., 2012)

Entre los desastres que más han afectado al país se encuentran: El *terremoto y tsunami en Tumaco*, el 12 de diciembre de 1979 a 75 kilómetros de Tumaco en el océano pacifico se generó un terremoto de 7,9 grados en la escala de Richter causando olas de 6 metros de altura que azotaron a esta población, aproximadamente 450 personas murieron, más de 1.000 personas quedaron heridas y 5.000 viviendas destruidas. (Villada S. C., 2015). La *Avalancha de Armero*, el 13 de noviembre de 1985 el volcán Nevado del Ruiz expulso gases y materiales que derritieron la capa de nieve, la cual produjo una avalancha que siguiendo el río Lagunilla llego al municipio de Armero, en el Tolima el cual quedó cubierto por lodo y demás materiales que arrastro el volcán, aproximadamente 25.000 habitantes quedaron sepultados y 15.000 quedaron damnificados.

Debido a que los desastres naturales son imprevistos, razón por la cual los datos de cuando ocurren, como la duración y magnitud son datos que sirven para estimaciones con un gran margen de incertidumbre para eventos posteriores y consumen grandes cantidades de recursos, estos últimos, suelen ser escasos y a menudo son específicos para cierto tipo de necesidad, puesto que sirven para protección de las personas y disminuir los efectos del desastre. Surge la importancia de desarrollar herramientas, que ayuden a una adecuada asignación, transporte y distribución de recursos.

Este proyecto de investigación plantea el reto de desarrollar la solución para un problema de asignación de recursos en caso de desastres simultáneos, siendo un factor que aumenta la complejidad del mismo, el cual se define como dos o más desastres que se superponen temporalmente, que pueden ser geográficamente distantes pero que demandan el mismo conjunto de recursos, enfocándose en los recursos especializados para la atención de desastres de tipo inundación y remoción de masa; en las zonas más vulnerables de Santander haciendo uso de un algoritmo de base biológica.

Objetivos específicos	Numerales relacionados
Identificar modelos de optimización estocástica para el problema de asignación de recursos, a través de una revisión de literatura.	Capítulo 2
Desarrollar un modelo matemático estocástico para la asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos.	Capítulo 4
Construir en Python un algoritmo BGA para dar solución al problema de asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos.	Capítulo 5
Implementar el algoritmo desarrollado en un escenario de múltiples desastres para el departamento de Santander	Capítulo 12, 13 y apéndice 8
Elaborar un artículo publicable en base a la investigación realizada.	Apéndice 9

1 Generalidades del proyecto

1.1 Planteamiento del problema.

En los últimos años han ocurrido un gran número de desastres en el planeta que viene acompañados de otros fenómenos, como el terremoto y tsunami en indonesia; el 28 de septiembre la isla Cébeles fue sacudida por un terremoto de 7,5 grados, que luego generó un fuerte tsunami, el desastre natural más potente del 2018 que dejó 1.234 muertos, más de 5.000 desaparecidos y 61.000 desplazados; o el terremoto de Papúa, Nueva Guinea que provocó aislamientos de pueblos enteros, al menos 160 personas fallecieron y 300 resultaron heridas, el temblor generó deslizamientos de tierra y destruyó varios pueblos.

Las consecuencias de los fenómenos naturales no son ajenas a la región Caribe. En Colombia la temporada de lluvias de la niña 2010-2011 trajo consigo 8 mil viviendas destruidas, más de 400 mil daños en otras, 3.5 millones de personas damnificadas, pérdidas económicas y daños sin precedentes por inundaciones repentinas, deslizamientos de tierra y otros eventos de peligro. En el 2017 y 2018, se presentaron deslizamientos de tierra e inundaciones que afectaron a todo el país, dejando cientos de muertos y daños en el desarrollo social y económico. Los impactos que tuvieron estos eventos sobre la población, los recursos y el medio ambiente, se pueden relacionar a la capacidad de preparación frente a los desastres.

El departamento de Santander debido a su geografía es altamente propenso a fenómenos naturales o antrópicos en temporada de lluvias como lo son la remoción en masa, deslizamientos, inundaciones o temblores debido a que en la Mesa de los Santos está ubicado el segundo nido sísmico del mundo después de Afganistán.

En la figura 6 se evidencia la información suministrada por la Global Facility For Disaster Reduction And Recovery (GFDRR) (ThinkHazard, Globas Facility for Disaster Reduction and Recovery, 2017), de la alta predisposición de remoción en masa que se presenta en el departamento de Santander, lo que significa que se presentan unos patrones de lluvia, pendientes del terreno, geología, suelo, cubierta de terreno y terremotos que hacen que los desprendimientos de tierras localizados sean un constante peligro, así mismo, la figura 7 muestra el peligro de inundaciones en las diferentes zonas del departamento.

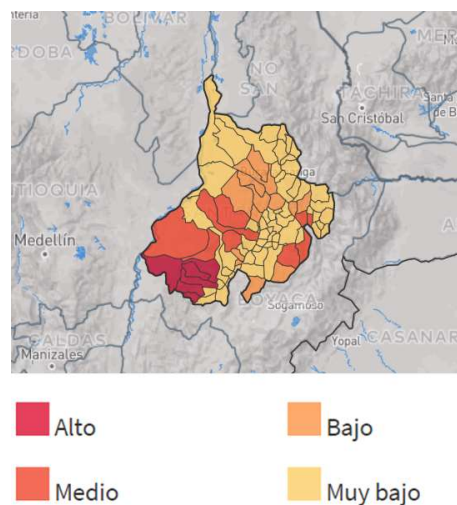


Figura 1 Zonas con probabilidad de remoción en masas en el departamento de Santander. Adaptado de GFDRR

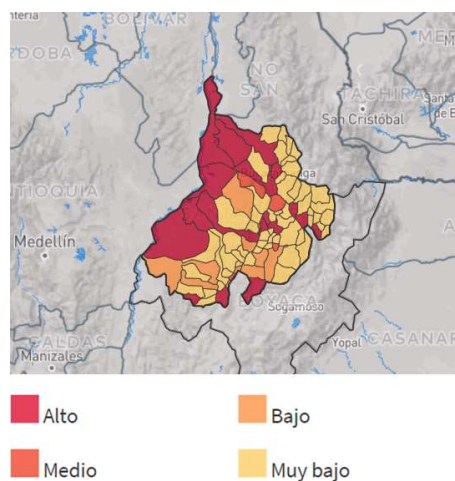


Figura 2 Zonas con probabilidad de inundaciones en el departamento de Santander. Adaptado de GFDR

Debido al cambio climático que está alterando la estabilidad de las pendientes y lechos de roca por las precipitaciones o la temperatura, es difícil determinar cuándo y dónde se producirán grandes avalanchas de rocas e inundaciones; considerando el alto riesgo en el que se encuentra la región, una falta de planeación estratégica en el departamento para la respuesta ante emergencias puede generar un mayor impacto.

La ocurrencia de desastres, genera desafíos para cada uno de los involucrados; sin embargo las políticas actuales son proactivas con un enfoque a corto plazo, pues se centran en restaurar la comunidad a la normalidad en el menor tiempo posible, por lo cual la literatura sugiere que se requiere de inversiones en planes de recuperación a largo plazo que fortalezcan la capacidad de las comunicaciones para prepararse y planificar, adsorber, responder y recuperarse de desastres presentes y futuros (Cutter, 2013).

Uno de los elementos más críticos al momento de responder ante un desastre natural es la preparación de la distribución adecuada y eficiente de los suministros en zonas afectadas, elemento que es identificado por la defensa civil, organización social y humanitaria más grande del país, en Santander hay más de cinco mil 600 líderes voluntarios, es una organización sin ánimo de lucro, no cuenta con recursos propios, solo recibe ayuda de la Unidad de Gestión del Riesgo de Desastres del departamento y es el único organismo de rescate que está adscrito al Ministerio de Defensa del país.

Los miembros de la defensa saben cómo actuar en caso de que ocurra un evento o desastre ya que con regularidad reciben capacitaciones. Sin embargo, no tienen los equipos suficientes para proceder de forma óptima ante este tipo de eventos. Una adecuada asignación de recursos en el departamento podría mejorar la eficiencia en la respuesta a desastres por parte de las entidades de apoyo. Considerando que la logística humanitaria se define como la planificación, implementación

y control de los recursos que se pueden describir como una red de personal voluntario y especializado que con ayuda de maquinaria satisfacen la atención rápida ante la aparición de dichos tipos de desastres, desde el punto de origen hasta las zonas afectadas, resulta útil su implementación para abordar la gestión de las operaciones de desastres, en busca de reducir los impactos negativos de los desastres sobre la población.

Con el propósito de ayudar a la toma de decisiones en el ámbito logístico dentro de la planeación de la gestión del riesgo este proyecto busca diseñar y desarrollar una herramienta computacional que facilite la asignación de recursos, para disminuir el tiempo de respuesta a la ocurrencia de desastres simultáneos de tipo inundación y remoción en masa, con el fin de responder de forma adecuada ante este tipo de eventos. La mayor dificultad que se puede presentar al momento de planificar dicha asignación es el hecho de que la demanda de este tipo de desastres simultáneos será estocástica, es decir que no podrá ser determinada con anticipación al evento.

Lo anterior sustenta la importancia de la investigación que se realizara para lograr definir los lugares y las cantidades adecuadas de recursos basándose en la cantidad ya existente para la respuesta ante desastres en el departamento de Santander, mitigando el problema de asignación de recursos con demanda estocástica que busca minimizar la falta de maquinaria especializada a la hora de atender este tipo de eventos. Al ser un problema de tipo NP-Hard, es decir, computacionalmente difícil de resolver, se desarrollará un algoritmo genético de base biológica, con el propósito de encontrar una solución adecuada al problema de asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos en escenarios inciertos.

Finalmente, el estudio de esta problemática es una ayuda para fortalecer la línea de investigación en logística humanitaria dentro del grupo de investigación OPALO, el cual permitirá

el desarrollo de nuevos proyectos enfocados a desastres simultáneos, generando un impacto positivo en el departamento de Santander.

1.2 Justificación del proyecto

Los desastres naturales como deslizamientos, inundaciones, sismos de magnitud considerable en la escala Richter, avenidas torrenciales, vientos huracanados, tempestades, entre otros; causan impactos significativos en el desarrollo económico y social de todo un país, ya que este tipo de eventos requiere de una alta inversión por parte del gobierno y previa preparación para responder eficientemente ante las necesidades de los ciudadanos expuestos a la calamidad. Uno de los elementos más críticos es la planificación que existe para ejecutar obras de mitigación y múltiples estrategias de prevención, respuesta y atención ante un solo tipo de desastre, dando lugar a que este elemento sea aún más complejo cuando se pueden presentar desastres simultáneos.

Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP), Colombia es el país con la mayor tasa de desastres Naturales en América Latina. En 18 años; entre 1998 y 2016, el 88% de los desastres que ocurrieron fueron de origen hidrometeorológico, con un 37% de sequías e incendios, 35% inundaciones, 15% movimientos en masa, 11% geológicos, 1% flujos torrenciales y 1% otros. Sin embargo, a pesar de que las sequías e incendios fueron eventos de mayor ocurrencia, estos no generaron un impacto o amenaza significativa como lo fueron las inundaciones y los movimientos en masa, ya que se evidenciaron 2.800 viviendas destruidas en promedio al año y 160 personas muertas a causa de estos. (Índice Municipal de Riesgo de Desastres de Colombia- abril 2018).

En el departamento de Santander más de ochocientas mil personas, que representan el 39% de los habitantes del departamento, residen actualmente en zonas expuestas a desastres naturales como: inundaciones, deslizamientos de tierra y avalanchas. Según estudios realizados por el Departamento Nacional de Planeación (DNP). En los últimos años se han registrado más de 240

deslizamientos en Santander ubicados en: Bucaramanga (79 eventos), Rionegro (18), Tona (16), Lebrija (14), Puerto Wilches (14), Girón (13), entre otros. Recientemente el municipio de Chima (vereda de Chimera) fue azotado por deslizamientos e inundaciones, con deterioro de suelos agrícolas y ganaderos y pérdidas económicas importantes de la población. (160 Castro y Bernal, 1992, citado por Royero y Clavijo et al. 2001:68.)

Según lo planteado anteriormente, se sustenta la importancia de enfocar la investigación en los fenómenos naturales de inundaciones y movimientos en masa. Debido a su alto índice de ocurrencia, estos eventos se pueden presentar de manera simultánea, generando un problema de asignación de recursos, considerando la demanda de recursos especializados escasos, compartidos, locales y municipales; respuestas necesarias en diferentes localidades que pueden estar distribuidas geográficamente; la priorización de algunas localidades en función de su importancia territorial, incluida la recepción de ayuda mutua; regulación de implementación para garantizar un trabajo seguro. La asignación de recursos al planificar desastres simultáneos es abordada mediante técnicas heurísticas, la cual se divide en dos etapas, la primera etapa se enfoca en decisiones de asignación de recursos en la fase de preparación y la segunda etapa se enfoca en decisiones de solicitud de recursos en la fase de respuesta.

Según la revisión del plan local de emergencia en el departamento de Santander, no se encuentra la asignación de recursos para la atención ante desastres simultáneos, lo cual amerita el diseño y desarrollo de un modelo computacional que sirva para la solución de este problema para atender este tipo de eventos. Por lo tanto, la temática abordada en este trabajo de investigación permitirá aportar elementos funcionales a la hora de tomar decisiones de asignación de recursos, que beneficiará a la sociedad, permitiendo disponer de recursos previamente localizados con el fin de responder rápida y eficientemente la zona afectada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una solución al problema de asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos en escenarios inciertos aplicando un algoritmo BGA

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar modelos de optimización estocástica para el problema de asignación de recursos, a través de una revisión de literatura.
- Desarrollar un modelo matemático estocástico para la asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos.
- Construir en Python un algoritmo BGA para dar solución al problema de asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos.
- Implementar el algoritmo desarrollado en un escenario de múltiples desastres para el departamento de Santander.
- Elaborar un artículo publicable en base a la investigación realizada.

1.4 Metodología

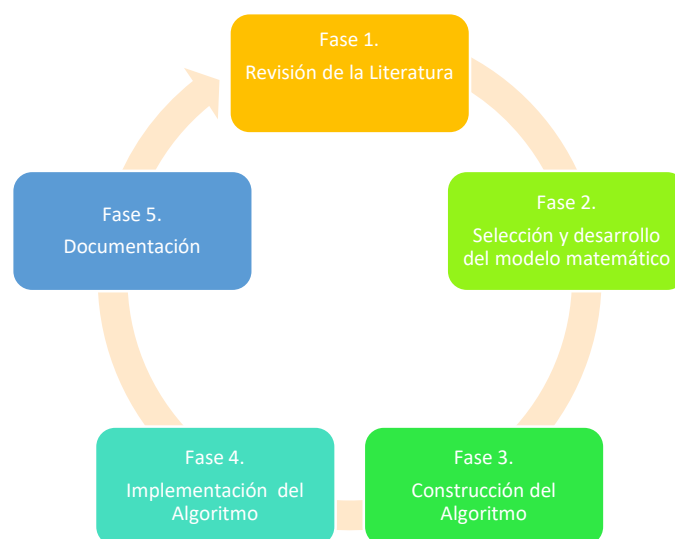


Figura 3 Planificación de la metodología del proyecto de grado. Autoría propia

Fase 1. Revisión de la Literatura

- Revisión de literatura sobre el problema de asignación de recursos al planificar desastres simultáneos
- Revisión de la literatura sobre modelos matemáticos estocásticos para problemas de asignación de recursos.

Fase 2. Selección y desarrollo del modelo matemático

- Seleccionar un modelo matemático basado en los modelos identificados de la revisión de la literatura para el problema de asignación de recursos.
- Identificación de la función objetivo, variables de decisión, parámetros y restricciones del modelo.
- Construir el modelo matemático estocástico basado en los modelos identificados de la revisión de la literatura para el problema de asignación de recursos al planificar desastres simultáneos.

Fase 3. Construcción del algoritmo

- Estudiar y comprender las bases teóricas del algoritmo BGA entre las diferentes técnicas de solución aplicables al problema de asignación de recursos.
- Construir el algoritmo BGA para la solución del problema de asignación de recursos en desastres simultáneos.

Fase 4. Implementación del algoritmo

- Estudiar el funcionamiento y codificación del lenguaje de programación Python, la implementación del algoritmo BGA diseñado.
- Recopilar información a nivel de Santander sobre eventos y recursos disponibles en caso de desastres, por medio de reuniones con miembros del comité departamental o mediante datos históricos.
- Diseñar el escenario de prueba para la aplicación y solución del algoritmo
- Ejecutar el software para verificar los resultados obtenidos de acuerdo a la función objetivo, variables involucradas y sus respectivas restricciones

Fase 5. Documentación

- Elaborar el documento de proyecto de grado
- Escritura del artículo de carácter publicable con la información destacada de la investigación y los resultados obtenidos.

2 Revisión de la literatura.

2.1 Análisis bibliométrico

La revisión bibliométrica permite analizar el impacto de artículos como medio de divulgación de un nuevo conocimiento, mediante un análisis cuantitativo de la producción científica a través de temáticas, autores, vinculación, procedencia de autores, entre otros.

Para iniciar la revisión literaria se identificaron las palabras claves durante la revisión preliminar del tema a tratar. Posteriormente se construye la siguiente ecuación de búsqueda aplicada en la base de datos Web of Science:

((Disaster OR Emergency OR catastrophe OR flood OR “mass removal” OR landslide*) AND (Allocation* OR Allotmet OR Assignment OR Location)) AND (Concurrent OR Parallel OR Simultaneous OR Synchronous*) AND (Resource* OR Relief OR Stock OR Reserves OR Supply*)*

La ecuación de búsqueda que se corrió el 27 de enero de 2020, arrojó 228 artículos relacionados con las palabras anteriormente mencionadas, los cuales se filtraron mediante los temas de interés como Ingeniería Industrial e Investigación de Operaciones dando un resultado de 27 artículos relacionados con el tema de investigación de asignación de recursos al planificar desastres simultáneos en escenarios inciertos.

El análisis bibliométrico que se realizó para el estudio de los artículos fue con la ayuda de la herramienta R Studio que nos brinda una librería llamada Bibliometrix dentro de sus funciones viene Biblioshiny() que al ser ejecutada, abre una ventana en el explorador donde se encuentra la aplicación que proporciona una interfaz web eficiente para examinar, recolectar, analizar e interpretar información, proporcionando un marco del contexto sobre las áreas de investigación, número de publicaciones realizadas por país, además de ordenar la información adecuada a los tiempos y resultados de la investigación.

La *figura 4* muestra el número de publicaciones registradas en una ventana de tiempo, comprendida entre el año 2007 al 2019, evidenciando que el año con mayor número de publicaciones fue en el 2019.

Cabe destacar que la búsqueda en la base de datos Web of Science se definió hasta el presente año, lo que puede suponer que se esperaría que el número de publicaciones en el 2020 sea mayor al promedio de artículos presentados en los últimos 13 años.



Figura 4 Publicaciones realizadas por año. Adaptado de biblioshiny (2020)

La *figura 5*, muestra el número de publicaciones realizadas por 20 autores durante la ventana de tiempo analizada, en donde los años con mayores publicaciones son en el 2014 y 2019 con un total de 5 artículos, también se evidencia que ninguno de los 20 autores ha trabajado la temática de manera continua, ya que no tiene más de una publicación sobre el tema, se podría suponer que el tema de investigación ha sido poco tratado o que apenas se está abordando.

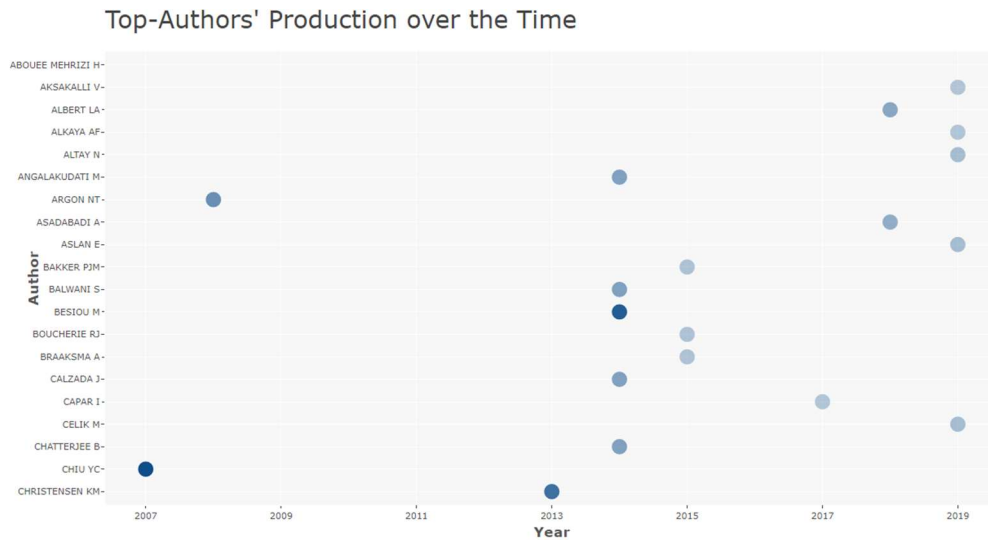


Figura 5 Producción de autores a lo largo del tiempo. Adaptado de biblioshiny (2020)

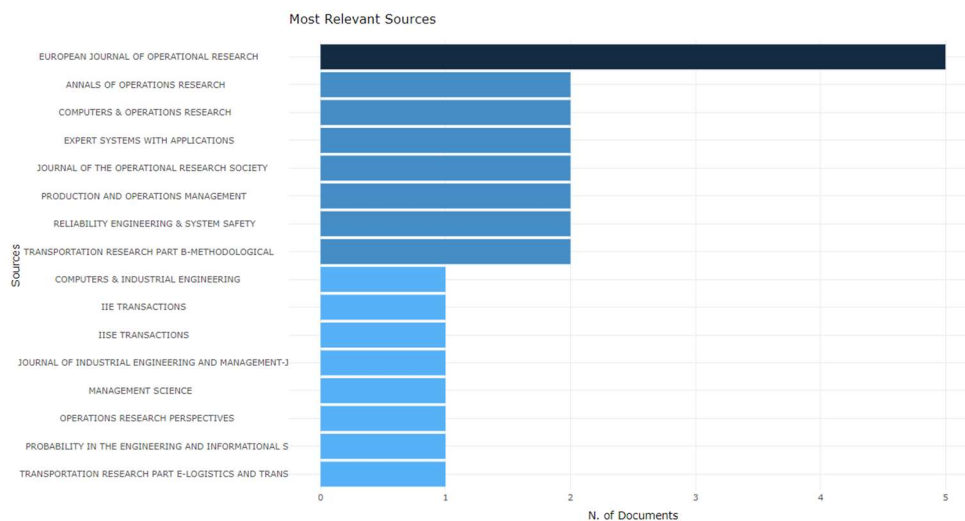


Figura 6 Número de publicaciones por fuentes relevantes. Adaptado de biblioshiny (2020)

En la *figura 6*, se puede observar que, dentro de los parámetros establecidos en la ecuación de búsqueda, la fuente de investigación con mayor número de artículos es la *European Journal of Operational Research*, con un total de 5 artículos. Esta revista pertenece al área de ingeniería dentro de la base de datos Web of Science. Según el Scimago, tiene un factor de impacto de 2,679 que la lleva a posicionarse en el cuartil Q1 lo que indica la gran repercusión que ha obtenido la revista en la comunidad científica. A dicha fuente objetivo le siguen otras que están ampliamente relacionadas con la ingeniería industrial, específicamente en el área de investigación de operaciones como lo son *Annals of Operations Research*, *Computers & Operations Research*, *Expert Systems with Applications*, *Journal of Industrial Engineering and Management-Jiem*, *Probability in the Engineering and Informational Science*, entre otros, los cuales tienen una cantidad entre uno y dos artículos publicados respectivamente.

Country Scientific Production

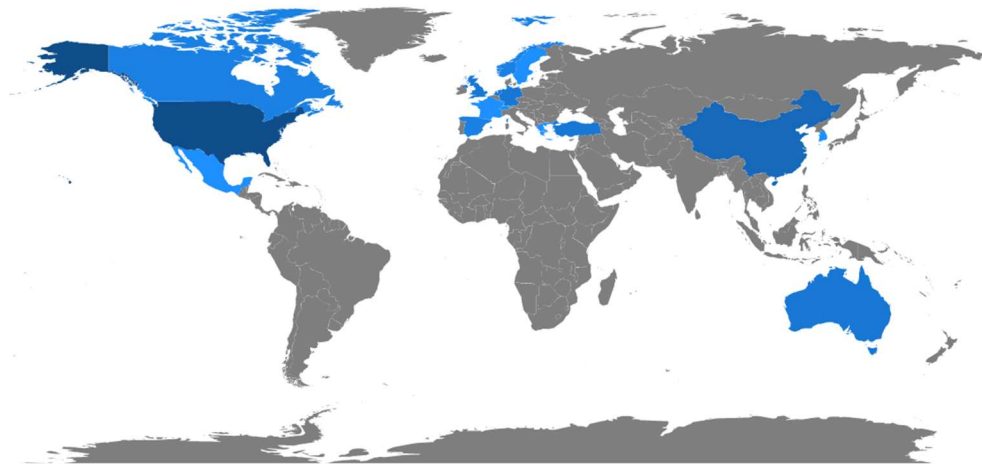


Figura 7 Publicaciones realizadas por países. Adaptado de biblioshiny (2020)

En la *figura 7*, se muestra la producción de los países con respecto al tema tratado. Se puede visualizar que con un color azul oscuro petróleo los 2 países con mayor producción los cuales son

Dentro de las de las contribuciones publicadas en países de habla hispana se encuentra México con el artículo “*A multi-criteria vertical coordination framework for a reliable aid distribution*”, publicado por los autores, Fabiola Regis- Hernández, Jaime Mora- Vargas, Ángel Ruiz en Monterrey México y Canadá, el cual propone una metodología que traduce las referencias múltiples de las partes interesadas en la cadena de suministro humanitario cualitativa y cuantitativa.

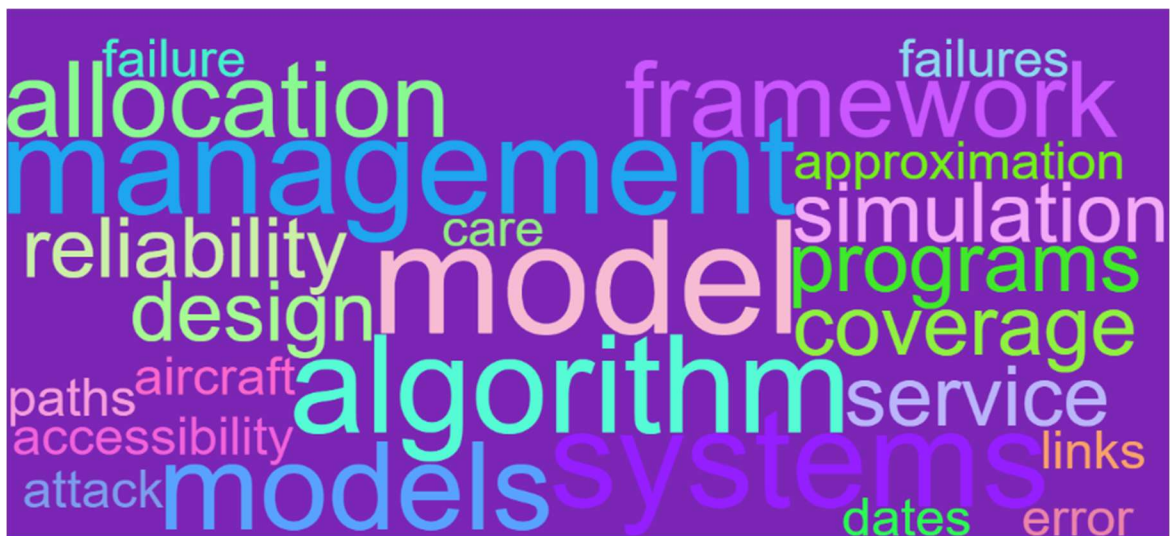


Figura 8 Palabras claves. Adaptado de biblioshiny (2020)

La *figura 8*, destaca las palabras claves, las cuales ofrecen información sobre las tendencias de investigación filtradas en orden: “Model (77)”, “Algorithm (55)”, “Systems (55)” “management (55)”, “Facility location (44)” y “Models (44)”. Dichas palabras sirven como recurso para determinar los tópicos tradicionales y emergentes para la formación en el tema a tratar.

2.2 Análisis preliminar de la literatura

Los desastres pueden ser eventos imprevistos o previstos con consecuencias extremas o anticipadas creando una demanda significativa lo cual requiere la correcta asignación de los recursos escasos y especializados. Por lo tanto, surge la necesidad de la planificación de los desastres teniendo en cuenta los datos mínimos e imperfectos en el modelado del evento.

A lo largo de la historia se han presentado desastres que han tenido un impacto negativo en la sociedad, es por esto que el estudio de cómo abordar diferentes tipos de desastres es importante, ya que en la respuesta a estos eventos se tienen en cuenta consideraciones diferentes según las necesidades específicas que se presentan, siendo un reto, identificar las situaciones y requerimientos de demanda. Cada investigación se desarrolla de manera diferente, pero con un fin común que es minimizar el impacto de dichos eventos.

Humanitarian logistics conference, define la logística humanitaria como el proceso de planificar, implementar y controlar de manera eficiente, el flujo y almacenamiento de materiales, desde el punto de origen hasta el punto de requerimiento con el fin de satisfacer las necesidades de la población afectada por un desastre en el menor tiempo posible.

La logística humanitaria, ha tomado gran importancia a partir de los últimos años debido al aumento de desastres ocurridos, por este motivo todas las entidades humanitarias cada día demandan herramientas de planificación y gestión del riesgo que ayuden a la toma de decisiones de una manera más ágil y eficiente, por tal razón se están planteando modelos de operación que permitan potenciar el sistema logístico humanitario, utilizando múltiples herramientas matemáticas, apoyados de la investigación de operaciones. (Ovideo, julio-diciembre 2018)

El enfoque de esta investigación se basa en un modelo de asignación de recursos, el cual surge en 1792 por Thomas Jefferson y es publicado formalmente en 1941 por F.L. Hitchcock. como un problema de programación lineal de la rama de investigación de operaciones, en el que son asignados recursos (máquinas o personas) que se destinan a la realización de determinadas tareas.

La asignación de recursos es un factor clave a la hora de dar respuesta a los eventos que se presentan, ya que el impacto de dichos eventos se puede disminuir mediante la planificación adecuada teniendo en cuenta y evaluando la capacidad de respuesta para poder cumplir con los requerimientos establecidos. En los problemas de asignación de recursos se deben tener en cuenta parámetros como tiempo de suministro, capacidad, recursos disponibles, rutas, transporte entre otros los cuales varían según la magnitud del desastre.

Existen un gran número de publicaciones relacionadas con el manejo de emergencias, los cuales tienden al mismo enfoque de maximizar la efectividad en las operaciones humanitarias, priorizando las regiones o poblaciones más afectadas según la gravedad del daño, es decir, los recursos de rescate se asignan de acuerdo con la lista de prioridades (Lichun & Elise, 2000). (Fiedrich, Gehbauer, & Rickers, 2000), propusieron un problema de asignación dinámica de recursos que buscaba minimizar el número total de muertes durante el período inicial de búsqueda y rescate.

Chen y Miller-Hooks, formularon un modelo matemático que despliegan de manera óptima equipos de búsqueda y rescate urbano en sitios posteriores al desastre como un programa estocástico de etapas múltiples. Posteriormente desarrollaron una estrategia la cual es basada en la generación de columnas el cual resuelve una serie de programas estocásticos de dos etapas con el

recurso dentro de un horizonte de tiempo reducido para superar el costoso esfuerzo computacional. (Chen & Miller-Hooks, 2012).

Es de gran importancia resaltar que el tema de asignación de recursos no solo es utilizado para temas de desastres, también es una rama importante en otras áreas por eso se resaltan publicaciones para darle atribución a su amplia aplicación.

En el año 2008 se publica un artículo llamado “*un modelo de asignación de recursos a rutas en el sistema de transporte masivo de Transmilenio*”, el cual se aplicó un algoritmo genético como metodología de optimización para la asignación de frecuencias y número de buses para las rutas determinadas en la operación del sistema de transporte masivo de Transmilenio en la troncal de las Américas. El proceso comenzó con la asignación de parámetros del algoritmo genético, entre los cuales se encontraba el grado de mutación, el número de usuarios en el sistema, tiempo total de cada ruta-teórica, tamaño de la población, número de generaciones, entre otros. Posteriormente se dio inicio a la primera población del algoritmo genético y luego de forma cíclica se evolucionan la generación por medio de la aplicación de mutaciones a los individuos. (Duarte, Becerra, & Fernando, mayo, 2008).

El 6 de septiembre del 2011 se publicó un artículo llamado “*Revisión de Algoritmos genéticos Aplicados al Problema de la Programación de Cursos Universitarios*”, el cual presenta una herramienta computacional, por medio de un algoritmo genético adaptado a un caso real del problema de calendarización de cursos de una escuela italiana. el problema considera la lista de profesores, la lista de clases involucradas, las horas de cada clase entre otras condiciones externas. (Pichardo, 6 de septiembre de 2011)

Si bien, el problema de asignación de recursos es un tema amplio posible de aplicar en cualquier campo como se evidencia anteriormente. El desafío de la asignación de recursos que se

presenta en esta investigación viene en el término desastres simultáneos, el cual hace referencia a dos o más desastres que se superponen temporalmente, que pueden estar geográficamente distantes, pero que demandan el mismo conjunto de recursos, por tal razón, el reto es la competencia por los escasos recursos especializados combinado con el transporte y la manera eficiente de satisfacer la demanda.

A continuación, se presentan los 4 artículos seleccionados de los 27, los cuales presentan mayor afinidad con el desarrollo de la investigación presentada en este proyecto: “asignación de recursos al planificar desastres simultáneos en escenarios inciertos”.

En el año 2019, se publicó un artículo denominado “*Resource allocation when planning for simultaneous disaster*” por *Xuan Vinh Doan a y Duncan Shaw*. En este estudio se presenta la asignación de recursos escasos en zonas estratégicas para atender la demanda de tres desastres que se presentan simultáneamente. Se presenta mediante dos modelos, el primero es un modelo de optimización estocástica de dos etapas que asigna recursos existentes para lograr el mejor rendimiento, este modelo busca disminuir el riesgo de no cumplir la demanda con los recursos existentes. El segundo modelo consiste y asignar los recursos disponibles de forma óptima y determinar los recursos adicionales para poder cumplir con la demanda, el cual busca reducir el riesgo mediante la compra de recursos. Y un tercer modelo (hibrido) para analizar el impacto del presupuesto financiero sobre como asignar recursos adicionales.

En el año 2014, se publicó un artículo denominado “*Biological-based genetic algorithms for optimized disaster response*” por Jui-Sheng Chou, Chih-Fong Tsai, Zong-Yao Chen, Ming-Hui Sun. En este estudio se muestra la eficacia de la utilización de los algoritmos genéticos en problemas de optimización en diversos campos. Las GA de base biológica (BGA) propuestas en este estudio abordan estos problemas al incluir mecanismos para áreas de reserva de élite,

conversión de valor de aptitud no lineal, y migración. Este estudio realizó simulaciones experimentales para comparar BGA con algoritmos inmunes (IA) y GA en términos de efectividad para asignar personal del sitio de refugio para desastres y para planificar la distribución de suministros de socorro. Los resultados de la simulación muestran que, en comparación con otros métodos, los BGA pueden calcular soluciones óptimas más rápido. Por lo tanto, proporcionan una referencia más útil al realizar la toma de decisiones necesaria para resolver los problemas de optimización de recursos de respuesta a desastres. Según la revisión de la literatura los algoritmos genéticos de base biológica.

En el año 2014, se publicó un artículo denominado “Pre-positioning of relief items under road/facility vulnerability with concurrent restoration and relief transportation” por *Ece Aslan y Melih Celik*. En este modelo se tiene en cuenta la restauración de las carreteras y distribución de socorro, para la red de preposicionamiento ya que son dos factores que están en función del impacto y la magnitud del desastre. Se desarrolla mediante un enfoque heurístico basado en un esquema

En la literatura los problemas de preposicionamiento de inventario se resuelven mediante modelos estocásticos de dos etapas. En la primera etapa se toman decisiones de ubicación de instalaciones y decisiones de preposicionamiento previa al desastre y en la segunda etapa decisiones de transporte de socorro después del desastre una vez solucionado el problema de incertidumbre.

En la tabla 1. se observa la relación de los supuestos del tema planteado en esta investigación “*Biological-based genetic algorithms for optimized disaster response*” y “Pre-positioning of relief items under road/facility vulnerability with concurrent restoration and relief transportation”. Se observa la relación de supuestos sobre los posibles escenarios en los cuales se

toman como independientes el uno del otro. En preposicionamiento se tiene en cuenta los presupuestos por separado y en la asignación de recursos no se tiene en cuenta el presupuesto ya que lo que se busca con esta investigación es asignar los recursos existentes en puntos estratégicos de bajo y/o nulo riesgo de desastres.

Tabla 1 Comparación de supuestos. Autoría propia

Pre-positioning of relief items under road/facility vulnerability with concurrent restoration and relief transportation	Biological-based genetic algorithms for optimized disaster response
SUPUESTOS	SUPUESTOS
1. Escenarios de desastre independientemente uno del otro.	Escenarios de desastre independientemente uno del otro.
2. Se establece un subconjunto predeterminado de rutas y se eligen las rutas, en vez de optimizar todas las rutas posibles.	Se establece puntos estratégicos para distribución de recursos (Maquinaria y personal)
3. Existen presupuestos separados para las fases previas y posteriores al desastre, que está en línea con el Municipio Metropolitano de Estambul (2003).	No se tiene en cuenta el presupuesto

Continuación tabla 1

Comparación de supuestos entre modelos

4. Los camiones de despacho tienen que esperar hasta un tiempo de despacho predeterminado para abandonar un centro de distribución, principalmente con fines de coordinación.

N/A

5. No se supone ningún daño para los almacenes, puesto que están diseñados para resistir terremotos de alto impacto.	No se supone daño en el recurso (maquinaria) durante el desastre
pre-positioning of relief items under road/facility vulnerability with concurrent restoration and relief transportation	biological-based genetic algorithms for optimized disaster response
SUPUESTOS	SUPUESTOS
6. Un segmento de carretera puede estar parcial o completamente dañado. Una carretera parcialmente dañada incurre en tiempo de viaje adicional, debido a su capacidad disminuida; mientras que una carretera completamente dañada no permite atravesarla. Una vez reparada, una carretera incurre en su tiempo de viaje previo al desastre.	no se tiene en cuenta el daño de las carreteras dado que los sitios que se establecen para la distribución son de bajo riesgo ante los desastres y son punto central y estratégico de los lugares con mayor riesgo de desastre
7. La información de demanda y daños está disponible antes de que comience la reparación y distribución de socorro.	N/A
8. No se puede utilizar una ruta de entrega si al menos uno de sus segmentos está completamente dañado.	N/A

Continuación tabla 1*Comparación de supuestos entre modelos*

9. A una determinada ubicación de demanda se le puede servir un producto determinado desde un único centro de distribución, para evitar problemas de coordinación.	N/A
10. Los equipos comienzan a reparar la red al mismo tiempo que comienza la distribución de socorro.	N/A

3 Marco teórico**3.1 Logística Humanitaria**

La logística humanitaria es definida formalmente por Thomas y Mizushima como “el proceso de planeación, ejecución y control de la eficiencia, rentabilidad, flujo y almacenamiento de bienes y materiales, así como la información relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo, con el propósito de satisfacer las necesidades de los beneficiarios finales”. Esta definición es quizás la más completa, al abarcar en su descripción la amplia gama de operaciones logísticas que incluyen la distribución de medicamentos, alimentos en la lucha contra el hambre o suministros para desastres; además expresa la necesidad de la logística humanitaria de cumplir diferentes objetivos relacionados con personas en condición vulnerable.

La gestión logística es una disciplina que se ha desarrollado debido a la necesidad de dar respuesta a las necesidades que surgen antes, durante y después de un desastre. Esta gestión se hace más complicada a medida que la magnitud del desastre aumenta. Siendo un gran reto poder

gestionar de manera óptima los recursos existentes para poder satisfacer la mayor parte de la demanda y así minimizar las muertes y el sufrimiento humano. (B, 2008)

3.2 Desastres naturales

Un desastre natural es una serie de eventos que causan un gran impacto a nivel social, ambiental y económico de un territorio. Aumentando el riesgo al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales. Los efectos de un desastre natural varían según la planificación y preparación de medidas de seguridad, planes de emergencia y sistemas de alertas provocados por el hombre. Entre mayor sea la preparación a dichos eventos el impacto será menor.

3.3 Gestión de desastres

Proceso sistemático para la utilización de decisiones administrativas, de organización y conocimientos y capacidades operacionales para implementar políticas y estrategias, y fortalecer las capacidades de la sociedad y de las comunidades a fin de reducir el impacto de amenazas naturales, desastres medioambientales y tecnológicos consecuentes. Esto implica todo tipo de actividades, incluyendo medidas estructurales y no estructurales para evitar (prevención) o limitar (mitigación y preparación) los efectos adversos de los desastres. (EIRD 2007).

El manejo de los desastres se analiza y estudia para fines prácticos, en forma sistemática como una secuencia cíclica de etapas que se relacionan entre sí, y que se agrupan a su vez en tres fases: antes, durante y después.

El ciclo de los desastres, como se le conoce a este sistema de organización, está compuesto por las siguientes etapas:

3.3.1 Mitigación

Planificación y ejecución de medidas de intervención dirigidas a reducir o disminuir el riesgo o los impactos de un posible evento. Implica comprender que no es posible controlar el riesgo totalmente pero sí atenuar sus consecuencias.

3.3.2 Preparación

Medidas para organizar y facilitar los operativos de aviso, atención y habilitación de la población en caso de desastre. La preparación requiere la organización, planificación y capacitación de los actores para actuar en la respuesta.

3.3.3 Respuesta

Conjunto de medidas y acciones dispuestas con anticipación con el fin de evitar la ocurrencia de un fenómeno peligroso o reducir sus efectos sobre la población, los bienes, servicios y el medio ambiente.

3.3.4 Recuperación

Recuperación a corto plazo de cierta normalidad en la vida cotidiana e inicio de la reparación del daño físico, social y económico.

3.4 Optimización

La optimización es una parte relevante en la investigación de operaciones, consiste en la selección de la mejor alternativa, en algún sentido que las demás alternativas posibles, es un concepto inherente a toda la investigación operativa, sin embargo, determinadas técnicas propias se recogen bajo el nombre de optimización o programación matemática. Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones. Los problemas de optimización se componen generalmente de tres componentes:

3.4.1 Variables

Representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo. Desde un punto de vista funcional se pueden clasificar en variables independientes o principales o de control y variables dependientes o auxiliares o de estado, aunque matemáticamente todas son iguales.

3.4.2 Función objetivo

Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar).

3.4.3 Restricciones

Representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. (Ramos 2010)

3.5 Optimización estocástica

La optimización estocástica busca la solución en un escenario que depende del azar. Existen muchos sistemas en los cuales están presentes incertidumbres en su modelo, ya sea en misma descripción del sistema o como perturbaciones. Entre muchas variables aleatorias se pueden mencionar la demanda eléctrica de una red de generación, el caudal de lluvias en un sistema de riego, la cantidad de personas que ocupan una habitación en un sistema de calefacción. Entre otras, son ejemplos de sistemas estocásticos, en los cuales se pueden tener presente para su solución la idea de escenarios. En concreto, la optimización estocástica busca generar una solución para varios escenarios que se pueden establecer bajo una condición probabilística. (Capítulo 1. Introducción: Optimización Estocástica)

Una optimización estocástica debe considerar:

- ✓ Una serie de variables o decisiones que hay que tomar.

- ✓ Una serie de restricciones que limitan esas decisiones.
- ✓ Una función objetivo o un criterio a optimizar.

La optimización es una herramienta de ayuda en la toma de decisiones que permite escoger la mejor estrategia para alcanzar un objetivo. Para esto es necesario modelar como problema de optimización el entorno en el que se produce esa toma de decisión. Los problemas de optimización pueden involucrar parámetros cuyo valor no es conocido exactamente en el momento de decidir. Cuando existe incertidumbre sobre los datos del problema se habla de optimización estocástica, a diferencia de la optimización determinista en la que todos los parámetros son conocidos en el momento de tomar la decisión. (Optimización bajo incertidumbre. Técnicas de descomposición y aplicación en grid)

3.6 Optimización multiobjetivo

Un problema de optimización multiobjetivo generalmente consiste en minimizar (o maximizar) simultáneamente un conjunto de criterios (objetivos) que satisfacen un conjunto de restricciones. En la optimización multiobjetivo, no existe una solución única que optimice cada uno de los objetivos, pero un conjunto de soluciones eficientes en las que ninguna solución es mejor. (Arroyo, 2002)

3.7 Métodos de solución de un problema de optimización combinatoria

Los modelos de optimización combinatoria han presentado un atractivo de investigación gracias a la complejidad computacional que poseen y a las diversas aplicaciones del mundo real. Se han presentado múltiples métodos para determinar la solución. Los métodos pueden clasificarse básicamente en:

3.7.1 Algoritmos exactos

Proporcionan la solución óptima para la instancia planteada en un tiempo acotado; sin embargo, tiene una contraindicación cuando se trata de optimización combinatoria de la clase NP – Hard, ya que el tiempo estimado para la solución aumenta exponencialmente directamente proporcional al tamaño del problema.

3.7.2 Algoritmos heurísticos

Los métodos heurísticos son procedimientos que se usan para resolver los problemas de optimización mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza para obtener una buena solución. Las técnicas heurísticas pueden dividirse principalmente en dos categorías: heurísticas constructivas y métodos de búsqueda local.

3.7.3 Heurísticas constructivas

Determinan soluciones por medio de la incorporación iterativa de elementos a una estructura vacía inicial, hasta completar una solución que cumpla con las restricciones. Esta heurística se puede usar cuando el problema se puede solucionar por decisiones sucesivas, por ejemplo, líneas de montaje o rutas como el algoritmo de ahorro de Clarke y Wright, típico del ruteo de vehículos clásico.

3.7.3.1 Métodos de búsqueda local

Su procedimiento parte de una solución inicial y usa un operador para construir un vecindario, avanzando para encontrar mejoras hasta una solución óptima en el vecindario que cada vez es más aproximada que la anterior, a esta última solución se le conoce como óptimo local.

3.7.4 Algoritmos metaheurísticos

Los algoritmos metaheurísticos son algoritmos aproximados de optimización y búsqueda de propósito general. Son procedimientos iterativos que guían una heurística subordinada

combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar adecuadamente el espacio de búsqueda. (Introducción a los algoritmos metaheurísticos)

Se tienen diferentes algoritmos (metaheurísticos) que se usan para resolver problemas de optimización combinatoria como lo son:

- ✓ Optimización por Enjambre de partículas (PSO)
- ✓ Búsqueda Tabú (TS)
- ✓ Colonia de Abejas Artificial (ABC)
- ✓ Recocido Simulado (SA)
- ✓ Computación Evolutiva

3.7.5 Algoritmo Genético

El concepto central de algoritmos genéticos, que fue propuesto por primera vez por Holland (1975), se deriva de las leyes de selección natural y supervivencia del más apto asociado con la teoría de la evolución biológica desarrollada por Charles Darwin en su trabajo de 1859, *Origen de las especies* (Darwin, 1859). Una especie solo puede sobrevivir si supera las pruebas ambientales, como las limitaciones alimentarias y las amenazas depredadoras. Los organismos que superan con éxito estas pruebas tienen una mayor probabilidad de sobrevivir y reproducirse en la próxima generación, mientras que los que fallan no sobreviven y son eliminados. El proceso de selección natural asegura que las especies evolucionen gradualmente en organismos que se adapten bien a sus entornos.

Los algoritmos genéticos se han vuelto rápidamente populares debido a la robustez y al equilibrio entre eficiencia y efectividad en muchos entornos diferentes. Los algoritmos genéticos

se clasifican como algoritmos de búsqueda en los que el concepto darwiniano de “supervivencia del más apto” se combina con un intercambio de información estructurado, pero aleatorio. (Krishnapillai, 2009)

Los algoritmos genéticos (AG) trabajan a partir de estas equivalencias:

- Gen: un conjunto finito de bits.
- Genotipo o cromosoma: el conjunto de los genes, es decir, todas las cadenas de bits.
- Mutación puntual: alteración en un bit de un gen al azar.
- Cruce: intercambio de bits entre las cadenas de bits.
- Función objetivo: entorno al que deben adaptarse los individuos para sobrevivir.
- Factor de mutación: fracción de individuos que sufren mutación.
- Factor de intercambio: fracción de individuos que sufren intercambio de bits.

Inicialmente, se parte de una población que presente individuos con distintos genotipos, es decir, que tengan distintas cadenas de bits. Tras la aplicación de las operaciones de mutación y cruce sobre un porcentaje de nuestra población inicial, se obtiene una serie de nuevos individuos que pasan a formar parte de la población. Para lograr que la población se mantenga constante en número de individuos y no crezca en progresión geométrica, se aplica lo que se denominan políticas de dispersión. Dicho de manera un tanto violenta, una política de dispersión decide qué individuos han de morir para evitar el crecimiento de la población. Normalmente no se suelen aplicar políticas de envejecimiento, por lo que la supervivencia de un individuo se decide por 16 Charles Darwin Portada de la primera edición de El origen de las especies su nivel de adaptación sin que influya su edad en ello. Las dos políticas de dispersión más utilizadas en los AG son:

- a) Dispersión elitista: Los nuevos individuos se comparan con los peores individuos de la población, y sobreviven los mejor adaptados a la función objetivo.

- b) Dispersión pseudoelitista: La mitad de los nuevos individuos se comparan con los peores de la población, la otra mitad se compara con los mejores y se seleccionan a los mejor adaptados.

Tras estas operaciones se ha concluido lo que se llama una generación. Ahora tenemos una nueva población en la que muy posiblemente tengamos individuos que se adapten mejor a la función objetivo. Tras esto, sólo queda repetir de nuevo las operaciones anteriores hasta conseguir, al menos, un individuo que se adapte perfectamente a la función objetivo, es decir, la solución a nuestro problema.

3.7.6 Algoritmo genético de base biológica BGA

El algoritmo genético basado en biología (BGA) permite mejorar el rendimiento de la solución de GA mediante la mejora de su capacidad de búsqueda de solución óptima y su tiempo de ejecución.

El BGA se caracteriza por:

- a) Después de ajustar los valores de aptitud, la conversión de valores de aptitud no lineal retiene los cromosomas superiores al aumentar sus valores de aptitud y elimina los grupos genéticos inferiores al disminuir sus valores de aptitud. Por lo tanto, la función de conversión del valor de aptitud física aumenta la presión competitiva dentro de la población genética.
- b) Las áreas de reserva Elite retienen cromosomas superiores para su uso en futuras operaciones de cruce y mutación.
- c) Al almacenar simultáneamente los valores de aptitud de los cromosomas superiores retenidos, las áreas de reserva de élite simplifican los cálculos de la función de aptitud.

- d) Cuando la evolución generacional y la capacidad de búsqueda reducida provocan una convergencia prematura hacia la uniformidad en las poblaciones de cromosomas, este método aumenta la diversidad de la población de cromosomas y va más allá de las soluciones óptimas locales al imitar el fenómeno biológico de la migración. (Jui Sheng Chou, 2014)

Existen tres mecanismos que diferencian los BGA de los AG convencional:

3.7.6.1 Área de reserva de Élite

Las áreas de reserva de élite reducen el costo computacional en M veces la función del valor de aptitud, el uso de áreas de reserva de élite por parte de BGA no solo retiene cromosomas superiores para la reproducción en la próxima generación, sino que también reduce el costo computacional y mejora el rendimiento de búsqueda

3.7.6.2 Conversión del valor de condición física no lineal

En los GA se utiliza el método selección de rueda de ruleta para reproducir y seleccionar aleatoriamente cromosomas de acuerdo con su aptitud según el área correspondiente. En muchos casos solo unos pocos de los cromosomas seleccionados tienen valores de aptitud altos y cuando muchos de los cromosomas seleccionados tienen valores de aptitud bajos. En este caso, una búsqueda de GA no puede utilizar efectivamente la experiencia previa para imitar la dura presión competitiva de la selección natural. Al convertir los cromosomas con valores de aptitud bajos en cromosomas con valores de aptitud aún más bajos.

Dado que la conversión aumenta los valores de aptitud de los cromosomas con altos valores de aptitud, los organismos con estos cromosomas son los más propensos a sobrevivir y reproducirse. Por lo tanto, además de evitar el peor de los casos de selección de rueda de ruleta, la conversión de valor de forma no lineal mejora simultáneamente la presión competitiva entre los

cromosomas. Esto garantiza que una búsqueda BGA utilice cromosomas con valores de aptitud física elevados, lo que acelera la identificación de la solución óptima.

3.7.6.3 Migración

La migración es un método superior para escapar de los óptimos locales. En la naturaleza, los organismos con la mejor adaptación ambiental son los más propensos a migrar para aparearse. El BGA imita el comportamiento biológico migratorio al combinar dos poblaciones cromosómicas diferentes, lo que aumenta la diversidad de la población, estabiliza la población cromosómica y permite la búsqueda continua del espacio problemático. En lugar de limitar la búsqueda a soluciones óptimas locales, el BGA amplía la búsqueda de soluciones óptimas globales.

Los pasos de BGA se demuestran de la siguiente manera:

Paso 1. Genera una población inicial de cadenas (individuos) al azar.

Paso 2. Evaluar a cada individuo en la población actual y calcular el valor de aptitud de cada individuo.

Paso 3. Convierta la aptitud a la aptitud no lineal para cada cromosoma.

Paso 4. Seleccione las mejores personas E con los valores de condición física más altos y colóquelos en el área de élite.

Paso 5. Verifique el criterio de Gran migración. Si se cumple la condición, vaya al Paso 8; de lo contrario, vaya al paso 7.

Paso 6. Realizar una mutación a gran escala. Luego, ve al siguiente paso.

Paso 7. Combina las élites y los nuevos individuos como la nueva generación.

Paso 8. Verifique el criterio de detención. Si no se alcanza, vaya al Paso 2; De lo contrario, vaya al siguiente paso.

Paso 9. Detenga el proceso e informe las soluciones óptimas o casi óptimas del área Elite.

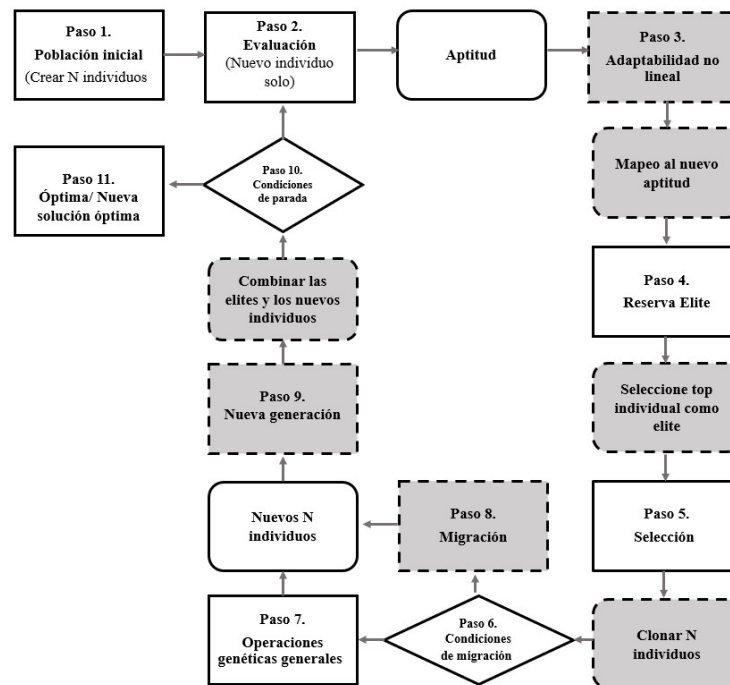


Figura 9 Proceso del BGA adaptado (Jui Sheng Chou, 2014)

3.7.7 Problema de asignación

El problema de asignación es un tipo especial de problema de programación lineal en el que los asignados son recursos que se destinan a la realización de tareas. Por ejemplo, los asignados pueden ser empleados a quienes se tiene que dar trabajo. La asignación de personas a trabajos es una aplicación común del problema de asignación. Sin embargo, los asignados no tienen que ser personas. También pueden ser máquinas, vehículos o plantas, o incluso periodos a los que se asignan tareas. En la presente investigación se habla de asignación de recursos como máquinas y personal especializado escaso en puntos estratégicos para satisfacer demanda en caso de desastres que se presenten simultáneamente. Para que se ajuste a la definición de un problema de asignación,

es necesario que este tipo de aplicaciones se formule de manera tal que se cumplan los siguientes supuestos:

1. El número de asignados es igual al número de tareas. (Este número se denota por n .)
2. A cada asignado se le asigna sólo una tarea.
3. Cada tarea debe realizarla sólo un asignado.
4. Existe un costo C_{ij} asociado con el asignado i ($i = 1, 2, \dots, n$) que realiza la tarea j ($j = 1, 2, \dots, n$).
5. El objetivo es determinar cómo deben hacerse las n asignaciones para minimizar los costos totales.

Cualquier problema que satisface todos estos supuestos se puede resolver en forma muy eficiente mediante los algoritmos diseñados de manera especial para los problemas de asignación. Los primeros tres supuestos son bastante restrictivos. Muchas aplicaciones potenciales no las satisfacen por completo. Con frecuencia es posible reformular el problema para hacerlo que se ajuste. Por ejemplo, muchas veces se pueden usar asignados o tareas ficticios con este fin. (Federick S. Hillier)

3.7.8 Modelo del problema de asignación

El modelo matemático para manejar el problema de asignación utiliza las siguientes variables de decisión:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se asigna } i \text{ para realizar la tarea } j \\ 0 & \text{si no es así,} \end{cases}$$

para $i = 1, 2, \dots, n$ y $j = 1, 2, \dots, n$. Entonces, cada x_{ij} es una variable binaria (toma valores 0 o 1). Las variables binarias son importantes en investigación de operaciones para representar las

decisiones de sí o no. En este caso, las decisiones de sí o no son: ¿debe el asignado i realizar la tarea j ? Si Z es el costo total, el modelo del problema de asignación es:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij},$$

3.7.9 Complejidad computacional

La teoría de la complejidad computacional se refiere a la estimación de los recursos que un computador necesita para resolver un problema, tales como tiempo, cantidad de pasos en un cálculo, y espacio, cantidad de memoria utilizada.

El objetivo de la teoría de la complejidad es clasificar los problemas según su complejidad, particularmente aquellos que son importantes en aplicaciones como la criptología, la programación lineal y la optimización combinatoria.

3.7.10 Clases de complejidad

3.7.10.1 Clase P

Una de las clases de complejidad más significativas es la clase P de problemas que se pueden resolver en tiempo polinomial. Una función f es de tiempo polinomial computable si existe un polinomio p para el cual f es computable en el tiempo $p(n)$, es decir, un problema se puede resolver en tiempo polinomial si su función característica es de tiempo polinomial computable. La importancia de la clase descansa en la hipótesis de trabajo, ampliamente aceptada, de que la clase de algoritmos prácticamente factibles se puede identificar con aquellos algoritmos que operan en tiempo polinomial.

3.7.10.2 Clase NP

Un problema L pertenece a la clase NP si hay un polinomio p y una relación de tiempo polinomial computable R , de modo que una cadena x está en L si y sólo si hay una cadena y de modo que la longitud de y está limitada por $p(|x|)$, y se cumple $R(x, y)$.

3.7.10.3 Clase NP-Hard

Contiene problemas de decisión, optimización o búsqueda que son como mínimo tan difíciles como un problema NP (López Restrepo & Rojas Paredes, 2016).

3.7.10.4 Clase NP-Completo

Contiene los problemas que están entre la intersección del NP y el NP-hard (López Restrepo & Rojas Paredes, 2016).

4 Modelo matemático

El modelo matemático planteado para la asignación de recursos durante la fase de respuesta, en caso de desastres simultáneos, ya sea de remoción en masa o inundación, en el departamento de Santander. Se construyó teniendo en cuenta algunas consideraciones del modelo Xuan Vinh Doan^a y Duncan Shaw. (2019).

La presente investigación se enfoca en minimizar el costo total, considerando la penalización cuando se exceda el tiempo mínimo para responder o no se cumpla con la demanda, donde se tiene en cuenta los siguientes supuestos:

1. Se considera maquinaria tipo amarilla que puede atender la demanda en desastres simultáneos, cuyas características de operación pueden ser similares con capacidades diferentes.

2. La maquinaria y el operario se consideran como un solo recurso.
3. En diferentes puntos de oferta del departamento de Santander existe una capacidad de maquinaria establecida para atender la demanda en caso de que se presenten desastres simultáneos.
4. Cada ubicación cuenta con un número conocido de diferentes tipos de máquinas, que pueden responder a diferentes tipos de desastres.
5. La demanda de recursos se considera incierta, es decir, en función del escenario sujeto a la probabilidad de ocurrencia.
6. En el modelo se considera que el tiempo de desplazamiento y el tiempo de operación de las maquinas en el lugar donde se presenta el desastre son conocidos y obedecen a un análisis previo.
7. Un lugar donde ocurre un desastre se considera un punto de demanda, la maquinaria se asigna a estos por priorización de los puntos de demanda, teniendo en cuenta criterios de cantidad de población e impacto del desastre.
8. Si en un punto de oferta, ocurren desastres simultáneos, para satisfacer la demanda se utilizará primero la maquinaria disponible en el lugar antes de solicitarla algún lugar cercano.
9. Si en la ubicación del desastre no se cuenta con la maquinaria requerida, se puede solicitar maquinaria a lugares cercanos teniendo en cuenta una priorización que se establece por el nivel de cercanía al lugar donde ocurre el desastre.
10. Las maquinas operan al tiempo, por lo cual no se presenta secuenciamiento a la hora de atender los desastres simultáneos.

11. El tiempo de desplazamiento entre los puntos de oferta y la ubicación donde ocurre el desastre, se asume como un valor conocido y corresponde al tiempo esperado de tránsito.
12. La demanda de recursos es conocida en el momento que se presenta el desastre y no varía en el tiempo, es decir, no se consideran escenarios que ocurran después de haber realizado la asignación.
13. Se considera un tiempo máximo (T_{max}) de respuesta de 72 horas

La formulación matemática del problema se presenta a continuación:

Conjuntos

Ubicaciones $U = (1, \dots, j)$

Maquinaria, $M = (1, \dots, m)$

Tipo Desastre, $D = (1, \dots, d)$

Escenarios, $S = (1, \dots, s)$

Desastres simultáneos, $L = (1, \dots, l)$

Requisitos, $R = (1, \dots, r)$

Parámetros

J Punto de oferta en la ubicación j , $j \in U$

I Punto de demanda en la ubicación i , $i \in U$

$H_{j,d}^m$ Conjunto de maquinaria tipo m , disponible en la ubicación j para atender desastres tipo d

$H_{i,d}^m$ Conjunto de maquinaria tipo m , disponible en la ubicación i para atender desastres tipo d

M_d^m	Conjunto de maquinaria tipo m , necesaria en respuesta a un desastre de tipo d , $d \in D$ (<i>demanda estimada</i>)
$p_{j,i}$	Nivel de preferencia de la ubicación j para suplir necesidades de demanda en la ubicación i
$tv_{j,i}$	Tiempo del desplazamiento de la maquinaria del lugar j a la ubicación i
L_s	Conjunto de desastres simultáneos que ocurren en el escenario s , $s \in S$
q_s	probabilidad del escenario s
$d_{l,i}$	Tipo de desastre simultaneo l que ocurre en la ubicación i , $l \in L_s$
$F_{l,i}$	Dimensión del desastre tipo l en la ubicación i
$r_{m,i}^l$	Maquinaria requerida de tipo m , $m \in M_{dl}$, en la ubicación i para dar respuesta al desastre l , $l \in L_s$ (<i>demanda en fase de respuesta</i>)
u_i	Indicador de importancia de la ubicación i .
$CM_{j,i}^m$	Costo de transportar la maquinaria tipo m desde la ubicación j a la ubicación i
$to_{m,i}^l$	Tiempo de operación de la maquinaria m atendiendo el desastre tipo l en el lugar i
$Co_{l,i}^m$	Costo por unidad de tiempo que se encuentra operando la maquinaria tipo m en respuesta al desastre tipo l en la ubicación i
$CP1_{j,i}^m$	Costo de penalización por no cumplir con la demanda de maquinaria tipo m para atención al desastre l en la ubicación i
$CP2_{l,i}^m$	Costo de penalización por exceder el tiempo de respuesta de maquinaria tipo m para atención al desastre l en la ubicación i
$T_{s,i}^{m,l}$	Tiempo total de respuesta para satisfacer la demanda de maquinaria m en atención al desastre l , en el escenario s , en la ubicación i

$C_i^{m,s}$ Costo total de penalización si se requiere maquinaria de tipo m , $m \in M$, en respuesta al desastre $l \in L_s$ y no se puede satisfacer en el escenario s , $s \in L$.

Variables de decisión

w_i^m Número de unidades de maquinaria m , $m \in M$, disponibles en la ubicación i , asignados a la ubicación i , $i \in U$.

$x_{j,i}^{m,s}$ Número de unidades de maquinaria tipo m , $m \in M$, enviado en respuesta al desastre que se presentó en el lugar i , $i \in U$, desde la ubicación cercana j , en el escenario s , $s \in S$.

$y_{j,i}^m$ 1, si se asigna maquinaria tipo m desde la ubicación j a la ubicación i del desastre
0, si no se asigna maquinaria tipo m desde la ubicación j a la ubicación i del desastre

Tabla 2 Tabla de unidades

UNIDADES

J	Entero
I	Entero
$H_{j,d}$	Entero
M_d	Entero
$p_{j,i}$	Entero
$t_{j,i}$	Hora
L_s	Adimensional
q_s	porcentaje

$d_{l,i}$	Adimensional
$F_{l,i}$	Porcentaje
$r_{m,i}^l$	Adimensional
l_i	Porcentaje
$C_{m,i}^l$	Peso colombiano/ Hora
$CM_{j,i}^m$	Peso colombiano/ Hora
$to_{m,i}^l$	Hora
$Ct_{l,i}^m$	Peso colombiano/ Hora
$CP1_{j,i}^m$	Peso colombiano/ Hora
$CP2_{l,i}^m$	Peso colombiano/ Hora
w_i^m	Adimensional
$x_{j,i}^{m,s}$	Adimensional
$T_{s,i}^{m,l}$	Hora
$C_{m,s}^i$	Peso colombiano/ Hora

La función objetivo del problema permite minimizar el costo total, considerando la penalización cuando se exceda el tiempo mínimo para responder o no se cumpla con la demanda. Esta función se compone de las siguientes ecuaciones:

$$\sum_m \sum_j \sum_i tv_{j,i}^m * Cv_{j,i}^m * y_{j,i}^m \quad (1)$$

La ecuación (1) corresponde al costo total de transportar maquinaria de la ubicación j a la ubicación i.

$$\sum_m \sum_i to_{m,i}^l * Co_{l,i}^m * y_{j,i}^m \quad (2)$$

La ecuación (2) corresponde al costo total de operación de la maquina tipo m en respuesta al desastre tipo l en la ubicación i .

$$\sum_m \sum_j \sum_i [r_{mi}^l - (x_{i,j}^{m,s})] * CP1_{j,i}^m \quad (3)$$

La ecuación (3) corresponde al costo total de penalización por unidad de demanda insatisfecha

$$\sum_m \sum_i \sum_j [(to_{m,i}^l + tv_{j,i}) - Tmax] * \rho * CP2_{l,i}^m \quad (4)$$

$$\rho \begin{cases} 0 & \text{si } (to_{m,i}^l + tv_{ij}) < Tmax \\ 1 & \text{si } (to_{m,i}^l + tv_{ij}) > Tmax \end{cases} \quad (5)$$

$\rho = \text{Factor de penalización de tiempo}$

Las ecuaciones (4) y (5) corresponden al costo total de penalización por exceder el tiempo de respuesta

El modelo se presenta a continuación:

Función objetivo:

$$\begin{aligned} \min = & \sum_m \sum_j \sum_i tv_{j,i}^m * Cv_{j,i}^m * y_{j,i}^m + \sum_m \sum_i to_{m,i}^l * Co_{l,i}^m * y_{j,i}^m + \sum_m \sum_j \sum_i [r_{mi}^l - \\ & (w_i^m + x_{i,j}^{m,s})] * CP1_{j,i}^m + \sum_m \sum_i \sum_j [(to_{m,i}^l + tv_{j,i}) - Tmax] * \rho * CP2_{l,i}^m \end{aligned} \quad (6)$$

Sujeto a:

$$\sum_i \sum_j \sum_m x_{j,i}^{m,s} * y_{j,i}^m \leq \sum_j H_{j,d}^m, \forall j \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_m w_i^m \leq \sum_i H_{i,d}^m, \forall i \quad (8)$$

$$\sum y_{ji}^m = 1, \forall m \quad (9)$$

$$\sum q_s = 1 \quad (10)$$

$$\sum_m \sum_j y_{j,i}^m = \sum_m \sum_j x_{j,i}^{m,s} \quad (11)$$

$$y_{j,i}^m \in \{0, 1\} \quad (12)$$

$$w_i^m \geq 0, \text{ entero} \quad (13)$$

$$x_{m,s}^{i,j} \geq 0, \text{ entero} \quad (14)$$

Las ecuaciones (7) y (8) aseguran que la maquinaria asignada desde un punto de oferta a la ubicación donde ocurre el desastre no sea mayor a la capacidad de los puntos de oferta; la ecuación (9) garantiza que la maquinaria sea asignada una única vez; la ecuación (10) comprueba que la sumatoria de las probabilidades de los escenarios s debe ser igual a 1; la ecuación (11) indica que para poder atender al punto de desastre i desde la ubicación j , debe estar asignado el lugar j a i ; la ecuación (12) hace que la variable de decisión $y_{j,i}^m$ sea binaria; las ecuaciones (13) y (14) garantiza que las variables de decisión w_i^m y $x_{m,s}^{i,j}$ son números enteros.

5 Diseño del Algoritmo genético de base biológica

El método de solución a utilizar en el trabajo de investigación se fundamenta en los mecanismos de evolución de la genética natural. Según estudios demuestran que los algoritmos genéticos (GA) son eficaces para resolver problemas de optimización en diferentes campos, sin embargo, su uso en operaciones de reproducción, cruce y mutación puede excluir los cromosomas óptimos durante el ciclo de generaciones. (Jui Sheng Chou, 2014)

El algoritmo genético que se plantea en este estudio es el BGA el cual utiliza un mecanismo de elitismo, conversión de valor de aptitud no lineal y un comportamiento migratorio biológico que combina dos poblaciones de cromosomas diferentes, lo que aumenta la diversidad de la población, estabiliza la población de cromosomas y permite la búsqueda continua del espacio del problema.

A continuación, se muestra la secuencia lógica del algoritmo en base biológica

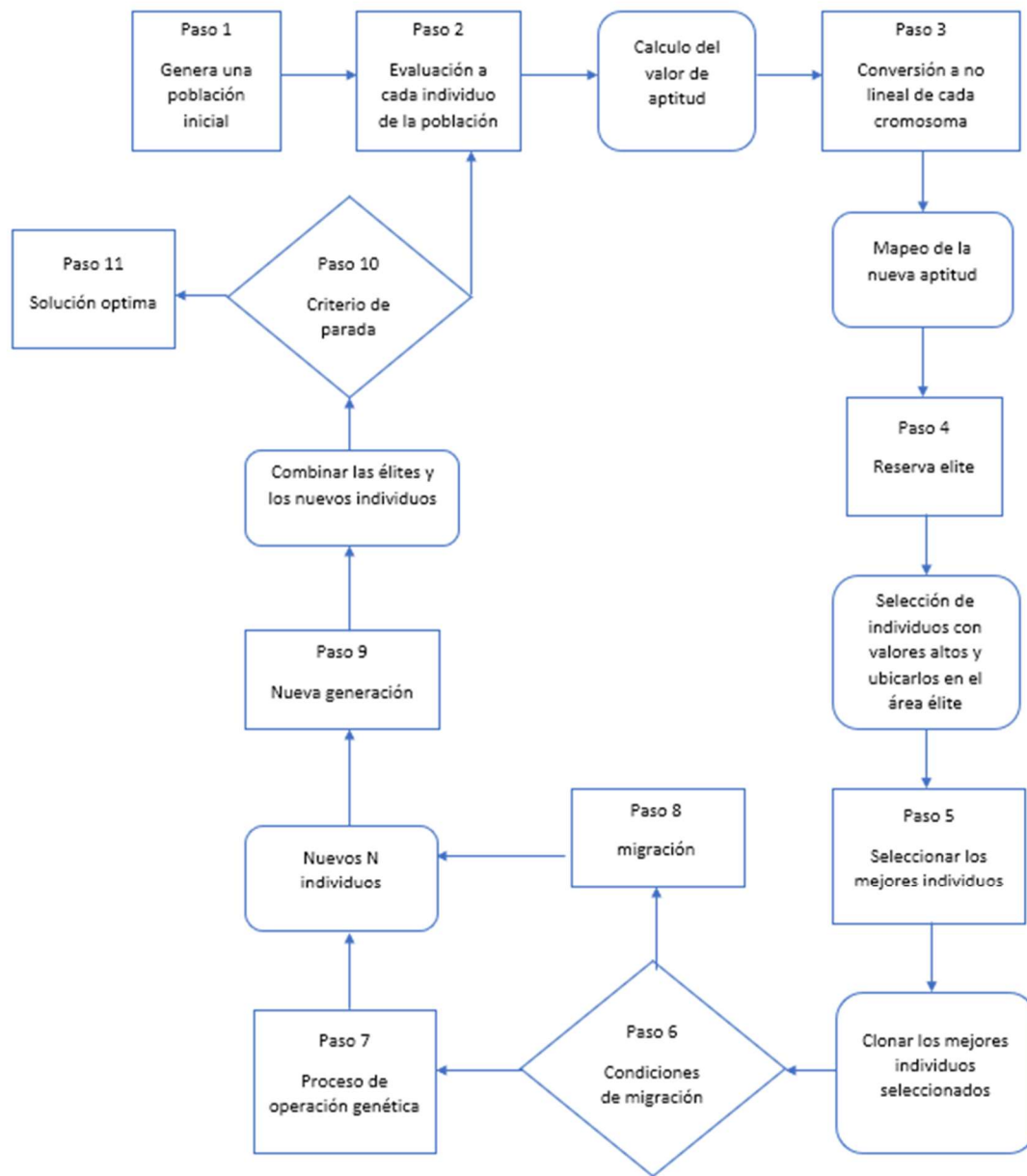


Figura 10 Ciclo algoritmo BGA. Tomada de (Jui Sheng Chou, 2014)

A continuación, se presentan cada uno de los pasos que conforman el algoritmo:

Paso 1. Se generan soluciones iniciales de asignación de maquinaria al azar que satisfagan la demanda.

Paso 2. Se evalúan cada una de las soluciones iniciales y se calcula el valor de la función objetivo de cada individuo.

Paso 3. Se realiza la conversión del valor calculado en la función objetivo de cada una de las soluciones iniciales a un valor fitness no lineal, el cual aumenta simultáneamente la competitividad entre los cromosomas. Esto asegura que el BGA utilice cromosomas con valores de aptitud elevados, lo que acelera la identificación de la solución óptima. Para llegar a esta conversión se realizan los siguientes pasos:

- Utilizar la función fitness para calcular los valores de aptitud correspondiente a la población de cromosomas.
- Utilizar los valores más altos y bajos de aptitud en la ecuación (15), para normalizar los valores fitness de la población de cromosomas entre 0 y 1

$$normalf_i = (1 - 0) \frac{f_i - \min(f)}{\max(f) - \min(f)} \quad (15)$$

Donde $normalf_i$ es el valor de la función objetivo normalizado, $\max(f)$ y $\min(f)$ son los valores más altos y bajos de la solución inicial de la función objetivo y f_i es el valor de aptitud del cromosoma individual.

Después de normalizar el valor de aptitud $normalf_i$ se utiliza la función de tangente hiperbólica ecuación (16) para convertir el valor de aptitud de $normalf_i$ a un valor no lineal.

$$Transfor_{f_i} = \frac{\text{hyperbolictangent}\left(\frac{normalf_i - 0.5}{0.4}\right) + 1}{2} \quad (16)$$

Paso 4. Se selecciona los mejores individuos M con los valores de aptitud más altos y se reservan en el área elite. El área elite hace referencia a la retención de buenos cromosomas para su uso en la reproducción de la próxima generación. Teniendo en cuenta que los buenos cromosomas no producen nueva descendencia cromosómica a través de cruces o mutaciones. Los cromosomas que están en el área de reserva elite almacenan simultáneamente sus valores de aptitud, por lo cual no se requiere realizar nuevamente el cálculo del valor de aptitud.

Los pasos para reservar los individuos en el área elite son los siguientes:

- Establecer el área de reserva elite como un conjunto vacío
- Generar aleatoriamente la población cromosoma de acuerdo con un parámetro de la población P.
- Utilizar la función de aptitud para calcular los valores de aptitud de la población de cromosomas.
- Combinar el conjunto de preservación de elite para usarlo como primera instancia de la población inicial de cromosomas P.
- Seleccionar los mejores cromosomas M del conjunto de aptitud reservado en el área elite.
- Realizar los pasos del algoritmo para producir N descendientes de poblaciones de cromosomas P.
- Seleccionar buenos cromosomas para actualizar el área de reserva de elite.
- Repetir los pasos del algoritmo para desarrollar la próxima generación de cromosomas P.

El número de relaciones cromosómicas es P (la suma de M y N).

Paso 5. Se clonan los mejores N individuos seleccionados en el paso 4.

Paso 6. Se verifica el criterio de migración, el cual se cumple cuando, después de un número predeterminado de generaciones de evolución, el valor de aptitud óptima permanece constante, es decir, no mejora. Si se cumple esta condición, se dirige al paso 8, de lo contrario al paso 7.

Paso 7. Los individuos seleccionados en el paso 4, se utilizan para el proceso de operación genética de cruce y mutación. Luego seguir al paso 8.

Paso 8. Se realiza una migración. La cual consiste en combinar dos poblaciones de cromosomas diferentes, lo que aumenta la diversidad de la población, estabiliza la población de cromosomas y permite la búsqueda continua del espacio del problema.

El proceso de migración permite salir de los óptimos locales para buscar soluciones optimas globales. Después de cumplir con el criterio de migración, se realiza la división de la población de cromosomas en las siguientes dos poblaciones:

1. Población de migración: Mediante un mecanismo se convierte el valor de aptitud no lineal para garantizar una tasa de mutación baja la cual genera k grupos de migración en el área de reserva elite. Si los cromosomas del área de reserva de élite no cambian, y si los valores de aptitud más altos se convierten por conversión de valor de aptitud no lineal, estos cromosomas ocupan toda la población de cromosomas, lo que limita la diversidad de la población de cromosomas y también limita los cromosomas a soluciones locales óptimas.
2. Población extranjera: Se combinan los cromosomas generados a partir de la población de cromosomas original mediante altas tasas de mutación.

Finalmente se combina la población de migración y la población extranjera para usar en los pasos posteriores.

Paso 9. Se combinan las élites y los nuevos individuos como la nueva generación.

Paso 10. Se verifica el criterio de parada. Si no se alcanza, vaya al paso 2; De lo contrario, vaya al siguiente paso.

Paso 11. Se detiene el proceso e informe la solución o soluciones óptimas o casi óptimas del área Elite.

5.1 Representación de los individuos

En la representación de los individuos del algoritmo genético de base biológica, se define la estructura del cromosoma de cada individuo, el cual está compuesto por una cadena de genes, donde está contenida la información. Este cromosoma se establece teniendo en cuenta varias estructuras de datos que contienen información relevante de los espacios que se asignan, los cuales se especifican a continuación:

Capacidad: Vector de n elementos contiene la capacidad de cada máquina (variable entera).

Demanda: Vector de n elementos que indica el requerimiento del punto donde ocurrió el desastre (variable entera).

Distancia: Matriz de $n \times n$ elementos que contienen la distancia entre ubicaciones (variable entera). La distancia varía de acuerdo con la ubicación del desastre.

Para llevar a cabo una posible solución del problema, se establecen dos cromosomas, el primero indican el número de clúster que va atender ciudad afectada y el segundo las ciudades que compone cada clúster. . La cantidad de genes que conforma el cromosoma depende del número de ciudades afectadas, como se muestra en las siguientes figuras.

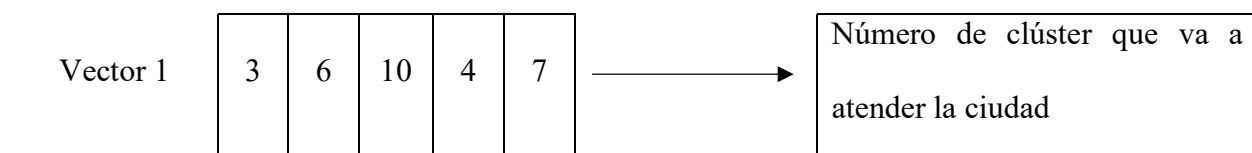


Figura 11 vector 1 número de clúster, autoría propia

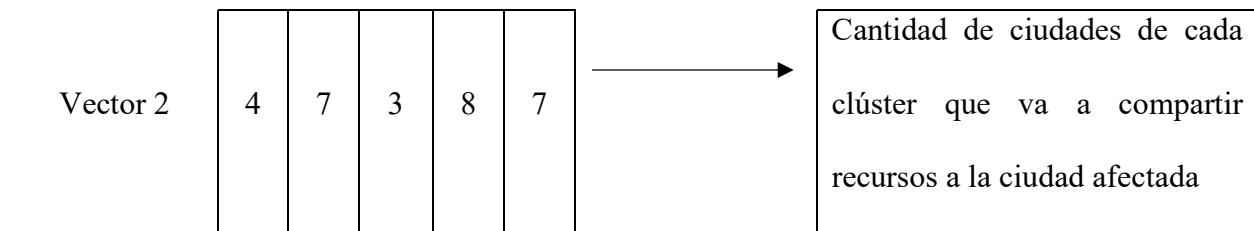


Figura 12 vector 2 cantidad de ciudades de cada clúster, autoría propia

Cada ciudad que va a ayudar atender el desastre en el lugar donde se presenta, tiene una capacidad total la cual está dada por la cantidad de máquinas disponibles, ya sea de remoción en masa o inundación. Se tiene en cuenta que para atender el desastre primero se asigna la maquinaria que está disponible en el sitio donde se presenta, si con esta capacidad de la maquinaria no es posible atender todo el desastre se procede a mirar las ciudades que pueden compartir recursos las cuales están dadas por el clúster, estás de acuerdo a su capacidad van a empezar a suplir la demanda desde la más cercana hasta la más retirada.

5.2 Mejora de la solución mediante operadores genéticos

Los operadores genéticos son los encargados de alterar la composición de los individuos que compiten por permanecer en la población tras un número determinado de iteraciones, buscando obtener individuos lo suficientemente adaptados para ser las soluciones optimas al problema.

En cada generación nueva se crean individuos que no se encontraban en la anterior. De esta forma, los algoritmos genéticos acceden a nuevos espacios de búsqueda. Estos individuos son generados al aplicar los operadores genéticos a individuos de la población anterior. El algoritmo de base biológica utiliza los mismos operadores genéticos de un algoritmo sencillo, los cuales son denominados de selección, cruce y mutación. Adicional a estos usa un operador genético

denominado migración, el cual, permite que el algoritmo encuentre una mejor solución a un menor costo.

5.3 Migración

En este operador, se crean dos poblaciones a partir del área de reserva elite donde a cada cromosoma se le asigna un numero aleatorio entre 0 y 1. La primera población llamada migración, se genera aplicando el operador de mutación a los cromosomas que tienen asignados números aleatorios inferiores a la tasa de mutación baja establecida como 0,2. La segunda población llamada extranjera, se genera aplicando el operador de mutación a los cromosomas que tienen asignados números aleatorios superiores a la tasa de mutación alta establecida como 0,8.

Finalmente se combina la población de migración y extranjera con la población inicial del área de reserva elite. Este operador de migración se aplica una vez se haya comprobado el criterio de migración, el cual se cumple cuando, después de un número predeterminado de generaciones de evolución, el valor de aptitud óptima permanece constante, es decir, no mejora.

5.4 Operadores de selección

Este tipo de operador genético permite seleccionar los individuos de la población actual copiando la información genética de los mejores adaptados al entorno para la generación de las nuevas descendencias. La selección debe asegurar que los individuos con el mejor valor en la función objetivo tengan mayor probabilidad de ser seleccionados como padres en el cruce, esto hace posible que aquellas soluciones que no pertenecen a la mejores puedan aportar información a la nueva generación. Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el método de reemplazo o selección por ruleta siendo la técnica de selección más usada.

5.4.1 Selección por el método de la ruleta

Este tipo de selección consiste en asignar un segmento de la ruleta a los individuos en base a la aptitud de estos y la aptitud total de la población. Los mejores individuos recibirán una porción de la ruleta, mayor que la recibida por los peores y se girará la ruleta tantas veces como selecciones se requiere. Para resolver la selección por el método de ruleta se manejan dos técnicas las cuales se nombran a continuación.

5.4.1.1 Ponderación de rango

Este enfoque es independiente del problema y encuentra la probabilidad según el lugar que ocupe el cromosoma. El primer paso consiste en ordenar los cromosomas de menor a mayor, posteriormente se calcula la probabilidad de ser elegidos a través de la siguiente fórmula:

$$P_n = \frac{N - n + 1}{\sum_n^N = 1}$$

Donde:

N: número total de cromosomas

n: posición que ocupa el cromosoma

La probabilidad que tiene un cromosoma de ser elegido se calcula una vez y se mantiene igual para la selección de todas las generaciones, debido a que, el número de individuos no cambia generación tras generación. Posteriormente, se calcula la probabilidad acumulada, sumando a la probabilidad acumulada anterior la posibilidad que tiene ese cromosoma de ser elegido.

El siguiente paso es generar un aleatorio para seleccionar los dos cromosomas los cuales comparan su valor de aptitud formando la nueva generación.

5.4.1.2 Ponderación de aptitud:

La probabilidad de selección es calculada considerando el valor de aptitud de cada cromosoma, se calcula una aptitud normalizada, la cual consiste en restar la aptitud más alta a cada cromosoma, logrando que en un problema de minimización los cromosomas de menor aptitud tengan más probabilidades de ser elegidos, en este caso no es necesario ordenar la población y el cálculo se repite en cada generación.

La probabilidad de ser elegido se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_n = \frac{A_n}{\sum_{n=1}^N A_n}$$

$$A_n = a_n - \max(a_n, n = 1, \dots, N)$$

Donde:

A_n : aptitud normalizada

a_n : aptitud de cada cromosoma

Una vez calculada la probabilidad de un cromosoma para ser elegido, se calcula la probabilidad acumulada. Posteriormente se generan dos aleatorios de los cromosomas para que compitan entre sí y se elige el cromosoma de mejor aptitud para formar la nueva generación.

5.5 Operador de cruce

Los operadores de cruce tratan de crear una generación de individuos nuevos pidiendo información a sus padres, una vez seleccionados dos padres, sus cromosomas se combinan utilizando los operadores de cruce y mutación. El operador de cruce consiste en intercambiar partes de dos vectores para formar dos nuevos, toma dos padres seleccionados y corta sus cadenas de

cromosomas en una posición elegida al azar para producir sub-cadenas iniciales y sub-cadenas finales, luego estas se intercambian produciendo dos nuevos cromosomas.

Los diferentes métodos de cruce podrán operar de dos formas diferentes. Si se opta por una estrategia destructiva los descendientes se insertarán en la población temporal, aunque sus padres tengan mejor ajuste. Por el contrario, utilizando una estrategia no destructiva la descendencia pasará a la siguiente generación únicamente si supera la bondad del ajuste de los padres. La idea principal del cruce se basa en que, si se toman dos individuos correctamente adaptados al medio y se obtiene una descendencia que comparta genes de ambos, existe la posibilidad de que los genes heredados sean precisamente los causantes de la bondad de los padres. (Gestal, s.f.).

5.5.1 Operador de cruce uniforme

El operador de cruce uniforme en lugar de crear descendientes directamente a partir de los padres los genera a través de una cadena de bits obtenida aleatoriamente o máscara de características similares a las cadenas de bits a cruzar con valores binarios. Si en una de las posiciones de la máscara hay un uno, el gen situado en esa posición en uno de los descendientes se copia del primer punto. Si por el contrario hay un cero el gen se copia del segundo padre. Para producir el segundo descendiente se intercambian los papeles de los padres, o bien se intercambia la interpretación de los unos y los ceros de la máscara de cruce (Rodríguez, 2014).

La secuencia de pasos a seguir se detalla a continuación.

- a) Se establece una máscara aleatoria de 0 y 1 para cada máquina de los cromosomas la cual se mantendrá fija.
- b) Si existe un 1 en la máscara la ciudad del primer padre pasa al primer hijo y si existe un 0 la ciudad del segundo padre pasa al primer hijo.

- c) Si existe un 1 en la máscara la ciudad del segundo padre pasa al segundo hijo y si existe un 0 la ciudad del segundo padre pasa al segundo hijo.

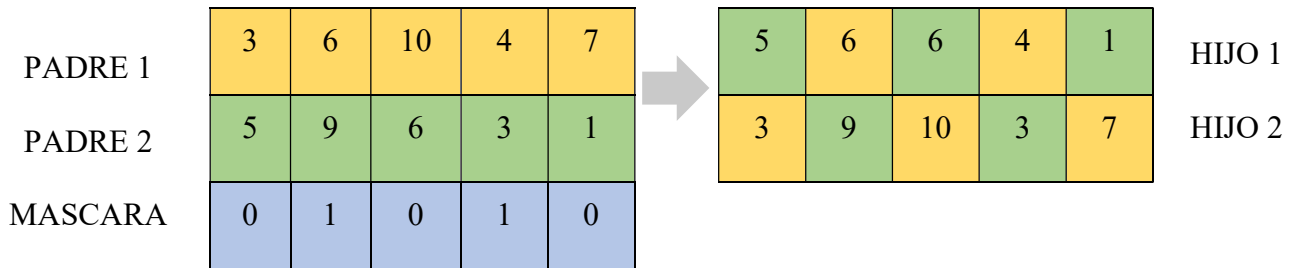


Figura 13 Cruce uniforme

Este proceso se realiza con los dos cromosomas que se manejan el local y el de clúster generando de esta forma dos descendientes de cada cromosoma sin generar soluciones infactibles.

5.6 Operador de mutación

El operador de mutación consiste en variar de forma aleatoria uno de los genes que compone el cromosoma, permitiendo introducir nueva información a la población.

La mutación se realiza con cierta probabilidad la cual es muy baja generalmente menor al 1%. Esto se debe a que los individuos suelen tener un ajuste menor después de ser mutados.

La mutación se basa en un operador básico, que brinda aleatoriedad a los individuos de una población. Si bien el operador de cruce se encarga de hacer una búsqueda en el espacio de posibles soluciones, es el operador de mutación el encargado de aumentar o reducir el espacio de búsqueda en un algoritmo genético y de proporcionar cierta variabilidad genética de los individuos.

Existen diversos operadores de mutación. A continuación, se detallan los operadores de mutación para representaciones reales utilizados en este trabajo.

5.6.1 Mutación por inserción.

La mutación por inserción es uno de los métodos más utilizados, debido a la ventaja de poder reorganizar la cadena de un individuo con el fin de mejorar la aptitud del individuo mutado

(Torres, 2013). Una inserción es un tipo de mutación que implica la adición de material genético. Una mutación por inserción puede ser pequeña e involucrar un único par de bases de ADN, a grande involucrar un fragmento de un cromosoma. (Maximilian Muenke, s.f.)

El operador IMS (Foguel, 1993) escoge aleatoriamente 2 puntos del individuo a mutar y se intercambian sus posiciones. Como se muestra a continuación en la figura 10 donde se intercambian entre las posiciones 2 y 6.

3	6	5	10	8	2	7	9	1	0
13	14	7	4	19	4	5	15	17	6

Figura 14 Mutación por inserción

5.7 Actualización de las mejores soluciones

Luego de finalizado el proceso ya sea el de migración o la aplicación de los operadores de cruce y mutación, se procede a comparar la solución brindada de los individuos de la generación anterior con los individuos de la nueva generación. Teniendo en cuenta que en el proceso de búsqueda de la mejor solución estuvo presente el área de reserva elite en la cual siempre estaban presentes las mejores soluciones, ya que, su uso por parte de BGA no solo retiene cromosomas superiores para la reproducción en la próxima generación, sino que también reduce el costo computacional y mejora el rendimiento de búsqueda

6 Resultados

6.1 Implementación del BGA al escenario de desastres simultáneos en Santander

Para la implementación de este estudio se plantea un escenario de prueba, en el cual se asigna maquinaria para la atención de desastres simultáneos tipo remoción en masa e inundación

que se presentan a nivel de Santander. A continuación, se presenta la información relevante para su desarrollo.

6.1.1 Levantamiento de la información

Inicialmente se realiza una investigación de la vulnerabilidad de los municipios de Santander ante los desastres de remoción en masa e inundación, donde se evidencia que las inundaciones se manifiestan principalmente al occidente del departamento, debido a la pendiente baja y morfología plana de esta zona (Santander, 2019).

En la figura 13 se muestra la susceptibilidad a inundaciones representada por tres categorías: alta susceptibilidad de color rojo, media susceptibilidad amarillo y baja susceptibilidad verde.

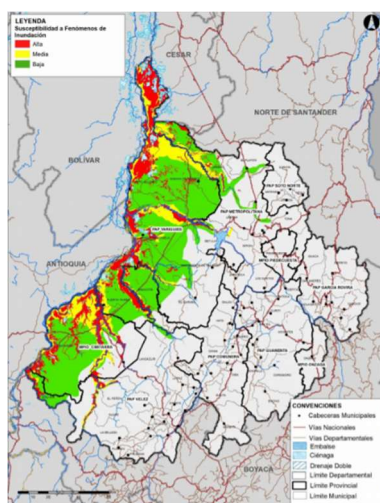


Figura 15 : Mapa de susceptibilidad a fenómenos de inundación en el departamento de Santander. Tomada de Dirección de Gestión del Riesgo de Santander

Para la amenaza remoción en masa, se clasifican tres categorías: baja, media y alta, donde se evidencia que el 19% del territorio se encuentra en amenaza alta, principalmente localizado al oriente del departamento, en las zonas andinas, altoandinas y páramos de la cordillera oriental, el 54% de los municipios presentan amenaza media, ubicados en la zona central y el 27% se localiza

en amenaza baja. En la figura 14 se muestra la susceptibilidad de remoción en masa de Santander. (Santander, 2019).

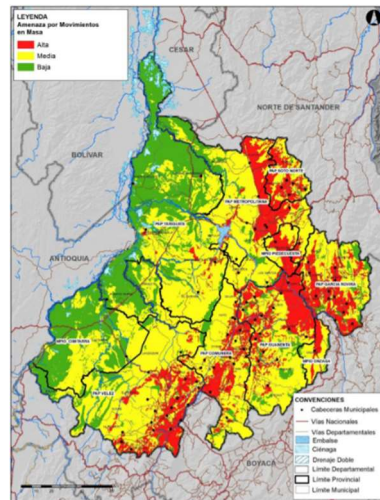


Figura 16 Mapa de amenaza por fenómenos de movimientos en masa en el departamento de Santander. Tomada la Dirección de Gestión del Riesgo de Santander

De acuerdo con la información mencionada anteriormente, se plantea un rango de cero a tres para categorizar el riesgo en los municipios del departamento, donde, cero significa que no tiene riesgo, uno tiene riesgo bajo, dos riesgos medios y tres riesgos altos de que se presente el desastre. Dado de que los desastres tipo remoción en masa e inundación, se pueden presentar de manera simultánea se realiza un factor de ponderación, con el fin de determinar los municipios con mayor impacto a la hora de presentarse este tipo de eventos, teniendo en cuenta la población existente en cada municipio, dato que se toma del último censo realizado en el año 2018. (ver apéndice 1).

Una vez determinada la ponderación de cada municipio de Santander, se realiza una matriz donde se relacionan las distancias entre municipios, con el fin de establecer los tiempos de viaje desde el lugar donde se encuentra la maquinaria, hasta el lugar donde ocurre el desastre. (ver apéndices 3 y 4).

Para la atención de desastres tipo remoción en masa e inundación, se cuenta con maquinaria tipo retroexcavadora y bombas con capacidades diferentes (tabla 3), las cuales serán vitales para realizar la asignación al momento de presentarse los desastres simultáneos. Teniendo en cuenta que se tiene maquinaria existente en cada municipio este valor se estableció arbitrariamente con el fin de analizar el comportamiento del algoritmo. (Ver apéndice 7)

REMOCIÓN EN MASA	RENDIMIENTO (m³/h)
Retroexcavadora E M312	22.1
Retroexcavadora E M315	48.86
Retroexcavadora E M318	136.8
Retroexcavadora E M320	81.72
Retroexcavadora E 320C	72.84
Retroexcavadora E 322B	81.72
Retroexcavadora E 325B	86.16
Retroexcavadora E 330B	90.61
Retroexcavadora E 345B	199.87
INUNDACIÓN	RENDIMIENTO (m³/h)
Bombas sumergibles para aguas residuales Gama ABS XFP 1,3-30 kW	792.000
Bomba de hélice vertical SJP	54.500

Tabla 3 Tipo de maquinaria. Autoría propia

Debido a que la maquinaria se traslada desde diferentes sitios se tiene en cuenta un costo de viaje y un costo de operación los cuales se plantean como un supuesto del promedio de un viaje de maquinaria pesada en Santander y el promedio de costo de operación de las diferentes maquinas. (tabla 4).

COSTO DE VIAJE	BOMBAS	MAQUINARIA AMARILLA
Combustible	\$50.000	\$175.000
Operario	\$3.785,53	\$3.785,53
Peaje	\$20.200	\$28.700
Total	\$73.985,53	\$207.485,53
COSTO DE OPERACIÓN	BOMBAS	MAQUINARIA AMARILLA
Combustible	\$100.000	\$250.000

Salario operativo	\$3.785,53	\$3.785,53
Total	\$103.785,53	\$253.785,53

Tabla 4 Costos de viaje y operación. Autoría propia

6.1.2 Escenario de prueba

Para efectos de esta investigación se plantea un escenario de seis ciudades afectadas, donde la dimensión del desastre se toma como un dato aproximado y las ciudades se establecen de acuerdo con la ponderación asignada inicialmente. En la tabla 7 se evidencian los lugares con el tipo y dimensión del desastre.

LUGAR	TIPO DE DESASTRE	DIMENSIÓN DEL DESASTRE	UNIDADES
Cimitarra	Remoción en masa	500000	m^3
Cimitarra	Inundaciones	105000	m^3
Puerto Wilches	Remoción en masa	200000	m^3
Puerto Wilches	Inundaciones	8245963	m^3
Vélez	Remoción en masa	800000	m^3
Málaga	Remoción en masa	1000000	m^3
Bolívar	Remoción en masa	200000	m^3
Bolívar	Inundaciones	3589452	m^3
Hato	Remoción en masa	253000	m^3

Tabla 5 Municipios donde ocurren desastres en el escenario de prueba. Autoría propia

6.2 Análisis del comportamiento generacional del algoritmo

Un aspecto importante del algoritmo es la definición de un criterio de parada que permita alcanzar un resultado suficientemente bueno y al mismo tiempo, que permita ahorrar recursos computacionales en generaciones que aportan mejora a la respuesta.

En el algoritmo propuesto como criterio de parada se usa la cantidad de generaciones, por esto se propone, hacer un análisis estadístico de los resultados que arroje cada una; lo anterior con el propósito de ubicar la cantidad de generaciones necesarias para alcanzar una buena respuesta. Para iniciar este análisis se realiza una corrida con 50 iteraciones y se va aumentando en 50 por corrida hasta alcanzar 300 iteraciones. Los resultados obtenidos para cada iteración versus el costo se presentan a continuación en la figura 15.

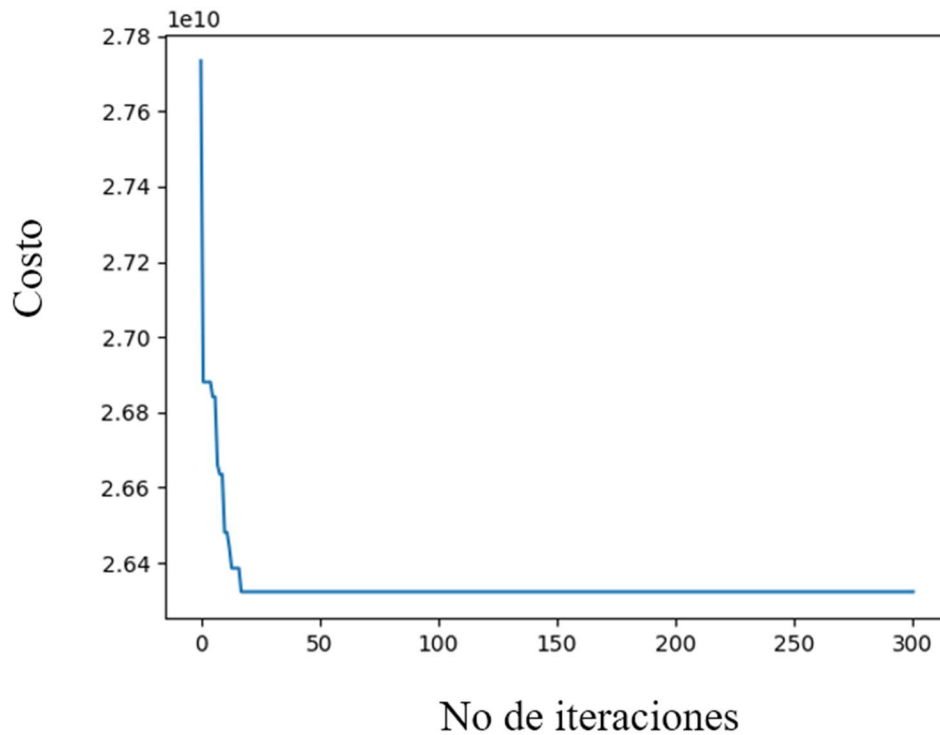


Figura 17 Resultado de costo versus número de generaciones para las ciudades donde ocurren desastres. Tomado del software Python (2021)

Después de una observación detallada es posible apreciar los siguientes eventos:

- Existe puntos estáticos en la gráfica. Lo cual indica un comportamiento que demuestra que prevalecen los datos del área de reserva elite establecidos como las mejores posibles soluciones.
- En el espacio de búsqueda explorado por el algoritmo no surge una mejor solución a partir de la iteración 17, lo cual sugiere que las grandes iteraciones no deben ser consideradas, pues las mejores soluciones se encuentran por debajo de 20.

6.3 Análisis de varianza para el número de generaciones

De acuerdo con los datos encontrados se realiza el análisis de varianza para conocer la diferencia de los resultados entre generaciones que se presentan. Para dar solución se establece el

diseño experimental de análisis de varianza de una vía o complemento aleatorio el cual consiste en asignar al azar una serie de experimentaciones asignadas previamente (Fallas, 2012).

Para realizar el análisis de varianza se toman las generaciones en las cuales hubo mejora de cada individuo comparando los costos como factor de evaluación. Esta decisión hace que el análisis sea de efectos fijos, ya que los niveles del factor a evaluar son decididos por los autores como se explicó anteriormente.

Para el desarrollo de este análisis, se contemplan 5 factores: 4, 10, 16, 20 y 30 generaciones, la última iteración se plantea de esta forma con el fin de dar un margen más amplio para generar mejores soluciones; además se realizan 4 corridas de algoritmo genético en base biológica por cada factor, como se muestra en la tabla 6.

Factores	Costo				
	1	2	3	4	PROMEDIO
4	26,554,265,463	26,873,034,909	27,034,188,831	25,857,528,213	26,579,754,354.07
10	25,431,025,620	26,892,939,146	26,237,433,144	26,237,433,144	26,199,707,763.63
16	25,100,634,109	26,016,667,120	25,119,549,704	25,120,687,751	25,339,384,671.09
20	24,962,681,293	25,827,007,155	26,179,074,070	24,717,760,165	25,421,630,670.74
30	25,342,674,735	25,024,651,795	24,558,962,658	25,014,049,506	24,985,084,673.58

Tabla 6 Número de iteraciones vs costo

Para dar solución a lo planteado anteriormente, se realiza la siguiente prueba de hipótesis:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1 \neq \text{Al menos una de las medidas es diferente}$$

La hipótesis nula plantea que las medias de todas las generaciones son iguales, con lo cual se concluiría que el mejor número de generaciones a correr será el que consuma menos recurso computacional. Al generar rechazo a la hipótesis nula no se puede afirmar que todas las medias de las generaciones sean diferentes, se puede interpretar que mediante la aplicación de comparaciones múltiples se establece cuál de las medias es significativamente diferente a las demás.

Para decidir si se rechaza o se acepta la hipótesis nula se establece el siguiente criterio con un nivel de significancia igual a $\alpha = 0.05$:

Si el valor $P < \alpha$ Se rechaza la hipótesis nula

Si el valor $P > \alpha$ No hay evidencia significativa que permita rechazar la hipótesis nula

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
4	4	1.06319E+11	26579754354	2.71595E+17
10	4	1.04799E+11	26199707764	3.58096E+17
16	4	1.01358E+11	25339384671	2.03956E+17
20	4	1.01687E+11	25421630671	4.81373E+17
40	4	99940338694	24985084674	1.03952E+17

Tabla 7 resumen análisis de varianza ANOVA. Adaptado de Excel

En la tabla 7 se presenta cada iteración con la suma total de los costos, el promedio y la varianza. Estos datos se usan para generación de la tabla ANOVA y el análisis de la varianza como se evidencia en la tabla 8.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6.96873E+18	4	1.74218E+18	6.138886969	0.00392763	3.055568276
Dentro de los grupos	4.25692E+18	15	2.83794E+17			
Total	1.12256E+19	19				

Tabla 8 tabla ANOVA. Adaptado de Excel

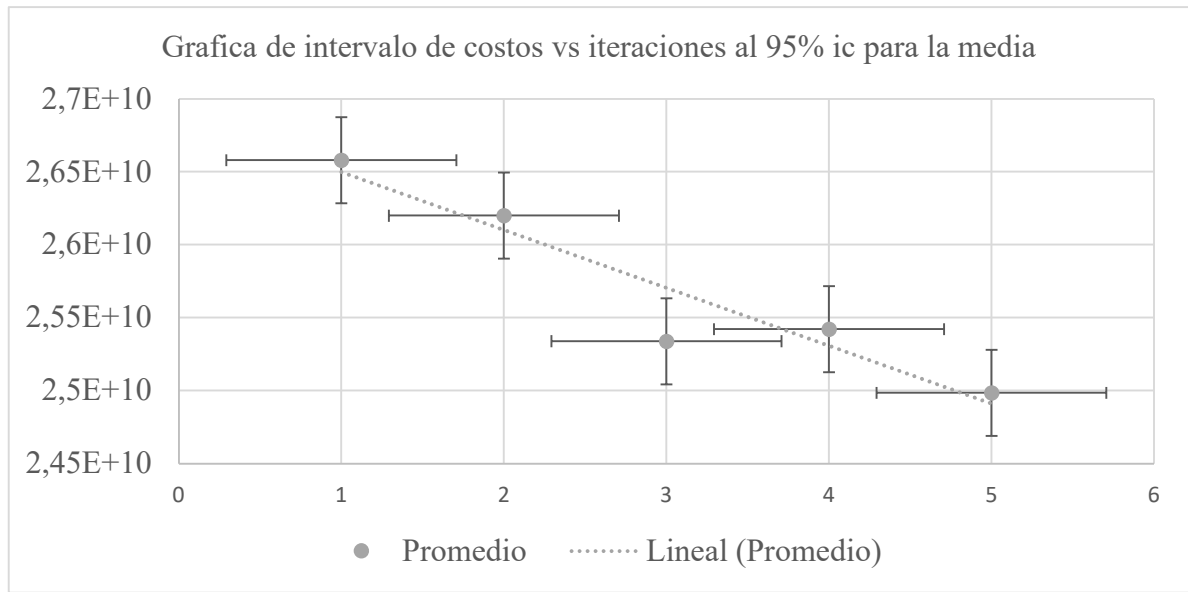


Figura 18 Grafico de intervalo de costo vs iteraciones. Adaptado de Excel

La figura 18 nos muestra los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA), del análisis realizado se obtiene que la probabilidad es igual a 0.00392763, con la cual es posible comprobar la regla de hipótesis nula obteniendo el siguiente resultado:

$$\text{Valor } p = 0.00392763 < \alpha = 0.05$$

Según este resultado se concluye que es rechazada la hipótesis nula, es decir que alguno de los valores de las generaciones es diferente a los demás datos; por lo cual es necesario aplicar una prueba de comparaciones múltiples.

El método utilizado para realizar la prueba de múltiples comparaciones es el método Tukey el cual se utiliza en la ANOVA creando intervalos de confianza para las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores mientras controla la tasa de error por familia en un nivel específico. (MINITAB, 2019).

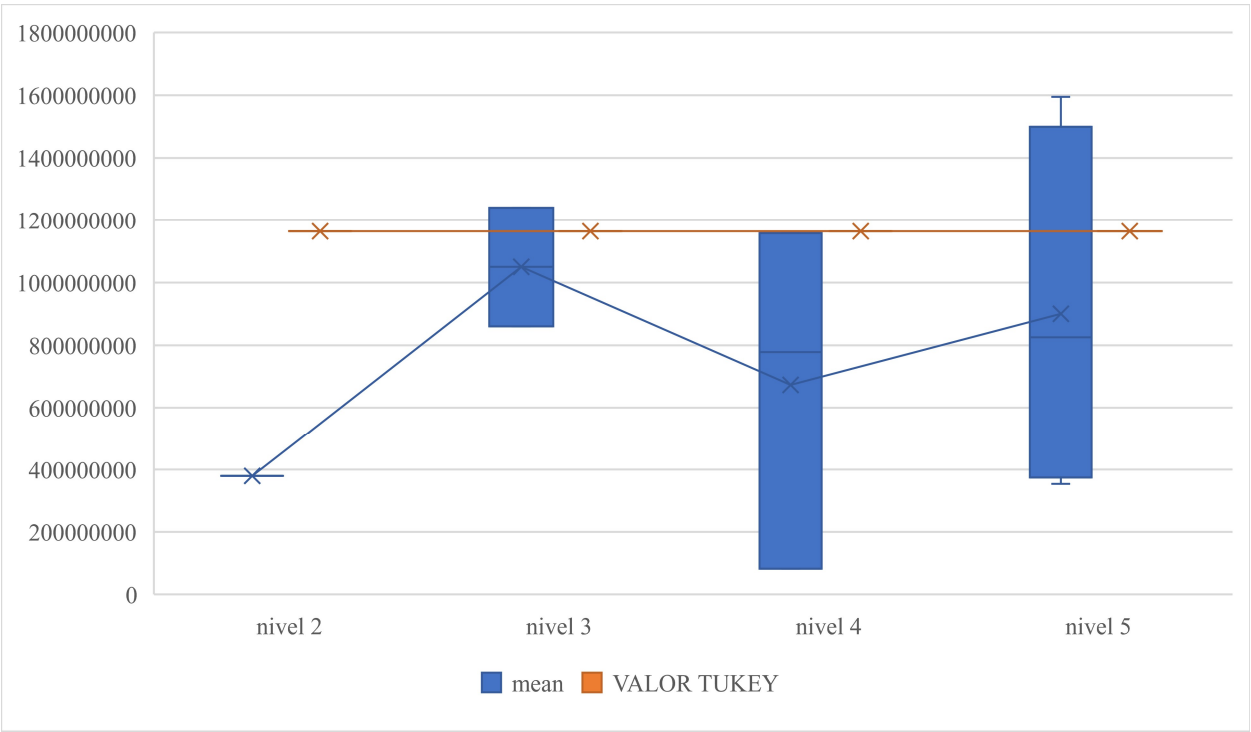


Figura 19 Diferencias de las medias para costo. Adaptado de Excel

GRUPO 1	GRUPO 2	PROMEDIO
nivel 1	nivel 2	380046590.4
nivel 1	nivel 3	1240369683
nivel 1	nivel 4	1158123683
nivel 1	nivel 5	1594669680
nivel 2	nivel 3	860323092.5
nivel 2	nivel 4	778077092.9
nivel 2	nivel 5	1214623090
nivel 3	nivel 4	82245999.65
nivel 3	nivel 5	354299997.5
nivel 4	nivel 5	436545997.2

Tabla 9 prueba tukey entre niveles. Adaptada de Excel

Los resultados arrojados por la prueba Tukey en la figura 19 y la tabla 9, se miden a partir de una línea constante que se asume como valor cero, si los datos se encuentran por debajo de la línea se asume que no existen diferencias significativas, por el contrario, si existen datos que se encuentren por encima de la línea se concluye que existen datos entre los niveles que arrojan cambios importantes.

Al observar la gráfica es posible evidenciar que se tiene cambios en los niveles 3, 4 y 5 los cuales son comprobados al hallar un valor comparador representado con la letra W. Esto nos permite concluir que al correr 0 iteraciones se genera en promedio una respuesta significativa menor que las respuestas generadas en los niveles 3, 4 y 5. En conclusión, se puede afirmar que el número de generaciones que permite estimar el mejor individuo y reducir el costo computacional son 40 generaciones, esto con el fin de ampliar el rango de generaciones para obtener una solución más acertada, con un tiempo computacional promedio de 74 segundos.

6.4 Resultados de la implementación del algoritmo al escenario de Santander

Según el escenario planteado anteriormente el programa arroja un número de ciudades que le pueden compartir recursos a las ciudades afectadas, teniendo en cuenta que dichas ciudades poseen una cantidad de máquinas las cuales tienen una capacidad en términos de metros cúbicos por hora de trabajo, de este modo se realiza el cálculo del total de máquinas asignadas por ciudad. Para conseguir la solución al problema de asignación de recursos en caso de desastres simultáneos se corrió el programa con un número de iteraciones igual a 40 y una población inicial de 100 individuos, estos datos se establecen luego del análisis del algoritmo mencionado anteriormente.

Como resultado al problema, el algoritmo planteado muestra un costo mínimo igual a \$25,440,966,459.320404, el cual se evidencia en la figura 20, donde se puede observar que el costo empieza hacer constante en la iteración 10.

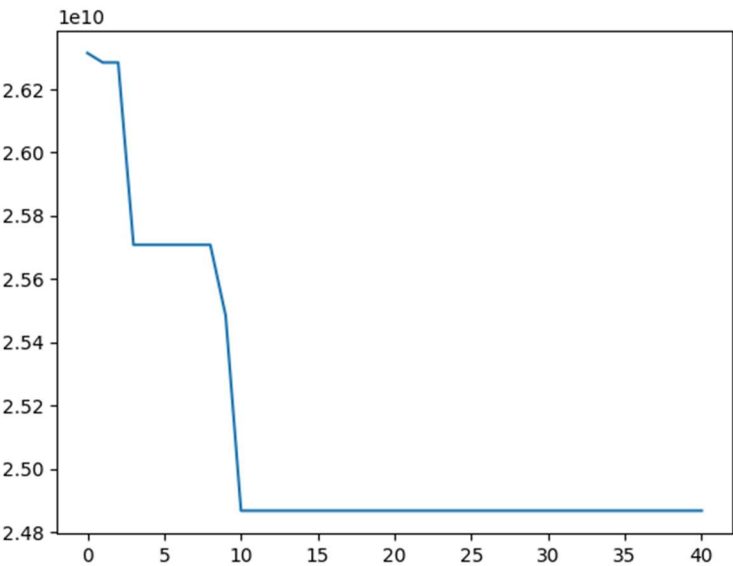


Figura 20 Grafica de costo del escenario en Santander. Adaptado de Python

Para el costo mínimo, el resultado de asignación de maquinaria para atender los desastres simultáneos que se presentan en 6 ciudades diferentes se muestra a continuación

Cimitarra									
Tipo de desastre			Remoción en masa			Dimensión del desastre		500,000	
	E_M312	E_M315	E_M318	E_M320	E_320C	E_322B	E_325B	E_330B	E_345B
Recursos asignados de la ciudad local									
Cimitarra	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Recursos asignados del clúster por ciudad									
Palmar	0	1	0	0	1	0	0	0	0
Galán	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Cabrera	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Simacota	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Villanueva	0	1	0	0	1	0	0	0	0
valle de san jose	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Ocamontes	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Aguada	0	0	1	0	0	0	0	0	0
San joaquin	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Total de tipos de maquina	0	2	2	1	2	0	1	0	1

Tabla 10 Asignación maquinaria a cimitarra tipo de desastre remoción en masa. Adaptado de Python

Cimitarra				
Tipo de desastre		Inundación	Dimensión del desastre	105000
	Bombas sumergibles para aguas residuales Gama ABS XFP 1,3-30 kW		Bomba de hélice vertical SJP	
Recursos asignados de la ciudad local				
Cimitarra	0		0	
Recursos asignados del clúster por ciudad				
la paz	0		1	
Concentración	1		0	
Charala	1		0	
Coromo	1		0	
Encino	1		0	
Total de tipos de maquina	4		1	

Tabla 11 Asignación de maquinaria a cimitarra tipo de desastre inundación. Adaptado de Python

En la ciudad de cimitarra se presentaron los dos tipos de desastre remoción en masa e inundación para darle atención a los desastres, la asignación establecida por el algoritmo se evidencia en la tabla 10 y tabla 11, donde se observa la cantidad de máquinas disponibles en cada ciudad, dando una capacidad total para atender el desastre de remoción en masa igual a $884.75 \text{ m}^3/\text{h}$, dicha capacidad la componen los recursos que se encuentran en la ciudad de Cimitarra y las ciudades que comparten sus recursos como lo son Palmar, Galán, Cabrera, Simacota, Villanueva, Valle de san José, Ocamontes, Aguada y San Joaquín y una capacidad total para atender el desastre inundación igual a $3225.5 \text{ m}^3/\text{h}$, Compuesta por Cimitarra y las siguientes ciudades, La Paz, Concentración, Charalá, Coromo y Encino; Estas ciudades fueron establecidas por el algoritmo para compartir sus recursos de acuerdo a sus distancias y coordenadas (ver apéndice E)

Puerto Wilches									
Tipo de desastre			Remoción en masa			Dimensión del desastre		200,000	
	E_M312	E_M315	E_M318	E_M320	E_320C	E_322B	E_325B	E_330B	E_345B
Recursos asignados de la ciudad local									
Puerto Wilches	0	0	1	0	1	1	0	0	0
Recursos asignados del clúster por ciudad									
Floridablanca	1	0	0	1	0	1	0	0	0
Total de tipos de maquina	1	0	1	1	1	2	0	0	0

Tabla 12 Asignación de maquinaria a Puerto Wilches para desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python

Puerto Wilches				
Tipo de desastre		Inundación	Dimensión del desastre	8245963
	Bombas sumergibles para aguas		Bomba de hélice vertical SJP	
Recursos asignados de la ciudad local				
Puerto Wilches	1		0	
Recursos asignados del clúster por ciudad				
Floridablanca	1		0	
Total de tipos de maquina	1		0	

Tabla 13 Asignación de maquinaria a Puerto Wilches para desastres tipo inundación. Adaptado de Python

En la ciudad de Puerto Wilches se presentaron los dos tipos de desastre remoción en masa e inundación, para darle atención a los desastres la asignación establecida por el algoritmo en base biológica se evidencia en la tabla 12 y tabla 13, dando una capacidad total para atender el desastre de remoción en masa igual a $476.9 \text{ m}^3/h$ y una capacidad total para atender el desastre inundación igual a $792 \text{ m}^3/h$, Estas capacidades están dadas por las máquinas que se encuentran en Puerto Wilches y Floridablanca la cual es la única ciudad que aplica para compartir sus recursos según la disponibilidad y distancia.

Velez									
Tipo de desastre			Remoción en masa			Dimensión del desastre		800,000	
	E_M312	E_M315	E_M318	E_M320	E_320C	E_322B	E_325B	E_330B	E_345B
Recursos asignados de la ciudad local									
Velez	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Recursos asignados del clúster por ciudad									
Guepsa	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Total de tipos de maquina	0	0	1	0	0	0	1	1	1

Tabla 14 Asignación de maquinaria para Vélez desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python

En la ciudad de Vélez se presentó el desastre tipo remoción en masa para darle atención, la asignación establecida por el algoritmo en base biológica se evidencia en la tabla 14, dando una capacidad total para atender el desastre de remoción en masa igual a $513.44 \text{ m}^3/h$, capacidad dada por las maquinas disponibles en la ciudad de Vélez y Güepsa la cual tiene la maquinaria necesaria para atender el desastre dentro del tiempo establecido y con menor costo.

Malaga									
Tipo de desastre			Remoción en masa			Dimensión del desastre		1,000,000	
	E_M312	E_M315	E_M318	E_M320	E_320C	E_322B	E_325B	E_330B	E_345B
Recursos asignados de la ciudad local									
Malaga	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Recursos asignados del clúster por ciudad									
La paz	1	0	0	0	1	0	0	0	0
landazuri	0	0	0	0	0	0	0	1	0
suaita	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Pinchote	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Coromoro	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Encino	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Zapatoca	1	0	0	0	0	1	0	1	0
Onzaga	0	0	0	1	0	0	0	1	0
Total de tipos de maquina	3	1	0	2	2	1	1	4	0

Tabla 15 Asignación de recursos a Málaga para desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python

En la ciudad de Málaga se presentó el desastre tipo remoción en masa, para darle atención a los desastres la asignación establecida por el algoritmo en base biológica se evidencia en la tabla 15, dando una capacidad total para atender el desastre igual a $954.6 \text{ m}^3/h$, esta capacidad la conforman las máquinas que se encuentran en el municipio de Málaga y en los municipios que

pueden compartir sus recursos para atender el desastre en el menor tiempo y al menor costo las cuales son, La Paz, Landázuri, Suaita, Pinchote, Coromoro, Encino, Zapatoca, Onzaga.

Bolívar									
Tipo de desastre			Remoción en masa			Dimensión del desastre		200,000	
	E_M312	E_M315	E_M318	E_M320	E_320C	E_322B	E_325B	E_330B	E_345B
Recursos asignados de la ciudad local									
Bolívar	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Recursos asignados del clúster por ciudad									
San Andres	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Total de tipos de maquina	0	0	0	0	0	0	1	1	0

Tabla 16 Asignación de maquinaria a Bolívar para desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python.

Bolívar				
Tipo de desastre		Inundación	Dimensión del desastre	3589452
	Bombas sumergibles para aguas		Bomba de hélice vertical SJP	
Recursos asignados de la ciudad local				
Bolívar	0		1	
Recursos asignados del clúster por ciudad				
Cabrera	1		0	
Simacota	1		0	
Villanueva	1		0	
Total de tipos de maquina	3		0	

Tabla 17 Asignación de maquinaria a Bolívar para desastre tipo inundación. Adaptado de Python

En la ciudad de Bolívar se presentaron dos tipos de desastre remoción en masa e inundación, para darle atención a los desastres la asignación establecida por el algoritmo en base biológica se evidencia en la tabla 16 y tabla 17, dando una capacidad total para atender el desastre de remoción en masa igual a $176.77 \text{ m}^3/h$, esta capacidad la establecen dos máquinas, las cuales se encuentran en el municipio de Bolívar y San Andrés, municipio que comparte sus recursos para la atención del desastre y una capacidad total para atender el desastre inundación igual a $2376 \text{ m}^3/h$, compuesta por el municipio de Bolívar y los municipios que comparten sus recursos los cuales son Cabrera, Simacota y Villanueva

Hato									
Tipo de desastre			Remoción en masa			Dimensión del desastre		253,000	
	E_M312	E_M315	E_M318	E_M320	E_320C	E_322B	E_325B	E_330B	E_345B
Recursos asignados de la ciudad local									
Hato	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recursos asignados del clúster por ciudad									
Guavatá	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Sucre	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Barrancabermeja	0	1	0	1	0	0	1	0	0
Total de tipos de maquina	0	1	1	1	0	1	1	0	1

Tabla 18 Asignación de maquinaria a Hato para desastre tipo remoción en masa. Adaptado de Python

En la ciudad del Hato se presentó el desastre tipo remoción en masa para darle atención al desastre la asignación establecida por el algoritmo se evidencia en la tabla 15, dando una capacidad total para atender el desastre de remoción en masa igual a $635.13 \text{ m}^3/h$, dada por los recursos disponibles en el municipio del Hato y los municipios que comparten sus recursos los cuales son Guavatá, Sucre y Barrancabermeja.

7 Conclusiones

Según la revisión de la literatura abordada sobre problemas de asignación de recursos, se logra identificar que en los últimos años ha crecido el interés por abordar este tipo de problemas. Sin embargo, en la revisión ejecutada no se encuentran autores que hayan desarrollado el problema de asignación con las mismas características propuestas en la presente investigación, lo cual permite que este proyecto sea una referente para futuras investigaciones sobre el mismo tema.

El modelo matemático propuesto para dar solución al problema de asignación de recursos al planificar desastres naturales simultáneos en escenarios inciertos permite cumplir de manera

clara las características planteadas, generando soluciones acordes al escenario propuesto para realizar la prueba de este.

. La aplicación del algoritmo en Base Biológica (BGA) en este proyecto evidencia la eficiencia al incluir un nuevo operador llamado migración el cual permite saltar de los óptimos locales, utilizando en este caso un factor importante como es la normalización de los valores fitness de los individuos y el área de reserva elite con los cuales se logra una aceleración de la identificación de la solución óptima. Demostrando que el BGA tiene una calidad de solución y un tiempo de ejecución satisfactorios frente al modelo propuesto.

8 Recomendaciones

Realizar un estudio en el cual se obtenga información real de desastres simultáneos que se presenten en Santander, así, como las máquinas que posee cada uno de los municipios pertenecientes al departamento y de esta forma poder dar datos reales a la hora de atender desastres simultáneos.

En base a este proyecto se recomienda realizar una investigación de la comparación entre una asignación de recursos utilizando un algoritmo genético sencillo y un algoritmo de base biológica como el ya propuesto, para así identificar las diferencias, ventajas y desventajas de estos.

Dada la ausencia de instancias con las cuales se puede verificar el algoritmo se deja abierta la posibilidad de crear e investigar parámetros con los cuales se puede evaluar más afondo la efectividad del problema propuesto.

Referencias Bibliográficas

- Ana Campos G., N. H.-N. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery*, 5480-4222.
- Arroyo, J. E. (2002). Heurísticas e metaheurísticas para otimização.
- B, B. (2008). Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics*.
- BANCO MUNDIAL . (14 de febrero de 2013).
- BUCARAMANGA, U. A.-D. (2016). ANDRES RICARDO BARRERA NAVARRO, ANGIE PAOLA HERNANDEZ GOMEZ. *UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS*, 150.
- Bycaramanga. (20 de 11 de 2017). Emergencia en San Vicente de Chucurí por derrumbe en vía principal . *EL TIEMPO* .
- Capítulo 1. Introducción: Optimización Estocástica. (s.f.). Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70544/fichero/1CAP1.pdf>
- Chandes, J., & Paché, G. (diciembre, 2009). Pensar la acción en el contexto de la logística humanitaria: las lecciones del sismo de pisco. *Journal of Economics, Finance and Administrative Science*, 47-61.
- Chen, L., & Miller-Hooks, E. (2012). Optimal team deployment in urban search and rescue. *Transp. Res. Part. B Methodol*, 984-999.
- Coppola, D. P. (2007). *Introduction to international disaster management*. Oxford: Elsevier.
- Cutter. (2013).
- Departamento Nacional de Planeación www.dnp.gov.co - (Índice Municipal de Riesgo de Desastres de Colombia- Abril 2018)

- Duarte, S., Becerra, D., & Fernando, L. (mayo, 2008). Un Modelo de Asignación de Recursos a Rutas en el Sistema de Transporte Masivo Transmilenio. *Avances en Sistemas e Información* , 11.
- Duran, S., Ergun, O., Keskinocak, P., & Swann, J. (2013). Humanitarian logistics : advanced purchasing and pre-positioning of relief items. *Handbook of global logistics: transportation in international supply chains*, 447-496.
- Fallas, J. (2012). Análisis de Varianza . En J. Fallas, *Análisis de Varianza* (págs. 7-8).
- Federick S. Hillier, G. J. (s.f.). *Introducción a la investigación de operaciones* . México .
- Fiedrich, F., Gehbauer, F., & Rickers, U. (2000). Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. *Safety Science*, 41-57.
- Foguel, D. (1993). Applying evolutionary programming to selected traveling salesman problems. *Cybernetics and Systems*, 27-36.
- George Palace T, M. P. (Julio 2018). Complejidad Computacional: Tiempo y ESpcio. *RACCIS*.
- Gestal, M. (s.f.). Obtenido de <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/AAGGtutorial/node12.html>
- Getty. (2018). Los 7 desastres naturales que estremecieron el planeta durante 2018. *Pulzo*. <http://www.santafeciudad.gov.ar/blogs/gdr/terminos/>. (s.f.).
- Ibarra, J. (1967). *Asignación de recursos, programación lineal y teoria economica*. Santiago de chile: Cuadernos del instituto latinoamericano de planificación economica y social .
- IMITOLA, K. J. (2015). UN MODELO MULTIOBJETIVO DE LOCALIZACIÓN-RUTEO PARA LA PLANEACIÓN LOGÍSTICA EN LA FASE DE PREPARACIÓN A SISMOS EN BUCARAMANGA. *GRUPO DE INVESTIGACIÓN ORGANIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS ADMINISTRATIVOS Y LOGÍSTICOS (OPALO)*.

Introducción a los algoritmos metaheurísticos. (s.f.). Obtenido de <http://sci2s.ugr.es/>

Juan Camilo López- Vargas, D. M.-A. (2017). Gestión de la logística humanitaria en las etapas previas al desastre: revisión sistemática de la literatura. *Rev.investig.desarro.innov*, 203-216.

Juan Gaytan Iniestra, P. E. (2010). Logística humanitaria: planeación y control del producto . *É Logística*.

Jui Sheng Chou, M. H. (2014). Biological-based genetic algorithms for optimized disaster response resource allocation. *ScienceDirect*, 52-67.

Kai, H., Yiping, J., Yufei, Y., & Zhao, L. (2015). Modeling multiple humanitarian objectives in emergency response to large-scale disasters. *SciendeDirect*, 1-17.

Karanik, M. J. (mayo, 2005). Asignación dinámica de aulas utilizando algoritmos genéticos . *Grupo de investigación sobre inteligencia artificial, Universidad tecnológica nacional* , 56-60.

Krishnapillai, K. (2009). Structural optimisation of 3D damage tolerant components comparing the biological and genetic algorithm solutions. *Engineering Failure Analysis*.

Lichun Chen. (s.f.).

Lichun, C., & Elise, M.-H. (2000). despliegue óptimo del equipo en búsqueda y rescate urbano. *ScienceDirect*, 984-999.

Lina Ximena Morales, S. A. (2017). *Localización de instalaciones y asignación de recursos mediante un algoritmo heurístico, para la atención post-desastre, en caso de inundación o remoción de masa*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, facultad de ingenierías Físico-Mecánicas.

López-Vargas, & Cárdenas-Aguirre. (2017). gestión de la logística humanitaria en las etapas previas al desastre: revisión sistemática de la literatura. *Revista de investigación, desarrollo e innovación* , 203-2016.

Lorenas S. Reyes, C. L. (2014). Modelo matemático para la programación de personal especializado en logística humanitaria post-desastre. *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* , 22-24.

los 7 desastres naturales que estremecieron el planeta durante 2018. (2018). *pulzo* .

Maximilian Muenke, M. (s.f.). *National Human Genome Research Institute* . Obtenido de <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Insercion#:~:text=Una%20inserci%C3%B3n%20es%20un%20tipo,un%20fragmento%20de%20un%20cromosoma>.

MINITAB. (2019). *SOPORTE DE MINITAB* . Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/multiple-comparisons/what-is-tukey-s-method/#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20de%20Tukey%20se,familia%20en%20un%20nivel%20especificado>.

Morales Celis, P. V. (2017). Localización de instalaciones y asignación de recursos mediante un algoritmo heurístico, para la atención post- desastre, en caso de inundación o remoción de masa. *UIS*.

Omar Viera, S. M. (2 de agosto de 2012). Logística humanitaria y su aplicación en Uruguay. *Universidad de la Republica oriental del Uruguay*, 47-56.

Optimización bajo incertidumbre. Técnicas de descomposición y aplicación en grid. (s.f.). Obtenido de <https://www.iit.comillas.edu/docs/IIT-08-042A.pdf>

Otero, M. (2019). Los 10 peores desastres naturales del siglo XXI. *OK diario*.

Ovideo, N. E. (julio-diciembre 2018). Desarrollo de la logística humanitaria: una revisión de la literatura. *Science Of Human Action*.

Paredes, R. C. (Noviembre 2000). Algoritmos genéticos: La evolución como modelo matemático. *SUMA*, 15-20.

Pichardo, M. F. (6 de septiembre de 2011). Revisión de Algoritmos Genéticos Aplicados al Problema de la Programación de Cursos Universitarios . *Programación Matemática y Software* , 17.

Rebeca Mori, K. R. (2018). Logística humanitaria: Proceso de respuesta óptima ante huacos de choisa. *PUCP*, 3-29.

riesgo, P. n. (14 de septiembre de 2016). *Unidad Nacional para la gestión del riesgo de desastres*.
Obtenido de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Plan-Nacional-de-Gestion-del-Riesgo.aspx>

Rodriguez, P. S. (2014). *Optimización y aproximación al problema de la Regresión simbólica a través de Straight Line Programs y algoritmos geneticos*.

Santander, E. d. (2019). Dirección de Gestión del Riesgo de Santander. En E. d. Santander, *Dirección de Gestión del Riesgo de Santander* (págs. 5-9).

SERRANO, N. (6 DICIEMBRE DEL 2017). LA VULNERABILIDAD DE SANTANDER. *PLATAFORMA*.

Smith, A. O. (Julio-diciembre 1995). Desastres y Sociedad. *La red* .

ThinkHazard. (16 de octubre de 2017). *Global Facility for disaster Reduction and Recovery*.

ThinkHazard. (16 de octubre de 2017). *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery*.

- Torres, I. H. (2013). *Estrategias de optimización con algoritmos genéticos complejos en la resolución de problemas de asignación de canales en redes celulares*.
- Trotti, M., Reis, M. d., Bueno, M., & Xodo, D. (abril 2015). Algoritmo genético para la asignación eficiente de recursos en casos de catástrofes climáticas. *Red de Universidades con Carreras en Informática (RedUNCI)*, 1-6.
- Vargas, I. (27 de agosto, 2019). Los 10 peores desastres naturales alrededor del mundo que nunca olvidaremos . *Cultura Colectiva*.
- Veloza, D. R. (s.f.). *Desastres Naturales en Colombia* . Obtenido de ESRI: <https://www.arcgis.com/apps/MapTour/index.html?appid=4f811859b56f492d94cb879d43b853da>
- Villada, S. C. (13 de noviembre de 2015). *El Colombiano* .
- Villada, S. C. (2015). Estas son las cinco tragedias naturales más grandes en Colombia. *El Colombiano*.
- Wassenhove, L. V. (2006). Logística de ayuda humanitaria: gestión de la cadena de suministro en marcha. *Journal of the Operational Research Society*, 489.
- Xuan Vinh Doan, D. S. (2019). Resource allocation when planning for simultaneous disasters. *ScienDirect*, 687-709.