

Un algoritmo híbrido para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventario de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica.

Rony Stewart Carranza Guzmán y Julieth Paola Sánchez Montañez

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director

Karin Julieth Aguilar Imitola

M. Sc en Ingeniería Industrial

Codirector

Henry Lamos Díaz

Ph.D en Física-Matemática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por ser mi fortaleza y llenarme de sabiduría y paciencia para no rendirme ante las dificultades.

A mis padres porque desde siempre han sido mi apoyo y nunca dejaron de creer en mis capacidades.

A mi compañero de vida y mi hija, que son mi polo a tierra, la motivación y el impulso que me han llevado a alcanzar esta meta.

A compañeros y amigos que me dejó este largo camino, porque cada uno aportó de una u otra forma a mi crecimiento personal y profesional.

Y por último, pero no menos importante, a Rony, mi compañero de luchas, por permanecer aún después de lo difícil que fue el proceso, por aguantar mis regaños, por alentarme cuando sentí que ya no podía más y porque juntos logramos llegar al final.

Julieth Paola Sánchez Montañez.

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía cada día y quien me acompaña en todas las decisiones en mi vida.

A mi madre María Gladys Guzmán de Carranza mi gran ejemplo de vida y apoyo, mi gran motivación, quien me enseñó a siempre seguir adelante ante los problemas, luchar por mis sueños y hacer de mí siempre una mejor persona.

A mis hermanos Rogers, Steven y Rossana por estar siempre presentes, por demostrarme que todo esto si era posible y sobre todo por apoyarme siempre en cada una de mis decisiones.

A mi padre Manuel Roberto Carranza Ramírez quien antes de fallecer deseo que cada uno de sus hijos lograsen ser profesionales y por enseñarme el significado del verdadero amor eterno.

A Lorena, por ser mi compañera, por estar presente, por brindarme amor y apoyo en cada momento que me sentida derrotado.

A Paola, por ser mi compañera de proyecto, por aguantarme día a día, pero sobre todo por demostrarme que si se podía lograr, gracias.

Rony Stewart Carranza Guzmán

Agradecimientos

A Dios, por permitirnos finalizar este camino satisfactoriamente.

A la Universidad Industrial de Santander, por los espacios, los recursos, todas las experiencias vividas y aprendizajes adquiridos que aportaron a nuestro crecimiento personal y profesional.

A los profesores Karin Aguilar y Henry Lamos, por ser guías en este proceso, su acompañamiento y asesoría fueron vitales.

Al grupo de investigación OPALO, por las herramientas brindadas en la ejecución del proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Generalidades del proyecto	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Justificación del proyecto	19
1.3 Objetivos.....	22
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.4 Metodología	22
2. Revisión de la literatura	26
2.1 Análisis bibliométrico.....	26
2.2 Análisis preliminar de la literatura.....	31
3. Marco teórico	37
3.1 Logística humanitaria.....	37
3.2 Suministros humanitarios.....	40
3.3 Desastre.....	41
3.4 Gestión del riesgo de desastres.	41
3.5 Procesos de la Gestión del Riesgo de Desastres	42
3.6 Modelos matemáticos.	43
3.7 Modelo de optimización	44
3.8 Optimización combinatoria.....	44

3.9 Problemas de optimización combinatoria	44
3.10 Complejidad computacional.	45
3.11 Métodos de solución.	46
3.12 Métodos exactos.....	47
3.13 Métodos aproximados.....	47
3.14 Métodos heurísticos.	48
3.15 Meta-heurísticas.....	49
3.16 Métodos híbridos	51
3.17 Algoritmo genético	51
3.17.1 Codificación y generación de la población.....	53
3.17.2 Evaluación de aptitud (fitness).....	54
3.17.3 Selección	54
3.17.3.1 Selección por ruleta.....	54
3.17.3.2 Selección por torneo.	55
3.18 Recombinación	55
3.18.1 Cruce con un punto.	55
3.18.2 Cruce con dos puntos.	56
3.18.3 Cruce Alternativo:.....	56
3.18.4 Cruce combinado.	57
3.19 Mutación	58
3.20 Programación estocástica.....	58
3.20.1 Clasificación de los modelos de programación estocástica.	58
3.21 Problema de localización de instalaciones en Logística humanitaria.....	59

3.22 Problema de asignación de recursos en Logística humanitaria	60
4. Formulación del modelo matemático.....	61
5. Diseño del algoritmo híbrido	65
5.1 Algoritmo genético	65
5.1.1 Etapa 1: Codificación y generación de la población inicial.....	65
5.1.1.1 Codificación.....	65
5.1.1.2 Generación de la población inicial.....	66
5.1.1.3 Gen 3. Albergues.	67
5.1.1.4 Selección.....	68
5.1.1.5 Recombinación.	68
5.1.1.6 Mutación.	69
5.1.2 Algoritmo VNS.....	70
6. Validación del algoritmo.....	74
6.1 Instancias.....	75
6.2 Cálculo de la demanda	76
6.3 Estudio de orden de complejidad temporal del algoritmo híbrido implementado.....	84
6.4 Resultados de la experimentación del algoritmo híbrido.....	85
7. Conclusiones.....	88
8. Recomendaciones	90
Referencias bibliográficas.....	91

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Número de desastres naturales entre los años 2008 al 2017 y el año 2018.....	17
Figura 2. Tipología de fenómenos calamitosos.	18
Figura 3. Fases metodológicas para un estudio en investigación de operaciones.	23
Figura 4. Ecuación de búsqueda base de datos Web of Science.....	27
Figura 5. Producción Científica Anual. Adaptado de RStudio.....	27
Figura 6. Producción Científica por Países.....	28
Figura 7. Fuentes más relevantes.	29
Figura 8. Coautoría entre países.....	30
Figura 9. Nube de palabras.	31
Figura 10. Etapas de la Logística Humanitaria.....	38
Figura 11. Clasificación de los Desastres Naturales.....	41
Figura 12. Estructura general de un modelo matemático	43
Figura 13. Clasificación de las técnicas de optimización.	46
Figura 14. Principales técnicas meta-heurísticas	50
Figura 15. Cromosoma.....	52
Figura 16. Etapas algoritmo genético.	53
Figura 17. Selección por ruleta	55
Figura 18. Cruce con un punto-	56
Figura 19. Cruce con dos puntos.....	56
Figura 20. Cruce alternativo.	57
Figura 21. Cruce combinado.....	57
Figura 22. Cromosoma propuesto.....	65
Figura 23. Ejemplo cromosoma centros de distribución.	66
Figura 24. Ejemplo cromosoma número de albergues.....	67
Figura 25. Ejemplo cromosoma asignación de albergues.....	68
Figura 26. Ejemplo cromosoma porcentaje de producto enviado.....	68
Figura 27. Ejemplo cromosoma cruce gen 1.	69

Figura 28. Ejemplo cromosoma cruce gen 3	69
Figura 29. Ejemplo cromosoma mutado.....	70
Figura 30. Diagrama de flujo algoritmo VNS.	72
Figura 31. Diagrama de flujo algoritmo hibrido propuesto.	74
Figura 32. Zonas con mayor vulnerabilidad	78
Figura 33. Mapa de zonificación de Bucaramanga.....	79
Figura 34. Porcentaje de evacuados en la zona k para un sismo de intensidad t.	82
Figura 35. Comportamiento de la demanda en cantidad de kits.	83
Figura 36. Comportamiento del algoritmo en función del número de cromosomas y el tiempo computacional.	85
Figura 37. Cromosoma resultado de la experimentación 1.....	88

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Cumplimiento de objetivos	16
Tabla 2. Datos de entrada del problema planteado	75
Tabla 3. Resultados adaptados del lenguaje de programación Phyton.	86
Tabla 4. Información general de la experimentación 1.....	87

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en la sala de base de datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Código del algoritmo híbrido propuesto.

Apéndice B. Albergues y sus capacidades.

Apéndice C. Datos correspondientes a las instancias seleccionadas.

Apéndice D. Datos correspondientes a las instancias no seleccionadas.

Apéndice E. Comportamiento de la demanda.

Apéndice F. Artículo publicable.

Resumen

Título: Un algoritmo híbrido para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventario de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica*

Autores: Carranza Guzmán, Rony Stewart y Sánchez Montañez, Julieth Paola**

Palabras claves: Algoritmo híbrido, algoritmo genético, demanda estocástica, costo de privación, gestión de inventarios, logística humanitaria.

Descripción:

La logística humanitaria se considera una de las principales disciplinas que participan en la atención a un desastre, para ello la generación de constante conocimiento en el desarrollo de modelos y métodos de solución que busquen optimizar el uso de los recursos constituyen la clave para ayudar a disminuir los efectos y consecuencias de los desastres. El problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventarios de suministros para la logística post desastre es uno de los temas más recientes en el campo de la investigación. En consecuencia, el objetivo principal abordado en el modelo de programación lineal, es la minimización de la suma de todos los costos del problema incluyendo los costos generados por la falta de acceso a la ayuda humanitaria. Dado que este tipo de problema es NP-Hard, se propone utilizar un algoritmo híbrido entre la búsqueda de vecindario de variable (VNS) y el algoritmo genético, proporcionando una solución al problema mencionado. Con esta herramienta se busca mejorar las decisiones en cuanto a la ubicación de los depósitos y la asignación de los recursos humanitarios, haciéndolas factibles para el problema, y de esta manera, se valida el desempeño del algoritmo propuesto en términos de calidad de la solución y menor tiempo computacional.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Estudios Industriales y Empresariales Director Karin Julieth Aguilar Imitola M. Sc en Ingeniería Industrial Codirector Henry Lamos Díaz Ph.D en Física-Matemáticas

Abstract

Title: A hybrid algorithm for the problem of distribution points location and supply inventory management for post-disaster logistics with stochastic demand*.

Author: Carranza Guzmán, Rony Stewart y Sánchez Montañez, Julieth Paola **

Keywords: Hybrid algorithm, genetic algorithm, stochastic demand, deprivation cost, inventory management, humanitarian logistics.

Description:

Humanitarian logistics is considered one of the main disciplines involved in disaster response, for this the generation of constant knowledge in the development of models and solution methods that seek to optimize the use of resources are the key to help reduce the effects and consequences of disasters. The problem of location of distribution points and inventory management of supplies for post-disaster logistics is one of the most recent topics in the field of research. Consequently, the main objective addressed in the linear programming model is the minimization of the sum of all the costs of the problem, including the costs generated by the lack of access to humanitarian aid. Since this type of problem is NP-Hard, it is proposed to use a hybrid algorithm between the variable neighborhood search (VNS) and the genetic algorithm, providing a solution to the aforementioned problem. This tool seeks to improve decisions regarding the location of deposits and the allocation of humanitarian resources, making them feasible for the problem, and in this way, the performance of the proposed algorithm is validated in terms of quality of the solution and less computational time.

* Project of grade

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas Escuela de Estudios Industriales y Empresariales Director Karin Julieth Aguilar Imitola M. Sc en Ingeniería Industrial Codirector Henry Lamos Díaz Ph.D en Física-Matemáticas

Introducción

Los desastres naturales siempre han existido, son parte de la naturaleza y son inevitables, provocan pérdidas y daños tanto materiales como humanos. Todos los años, el mundo se ve sacudido por el paso de fenómenos y eventos de origen natural que alteran el funcionamiento normal de una sociedad.

A nivel mundial, los desastres naturales provocaron en 2018 más de 10.000 personas muertas y 61,7 millones de afectados, ya sea por sufrir algún tipo de herida o porque perdieron su trabajo o vivienda y se vieron obligados a emigrar.

Según el informe presentado en enero de 2019 por parte de la Oficina para la Reducción de Riesgos de Desastres de Naciones Unidas (UNISDR), la cifra de fallecidos en 2018 se situó como la sexta más baja en lo que va del siglo, esto, como resultado de que no hubiera ninguna catástrofe de enormes proporciones, y también por una mejor gestión de riesgos a nivel nacional y local, pero aun así superó los 8.500 fallecidos de 2016 y los 9.700 de 2017 (EFE Verde, 2019). En Latinoamérica el peor desastre natural en 2018 fue la erupción del volcán de Fuego en Guatemala, con 425 muertos. Centroamérica fue en este mismo año una de las regiones más golpeadas por las sequías que afectaron a 2,5 millones de personas y contribuyeron al aumento de la migración en países como Honduras, Guatemala, El Salvador o Nicaragua, según UNISDR (Broto, 2019).

A nivel nacional, Según la Unidad de Manejo y Análisis de Información Colombia (UMAIC) en el año 2017 resultaron afectadas 603.302 personas por desastres naturales, siendo las inundaciones las que ocasionan mayor impacto (79%) en la población afectada. Por otro lado, según el índice para la gestión de riesgos (INFORM por sus siglas en inglés) Colombia registra un índice muy alto (5.4) y se posiciona en el puesto número 30 entre 191 países del mundo en cuanto a crisis humanitaria (Oficina de Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios,

2018). Existen condiciones desfavorables para la gestión de desastre que se enfatizan en países en desarrollo como Colombia, con características geo-climáticas y socio políticas que la hacen vulnerable cada año a múltiples desastres. Algunas de estas características están relacionadas con su posición geográfica ya que el país se encuentra ubicado en la “convergencia de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe y América del Sur” las cuales son dan origen a amenazas sísmicas en la región. Otras, tienen que ver con su accidentalidad geográfica ya que Colombia posee tres cordilleras sobre las cuales yacen 27 volcanes y una amplia hidrografía, representando así, un alto riesgo de inundación, deslizamientos y demás impactos causados por erupciones, movimientos telúricos y lluvias prolongadas (Quiroga, 2019).

Por todo lo anterior, la logística humanitaria ha venido cobrando cada vez más importancia no solo a nivel mundial sino a nivel nacional y local, ya que el mejoramiento de la calidad de vida de los seres humanos está relacionado de alguna manera con la capacidad de brindar una mayor seguridad y rápida solución frente a las consecuencias que puede generar un evento desastroso ya sea de carácter natural o propiciado por el hombre. La logística humanitaria puede actuar en tres momentos del desastre: antes, durante y después, haciendo uso de diferentes técnicas orientadas a concretar estrategias y tomar decisiones a través de modelos matemáticos que permitan localizar ayudas, definir estrategias operativas de búsqueda y rescate y disminuir el tiempo de respuesta a través del ruteo y optimización del transporte.

Es por esto que esta investigación se centra en una de las decisiones más críticas que se deben tomar en la logística humanitaria, y es la relacionada con el diseño de la cadena de suministro, la cual consiste en la adecuada ubicación de los centros donde se almacenan los recursos humanitarios tales como agua, medicina, alimentos, entre otros; así como la distribución óptima de los mismos luego de que haya ocurrido un desastre natural y poder garantizar el menor tiempo de respuesta para recuperar o mantener el bienestar de la población afectada o de la que se encuentra en riesgo potencial.

A continuación, en la Tabla 1, se expone el cumplimiento de los objetivos propuestos en la presente investigación.

Tabla 1.*Cumplimiento de objetivos*

Objetivos específicos	Numerales relacionados
Revisar la literatura relacionada con los problemas de ubicación de puntos de distribución, gestión de los inventarios y su solución simultánea, aplicados a la logística humanitaria.	Capítulo 2
Formular un modelo matemático para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventarios de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica.	Capítulo 4
Diseñar en el lenguaje de programación Python un algoritmo híbrido para dar solución al problema planteado.	Capítulo 5
Implementar el algoritmo diseñado y validarlo mediante Benchmarking en escenarios estudiados previamente en la academia.	Capítulo 6
Elaborar un artículo académico de carácter publicable con base en la investigación realizada y en los resultados obtenidos.	Apéndice F

1. Generalidades del proyecto

1.1 Planteamiento del problema

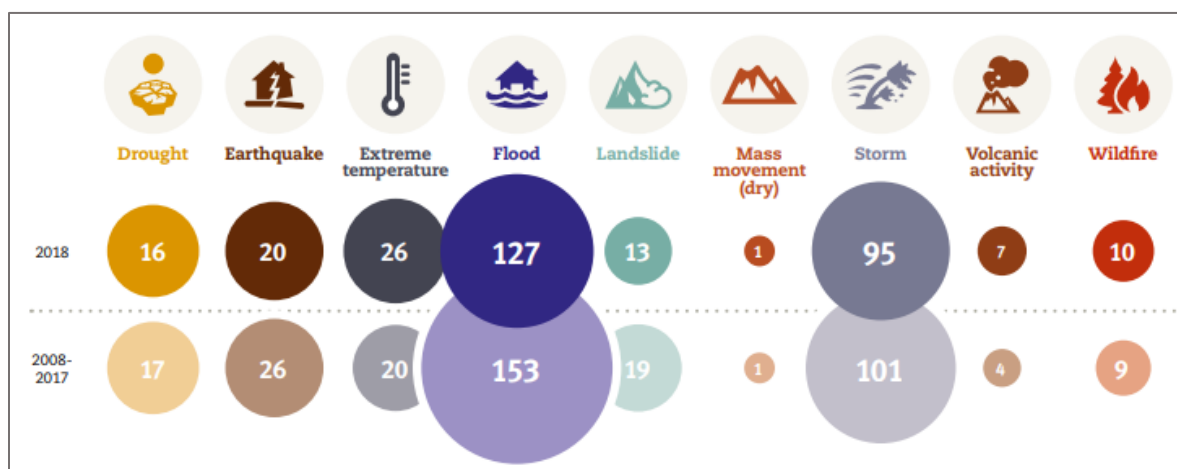
Un desastre es un evento calamitoso, repentino o previsible, que trastorna seriamente el funcionamiento de una comunidad o sociedad y causa unas pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales que desbordan la capacidad de la comunidad o sociedad afectada para hacer frente a la situación a través de sus propios recursos. Aunque frecuentemente están causados por la naturaleza, los desastres pueden deberse a la actividad humana. (Vulnerabilidad + Peligro)

/ Capacidad = Desastre. Un peligro, combinado con vulnerabilidad e incapacidad para reducir sus consecuencias negativas potenciales, da lugar a un desastre. (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies., 2019)

En los últimos años el resultado de la interacción entre seres humanos y desastres naturales ha dejado considerables pérdidas materiales y aún más importantes vidas humanas. El número de desastres naturales con el transcurrir de las últimas décadas ha aumentado de forma alarmante. Cualquier tipo de desastre es considerado un evento de suma importancia puesto que es impredecible. La Figura 1 muestra el número de desastres naturales ocurridos entre los años 2008 y 2017 y los desastres naturales en el 2018. Para el año 2018 la cantidad de desastres es casi igual a la del transcurso de años del 2008 al 2017. (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2019).

Figura 1.

Número de desastres naturales entre los años 2008 al 2017 y el año 2018



Nota. Adaptado de Centre for Research on the Epidemiology of Disaster -CRED, 2019

Actualmente a nivel mundial hay países que afrontan de forma inadecuada los primeros instantes después de ocurrido un desastre natural y actuar correctamente en el primer lapso de tiempo resulta importante si cuantificamos el número de vidas humanas que se podrían redimir y por consiguiente disminuir el impacto ocasionado cada vez que ocurra un inesperado suceso natural. En la Figura 2 se muestra la tipología de los desastres. (Capacci & Mangano, 2015).

Figura 2.*Tipología de fenómenos calamitosos.*

Tipologías	Subtipologías de fenómenos		Fenómenos	Nivel de responsabilidad del hombre
Naturales	Geofísicos	Subsuelo	Terremotos, erupciones	Ninguna o responsabilidad indirecta
		Superficie terrestre	Inundaciones, deslizamientos	
		Atmósfera	Huracanes, calor y frío intensos, tormentas eléctricas	
	Biológicos	Macro fauna	Plagas de langostas, termitas	
		Micro fauna	Infecciones causadas por bacterias, virus	
		Flora	Plantas venenosas, la fiebre del heno	
Seminaturales			Smog, desertificación, avalancha, calentamiento global	Acentuadas por el hombre
Antrópicos			Contaminación, desastres industriales, guerras	Provocadas por el hombre

Nota. Adaptado de (Capacci & Mangano, 2015).

Colombia está constituida por una amplia diversidad geológica, geomorfológica, hidrológica y climática, la cual se expresa en un conjunto de fenómenos que representan una potencial amenaza para el desarrollo social y económico del país. Se localiza en la esquina noroccidental de Suramérica, con un área de 1'141.748 km² en que el 35% del territorio está ubicado en la Cordillera de los Andes, resultado de una larga evolución durante la cual grandes bloques corticales chocan entre sí, lo que da origen a un complejo sistema montañoso que recorre el país de sur a norte, y que se manifiesta en una importante actividad sísmica y volcánica. (Campos, y otros, 2012).

De esta manera, la logística humanitaria se considera una de las principales disciplinas que participan en la atención a un desastre, para ello la generación de constante conocimiento en el desarrollo de modelos y métodos de solución que busquen optimizar el uso de los recursos constituyen la clave para ayudar a disminuir los efectos y consecuencias de los desastres. (Santana, 2015).

La gestión de la cadena de suministro en situaciones de emergencia es una labor compleja, debido a la incertidumbre en la demanda, carencia de infraestructura y de canales de información.

El principal problema consiste en que la gestión de la cadena de suministro en situaciones de emergencia es coordinada igual a la cadena de suministro comercial, aunque se puede decir que la logística humanitaria y la logística comercial tienen puntos en común donde hay una capacidad de suministros a enviar, una demanda que satisfacer y un flujo de información. (Reyes, 2015).

La cuantificación de los costos de privación es motivo de gran preocupación. Sin embargo, el valor del sufrimiento humano debido al tiempo de privación de bienes esenciales cuando ocurre un desastre es difícil de evaluar debido a la ausencia, por razones obvias, de un mercado adecuado para ello. (Perez & Holguín, 2015).

Por consiguiente, es importante tener una adecuada gestión e implementación de la cadena de suministros de recursos humanitarios, organismos de ayuda y personal especializado que interactúan con bienes y servicios, con el fin de satisfacer la demanda de la población damnificada.

Actualmente surge la necesidad de formular un modelo matemático para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventarios de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica, validado mediante benchmarking en escenarios previamente estudiados, implementando el diseño en el lenguaje de programación Python. Se plantea un algoritmo híbrido cuya función objetivo se centra en la reducción de los costos de privación que implementara toda una red logística óptima con localización de centrales de abastecimiento dirigidos a la distribución de los recursos humanitarios, garantizando las entregas en el menor tiempo posible minimizando el impacto social y económico después ocurrido el fenómeno natural. La ubicación de los puntos de distribución y la gestión de los inventarios las cuales determinarán finalmente la flexibilidad de los inventarios y su capacidad de respuesta en dicho momento donde la demanda resulta ser incierta.

1.2 Justificación del proyecto

Un desastre es una interrupción del funcionamiento normal de un sistema, que se puede originar de dos formas: los naturales y los causados por la acción humana. Los desastres naturales son impredecibles, ya que por su naturaleza se encuentran fuera del control humano. Por lo tanto,

la organización para la atención de desastres naturales se convierte en una necesidad primordial encaminada a proteger las vidas humanas y disminuir el impacto socioeconómico y ambiental.

En los últimos años los adelantos tecnológicos y la innovación demuestran que está en auge la competitividad. Por ende, las empresas buscan procedimientos más eficientes que ayuden a su desarrollo y crecimiento, permitiéndoles permanecer en el mercado y obteniendo ventajas respecto a sus competidores.

De acuerdo con el Índice de Desempeño Logístico, obtenido de la evaluación correspondiente al año 2014 (Banco Mundial), Colombia se encontraba en el puesto 64 entre 160 países en relación con la percepción sobre situación logística. Adicional a ello, en el ranking establecido por el Índice Global de Competitividad 2014-2015 (Schwab, 2014), Colombia ocupaba el puesto 66 evidenciando que ha tenido mejoras en materia de tecnología.

Según la Encuesta Nacional Logística (ENL) (departamento nacional de planeación de Colombia, 2015), se puede afirmar que el costo logístico en el país es alto y que este se está incrementando (14,9%) (Ospina Díaz y Sanabria Rangel, 2017, p. 255); esto se debe, muchas veces, al excesivo tiempo en los procesos de transporte y esperas.

Luego de la revisión literaria científica se permite afirmar que para el diseño de una red de recolección debe tenerse en cuenta diferentes decisiones de interés a nivel estratégico (localización), táctico y operativo. Ahora bien, teniendo claro lo anterior, se define la importancia que tiene la disminución de todos los costos asociados con la apertura, transporte y entrega a los clientes; teniendo en cuenta que esto representa en la mayoría de los casos una gran participación en los costos que tienen las empresas, por ende, limitado el porcentaje de utilidades.

Lo mencionado anteriormente expone la necesidad de definir centros de distribución y albergues temporales, haciendo un uso eficiente de los recursos de ayuda humanitaria que ayudan a disminuir el impacto social. Para garantizar una respuesta rápida en el desempeño del trabajo de rescate, se requiere de una gestión eficiente, específicamente de la asignación adecuada de los

recursos de ayuda humanitaria con el fin de disminuir los tiempos de espera y de esta forma, mitigar las pérdidas humanas.

Por esta razón, se presenta un algoritmo híbrido entre Genético y VNS para resolver el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventario de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Desarrollar un algoritmo híbrido para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventario de suministros con el fin de minimizar los costos de privación en un ambiente post-desastre con demanda estocástica.

1.3.2 *Objetivos específicos*

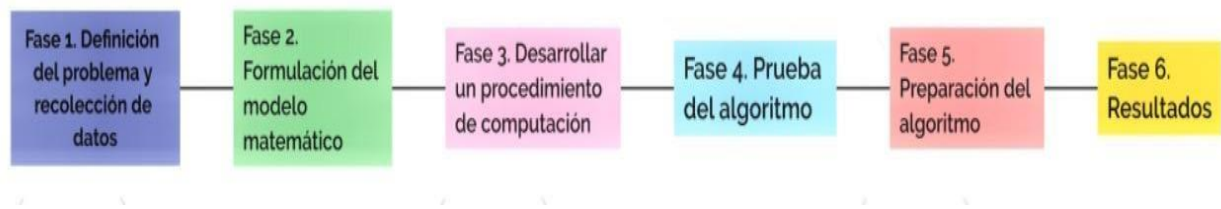
- Revisar la literatura relacionada con los problemas de ubicación de puntos de distribución, gestión de los inventarios y su solución simultánea, aplicados a la logística humanitaria.
- Formular un modelo matemático para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventarios de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica.
- Diseñar en el lenguaje de programación Python un algoritmo híbrido para dar solución al problema planteado.
- Implementar el algoritmo diseñado y validarlo mediante Benchmarking en escenarios estudiados previamente en la academia.
- Elaborar un artículo académico de carácter publicable con base en la investigación realizada y en los resultados obtenidos.

1.4 Metodología

La metodología que regirá este trabajo de investigación cuenta con seis fases adaptadas de (Hillier & Lieberman, 2010), como se puede ver en La Figura por los 3, las cuales son las siguientes:

Figura 3.

Fases metodológicas para un estudio en investigación de operaciones.



Nota. Adaptado de (Hillier & Lieberman, 2010)

Fase 1. Definición del problema y recolección de datos.

A partir del planteamiento del problema, se realiza una revisión e investigación de literatura en bases de datos conocidas sobre artículos que investiguen temas relacionados, estudiando los principales algoritmos propuestos con el propósito de conceptualizar el tema de estudio. Lo anterior se decide comenzar la investigación en función de las siguientes actividades.

- **Actividad 1.** Definir las palabras claves para realizar la búsqueda en bases de datos científicas
- **Actividad 2.** Construir ecuación de búsqueda.
- **Actividad 3.** Establecer restricciones de búsqueda para filtrar la información.
- **Actividad 4.** Ejecutar la ecuación de búsqueda en las bases de datos disponibles en la Universidad Industrial de Santander.
- **Actividad 5.** Realizar un análisis bibliométrico de la información.
- **Actividad 6.** Revisar la literatura obtenida, su aplicación y sus métodos de solución.

Fase 2. Formulación del modelo matemático.

Se plantea la formulación matemática afín al problema a estudiar, la construcción del modelo matemático que represente el cuerpo del problema. Se proponen las siguientes actividades para cumplir con el segundo objetivo de investigación.

- **Actividad 1.** Comprender las bases teóricas que involucran el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventarios, aplicado a logística humanitaria post desastre.
- **Actividad 2.** Definir la estructura del modelo con base en las variantes encontradas durante la revisión de literatura, considerando las diferentes personalizaciones del investigador.
- **Actividad 3.** Establecer el propósito del modelo; es decir, el objetivo a cumplir.
- **Actividad 4.** Definir los parámetros o datos de entrada para el problema propuesto.
- **Actividad 5.** Determinar el conjunto de variables de decisión para el problema propuesto.
- **Actividad 6.** Establecer el conjunto de restricciones pertinentes que debe considerar el modelo.
- **Actividad 7.** Verificar la estabilidad del modelo a partir de la correcta relación entre los elementos de este (variables, restricciones).

Fase 3. Desarrollar un procedimiento de computación.

Se desarrolla el algoritmo híbrido con el propósito de encontrar una solución factible al problema por medio de las siguientes actividades. Esta fase permite dar cumplimiento al tercer objetivo.

- **Actividad 1.** Identificar las metaheurísticas a implementar, así como analizar y comprender los métodos de solución de cada una de ellas.
- **Actividad 2.** Definir los principales elementos necesarios para ejecutar el algoritmo metaheurístico híbrido.
- **Actividad 3.** Describir el conjunto de pasos lógicos que permiten dar solución al problema.
- **Actividad 4.** Construcción de un algoritmo híbrido para dar solución al problema planteado en el lenguaje de programación PYTHON.

Fase 4. Prueba del algoritmo.

Se prueba el modelo buscando encontrar y corregir las diferentes fallas y/o errores, buscando determinado mejoras y/o ajustes.

- **Actividad 1.** Ejecutar el programa y determinar si hay validez en sus resultados a partir de los parámetros del modelo.
- **Actividad 2.** Ajustar el modelo en caso de ser necesario.
- **Actividad 3.** Desarrollar instancias de prueba para modelo propuesto en la investigación.
- **Actividad 4.** Validar el modelo programado a partir de la actividad anterior, confirmando la relación en los resultados de este.

Fase 5. Preparación del algoritmo.

Después de la validación del modelo y sus ajustes, el marco de la investigación queda disponible para ser aplicado en contextos académicos, atendiendo al mismo tiempo, necesidades reales que puedan estar ligadas a la gestión de cadena de suministro logístico para la ayuda humanitaria post desastre.

Fase 6. Resultados.

Se organiza toda la información obtenida a partir de los resultados de investigación, con el fin de lograr el quinto objetivo.

- **Actividad 1.** Elaborar el libro de proyecto de grado.
- **Actividad 2.** Construir un artículo académico de carácter publicable.

2. Revisión de la literatura

2.1 Análisis bibliométrico

Los desastres naturales son fenómenos provocados por la naturaleza de manera imprevista que generan daños parciales o totales en los lugares en que ocurren. Según el portal de estadística online STATISTA, en el año 2018 se registraron 850 catástrofes naturales a nivel mundial que ocasionaron la muerte de 12.800 personas y que a su vez generaron un impacto económico de 140 mil millones de dólares, catalogando al continente asiático como el más afectado entre los 5, siendo India el país con mayor número de afectados, Indonesia con el mayor registro de víctimas mortales; y Estados Unidos el país más afectado a nivel económico (Statista Research Department, 2019).

De aquí la importancia de realizar estudios relacionados con la logística humanitaria, pues dado el aumento en la ocurrencia de desastres en el mundo, ésta se ha convertido en una herramienta que permite responder, gestionar y controlar estas situaciones; sin embargo, la mayoría de países no cuentan con un modelo de ejecución que les permita actuar de manera eficiente. Con el fin de validar lo anterior, se lleva a cabo una búsqueda relacionada con las principales contribuciones hechas por diversos autores que se enfocan en la temática ya expuesta. Por medio de la base de datos Web of Science, disponible en la plataforma web de la Universidad Industrial de Santander, se realizó la búsqueda el día 23 de enero del 2020 usando la ecuación de búsqueda (*Ver figura 4*) que generó 122 resultados. Con el propósito de mejorar la búsqueda se filtró por categorías de Web of Science, escogiendo Engineering Industrial y Operations Research Management Science, obteniendo de esta manera un total de 59 artículos centrados en la problemática abordada. Se realiza un análisis bibliométrico por medio del software *R Studio* con el objetivo de identificar los países con mayor contribución, número de publicaciones anuales, revistas más relevantes, publicaciones de autor por país, palabras clave, y la colaboración entre países.

Figura 4.

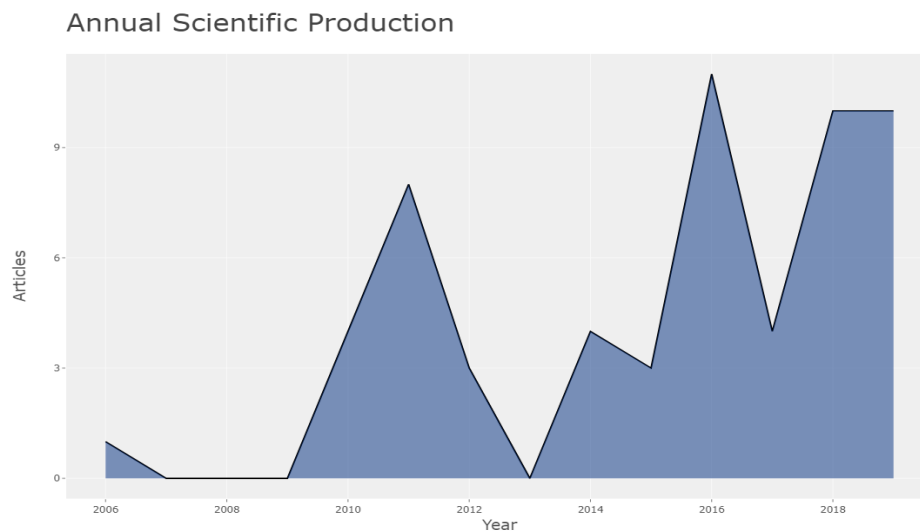
Ecuación de búsqueda base de datos Web of Science

TS= ((“humanitarian logistics” OR disaster OR “natural disaster”) AND (“deprivation” OR (cost NEAR/5 deprivation) OR “deprivation cost” OR cost*) AND ((inventory management*) OR inventory* OR “stochastic demand”))*

La Figura 5 muestra el número de producciones científicas por año, donde el tema de investigación estudiado da inicio a una primera publicación para el año 2006 y refleja que hay una tendencia de crecimiento a partir del año 2015 hasta el año 2019, año en el que se realiza la última publicación hasta el momento en el que se ejecutó la ecuación de búsqueda. Se comprende que luego de la primera publicación, se volvió a generar otra 3 años más tarde, obteniendo uno de sus picos más altos para el 2011 y posteriormente cayendo hasta su punto más bajo para el 2013 con ninguna publicación para este año.

Figura 5.

Producción Científica Anual. Adaptado de RStudio



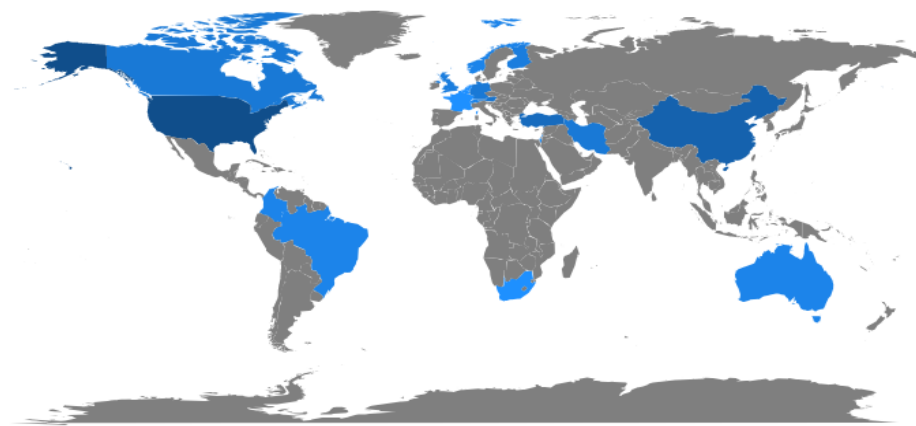
La Figura 6 muestra que el país que más contribuciones ha realizado en el tema de investigación estudiado es Estados Unidos con un total de publicaciones de 27 artículos demostrando así que es el país que publica con mayor frecuencia seguido de China y Turquía con 6, Austria e Irán con 3, Canadá y Colombia con 2 y Australia, Bélgica, Brasil, Finlandia, Alemania,

Sudáfrica, Suiza, Emiratos Árabes Unidos, Reino Unido con 1 publicación. Son dos las contribuciones con autoría colombiana, *Including deprivation costs in facility location models for humanitarian relief logistics*, artículo publicado por Nathalie Cotes y Victor Cantillo de la Universidad del Norte de Barranquilla; y el segundo, *Stockpiling supplies for disaster response: an experimental analysis of prepositioning biases* de Jaime Andrés Castañeda de la Universidad del Rosario de Bogotá, en coautoría con Paulo Gonçalves de la Universidad de Svizzera italiana, Lugano Suiza.

Figura 6.

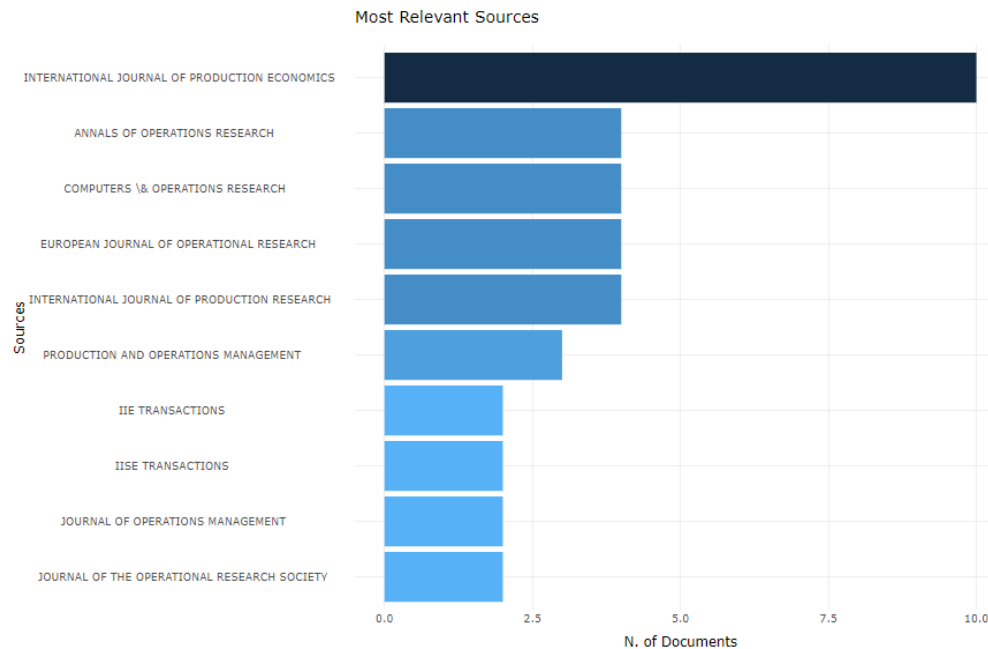
Producción Científica por Países.

Country Scientific Production



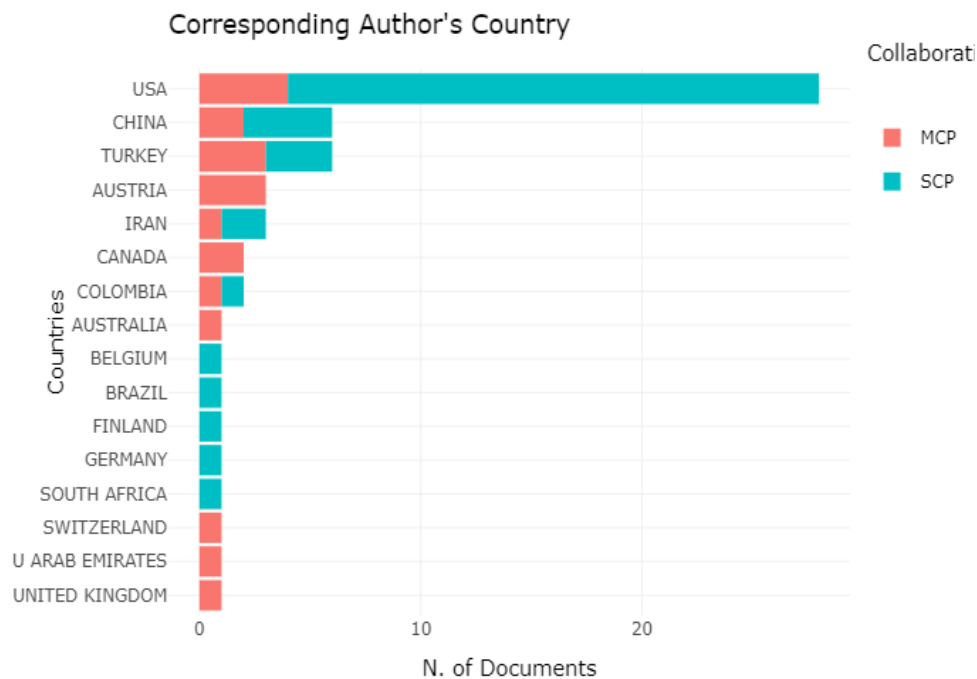
Nota. Adaptado de RStudio

En la Figura 7, se evidencian las revistas más relevantes y su respectivo número de publicaciones relacionadas con el tema de este proyecto, en el periodo de tiempo abarcado entre el año 2006 y el 2018. *International Journal of Production Economics* es la revista con mayor participación, puesto que ha publicado un total de 10 artículos, seguida de *Annals of Operations Research*, *Computers & Operations Research*, *European Journal of Operational Research*, *International Journal of Production Research*, cada una con 4 documentos. Por otro lado, cabe resaltar que según SCIMAGO, el 80% de estas revistas corresponden al área temática de Ciencias de la decisión y a la categoría de Gestión Ciencia e Investigación de Operaciones.

Figura 7.*Fuentes más relevantes.*

Nota. Adaptado de RStudio

La Figura 8 contiene información sobre la cantidad de publicaciones de cada país, pero, además de la respectiva coautoría con otros países. La parte de la barra que es de color rojo (MCP), indica para cada uno el número de documentos en los que hay al menos un coautor de un país diferente, y la parte azul (SCP) indica los documentos publicados en un solo país. Se puede observar que Estados Unidos tiene una baja colaboración internacional, debido a que, de los 27 artículos publicados, sólo 4 son en coautoría con otros países; China e Irán se encuentran en la misma condición ya que menos del 30% de sus artículos son publicados en colaboración con autores internacionales. En el caso de Austria, Canadá, Australia, Suiza, Emiratos Árabes y Reino Unido, se puede concluir que son países en los que los autores han optado por publicar todos sus artículos sobre el tema en estudio, de la mano de autores de otros países. Por otro lado, de Turquía y Colombia no se puede decir si tienen una alta o baja colaboración internacional ya que están 50/50 pues la mitad de sus documentos son publicados individualmente y la otra mitad en coautoría con otros países.

Figura 8.*Coautoría entre países.*

Nota. Adaptado de RStudio

Las palabras utilizadas con más frecuencia en los artículos que hacen parte de los resultados arrojados por nuestra ecuación de búsqueda, se resumen en la Figura 9. Ciertos términos como “model”, “optimization”, “inventory”, “facility location” y “uncertainty” son los más destacados en la nube de palabras, otro como “emergency supplies”, “humanitarian logistics” y “disaster management” demuestran que los artículos encontrados son los que realmente aportan para la realización de este proyecto, ya que ratifican que son del tema en mención por lo que dichas palabras se encuentran inmersas ya sea, en el título o en los objetivos del mismo.

Posteriormente, se llevaron a cabo investigaciones orientadas al desarrollo de elementos de la logística, como la gestión de materiales, la ubicación de instalaciones, la gestión de inventario y almacenaje, el ruteo de vehículos, entre otros. En los años 80s, debido al aumento de los costos logísticos, la distribución en centros de acopio, eficiencia energética y conservación de componentes electrónicos, se realizaron estudios relacionados con la denominada logística en reversa, encargada de operaciones de retorno entre los diferentes eslabones de la cadena de abastecimiento y de las actividades de reciclaje, remanufactura y disposición final de residuos. (Ceballos, 2015)

Entre las últimas tendencias de investigación, la logística humanitaria se expone como un campo de creciente interés, con el objetivo de maximizar la agilidad en la respuesta ante cualquier tipo de desastre y proveer los insumos de primera necesidad en escenarios de incertidumbre donde lo fundamental se centra en identificar las necesidades de las poblaciones afectadas y reducir su sufrimiento (Ceballos, 2015).

A continuación, se destacan algunos artículos en el área de la logística humanitaria que serán tomados como referencia para abordar el tema en estudio, ya que se enfocan en el problema de ubicación de puntos de distribución, gestión de inventarios y costos de privación.

El propósito de la asistencia humanitaria es salvar vidas y aliviar el sufrimiento humano durante y después de un desastre natural, por lo que la preparación para la ocurrencia de este tipo de situaciones es de vital importancia y la disponibilidad de suministros de ayuda a corto plazo se vuelve crucial. Es así como (Perez & Holguín, 2015) proponen modelos matemáticos de asignación y distribución de inventarios para la logística humanitaria posterior a un desastre con consideración explícita en los costos de privación. Las formulaciones se basan en la economía del bienestar y el uso de los costos sociales en los que incurren los segmentos de la sociedad involucrados y afectados por la estrategia de distribución de ayuda. Los costos para el grupo de socorro se evalúan como costos logísticos, mientras que los impactos para los beneficiarios se miden como los efectos que tiene la distribución de socorro en sus costos de privación, que son el valor económico del sufrimiento humano resultante de la falta de acceso a un bien o servicio. Los autores desarrollan un modelo de enrutamiento y asignación de inventario para la distribución

óptima de suministros críticos que minimiza los costos sociales, diseñan enfoques de solución heurística adecuados y evalúan el rendimiento de la heurística mediante experimentos numéricos, conceptualizando que los modelos de logística humanitaria posterior a un desastre (PD-HL) deben basarse en la economía del bienestar: la rama de la economía que estudia el impacto de la asignación de recursos, para garantizar que todos los impactos relevantes se tengan debidamente en cuenta. Al hacerlo, se debe considerar el impacto de la estrategia de distribución, en el grupo de ayuda y los beneficiarios. Si bien la cuantificación del primer impacto se puede lograr fácilmente utilizando costos logísticos, evaluar este impacto requiere analizar el impacto de la distribución de ayuda en condiciones donde los suministros disponibles no satisfacen completamente las necesidades de la población. En el momento de la entrega, la llegada de suministros divide la población en dos grupos: aquellos que recibieron ayuda y aquellos que tienen que esperar entregas futuras. Mientras que el primer grupo experimenta una reducción del sufrimiento debido a la llegada de los suministros necesarios, el último grupo experimenta lo contrario esto lleva a un problema de optimización dependiente de la ruta en el que el historial de decisiones anteriores determina la solución óptima en una época de entrega dada considerando los incrementos en el sufrimiento. Además, los costos de oportunidad se acumulan con el tiempo, solo las formulaciones de períodos múltiples podrían calcularlas correctamente, lo que implica que las formulaciones de período único no son apropiadas. La cuantificación de estos impactos no es sencilla porque los desastres destruyen los lugares donde, en tiempos normales, se comercializan los suministros. Por lo tanto, estos impactos se convierten en externalidades que deben ser valoradas utilizando técnicas de valoración económica. La necesidad de considerar los costos privados y externos requiere el uso de costos sociales que son iguales a la suma de los costos privados y externos.

Estimar las externalidades producidas por la estrategia de entrega es la idea de que el sufrimiento humano podría estar representado por una función adecuada de costo de privación, que captura cómo el sufrimiento humano aumenta en función del tiempo de privación (el tiempo que un individuo ha estado sin acceso a un bien o servicio), esta función de costo de privación la denotan con tres vectores donde el primero es el vector de parámetros, el segundo es el vector del tiempo de privación de un nodo a otro y el tercero es el vector de características socioeconómicas; sin embargo Pérez y Holguín modelan en este documento una función genérica de costo de

privación que solo depende del tiempo de privación, esta suposición se justifica porque después de un gran desastre, es poco probable que los grupos de ayuda tengan datos detallados sobre las personas que necesitan ayuda. Finalizan el estudio concluyendo que establecen claramente la viabilidad y la utilización de los costos sociales como función objetiva en los modelos de logística humanitaria posterior al desastre (PD-HL) y que la consideración explícita de los costos de privación en los costos sociales lleva a comprender estrategias óptimas de alivio que no es posible obtener de funciones objetivos alternativas.

Por otro lado, (Ni, Shu, & Song, 2017) logran optimizar simultáneamente las decisiones de localización de instalaciones, pre-posicionamiento de inventarios de emergencia y operaciones de entrega de ayudas dentro de una red de socorro en caso de desastre. Proponen un modelo min-max robust para capturar las incertidumbres en los parámetros de los lados izquierdo y derecho en las restricciones, donde el primer parámetro corresponde a las proporciones de los inventarios ya previamente posicionados que son utilizables después de un desastre natural mientras que otro representa la demanda de los inventarios y las capacidades viales en las áreas afectadas por el desastre. Demuestran cómo resolver el modelo robusto de forma eficiente y analizan un caso especial que minimiza el costo de privación. La aplicación del modelo de este caso de estudio se ilustra en el terremoto del 2010 en el condado de Yushu en la provincia de Qinghai República de China y afirman que las ventajas del modelo min-max robusto se demuestran mediante la comparación con el modelo determinista y el modelo estocástico de dos etapas para el mismo problema donde las variantes experimentales también muestran que el modelo robusto supera a los otros dos enfoques para instancias donde las escalas son significativamente mayores considerando una red de un solo producto para la distribución de suministros de emergencia (paquetes de productos de ayuda humanitaria) En las operaciones previas al desastre, se debe decidir dónde ubicar las instalaciones para el posicionamiento previo suministros de emergencia y cuánto inventario se debe pre posicionar en cada instalación abierta. Siguiendo la nomenclatura en el programa estocástico de dos etapas. Una buena ubicación y una estrategia de pre posicionamiento de inventario de emergencia es fundamental para el socorro en casos de desastre. El modelo propuesto protege contra cualquier alteración de los parámetros inciertos, incluidas las demandas, las proporciones utilizables de inventarios pre posicionados y las capacidades de los enlaces entre carreteras. Los conjuntos de incertidumbre se definen en función de los valores más

probables, los límites superiores y los límites inferiores de estas entradas aleatorias y los parámetros llamados presupuestos de incertidumbre se introducen para ajustar los conjuntos de incertidumbre y a su vez controlar la conservación del modelo robusto.

Loree y Aros-Vera, (2018), también hablan de la importancia de considerar el costo del sufrimiento humano, que se genera cuando las personas no pueden acceder a suministros críticos durante un periodo de tiempo. Es por eso que presentan en su documento, un modelo matemático de programación no lineal entera mixta (MINLP) que integra las funciones de costo de privación en la toma de decisiones relacionada con la ubicación de los puntos de distribución y la estrategia de entrega de los suministros para minimizar el costo social global. Esto satisface directamente la necesidad de investigación de logística humanitaria posterior al desastre (PD-HL) para planificar puntos de distribución y desarrollar modelos para la asignación de inventarios que incluya estas externalidades, como lo son los costos de privación. El aumento en el sufrimiento humano es una función no lineal, ya que los efectos se amplifican con cada hora que pasa. Si bien el objetivo de un modelo matemático es representar con exactitud lo que está ocurriendo en la realidad, para poder comparar el sufrimiento humano con otros costos operacionales, éste debe considerarse en términos económicos.

Esta formulación matemática implementa tres características clave; primero, la función objetivo expone el equilibrio entre los tres elementos del costo social: costo de privación, costo de logística y costo de instalación. Segundo, el modelo define el número óptimo de puntos a ubicar, de esta manera se puede analizar el impacto que tiene sobre el costo social total el hecho de cambiar el número de puntos instalados. Por último, este modelo propone múltiples fuentes para satisfacer la demanda, lo que permite que cualquier punto de demanda pueda ser abastecido por cualquier instalación con inventario disponible, lo que ocasionará aumentar los costos logísticos para entregar ayuda a los sobrevivientes.

Adicionalmente, los autores proponen una solución heurística debido a la naturaleza altamente no lineal de la función objetivo y de las restricciones del modelo planteado. El enfoque heurístico desarrollado se basa en una variación del método entero de concentración heurístico

(HCI), que fue diseñado especialmente para trabajar con problemas grandes y aumentar la probabilidad de alcanzar resultados óptimos.

Cotes y Cantillo, (2019) enfocan su investigación en la toma de decisiones a partir de lo que produce la falta de acceso a elementos que sostienen la vida, es decir, a la pérdida en el bienestar de las personas. Por eso, proponen un modelo de ubicación de instalaciones para situar suministros como preparación ante un desastre; siendo la clave de esta formulación, el hecho de que considera explícitamente los costos de privación en la función objetivo. Estos costos deben incorporarse a las variables de decisión de los modelos de logística humanitaria (HL), ya que es una forma de calcular el bienestar de las personas; cuando estos costos no son tenidos en cuenta, el sufrimiento humano no se minimiza y las decisiones que se tomen en relación con la entrega de suministros críticos pueden no alcanzar el óptimo social. De esta manera, el modelo pretende minimizar los costos sociales globales, como la suma de los costos privados (costos de transporte, los costos de inventario y los costos fijos de las instalaciones) y los costos de privación, determinando la cantidad adecuada por producto que se pre-posicionará para atender las zonas afectadas durante la etapa inicial del desastre; teniendo en cuenta que la asistencia humanitaria debe llevarse a cabo dentro de las primeras 24 horas de la ocurrencia del fenómeno.

La propuesta de modelo tiene como objetivo establecer la ubicación más acertada para los centros de distribución, la cantidad óptima de inventario y cómo enviar los suministros desde los centros de distribución (DC) o los centros de consolidación (CC) hacia los puntos de demanda (DP). Pero antes de la formulación del modelo, los autores hicieron algunas suposiciones; una de ellas tiene que ver con el hecho de que un DC único sirve a cada DP, pero cada DC puede servir a varios DP. Además, cada DC puede ser abastecido por múltiples CC. Por otro lado, el modelo supone que tanto los CC como los DC deben encontrarse en zonas de bajo riesgo. En cuanto a la demanda, Cotes y Cantillo suponen una tasa de consumo constante para toda la población, dependiendo del tipo de producto; destacando que no hay demanda no satisfecha, sino tiempo de privación, ya que para este caso la demanda es conocida, pues se utilizó información real de la región del Caribe colombiano que se vio afectada por las inundaciones en 2010 y 2011. Finalmente, el modelo encuentra el valor mínimo de los costos sociales.

Este análisis permite puntualizar que, las etapas previas a la ocurrencia y respuesta de un desastre juegan un papel importante dentro del proceso de la Logística humanitaria, ya que permiten que con anticipación se desarrollen esquemas de prevención y así adelantar planes de acción de respuesta que establezcan las condiciones para alcanzar eficiencia y eficacia en la respuesta ante un desastre, contribuyendo así con la disminución del sufrimiento de las víctimas. Es por esto que el artículo publicado por Loree y Aros-Vera, titulado “*Points of distribution location and inventory management model for Post-Disaster Humanitarian Logistics*” se utilizará como referente para el desarrollo de este proyecto, ya que el modelo propuesto por los autores incluye las temáticas abordadas en esta investigación, aportando de esta manera información valiosa en cuanto a la toma de decisiones relacionadas con la planeación para la ubicación de los puntos de distribución y de la asignación y distribución de inventarios; todo esto con el fin de minimizar el costo social total, logrando un equilibrio entre los componentes de dicho costo.

3. Marco teórico

3.1 Logística humanitaria.

La logística humanitaria se define como el proceso de planificación, implementación y control efectivo y eficiente de los flujos de productos, materiales e información desde los donantes hasta las personas o sectores afectados, con el fin de satisfacer las necesidades de supervivencia.

Según José Holguín-Veras, la logística humanitaria es un proceso socio-técnico que permite a los individuos organizarse en una red social, compuesta por una serie de actividades técnicas. Es de gran importancia, aplicar conocimientos y habilidades que sumado a la movilización de personas y recursos permitan atender de manera rápida y efectiva a la población afectada (Logistec, 2015).

Otra definición es dada por Thomas y Mizushima en el 2005, quienes definen la Logística Humanitaria como “El proceso de planificación, ejecución y control eficiente del flujo de costos y el almacenamiento de los bienes y materiales, así como la información relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo con el propósito de cumplir con los requisitos del beneficiario final” (Goyes, 2016).

La logística humanitaria involucra todas las acciones dirigidas a la mitigación del riesgo, a reducir el impacto del desastre y a retornar al estado de normalidad, las cuales se dividen en cuatro etapas: mitigación, preparación, respuesta y recuperación (López & Cárdenas, 2017) (Ver figura 10).

Figura 10.

Etapas de la Logística Humanitaria



Nota: adaptado de (López & Cárdenas, 2017)

Las actividades propias de las etapas de mitigación y preparación se desarrollan previo a la ocurrencia del desastre. La etapa de mitigación incluye las medidas que se toman para prevenir y/o reducir el impacto de eventos infortunados como los desastres en una comunidad; está integrada por una serie de operaciones básicas como lo son, la evaluación de factores de riesgo, la planeación y configuración de la cadena de suministros humanitarios, pre-posicionamiento de bodegas o centros de distribución con material relacionado para la atención de emergencias, el estudio de riesgos y los análisis estructurales, así como el reforzamiento de las edificaciones y las

estructuras viales, y son de suma importancia respecto a la eficiencia que tendrá la respuesta al desastre. La etapa de preparación incluye todas las actividades desarrolladas por la población, los gobiernos locales y otras organizaciones antes de que acontezca el desastre con el fin de preparar a la comunidad para que respondan lo mejor posible ante una situación de emergencia y reducir sus efectos potenciales. Algunas actividades que se pueden llevar a cabo en la preparación son: el reclutamiento de voluntarios, el entrenamiento de la comunidad en la zona vulnerable por medio de simulacros, la adquisición de vehículos y equipos de emergencia, la compra y almacenamiento de suministros de emergencia, y el diseño de los planes de emergencia (López & Cárdenas, 2017).

Por otra parte, las etapas de respuesta y recuperación avanzan durante y después de la ocurrencia del desastre. En ese orden de ideas, la fase de respuesta inicia inmediatamente acontece el desastre, incluyendo actividades en las que se emplean todos los recursos disponibles para preservar la vida de los afectados, un ejemplo de estas actividades es: la búsqueda y rescate de personas, recolección de información sobre el área del desastre, identificación de los sitios apropiados para los refugios, determinación de rutas de evacuación, transporte y entrega de suministros de emergencia. Cuando en la etapa de preparación no se implementan las estrategias adecuadas, se genera un impacto negativo en la etapa de respuesta, representado en un mayor desgaste logístico para entregar las medicinas, alimento y albergue, las cuales son fundamentales en las primeras horas de un sistema impactado por un desastre.

Según Rottkemper, la transición entre las etapas de respuesta y recuperación se hace de forma gradual. Por último, la etapa de recuperación se desarrolla cuando el desastre ya tuvo su impacto e incluye las acciones ejecutadas en el largo plazo que permiten a la comunidad estabilizarse y retornar a su situación de normalidad (López & Cárdenas, 2017).

La logística es el elemento más importante en cualquier esfuerzo de ayuda ante un desastre y el que hace la diferencia entre una operación exitosa o fallida. Igualmente, es la parte más costosa de cualquier ayuda ante desastres, se estima alrededor del 80% del costo total de la ayuda, además las operaciones de logística humanitaria son más complejas que las de la logística comercial (Van Wassenhove, 2006). Se requiere de una respuesta inmediata a situaciones en donde la demanda es incierta, también no se tiene certeza de cuándo y dónde ocurrirá el desastre. Incluso, en los lugares

propensos a los desastres naturales, en donde se suele contar con planes de contingencia y evacuación, siempre existen variaciones y eventualidades que escapan a todo pronóstico.

3.2 Suministros humanitarios

Según (Health Library for Disaster, 2001) en relación con la Organización Mundial de la Salud, los suministros humanitarios o de emergencia son los productos, materiales y equipos utilizados por las organizaciones para la atención de los desastres, así como los requeridos para la atención de las necesidades de la población afectada. Estos suministros son de una amplísima gama, que incluye desde los productos y materiales para uso y consumo de la población, tales como los medicamentos, alimentos, enseres domésticos, vestimentas, etc., hasta aquellos requeridos por las organizaciones para brindar la asistencia, tales como los grupos electrógenos, equipos de rescate, materiales de construcción, herramientas, etc.

Como se ha mencionado anteriormente, estos suministros tienen procedencias diversas; algunos son adquiridos o canalizados por las propias organizaciones respondiendo a las necesidades determinadas en el terreno, pero la gran mayoría son el producto de la solidaridad espontánea de la comunidad nacional e internacional.

De manera que, desde la óptica de su origen, los suministros pueden ser de dos tipos:

1. Los solicitados o adquiridos por las organizaciones de acuerdo a su tipo de intervención y necesidades. Estos, independientemente de su pertinencia o no, son manejados generalmente por las propias instituciones que los gestionan, las cuales conocen sus contenidos y les asignan un destino específico.
2. Los procedentes de la solidaridad, sea nacional e internacional, y que no necesariamente corresponden a las necesidades que se enfrentan. Con frecuencia no tienen un destinatario específico y su manejo cae bajo la responsabilidad de las autoridades nacionales a cargo de la emergencia, quienes tienen que empezar por identificar el tipo de producto, sus características y condiciones y, si finalmente son utilizables, determinarán un uso y destino, así como la coordinación de su envío.

3.3 Desastre

Según la OMS, un desastre se define como situaciones imprevistas que representan serias e inmediatas amenazas para la salud pública o cualquier situación de salud pública que pone en peligro la vida o salud de una cantidad significativa de personas y exige la acción inmediata.

Un comité de expertos de la Organización de Naciones Unidas (ONU), define de forma empírica los desastres como interrupciones (rupturas) del sistema ecológico humano que exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada para abordar los efectos y funcionar con normalidad (González & Chiroles, 2010).

Según Guha-Sapir, Hoyois y Below, los desastres naturales se pueden clasificar como se muestra en la Figura 11 (Goyes, 2016).

Figura 11.

Clasificación de los Desastres Naturales

Tipo	Desastre
Biológico	• Epidemias • Infestación de Insectos • Estampida de Animales
Geofísico	• Terremotos • Volcanes • Movimiento de Masas (Seco) Caída de Rocas - Deslizamientos - Avalanchas – Hundimientos
Hidrológico	• Inundaciones • Movimiento de Masas (Húmedos) Caída de Rocas - Deslizamiento - Avalanchas – Hundimientos
Meteorológico	• Tormentas
Climatológico	• Temperaturas Extremas • Sequías • Incendios

3.4 Gestión del riesgo de desastres.

La gestión de desastres puede definirse como la organización y la gestión de recursos y responsabilidades para abordar todos los aspectos humanitarios de las emergencias, en particular la preparación, la respuesta y la recuperación a los desastres, a fin de reducir sus efectos.

De acuerdo a la Ley 1523 de 2012, establecida por el Congreso de la República, la Gestión del riesgo de desastres es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (Ley 1523, 2012)

3.5 Procesos de la Gestión del Riesgo de Desastres

La Gestión del riesgo de desastres es el conjunto de decisiones administrativas, de organización y conocimientos operacionales para implementar políticas y estrategias con el fin de reducir el impacto de amenazas naturales y desastres ambientales y tecnológicos. Según Chuquisengo, la Gestión de Riesgo de Desastres GRD puede ser: (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD Chile, 2012)

- *Prospectiva*: Implica abordar medidas y acciones en la planificación del desarrollo para evitar que se generen nuevas condiciones de riesgo.
- *Correctiva*: Se refiere a la adopción de medidas y acciones de manera anticipada para reducir los riesgos ya existentes.
- *Reactiva*: implica la preparación y respuestas a emergencias.

De esta forma, la gestión del riesgo se basa en tres procesos: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia, 2021)

1. *Conocimiento del Riesgo*: Es el proceso que, a través de la identificación de escenarios de riesgo, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes y la comunicación, busca promover una mayor conciencia que alimenta los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastre.

2. *Reducción del Riesgo*: Es el proceso que está compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes, con medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los

recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos.

3. *Manejo del Desastre*: Es el proceso que abarca la preparación para la respuesta a emergencias, la preparación para la recuperación pos-desastre, la ejecución de dicha respuesta y la ejecución de la respectiva recuperación.

3.6 Modelos matemáticos.

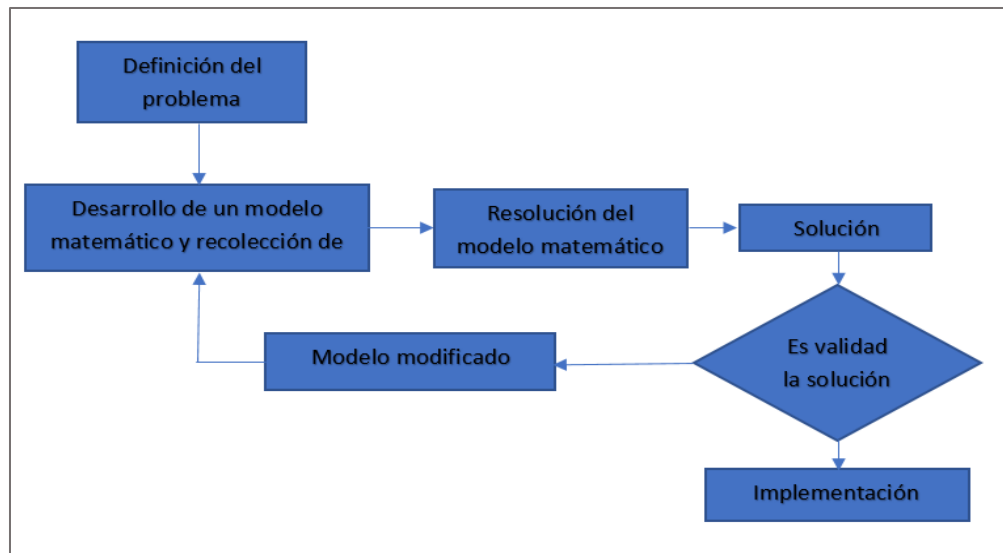
Un modelo matemático describe teóricamente un objeto que existe fuera del campo de las Matemáticas. Las previsiones del tiempo y los pronósticos económicos, por ejemplo, están basados en modelos matemáticos. Su éxito o fracaso depende de la precisión con la que se construya esta representación numérica, la fidelidad con la que se concrete hechos y situaciones naturales en forma de variables relacionadas entre sí. Básicamente, en un modelo matemático advertimos tres fases: la construcción, proceso en el que se convierte el objeto a lenguaje matemático; el análisis o estudio del modelo confeccionado y la interpretación de dicho análisis, donde se aplican los resultados del estudio al objeto del cual se partió. (Perez & Gardey, 2008)

Según el diccionario de la lengua española (Real Academia Española) un modelo matemático es un esquema teórico en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja (por ejemplo, la evolución económica de un país), que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.

Cada modelo matemático utiliza la siguiente estructura general (Yepes, 2012) (*Ver Figura 12*)

Figura 12.

Estructura general de un modelo matemático



3.7 Modelo de optimización

El modelo de optimización busca encontrar una alternativa de decisión con propiedad de ser mejor que cualquier otra en algún sentido, se encarga de hallar el valor máximo o mínimo de una cierta función, definida en un dominio. En los problemas de decisión o de requisitos mínimos a cumplir (producción, horas de descanso), que condicionan la elección de la solución adecuada, ya sea a nivel estratégico, táctico e incluso operativo. Por lo general, el propósito perseguido al tomar una decisión consiste en llevar a cabo el plan propuesto de una manera óptima: mínimos costos o máximo beneficio. (Yepes, 2012).

3.8 Optimización combinatoria.

La optimización combinatoria es un amplio campo de la matemática aplicada que desde la perspectiva computacional busca el desarrollo de soluciones algorítmicas a problemas cuyo espacio de soluciones posibles es discreto. Además, está fuertemente relacionada con la investigación operativa, la teoría algorítmica y la teoría de la complejidad computacional.

3.9 Problemas de optimización combinatoria

Los problemas de optimización combinatoria, son usados comúnmente para hallar el valor de determinadas variables de decisión con el objetivo de maximizar o minimizar dependiendo el requerimiento de la función objetivo y sus respectivas restricciones. Dependiendo del número de funciones que se empleen los problemas de combinatorios pueden ser mono-objetivos (una sola función) y multi-objetivo (más de una función) (Sánchez, 2000)

Christian Blum y Andrea Roli, (2003) definen un problema de optimización combinatoria como se muestra a continuación:

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

$\mathbb{R}^+$

El conjunto de las posibles asignaciones factibles es:

$$S = \{s = (x_1, v_1) \dots, (x_n, v_n)\}$$

Donde $x_i \in D_i$, s satisface todas las restricciones.

De esta manera, la resolución de un problema de optimización combinatoria radica en hallar una solución $s^* \in S$ tal que, $f(s^*) \leq f(s)$ si se minimiza o $f(s^*) < f(s)$ si se maximiza.

3.10 Complejidad computacional.

Tiene como finalidad la creación de mecanismos y herramientas capaces de describir y analizar la complejidad de un algoritmo y la complejidad intrínseca de un problema dependiendo del tiempo de computación y la memoria requerida debido al nivel de dificultad del problema. (Garey & Johnson, 1979) establecen en su libro *Computers & Intractability* que los problemas de optimización pueden ser clasificados de acuerdo al tiempo de computación requerido para encontrar una solución.

- **Clase P:** Contiene aquellos problemas de decisión que una máquina de Turing determinística puede resolver en tiempo polinómico. Este tipo de problemas pueden ser resueltos en un tiempo computacional razonable, por ejemplo, ejercicios de ordenación, búsqueda, entre otros.

- **Clase NP:** Esta clase está conformada por aquellos problemas que no pueden resolverse en un tiempo polinómico. Este conjunto de problemas puede ser resuelto en tiempo polinómico por una máquina de Turing no determinista. Cabe resaltar que los problemas de tipo NP son verificables en tiempos polinómicos, es decir, dada una posible solución para una instancia, es posible comprobar que es válida en un tiempo nk .

- **Clase NP-Complete:** Es un subconjunto de la clase NP, este tipo de problemas se caracterizan por ser los de mayor complejidad dentro de su grupo, por lo cual es menos probable encontrar una solución en tiempo polinómico, dado que cualquier problema en NP se puede reducir a cada uno de los problemas de NP-Complete.

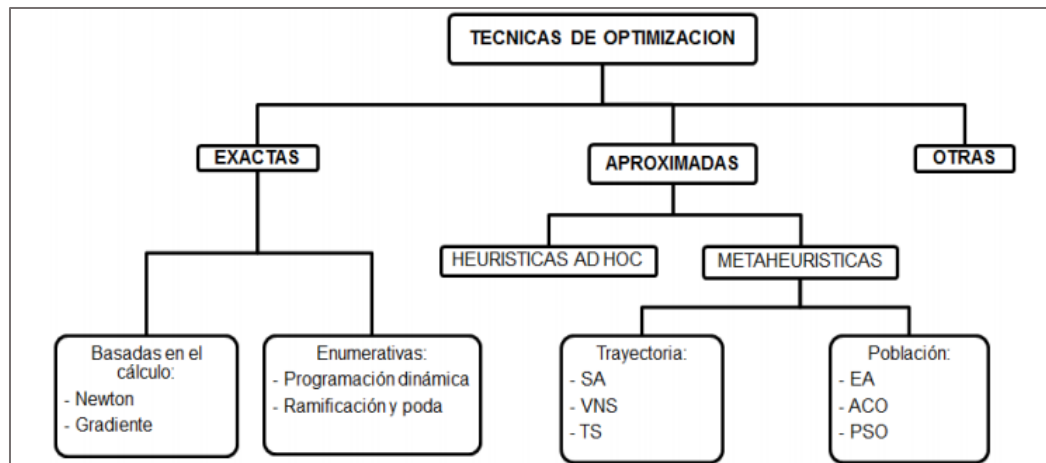
- **Clase NP-Hard:** En esta clase se encuentran los problemas que son por lo menos tan difíciles como los NP; sin embargo, no se encuentra establecida su complejidad, por tanto, puede ser más difícil un problema de esta categoría, que uno clasificado como NP-Complete. El tiempo de ejecución de un algoritmo que intenta solucionar un problema de clase NP-Hard, aumenta de forma exponencial respecto al tamaño del problema.

3.11 Métodos de solución.

Los problemas de optimización combinatoria tienen diversas aplicaciones prácticas en el mundo real, convirtiéndose así en temas atractivos para investigación y extensión. Múltiples métodos han sido creados para abordar y dar solución a estos problemas. En la Figura 13 se puede observar la clasificación de estos métodos, que generalmente pueden clasificarse en métodos exactos y métodos aproximados (Barreto & Niño, 2016).

Figura 13.

Clasificación de las técnicas de optimización.



3.12 Métodos exactos.

Son métodos usados para obtener una respuesta óptima de un problema determinado, pero no tienen tiempo de complejidad polinómica para resolver los problemas de tipo NP o NP-Hard, ya que este crece exponencialmente con el tamaño del problema. Entre los métodos exactos se pueden encontrar el método simplex y el método Branch and Bound (B&B).

- **Método simplex:** un procedimiento general para resolver problemas de programación lineal se usa en forma rutinaria para resolver problemas grandes en las computadoras de hoy en día. El método Simplex es un procedimiento algebraico, Sin embargo, sus conceptos fundamentales son geométricos, por lo que la comprensión de estos conceptos geométricos nos proporciona una fuerte intuición sobre cómo opera el método Simplex y porque es tan eficiente. (Hillier & Lieberman, 2010)

- **Método Branch and Bound:** es una técnica general para mejorar el proceso de búsqueda, enumerando sistemáticamente todas las soluciones posibles y eliminando soluciones obviamente imposibles. Branch-and-bound generalmente se aplica a aquellos problemas que tienen soluciones finitas, en las que las soluciones pueden representarse como una secuencia de opciones. La primera parte de ramificación requiere varias elecciones para que las elecciones se ramifiquen en el espacio de la solución. En estos métodos, el espacio de solución se organiza como una estructura en forma de árbol. (Huang, Lai, & Cheng, 2009)

3.13 Métodos aproximados.

Este método ofrece soluciones múltiples en tiempo razonables en comparación de los métodos exactos que dan soluciones en grandes cantidades de tiempo, aunque no son del todo óptimas, estos métodos se clasifican en heurísticos y meta-heurísticos.

3.14 Métodos heurísticos.

Encuentran una buena solución, pero no se garantiza que sea la óptima. En muchos problemas el conjunto de soluciones posibles es tan elevado que la localización de una solución óptima es imposible en un tiempo razonable. Por ello, se opta por algoritmos heurísticos que encuentran una buena solución (Aguar Pulido, 2014).

Con base en un algoritmo planteado por Winker y Maringer en el 2007, se establece que una heurística de cumplir con las siguientes condiciones: (Angarita, 2018)

1. Debe ser capaz de proporcionar aproximaciones de alta calidad al óptimo global.
2. Ser robusta, es decir, presentar flexibilidad a los cambios del problema.
3. Aplicable a muchas instancias del problema y, de hecho, poder adaptarse a nuevos problemas a pesar de que casi siempre es desarrollada para la solución de un problema específico.
4. Las heurísticas pueden ser algoritmos estocásticos, pero no deben contener elementos subjetivos.

Existen métodos heurísticos (también llamados algoritmos aproximados, procedimientos inexactos, algoritmos basados en el conocimiento o simplemente heurísticas) de diversa naturaleza, por lo que su clasificación es bastante complicada. Se clasifican de la siguiente manera: (Vidal, 2013)

- *Métodos constructivos*: Procedimientos que son capaces de construir una solución a un problema dado. La forma de construir la solución depende fuertemente de la estrategia seguida.
- *Métodos de búsqueda local*: Parten de una solución factible dada y a partir de ella intentan mejorarla. El método finaliza cuando, para una solución, no existe ninguna solución accesible que la mejore.

Además de resolver un problema difícil, hay otras razones para utilizar métodos heurísticos, algunas de ellas son: (Cunquero, 2000)

- El problema es de una naturaleza tal que no se conoce ningún método exacto para su resolución.
- Aunque existe un método exacto para resolver el problema, su uso es computacionalmente muy costoso.
- El método heurístico es más flexible que un método exacto, permitiendo, por ejemplo, la incorporación de condiciones de difícil modelización.
- El método heurístico se utiliza como parte de un procedimiento global que garantiza el óptimo de un problema. Existen dos posibilidades:
 - El método heurístico proporciona una buena solución inicial de partida.
 - El método heurístico participa en un paso intermedio del procedimiento, como por ejemplo las reglas de selección de la variable a entrar en la base en el método Simplex.

3.15 Meta-heurísticas

El término meta-heurística o meta-heurística fue introducido por F. Glover en el año 1986. Con este término, buscaba definir un “procedimiento maestro de alto nivel que guía y modifica otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimalidad local” (Vidal, 2013).

En 1995, los profesores Osman y Kelly proponen la siguiente definición: “Una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Las meta-heurísticas proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos” (Vélez & Montoya, 2007).

En otras palabras, una meta-heurística es una plantilla general no determinista, que debe ser rellenada con datos específicos del problema (representación de las soluciones, operadores para manipularlas, etc.) y que permite abordar problemas con espacios de búsqueda de gran tamaño. En este tipo de técnicas es muy importante el correcto equilibrio (generalmente dinámico) que haya entre diversificación e intensificación.

- *Diversificación*: se refiere a la evaluación de soluciones en regiones distantes del espacio de búsqueda (de acuerdo a una distancia previamente definida entre soluciones), también se conoce como exploración del espacio de búsqueda.
- *Intensificación*: se refiere a la evaluación de soluciones en regiones acotadas y pequeñas con respecto al espacio de búsqueda, centradas en el vecindario de soluciones concretas (explotación del espacio de búsqueda).

El equilibrio entre estos dos aspectos contrapuestos es de gran importancia, ya que por un lado deben identificarse rápidamente las regiones prometedoras del espacio de búsqueda global y, por otro lado, no se debe malgastar tiempo en las regiones que ya han sido exploradas o que no contienen soluciones de alta calidad. Las técnicas meta-heurísticas más utilizadas en la resolución de problemas, se muestran en la Figura 14 (Cachay, Raffo, & Acevedo, 2012).

Figura 14.

Principales técnicas meta-heurísticas

Nombre	Descripción
ACO	Optimización por colonias de hormigas
AMP	Programas de memoria adaptativa
CA	Algoritmos culturales
EA	Algoritmos evolutivos
FANS	Búsqueda por entorno adaptativo borroso
GA	Algoritmos genéticos
GHC	Métodos de escalada generalizados
GLS	Búsqueda local guiada
GRASP	Procedimientos de búsqueda miope, aleatorizada y adaptativa
ILS	Búsqueda local iterativa
MA	Algoritmos meméticos
NM	Métodos ruidosos
PR	Re-encadenamientos de caminos
SA	Recocido simulado
SI	Inteligencia de enjambre
SS	Búsqueda dispersa
TAM	Métodos de aceptación de umbral
TS	Búsqueda Tabú
VNS	Búsqueda de entorno variable

Las meta-heurísticas se clasifican en algoritmos basados en trayectoria y en algoritmos basados en población.

- **Meta-heurísticas basadas en trayectoria:** Su característica fundamental es que parten de una solución y, mediante la exploración del vecindario van actualizando la solución actual, formando una trayectoria. La mayoría de estos algoritmos surgen como extensiones de los métodos de búsqueda local simples a los que se les añade algún mecanismo para escapar de los mínimos locales. Entre las meta-heurísticas trayectoriales se destacan las basadas en búsqueda local (como TS y SA), búsqueda iterativa (como ILS y FANS) y búsqueda multi-arranque (como GRASP).

- **Meta-heurísticas basadas en población:** Este método (llamado población) en cada iteración se caracteriza por trabajar con un conjunto de soluciones. Entre las meta-heurísticas poblacionales, se encuentran las basadas en combinación de soluciones (como GA y SS) y las basadas en movimientos (como ACO, de optimización de colonias de hormigas y SI, inteligencia de enjambres).

3.16 Métodos híbridos

Los algoritmos híbridos meta-heurísticos se basan en la combinación de varias meta-heurísticas con el fin de aprovechar las fortalezas y eliminar las limitaciones individuales, generando métodos de búsqueda más potentes y flexibles. Se pueden distinguir tres formas principales de hibridación, pero la mayoría de los algoritmos híbridos pertenecen a la categoría de hibridación de componente de intercambio, en el que varios componentes y características de solución están compartidos entre dos o más métodos heurísticos y meta-heurísticos (Barreto & Niño, 2016).

3.17 Algoritmo genético

A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Charles Darwin en 1859.

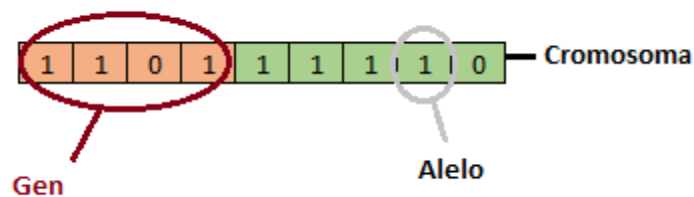
Los Algoritmos Genéticos (GA) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización que a su vez están basados en el proceso genético de los organismos vivos. Los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas

del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de estas (Goldberg, 1989). Los fenómenos evolutivos y selectivos tienen lugar en una dinámica de poblaciones, y ciertas propiedades de los sistemas biológicos.

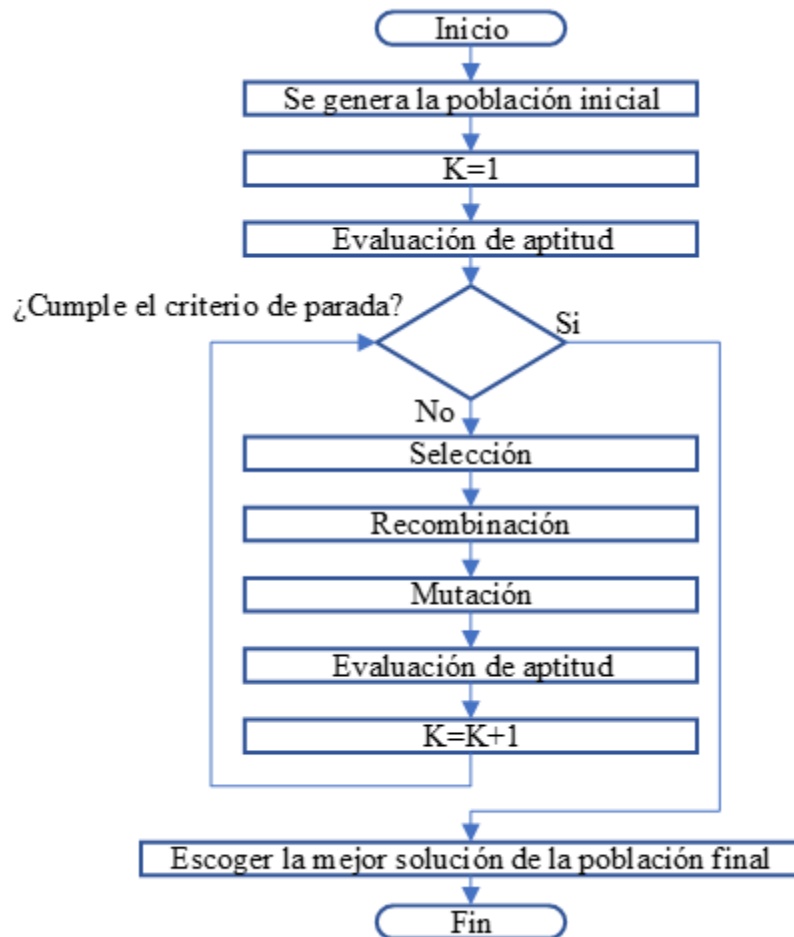
Para generar el algoritmo genético, se inicia con la selección de la población mediante un conjunto de cromosomas generados aleatoriamente o mediante heurísticas. Estos cromosomas, son los códigos de la solución que se muestra como una cadena de números cada una de estas cadenas se les conoce como gen y a su vez cada número dentro del gen se le conoce como alelo (*Ver Figura 15*); se evalúa la función objetivo de todos los cromosomas para conformar la nueva población.

Figura 15.

Cromosoma



El cambio de una población a otra se le llama generación. Según la función objetivo o fitness, se escogen los cromosomas actuales y posteriormente a partir de una serie de etapas (selección, cruce y mutación) se busca la mejor solución del problema. Una vez desarrollado por varias generaciones el sistema genético, se codifica el cromosoma que representa la solución más cercana al óptimo del problema analizado. (Tarazona Uribe & Joya Millan, 2019). A continuación, en la Figura 16 se definen las etapas del algoritmo genético.

Figura 16.*Etapas algoritmo genético.*

3.17.1 Codificación y generación de la población

Para poder elaborar un algoritmo genético se da origen a la generación de la población inicial, consiguiendo que el tamaño de esta sea lo suficientemente grande y a su vez generada de forma aleatoria para así poder garantizar la diversidad de soluciones. En caso de que la población no sea generada de forma aleatoria habrá que tener en cuenta que se garantice una cierta diversidad en la población generada. (Arranz de la Peña & Parra Truyol)

3.17.2 Evaluación de aptitud (fitness)

Obtenida la población inicial, el siguiente paso corresponde a la evaluación de aptitud o fitness de cada uno de los individuos. Esto se lleva a cabo a partir de la función objetivo, y corresponde a un paso fundamental para el desarrollo de las siguientes etapas del algoritmo. La evaluación de aptitud puede realizarse reiteradas veces dentro de una misma iteración dependiendo del diseño y las necesidades del algoritmo; sin embargo, es requerido evaluar a toda la población al final de cada iteración, con el objetivo de que cada vez que se inicie una nueva se cuente con la misma información para el desarrollo de las etapas siguientes.

3.17.3 Selección

Es la primera operación aplicada a los individuos de la población. Su objetivo es seleccionar cuáles individuos van a disponer de oportunidades de reproducirse y cuáles no. Imitando lo que ocurre en la naturaleza, se otorgará un mayor número de oportunidades de reproducción a los individuos más aptos. Por lo tanto, la selección de un individuo estará relacionada con su valor fitness. Sin embargo, no se deben eliminar por completo las opciones de reproducción de los individuos menos aptos, pues en pocas generaciones la población se volvería homogénea. (Gestal Pose, 2006).

A partir de lo mencionado, la literatura resalta dos métodos para ejecutar el proceso de selección, los cuales, se exponen a continuación.

3.17.3.1 Selección por ruleta. A cada uno de los cromosomas de la población se le asigna una parte proporcional a su valor de la función fitness en una ruleta, de tal forma que la suma de todos los porcentajes sea la unidad, como se muestra en la Figura 17. Los mejores individuos recibirán una porción de la ruleta mayor que la recibida por los peores. Generalmente la población está ordenada con base al valor de la función fitness por lo que las porciones más grandes se encuentran al inicio de la ruleta. Para seleccionar un individuo basta con generar un número aleatorio del intervalo $[0,1]$ y devolver el individuo situado en esa posición de la ruleta. Esta posición se suele obtener recorriendo los individuos de la población y acumulando sus

proporciones de ruleta hasta que la suma exceda el valor obtenido. (Blickle & Thiele, 1995). Tiene el inconveniente de que el peor individuo puede ser seleccionado más de una vez.

Figura 17.

Selección por ruleta

Individuo	Fitness	Probabilidad	Probabilidad acumulada
1	15	0.3846	0.3846
2	3	0.0769	0.4615
3	9	0.2308	0.6923
4	12	0.3077	1

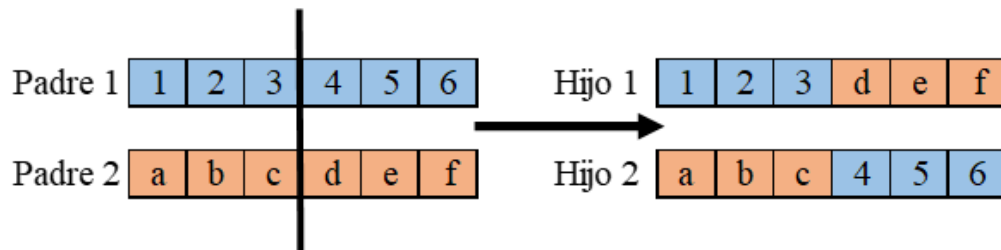
3.17.3.2 Selección por torneo. Esta metodología de selección se enfoca en hacer enfrentamientos entre 2 o más individuos de la población elegidos al azar. El ganador de cada enfrentamiento o torneo se define como el más apto, lo cual, conduce a su selección. Relacionando la función fitness para evaluar y escoger al individuo más apto.

3.18 Recombinación

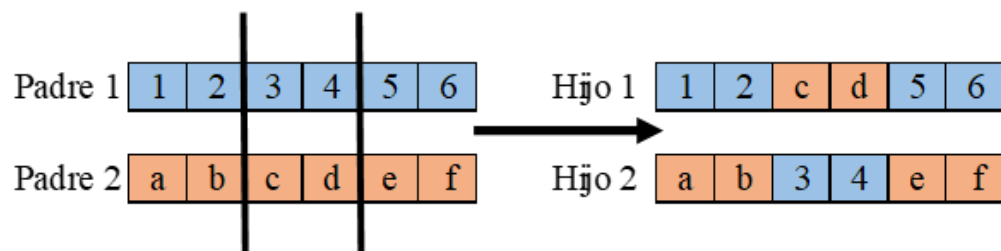
Ya seleccionados los individuos, éstos son cruzados para producir la descendencia de la siguiente generación. Los operadores de cruce actúan sobre parejas de individuos y producen un par de individuos que combinan características de los progenitores. El operador crea un nuevo par de individuos combinando partes de los dos cromosomas padre.

3.18.1 Cruce con un punto.

Se escoge un punto de cruce divisorio entre filas y se intercambian los alelos de los padres hasta ese punto (*Ver Figura 18*).

Figura 18.*Cruce con un punto-***3.18.2 Cruce con dos puntos.**

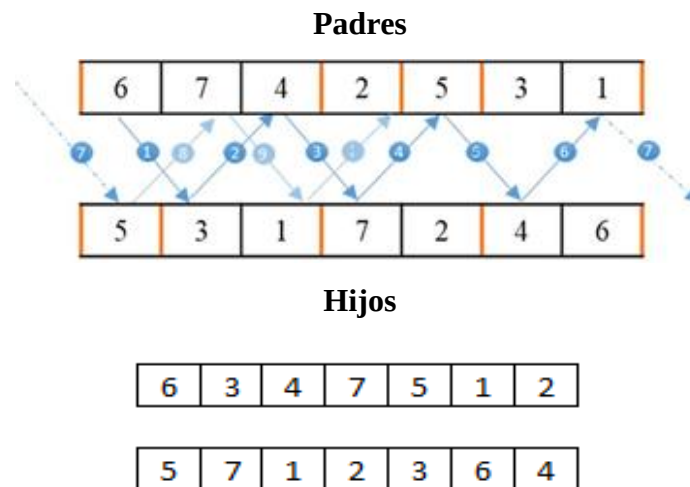
Se escogen dos puntos de cruce divisorios entre filas y se intercambian los alelos de los padres hasta el primer punto, y a partir del segundo punto.

Figura 19.*Cruce con dos puntos.***3.18.3 Cruce Alternativo:**

Intercala los alelos de cada uno de los padres en cada uno de los hijos. Aplicado en casos denotados binariamente.

Figura 20.*Cruce alterno.***3.18.4 Cruce combinado.**

Consiste en recorrer circularmente los valores de los padres, asignando de forma alternada a los cromosomas de los hijos cada nuevo número. A medida que se realiza esta operación se comprueba que el nuevo número no se encuentre en el hijo, en cuyo caso se le asigna el nuevo número prosiguiendo de la misma forma, como se muestra en la Figura # 21. Este cruce siempre mantiene la restricción de no tener elementos repetidos a nivel de fila.

Figura 21.*Cruce combinado.*

3.19 Mutación

Se considera como la modificación de uno o más alelos en el individuo. Se aplica a cromosomas solos permitiendo explorar nuevas alternativas en el espacio de búsqueda y tiene su valor de forma aleatoria, la mutación se suele utilizar de manera conjunta con el operador de cruce. Primeramente, se seleccionan dos individuos de la población para realizar el cruce. Si el cruce tiene éxito entonces uno de los descendientes, o ambos, se muta con cierta probabilidad P_m . Se imita de esta manera el comportamiento que se da en la naturaleza, pues cuando se genera la descendencia siempre se produce algún tipo de error, por lo general sin mayor trascendencia, en el paso de la carga genética de padres a hijos. (Blickle & Thiele, 1995)

3.20 Programación estocástica.

La programación estocástica une modelos de optimización en donde uno o más parámetros del problema son modelados a través de variables aleatorias. No se conocen sus valores, sólo sus distribuciones y habitualmente se supone que éstas son discretas con un número finito de estados posibles. Una manera de enfrentar esta aleatoriedad consiste en reemplazar los parámetros aleatorios por su valor esperado, lo cual lleva a resolver un problema determinístico de programación matemática y donde la variabilidad inherente a los parámetros se aborda a través del análisis de sensibilidad. (Birge & Louveaux, 2011)

3.20.1 Clasificación de los modelos de programación estocástica.

Los modelos de optimización estocástica se dividen en dos grandes categorías, estos son: Modelos con Restricciones Probabilísticas y Modelos con Recurso. (Birge & Louveaux, 2011).

- **Modelo con restricción probabilística o here and now:** se debe tomar antes de conocer la realización de la variable aleatoria, es decir que se escoge tomando en cuenta la aleatoriedad de los parámetros, pero cuyo valor es independiente de la realización particular que finalmente vaya a tomar dicha variable aleatoria. Las variables de primera etapa pueden ser vistas como decisiones proactivas y están asociadas frecuentemente a decisiones estratégicas como la planificación

- **Modelo con recursos:** su valor es tomado en respuesta al medio. En este sentido las variables de segunda etapa son de naturaleza reactiva y generalmente están asociadas a decisiones operativas.

3.21 Problema de localización de instalaciones en Logística humanitaria

El problema de la localización de instalaciones para la ayuda humanitaria ha sido un tema que desde hace muchos años se ha venido estudiando y modelando. Cooper, en 1963 presentó un método para definir dónde localizar instalaciones para dar respuesta a emergencias, determinar la demanda óptima desde dichas instalaciones y dar un uso efectivo a los recursos.

La localización óptima de instalaciones es un problema que se da en diferentes áreas y contextos, por esta razón los científicos han venido utilizando técnicas de investigación de operaciones que permitan resolver el problema.

Los primeros modelos fueron expuestos en 1961 por Balinski y se han venido tratando a lo largo de los años. Los modelos de localización óptima básicos consideran un solo producto con instalaciones de capacidad limitada o ilimitada. Estos modelos básicos son de carácter discreto, los cuales pueden tipificarse en dos grandes grupos: los modelos de locación de la mediana y los modelos de centro y cobertura. El otro grupo de modelos son los probabilísticos, estos modelos consideran que la incertidumbre y la información imperfecta afectan la respuesta esperada. Los modelos probabilísticos son clasificados en aleatorios, de peligro y de gran incertidumbre (Cornejo, Vargas, Aragón, & Serpa, 2013).

En el sector privado, el objetivo de los modelos de localización son generalmente minimizar los costos y maximizar el beneficio. A diferencia de ello, en el caso de ayuda humanitaria se busca optimizar la accesibilidad y el tiempo de respuesta. Entre ambos modelos matemáticos de localización, el modelo de cobertura se adecúa más a los problemas cuando el tiempo de respuesta es el criterio más importante (Cornejo, Vargas, Aragón, & Serpa, 2013).

En este proceso la localización de instalaciones y el transporte son operaciones que están estrechamente relacionadas, ya que la ubicación de las instalaciones afecta las rutas y la efectividad de la asistencia requerida por la población. De acuerdo a estas consideraciones B. B. Balcik y B. M. Beamon, proponen un modelo de localización temporal, en donde se relocalizan los puntos de distribución de acuerdo a los requerimientos de la zona o a los requerimientos de la ruta, el principal objetivo es mejorar el desempeño en términos de tiempos de respuesta, de la cadena de suministro.

3.22 Problema de asignación de recursos en Logística humanitaria

En las situaciones de emergencia, una de las problemáticas es la incertidumbre de la capacidad de respuesta de los centros de distribución y/o de los depósitos encargados de la distribución de suministros. El tipo de recursos a distribuir es independiente a la demanda, es decir, algunos de los recursos demandados probablemente no se suplan, esto debido a que la oferta de suministros de ayuda humanitaria no se define por la demanda de éstos sino por las donaciones hechas por países externos (Reyes, 2015).

Algunos de los productos demandados se suministran una vez, sin embargo, existen otros que se suministran con determinada frecuencia como son los medicamentos, alimentos, agua potable, personal especializado, elementos de construcción de albergues y hospitales, elementos para la reconstrucción de la zona y elementos de protección personal, entre otros.

La complejidad del modelo de asignación aumenta a medida que aumentan los puntos de demanda y los tipos de suministros, por lo cual, algunos autores con el objetivo de realizar el modelo, reducen la variedad de tipos de suministros a kits por familia.

4. Formulación del modelo matemático

La metodología consiste en la formulación de un modelo matemático basado en el propuesto por Cotes y Cantillo en el 2019, con sus respectivas modificaciones, para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventario de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica, utilizando un modelo ILP el cual integrara la toma de decisiones de localización y asignación de inventarios y su distribución, enfocado en la minimización de los costos para la logística humanitaria. Para su formulación matemática se asume que se solventará la demanda con kits de ayuda humanitaria los cuales representaría un único producto, además de los siguientes supuestos:

- Es un problema de localización y asignación de inventarios, de un solo producto, en un solo periodo de tiempo con demanda estocástica.
- La ubicación de los conjuntos de centros de distribución es desconocida pero cada uno de los sitios posibles destinados tienen que cumplir con ciertos criterios establecidos.
- El centro de distribución es instalado, aunque su utilización sea mínima ya que es importante suplir a cabalidad la demanda.
- No se contará con inventarios iniciales.
- No habrá intermediarios entre, el centro de distribución y la demanda
- Los centros de distribución funcionan como almacenes cuya capacidad es finita y puede variar para cada uno de estos.

Índices

j Centros de distribución, 1, 2, 3..., n

k Albergues, 1, 2, 3..., n

Parámetros de entrada.

CT: Costo de transportar los kits desde j hasta k. [\$]

f: Número de instalaciones a ubicar.

M: Costo de instalar un centro de distribución. [\$]

Q_k: Población en el albergue k.

S_k: Demanda de kits en el albergue k.

W: Cantidad mínima de inventario a almacenar en un centro de distribución

H: Costo unitario de almacenamiento por kit

q_j: Capacidad del centro de distribución j

t_{jk}: Tiempo de viaje desde j hasta k

t₀: Tiempo de alistamiento

Z: Costo por kit no entregado

N: Costo por tiempo de espera

T_{max}: Tiempo máximo de privación para que no haya pérdidas humanas.

Variables de decisión.

G_{jk}: porcentaje de la demanda de producto transportado desde j hasta k

X_j: Cantidad de producto que se debe almacenar en j

A_j ∈ {0,1} una variable binaria que toma el valor de 1 si el centro de distribución j es habilitado; 0 en caso contrario.

B_{jk} ∈ {0,1} una variable binaria que toma el valor de 1 si el albergue k recibe productos de j; 0 en caso contrario.

La función objetivo del problema, en este caso intenta minimizar los costos totales incurridos durante el periodo de respuesta al desastre. La formulación matemática en el primer término relaciona los costos de transporte desde el centro de distribución a los puntos de demanda; el segundo término hace referencia a los costos fijos para la ubicación de los centros de distribución y los costos de inventario para el pre posicionamiento se expresan en el tercer término. Además, la suma incluye el cuarto y quinto término que representan los costos de privación, relacionados con la falta de acceso al kit de soporte vital.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K S_k \cdot G_{jk} \cdot CT + \sum_{j=1}^J A_j \cdot M + \sum_{j=1}^J X_j \cdot A_j \cdot H + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (t_0 + t_{jk}) \cdot Q_k \cdot G_{jk} \cdot N + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (S_k - S_k \cdot G_{jk}) \cdot Z \quad (1)$$

Sujeto a:

La restricción (2) afirma que un CD único sirva a cada PD.

$$\sum_{j=1}^J B_{jk} = 1, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

La restricción (3) garantiza que, si un CD no sirve a un PD en particular, no enviará carga a ese PD específico.

$$G_{jk} \leq B_{jk}, \forall j \in J, k \in K \quad (3)$$

La restricción (4) indica que la sumatoria de las proporciones de la demanda de producto que se envía al nodo k y proviene de CD, es igual a la unidad.

$$\sum_{j=1}^J G_{jk} = 1, \forall k \in K \quad (4)$$

La restricción (5) hace referencia a la capacidad de CD y garantiza que, si no hay nada ubicado en el sitio j , no puede enviar ninguna carga.

$$\sum_{k=1}^K S_k \cdot G_{jk} \leq q_j \cdot A_j, \forall j \in J \quad (5)$$

Por otro lado, la restricción (6) permite la conservación del flujo de productos, lo enviado debe ser menor o igual a la capacidad del CD.

$$\sum_{k=1}^K S_k \cdot G_{jk} - X_j = 0, \forall j \in J \quad (6)$$

La restricción (7) establece el número de centros de distribución que se ubicarán, del total de sitios potenciales. Se incluye para reducir el área de búsqueda del modelo y hacer que converja más rápido.

$$\sum_{j=1}^J A_j = f \quad (7)$$

La restricción (8) establece que, si hay un CD ubicado, debe almacenar una cantidad mínima de producto, por lo que vale la pena abrir una instalación.

$$X_j \geq W \cdot A_j, \forall j \in J \quad (8)$$

La restricción (9) garantiza que si un CDj no está ubicado ($A_j=0$) entonces el conjunto de enlaces que lo atraviesan no está disponible.

$$B_{jk} \leq A_j, \forall j \in J, k \in K \quad (9)$$

La restricción (10) confirma que el tiempo de viaje desde un CD a un PD es menor o como máximo igual a un tiempo máximo de privación para que no haya pérdidas humanas.

$$t_{jk} \cdot B_{jk} \leq T_{max}, \forall j \in J, k \in K \quad (10)$$

La restricción (11) limita a las variables a ser un número entero.

$$A_j, B_{jk} \in \{0,1\}, \forall j \in J, k \in K \quad (11)$$

La restricción (12) asegura que el valor de las variables varía entre 0 y 1.

$$0 \leq G_{jk} \leq 1, \forall j \in J, k \in K \quad (12)$$

Por último, el conjunto de restricciones (13) y (14) son restricciones de no negatividad.

$$V_{jk} \geq 0, \forall j \in J, k \in K \quad (13)$$

$$X_j \geq 0, \forall j \in J \quad (14)$$

5. Diseño del algoritmo híbrido

Siguiendo los análisis preliminares de las diferentes metaheurísticas, se define al algoritmo genético y algoritmo VNS como los métodos que conformarán el algoritmo híbrido del problema planteado.

La combinación de métodos de resolución aproximados generales llamadas metaheurísticas híbridas permite la generación de métodos más exactos [10].

5.1 Algoritmo genético

Los Algoritmos Genéticos (GA) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización que a su vez están basados en el proceso genético de los organismos vivos. Los Algoritmos Genéticos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de estas.

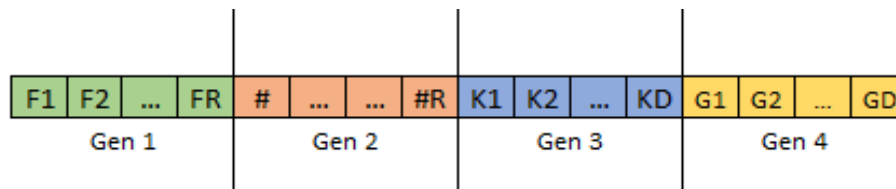
5.1.1 Etapa 1: Codificación y generación de la población inicial

Es importante resaltar que, se tomará como metaheurística principal al Algoritmo Genético, lo anterior, en función de definir la búsqueda en el espacio de solución por medio de una población de tamaño N , y que cada solución o individuo estará representado a partir de un cromosoma.

5.1.1.1 Codificación. Teniendo en cuenta las características del problema y la estructura del cromosoma propuesto por Camacho (2018), en la figura 22 se explica la codificación para la presente investigación.

Figura 22.

Cromosoma propuesto.



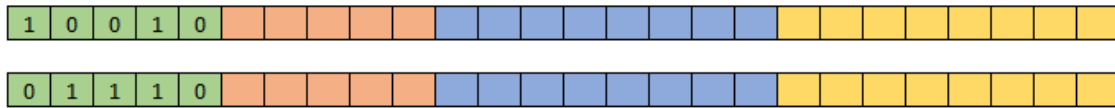
- **Gen 1. Centros de distribución:** El primer gen corresponde a los primeros R alelos, donde R hace referencia al número de centros de distribución considerados en el modelo.
- **Gen 2. Número de albergues:** Hace referencia al número de albergues que ha de satisfacer respectivamente cada centro de distribución abierto, donde cada alelo R tiene un valor numérico entre $[0, R]$ pertenecientes al problema propuesto.
- **Gen 3. Albergues:** Este gen determina la secuencia en la que serán visitados los albergues desde cada centro de distribución habilitado, respectivamente. Tiene un valor numérico entero y su tamaño es de D alelos, donde D corresponde a la cantidad de albergues considerados en el problema.
- **Gen 4: Porcentaje de producto enviado:** Hace referencia al porcentaje de producto que se envía desde un centro de distribución a cada uno de los albergues asignados para el mismo. Donde G tiene un valor porcentual entre 0-100% y tiene un tamaño de D alelos.

5.1.1.2 Generación de la población inicial. Una vez definida la codificación de los cromosomas, se plantea cómo se formará cada uno de los N individuos de la población inicial, donde el tamaño y la forma en la que se crea cada gen se explica a continuación, resaltando que cada uno de los cromosomas se genera de forma aleatoria. Los cromosomas que representan una solución infactible para el problema que aquí se plantea, serán desechados, en ningún caso se mejorarán.

Gen 1. Centros de distribución. Se genera de forma aleatoria en representación binomial (0,1) para cada centro de distribución en los R alelos, denotando con el número 0 cuando el centro de distribución no se abre y con 1 cuando el centro de distribución es abierto.

Figura 23.

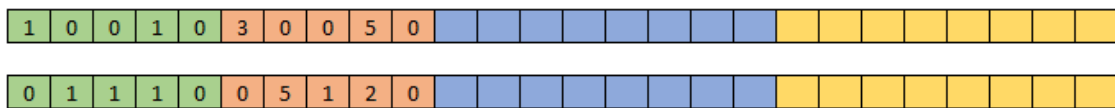
Ejemplo cromosoma centros de distribución.



Gen 2. Número de albergues. Este gen cuenta con R alelos, los cuales, se relacionan con los del gen anterior de forma paralela, es decir, en caso de que en el primer gen un alelo tome el valor de 1 entonces en el segundo gen, en el alelo correspondiente a la misma posición se le asignará un valor numérico aleatorio que hace referencia al número de albergues asignados a ese centro de distribución; en caso contrario, si un alelo del primer gen toma el valor de 0, así mismo se asignará el valor de cero para el alelo en la misma posición dentro del segundo gen. Si la suma de los valores en el segundo gen no corresponde al total de albergues del problema, la solución se considera infactible y es desechada

Figura 24.

Ejemplo cromosoma número de albergues.

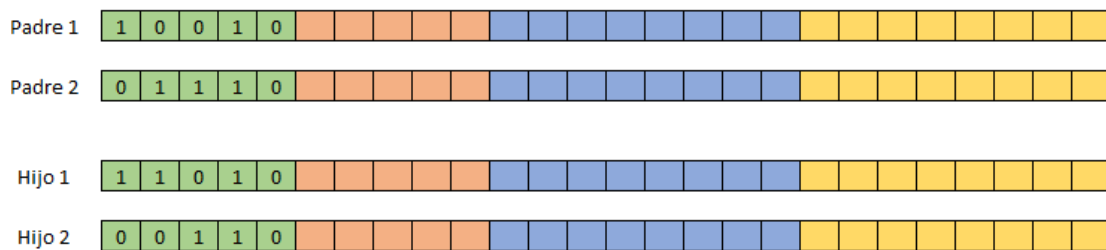


5.1.1.3 Gen 3. Albergues. Este gen se genera de forma aleatoria tomando un valor numérico entero el cual está relacionado directamente con el valor numérico asignado en el gen anterior. Los alelos del gen 2 que tomen el valor de cero no se representan en el gen 3, de manera que la suma de los valores asignados al gen 2, determinan la cantidad de alelos del gen 3. Así, para este caso, los 3 primeros alelos corresponden a los albergues asistidos por el centro de distribución 1, que a su vez serán atendidos en ese orden. Por lo tanto, los 5 alelos posteriores corresponden a los albergues que serán asistidos por el centro de distribución 4.

Una vez seleccionados dos individuos, para el caso del gen 1, se alternan los alelos de cada uno de los padres en cada uno de los hijos. De esta manera ambos descendientes heredan información genética de los padres.

Figura 27.

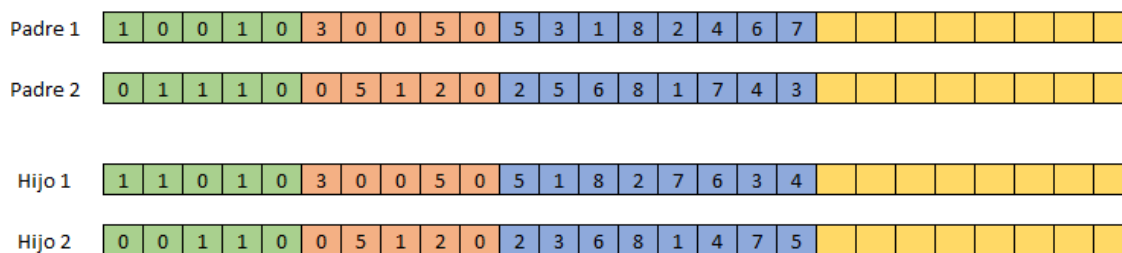
Ejemplo cromosoma cruce gen 1.



Para el gen 3, el método de cruce combinado recorre circularmente los valores no prefijados de los padres, y asigna alternadamente a la descendencia cada nuevo valor numérico entero. Conforme se realiza la operación descrita, se verifica que el nuevo valor no se encuentre duplicado en la descendencia. Los alelos que queden se completan con los valores que hagan falta.

Figura 28.

Ejemplo cromosoma cruce gen 3



5.1.1.6 Mutación. El operador de mutación transforma levemente un individuo, evita la convergencia prematura y cambia la dirección de búsqueda. Utilizaremos el operador de mutación

de intercambio (swap) en el gen 4. Se eligen dos posiciones (diferentes) de forma aleatoria entre 1 y D, para este caso se tomarán el alelo 3 y 7, cada posición será intercambiada.

Figura 29.

Ejemplo cromosoma mutado.

Padre 1	1	0	0	1	0	3	0	0	5	0	5	3	1	8	2	4	6	7	22	25	30	9	14	40	11	2
Padre 2	0	1	1	1	0	0	5	1	2	0	2	5	6	8	1	7	4	3	5	33	29	15	7	35	9	53
Hijo 1	1	1	0	1	0	3	0	0	5	0	5	1	8	2	7	6	3	4	22	25	11	9	14	40	30	2
Hijo 2	0	0	1	1	0	0	5	1	2	0	2	3	6	8	1	4	7	5	5	33	9	15	7	35	29	53

5.1.2 Algoritmo VNS

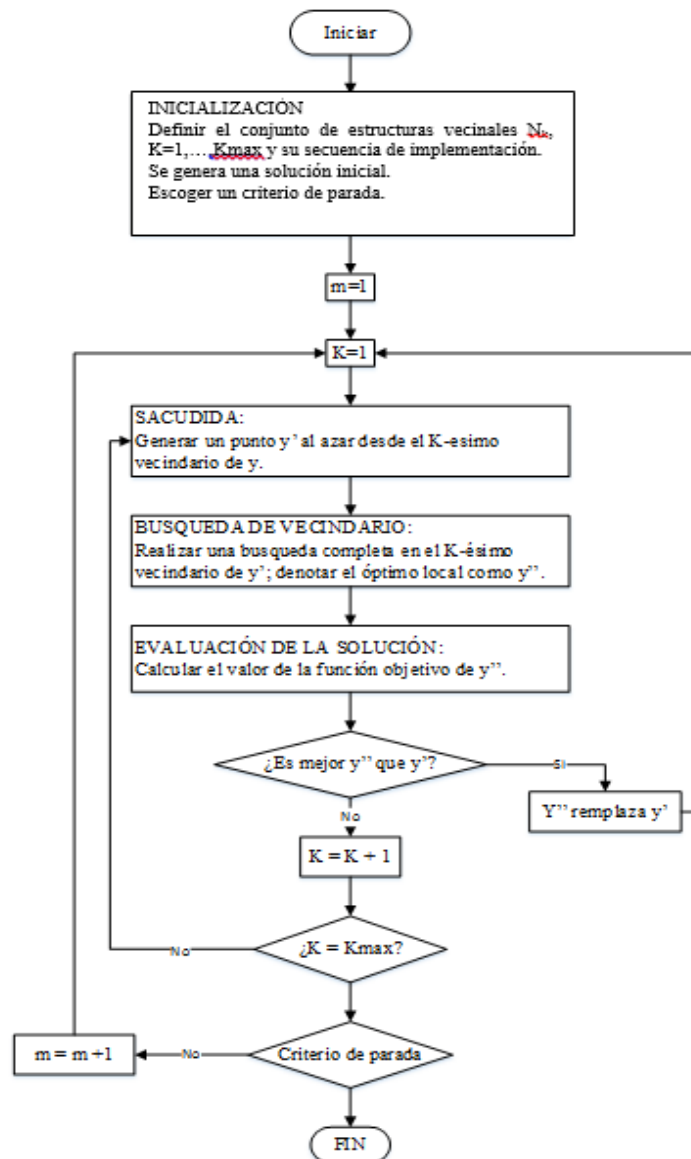
La búsqueda de vecindario variable (VNS) es un algoritmo metaheurístico que ayuda a resolver problemas complejos tanto de optimización combinatoria como de optimización global. En concreto, partiendo de una solución inicial, intenta mejorarla visitando distintos vecindarios. Mediante la utilización de una búsqueda local explora, en cada vecindario, las posibles soluciones prometedoras, obteniendo un óptimo local en cada uno de ellos.

Las heurísticas basadas en VNS, al contrario de lo que ocurre con otras metaheurísticas, se mantienen simples; no solo sus esquemas básicos sino también la mayoría de las extensiones, requiriendo el ajuste de muy pocos parámetros. Esta característica permite que la metaheurística VNS y sus extensiones sean útiles para diseñar rápidamente procedimientos heurísticos con los que proporcionar buenas soluciones con rapidez de manera muy simple dejando al descubierto cuales son las razones que determinan su rendimiento, lo que frecuentemente facilita la elaboración de implementaciones sofisticadas muy eficientes. Contrario a lo que hacen otras metaheurísticas basadas en métodos de búsqueda local, el VNS no sigue una trayectoria sino que explora entornos distantes de la actual solución, y pasa de esta solución a una nueva sólo si existe una mejora.

La heurística propuesta se presenta en el diagrama de flujo de VNS, ver figura #30. En general, los algoritmos VNS comienzan con una solución inicial y . $Maxiter$ y $kmax$ son parámetros de la búsqueda, $maxiter$ es el número máximo de iteraciones, y $kmax$ es el número máximo de vecindarios a explorar. Dada la solución actual, se aplica un procedimiento aleatorio de sacudida con tamaño k , obteniendo una nueva solución y' en el k -ésimo vecindario de y , luego se realiza un proceso de búsqueda, obteniendo una solución mejorada y'' . Si la nueva solución mejora al titular, entonces y'' reemplaza a y , como la mejor solución encontrada, y k , la estructura de vecindad, se restablece a 1, es decir, una nueva solución vecina se genera aleatoriamente a partir de y'' , en cualquier otro caso, k se incrementa. Este proceso se repite hasta que se alcance $kmax$, teniendo en cuenta el número máximo de iteraciones permitidas.

Figura 30.

Diagrama de flujo algoritmo VNS.



Nota. Tomado de: Liang, Y., Lo, M. y Chen, Y., 2007.

Inicialmente, partiremos de una solución inicial x generada aleatoriamente. A continuación, se genera la solución agitada x' , elegida de forma aleatoria de entre todas las del entorno $N_1(x)$. A partir de x' y mediante un procedimiento de búsqueda local, alcanzaremos un óptimo local x'' . Para poder escapar de este óptimo local, es necesario incrementar el parámetro k hasta que alcance el valor 4, ya que es en este momento cuando se puede obtener una solución agitada que permita alcanzar un nuevo óptimo local. Procediendo de análoga forma para este nuevo óptimo local, podremos generar una solución agitada del entorno N_4 de dicho óptimo local, que

permita escapar del mismo y llegar así al óptimo global tras la aplicación de la correspondiente búsqueda local.

Inicialización. Seleccionar el conjunto de estructuras de entorno N_k , $k = 1, \dots, K_{\max}$ que se usarán en la búsqueda y encontrar una solución inicial x . Elegir, también, el criterio de parada a emplear.

Repetir los siguientes pasos hasta verificarse el criterio de parada:

1. Hacer $k = 1$.
2. Repetir los siguientes pasos hasta que $k = k_{\max}$:
 - a) Agitación: Generar al azar una solución x' del k -ésimo entorno de x ($x' \in N_k(x)$)
 - b) Búsqueda Local: Aplicar algún procedimiento de búsqueda local partiendo de x' como solución inicial. Denotar por x' el óptimo local obtenido.
 - c) Moverse o no: Si la solución x'' mejora la mejor obtenida, hacer $x = x''$ y continuar la búsqueda con N_1 ($k = 1$). En otro caso, hacer $k = k + 1$.

Resulta interesante comentar que en la fase de agitación, correspondiente al paso 2(a) del esquema de la VNS, se selecciona la solución $x' \in N_k(x)$ de manera aleatoria para evitar que el procedimiento sea cíclico.

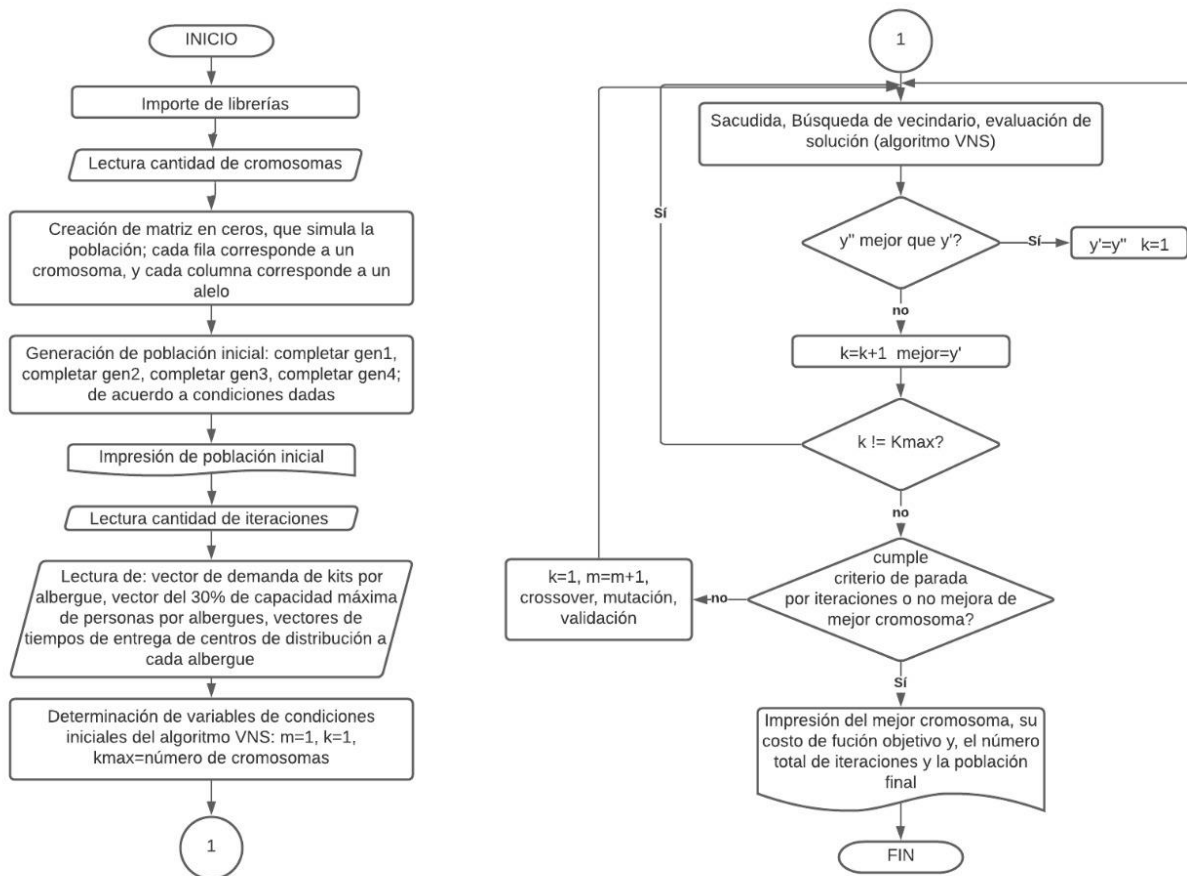
La estructura del algoritmo híbrido propuesto se describe de la siguiente manera:

- Población inicial: es generada de manera aleatoria en la etapa 1 del algoritmo genético.
- Posteriormente esta población es mejorada aplicando algoritmo VNS.
- Función de adaptación/aptitud: permite valorar el comportamiento de los individuos en cada generación para escoger el individuo que mayor compatibilidad presenta con el padre, generando así una nueva población.
- Selección: Se aplica el criterio de selección del algoritmo genético, tal como se plantea en el numeral 2.3.1.2.
- Cruce: Después se realiza la operación de cruce de un punto, el cual se busca intercambiar partes de los dos padres para generar nuevos descendientes.

- Mutación: Se aplica el operador de mutación tal como se plantea en el numeral 2.3.1.4 y así generar el mejor individuo para la siguiente generación.
- Criterio de parada: si después de ciertas generaciones la solución sigue siendo la misma y no mejora, se detiene.

Figura 31.

Diagrama de flujo algoritmo hibrido propuesto.



6. Validación del algoritmo

Una vez planteado el algoritmo híbrido para el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventario de suministros para la logística post desastre con demanda estocástica, se procede a realizar la experimentación de la investigación.

6.1 Instancias

Se limitan 9 diferentes parámetros para poder evaluar el modelo matemático al igual que el algoritmo híbrido diseñado en donde cada una de estos trabaja en función de los parámetros planteados en el modelo.

Tabla 2.

Datos de entrada del problema planteado

Parametros	Nomenclatura	Valor
Centros de distribucion	CD	CD donde CD toma el valor de {2,3,4}
Puntos de demanda	PD	47
Poblacion	Q	Q, donde Q toma el valor entre [16-585]
Demanda	S	S, donde S toma valor entre [4-117]
Cant de producto a almacenar	X	681
Costos		Valor (peso en miles)
Instalacion	M	200
Transporte	CT	15
Almacenamiento	H	8
Unidad no entregada	Z	12
		Valor (peso en miles/minutos)
Espera del producto	N	5
Tiempos		Valor (minutos)
Alistamiento	t0	30

Los tiempos de transporte entre cada uno de los centros de distribución hacia cada uno de los puntos de demanda son calculados con la herramienta Google maps en donde los datos proporcionados son aproximados puesto que pueden variar dependiendo la situación, las rutas que escojan entre otros aspectos.

6.2 Cálculo de la demanda

Para conocer la cantidad de personas afectadas que se encontraran en cada uno de los albergues asignados, se debe tener en cuenta el tipo de albergue. Para realizar este estudio se toman los datos de la capacidad de cada uno de los albergues planteados por (Barrera Navarro & Hernandez Gomez, 2016) . Los albergues serán clasificados en 3 grupos:

- **Parques:** Para calcular la cantidad de personas afectadas que se encontraran en dichos albergues, se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

A = Área total del parque.

Ψ = Porcentaje de arborización, construcciones del parque y zonas comunes (50%).

$\mathcal{A}$ = Área mínima en un albergue destinada para una persona ($3,5m^2$).

η = Capacidad del albergue (personas).

$$(1) \quad \eta = \frac{A - (\Psi \times A)}{\mathcal{A}}$$

- **Polideportivos:** En caso de los polideportivos que se tuvieron en cuenta son considerados superficies libres para ser contempladas como albergues en su totalidad, se tiene en cuenta los siguientes parámetros:

A = Área total del polideportivo.

$\mathfrak{h}$ = Porcentaje de áreas comunes (cocina, baños, comedores, pasillos) (40%).

$\mathcal{A}$ = Área mínima en un albergue destinada para una persona ($3,5m^2$).

η = Capacidad del albergue (personas).

$$(2) \quad \eta = \frac{A - (A \times \mathfrak{h})}{\mathcal{A}}$$

El área total de los parques y polideportivos se calcula por medio de la herramienta Google maps el cual proyecta datos aproximados.

Para los parques un elemento importante es el alto porcentaje de arborización el cual se le asigna un valor del 50% además se incluyen el espacio necesario para zonas comunes y en los polideportivos solo se tiene en cuenta las áreas comunes por tanto el porcentaje es menor tomando un valor del 40%.

- **Colegios:** Para calcular el número de personas afectas que estarían en el albergue se considera su capacidad teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

α = Alumnos matriculados en el colegio (personas).

α = Superficie destinada para cada alumno en el salón de clases ($1.65m^2$).

$\mathcal{A}$ = Área mínima en un albergue destinada para una persona ($3,5m^2$).

η = Capacidad del albergue (personas).

$$(3) \quad \eta = \frac{\beta \times \alpha}{\mathcal{A}}$$

Los datos del número de alumnos matriculados fue suministrada por la secretaria de educación de la ciudad de Bucaramanga y según la norma técnica colombiana NTC 4595 de 1999, ratificada en 2006 (Ministerio de Educación Nacional, 2006), se define los requisitos para construcciones de educación nacional básica y media, asignando un área mínima de $1,65m^2$ por estudiante y según la organización mundial de la salud (OMS) recomienda un área de $3,5m^2$ para alojamientos de emergencia de tal manera que no se encuentren en un espacio muy reducido debido a que podrían generar brotes de enfermedades, descontento social, peleas, violencia y abuso sexual de mujeres y menores de edad.

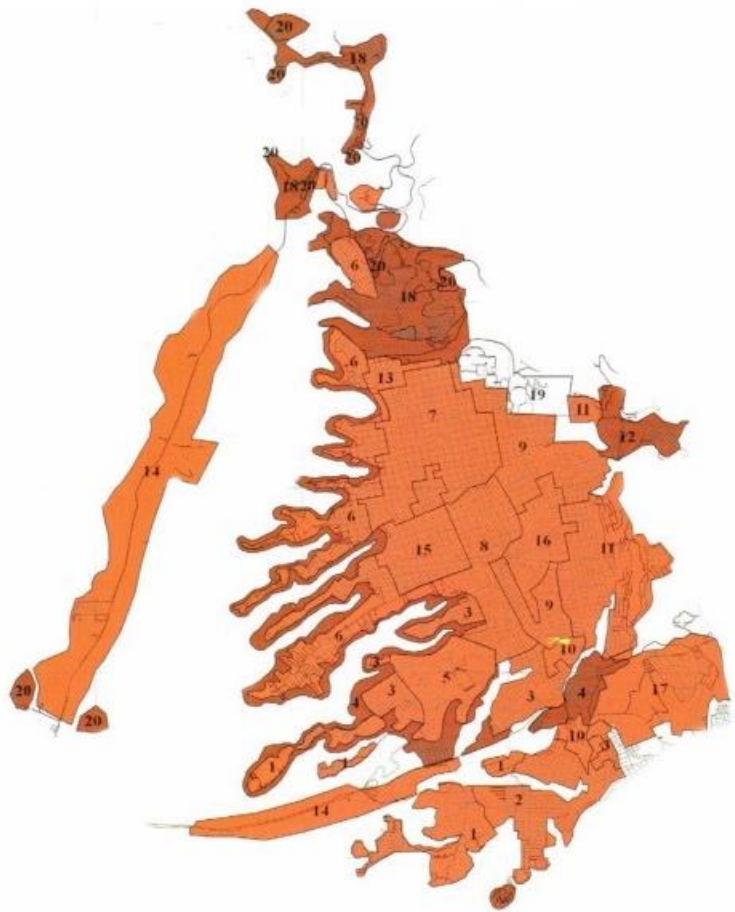
Después de obtener la capacidad de cada uno de los diferentes tipos de albergues, se contemplan las zonas con mayor vulnerabilidad de la ciudad de Bucaramanga según (Maldonado Rondon & Chio Cho, 2005). Tomando en cuenta esta información se considera que la zona 9A, zona 11, zona 12 y zona 18 son las más afectadas como se muestra en la figura # 32 por lo tanto se asume que los evacuados provienen de dichas zonas y acuden a los albergues más cercanos, sin embargo, se contempla el supuesto que no todos los evacuados requieren refugiarse en un albergue

Figura 32.

Según las zonas de afectación se estima la ubicación de los albergues ubicándose en los lugares posibles más cercanos de ser requeridos.

Figura 33.

Mapa de zonificación de Bucaramanga



Nota: Adaptado de (Maldonado Rondon & Chio Cho, 2005).

Se seleccionan cuatro (4) centros de distribución (CD) los cuales se encargaran de distribuir toda la ayuda humanitaria hacia los puntos de demanda (albergues), estos fueron escogidos por sus diferentes características, cumpliendo los diferentes estándares de salubridad y además reúnan condiciones básicas de accesibilidad y seguridad que son fundamentales para esta investigación, a su vez estos centros de distribución han sido asignados en una ubicación estratégica puesto que así podrán distribuir de forma rápida y precisa a cada uno de los puntos de demanda asignados.

Centros de distribución.

- Barrio Gaitán: Carrera 12# 15-36
- Neomundo: Calle 89 Transversal Oriental Metropolitana
- Cruz Roja: Calle 45 #48-10
- Unidades Tecnológicas de Santander: Av. Los Estudiantes#9-82

Cada centro de distribución tiene una capacidad de hasta 2000 kits, pero únicamente se contempla el hecho de ocuparlos con 681 kits y según (Joya Milan & Tarazona Uribe, 2019) está conformado por una caja de cartón corrugado con dimensiones de 34,2 cm de ancho, 28,4 cm de alto, y 24 cm de profundidad.

Estas son las zonas más cercanas según la figura # y sus respectivos albergues:

Zonas cercanas a las zonas con mayor riesgo

Zona 9A: Zona 3, Zona 7, Zona 8, Zona 16

Zona 11: Zona 9B, Zona 3, Zona 4, Zona 8, Zona 16, Zona 17

Zona 12: Zona 7, Zona 8, Zona 9B, Zona 16

Zona 18: Zona 6, Zona 7, Zona 13

Albergues cercanos según cada zona

Zona 3: Institución Educativa técnico empresarial José María Estévez, Colegio Metropolitano Real de Minas, Institución Educativa San José de la Salle SEDE B centro infantil la victoria, Institución Educativa Santa María Goretti SEDE C, Institución Educativa Aurelio Martínez Mutis SEDE C la victoria, Institución Educativa San José de la Salle SEDE A, Colegio La Salle, Institución Educativa Gabriela Mistral. (8)

Zona 6: Institución Educativa Maiporé, Institución Educativa Club Unión SEDE B 16 de marzo, Institución Educativa Club Unión SEDE A. (3)

Zona 7: Parque Cristo Rey, Colegio sagrado Corazón de Jesús, Institución Educativa Comuneros, Institución Educativa centro piloto Simón Bolívar, Colegio Santander SEDE H,

Institución Educativa técnico superior Damaso Zapata SEDE B, Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colegio Franciscano del Virrey Solís, Parque San Francisco, Colegio Americano de Bucaramanga, Colegio Santísima Trinidad. (11)

Zona 8: Parque de los Niños, Colegio Psicopedagógico Carl Rogers, Parque Antonia Santos, Colegio Incades, Parque Santander, Colegio Santander SEDE G, Parque Simón Bolívar. (7)

Zona 9B: Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A, Institución Educativa Aurelio Martínez Mutis SEDE B. (2)

Zona 13: Colegio Santander SEDE C (1)

Zona 16: Parque Mejoras Publicas, Parque Las Palmas, Colegio San Pedro Claver, Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE B. (4)

Zona 17: Estadio Atletismo La Flora, Colegio Caldas, Colegio Gimnasio San Sebastián. (3)

Zona 19: Colegio Santander SEDE A, Universidad Industrial de Santander, Institución Educativa Técnico Superior Damaso Zapata SEDE A, Polideportivo La Marte, Colegio Bicentenario, Estadio Alfonso López, Coliseo Vicente Diaz Romero, Velódromo Alfonso Flórez Ortiz. (8)

En el Apéndice B se encuentra los albergues y sus capacidades.

El número de personas que requieren o acuden a un albergue es calculado teniendo en cuenta dos factores: el supuesto que no todos los evacuados requieren refugiarse en un albergue y capacidad que tienen cada uno de los diferentes tipos de albergues.

La figura 34 muestra la estimación del número de personas que necesita albergues, información presentada fue tomada con base al nivel de afectación por comuna presentada por (Maldonado Rondon & Chio Cho, 2005), en las cuales ejemplifican los porcentajes de personas que necesitan o requieren un albergue en cada zona de acuerdo con la intensidad t de un sismo. Dichos autores establecen que las zonas vulnerables alcanzan un estado de daño significativo con sismos con intensidad 6, 7, 8 y podrían llegar al daño total con un sismo con intensidad igual o superior a 9.

Figura 34.

Porcentaje de evacuados en la zona k para un sismo de intensidad t .

Intensidad del sismo	Zona k			
	Zona 12	Zona 18	Zona 9A	Zona 11
$t=6$	30-60%	10-30%	0-10%	0-10%
$t=7$	30-60%	10-30%	10-30%	10-30%
$t=8$	30-60%	30-60%	10-30%	10-30%

Teniendo en cuenta lo anterior se selecciona el 30%, ya que se aplica en la intensidad del sismo 7 y 8 para las cuatro zonas mencionadas, como valor mínimo o como valor máximo y se dice que este porcentaje será el valor del número de personas que acudirán o requerirán un albergue y 70% restante será el número de personas que según el supuesto no acudirían a los albergues.

Teniendo en cuenta el porcentaje de personas que acudirán o requerirán un albergue y la capacidad de cada uno de los diferentes tipos de albergues se determinara el número real de personas que se albergarán con la siguiente formula:

$$(4) \quad n = C \times \rho$$

Donde:

n = Número de personas albergadas

ρ = Porcentaje de personas que acudirán a un albergue.

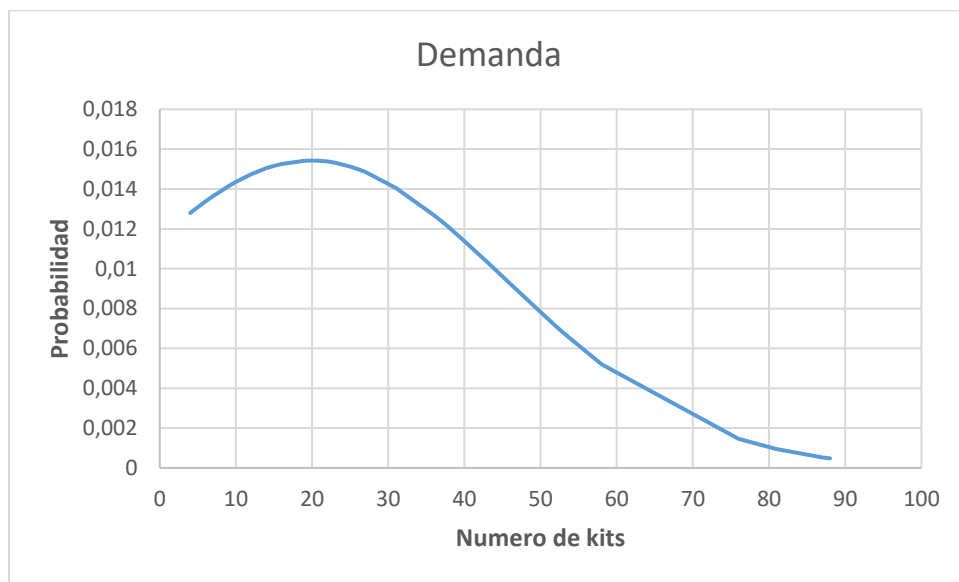
C = Capacidad del albergue.

Según la tesis de (Barrera Navarro & Hernandez Gomez, 2016) se determina que un kit de ayuda humanitaria puede abastecer hasta un máximo de cinco (5) personas albergadas y en el caso que el número no sea múltiplo de cinco se procede a dejar un kit adicional para abastecer dicha necesidad.

Ya con la cantidad de kits demandados, se calcula la desviación estándar y la media obteniendo un comportamiento de distribución normal (información que se encuentra en el Apéndice E).

Figura 35.

Comportamiento de la demanda en cantidad de kits.



6.3 Estudio de orden de complejidad temporal del algoritmo híbrido implementado.

El algoritmo desarrollado en un lenguaje de programación trabaja con estructuras estáticas llamadas vectores y matrices, además con ciclos iterativos y estructuras de decisión.

La información numérica se proporcionó por medio de un pseudocódigo desarrollado en el lenguaje de programación Python 3, y ejecutado en un computador con procesador Intel i7 de décima generación, disco duro de 512 Gb en estado sólido, 16 Gb DDR5 de memoria RAM y una tarjeta gráfica dedicada GTX 1660 ti GDDR6 de 6 Gb mediante Google Colaboratory.

Analizando el código fuente anexado, el cual se puede ver en el Apéndice A, el algoritmo cuenta con una cantidad significativa de líneas de código, aunque esto no significa grandes costos computacionales, se logra ver que, en esas líneas, existen bastantes ciclos anidados, los que generan un orden de complejidad temporal alto.

Analizando los tiempos generados en el diseño de experimentos, con diferentes cantidades de cromosomas, se ve que a medida que aumenta la cantidad de cromosomas generados en la población inicial y sus iteraciones, el algoritmo aumenta significativamente su tiempo de ejecución.

Lo anterior se sustenta hallando el orden de complejidad temporal del algoritmo implementado, o también llamado función de velocidad de crecimiento, el cual indica el costo computacional de un algoritmo dependiendo del número **N** datos ingresados en este mismo.

El orden de complejidad de este algoritmo se resume en encontrar la mayor cantidad de ciclos anidados en el código fuente, por lo tanto, al momento de crear la población inicial y conformar el gen 4 (suma de % de capacidad de albergue por cada centro de distribución 100%), se notan los siguientes ciclos iterativos:

1. **For:** para recorrer los cromosomas
- 1.1. **While:** para evaluar suma de albergues correspondientes sea ≤ 100

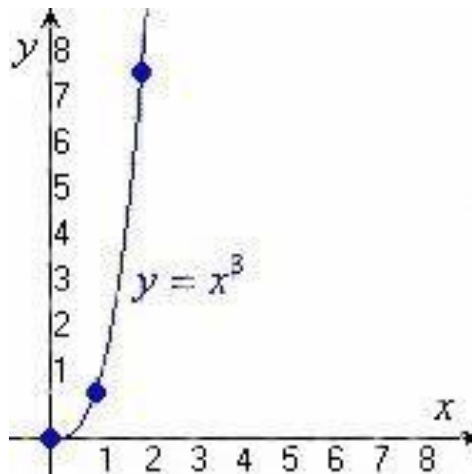
1.1.1. **For:** para recorrer la cantidad de albergues correspondientes al centro de distribución

1.1.1.1. Agregación de un número randómico de 0 a 20 a cada alelo correspondiente al centro de distribución.

La anterior estructura muestra un orden de complejidad computacional temporal aproximada de n^3 , debido a que hay 3 ciclos iterativos anidados. Por lo que, a mayor número de iteraciones y cromosomas propuestos, el algoritmo seguirá una función de tipo polinómica cúbica similar a la gráfica que se muestra en la Figura 38, generando así un mayor tiempo de ejecución.

Figura 36.

Comportamiento del algoritmo en función del número de cromosomas y el tiempo computacional.



En donde el eje de las x representa la población inicial (número de cromosomas) y el eje de las y el tiempo computacional.

6.4 Resultados de la experimentación del algoritmo híbrido.

Para el desarrollo del algoritmo se ejecutó con parámetros fijos y a su vez se contemplan los tiempos y costos para ejecutar el programa, con base al modelo planteado en la formulación matemática.

Las instancias del algoritmo se clasifican en secciones de tres, poblaciones iniciales pequeñas (8 cromosomas, experimentación 7, 8 y 9), medianas (10 cromosomas, experimentación 4, 5 y 6) y grandes (12 cromosomas, experimentación 1, 2 y 3), encasilladas y dadas así según el orden de complejidad de la programación diseñada, para cada población se consideran 3 diferentes criterios de parada (iteraciones). Cada instancia está diseñada con los parámetros generales de entrada, los tiempos de transporte de cada centro de distribución a cada punto de demanda seleccionado, así como los diferentes costos establecidos. Se realizan nueve (9) pruebas para verificar el comportamiento y variación del algoritmo propuesto en función de los datos y las variaciones planteadas.

En la Tabla 3 Se reflejan los resultados obtenidos del algoritmo propuesto, cada instancia con su solución, número de centros de distribución abiertos, cromosomas planteados, iteraciones, tiempo computacional y el costo generado del algoritmo híbrido.

Tabla 3.

Resultados adaptados del lenguaje de programación Phyton.

Instancias	Algoritmo	Población inicial (Cromosomas)	Iteraciones	Centros de distribución	Albergues visitados	Costo total	Tiempo computacional (min)
1	GA-VNS	12	4	2	37	55476,22	159,01
2	GA-VNS	12	5	3	38	59825,06	162,32
3	GA-VNS	12	6	2	38	57481,4	169,49
4	GA-VNS	10	4	3	39	108574,58	135,82
5	GA-VNS	10	5	2	36	61819,96	137,35
6	GA-VNS	10	6	2	41	58610,02	142,94
7	GA-VNS	8	4	2	36	125199,51	40,06
8	GA-VNS	8	5	3	40	65352,72	42,27
9	GA-VNS	8	6	3	38	107105,79	63,35

Según el orden de complejidad del algoritmo, únicamente se realizan las 9 instancias, cada instancia se corrió dos (2) veces para mayor espacio de los resultados obtenidos, y se selecciona el mejor. Ver en el apéndice C y D.

Se varía la cantidad de iteraciones y la población inicial (cromosomas) a su vez interactúa adaptándose la población de VNS para poder trabajar con mayor facilidad la hibridación, buscando así la forma de presentar los resultados obtenidos mostrando como los resultados varían a través de la experimentación de cada algoritmo.

Con la experimentación de cada instancia se corrobora la eficiencia de la hibridación, se definen qué factores resultan ser significativos en el estudio de la aptitud de cada solución y del tiempo computacional requerido. Se determina la mejor distribución en cada una de las instancias buscando el objetivo del problema: minimizar los costos. Se realiza la comparación de los resultados del algoritmo híbrido obtenidos mediante la programación lineal, considerando el valor de aptitud (representado en miles de pesos) y el tiempo computacional (minutos).

Tabla 4.

Información general de la experimentación 1

Información general de la experimentación 1	
Número de CD	2
Capacidad de CD	681
Costo fijo de instalación de CD	\$200
Costo fijo de almacenamiento	\$8
Costo fijo de transportar	\$15
Costo por unidad no entregada	\$12
Costo por la espera del kit	\$5
% entregas CD 1	83%
% entregas CD 2	98%

Finalmente, se reflejan los diferentes costos generados en cada una de las 9 mejores instancias obteniendo un costo de \$55'476.220 como el mejor resultado, donde se observa que la población inicial es de doce (12) y está clasificada como población inicial grande. La población inicial y el tiempo computacional se comportan de forma directamente proporcional, así como se menciona en el orden de complejidad. Para este resultado el tiempo computacional es igual a cuatro (4) horas con treinta y nueve (39) minutos y un (1) segundo.

Figura 37.*Cromosoma resultado de la experimentación 1.*

El mejor cromosoma es el número, 6
 [0. 1. 0. 1. 0. 24. 0. 23. 41. 39. 6. 9. 46. 3. 25. 14. 17. 31.
 40. 33. 44. 36. 38. 47. 28. 15. 8. 26. 16. 30. 27. 7. 37. 19. 11. 4.
 20. 32. 42. 12. 5. 10. 22. 45. 1. 2. 13. 18. 21. 23. 24. 29. 34. 35.
 12. 4. 5. 5. 8. 0. 8. 12. 12. 2. 1. 0. 0. 1. 0. 2. 7. 0.
 4. 1. 0. 6. 2. 5. 1. 3. 1. 16. 5. 11. 0. 2. 13. 3. 1. 4.
 0. 3. 5. 4. 0. 4. 10. 9. 2. 1. 0. 1.]
 Con un costo de 55476220.0

La experimentación 1 selecciona el cromosoma numero 6 como el mejor (Ver Figura 37), y considera que se abren los centros de distribución 2 y 4, y que a cada uno se le asignan 24 y 23 albergues, respectivamente. En el último gen, los alelos que tienen valor de cero, corresponden a los albergues que no recibieron recursos del centro de distribución. Por lo que se concluye que el centro de distribución 2 sirve a 18 albergues de los 24 asignados (83% entregado), y el centro de distribución 4 asiste a 19 albergues de los 23 (98% entregado).

7. Conclusiones

Según la revisión de literatura, son pocos los trabajos de investigación que han abordado el problema de ubicación de puntos de distribución y gestión de inventarios con demanda estocástica, teniendo en cuenta los costos de privación que se generan en la logística post desastre; por lo cual este proyecto puede considerarse como punto de referencia para futuras investigaciones.

El algoritmo desarrollado en la presente investigación genera resultados en tiempos computacionales cortos.

De acuerdo con los resultados obtenidos de la experimentación para el algoritmo híbrido propuesto, se determina que los factores estudiados son representativos a medida que la población inicial aumenta, esto no significa que a menor población inicial los resultados no sean óptimos,

demuestra que entre mayor sea la población inicial la hibridación de los algoritmos realizan un trabajo en un espacio completo para así hallar un mejor optimo global.

Para poder realizar lo anterior, el algoritmo genético permite generar una población inicial en números pares, dicha población es mejorada inmediatamente por medio de la interacción con el algoritmo VNS, la fase de búsqueda de vecindario por medio del óptimo local tiene como objetivo mejorar la solución generada por medio del proceso de sacudida, la fase de evaluación de la solución hace la comparación con la solución actual y de ser mejor, es remplazada mejorando así la solución inicial, el operador de selección del algoritmo genético permite obtener unos mejores resultados con el fin que dicha población presente un menor costo, de igual manera con el operador de cruce y mutación alterando los costos obtenidos, el cual se realiza en 18 diferentes escenarios, seleccionando los 9 mejores y realizando las diferentes experimentaciones con el fin de verificar dichos resultados con los parámetros planteados.

Con base en el algoritmo híbrido propuesto, se identifican una serie de etapas clave en el desarrollo de metaheurísticas que involucran algoritmos genéticos. Aunque los parámetros que comprenden los operadores genéticos son significativos para lograr soluciones óptimas, el diseño del cromosoma, referente a la codificación, es la etapa crítica de esta metaheurística, ya que, si este es ideal, el desempeño de los operadores es mejorado.

El tiempo computacional que representa en cada uno de los escenarios experimentados resulta ser significativo. Si se busca priorizar el tiempo computacional, el algoritmo debe ejecutarse en condiciones de nivel bajo de lo contrario para muy altos niveles el tiempo computacional podría superar días o semanas en ejecución. Hay una clara relación entre la efectividad y el recurso computacional, el algoritmo brinda mejores resultados en tiempos computacionales elevados.

Es posible que los datos presentados en esta investigación puedan generar mejores resultados a un precio computacional muy alto, pero no es lo aconsejable para presentar soluciones rápidas y efectivas.

8. Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación, se plantea para futuros estudios afines lo siguiente:

Se recomienda para el desarrollo de algoritmos genéticos variar la metodología para la generación de la población inicial, la aleatoriedad en la población inicial podría dar mejores resultados, escenarios aleatorios estarían más acertados o alejados a la realidad. Se debe considerar la complejidad del diseño del cromosoma a su vez la metodología aplicada ya que a partir de esto se dará solución al problema planteado.

Para lograr reducir los tiempos computacionales es necesario revisar cada estructura generada en la programación ya que cada una de esta cuenta con un alto valor para el algoritmo de igual forma lograr hacerlo simple con los mismos parámetros y objetivo igual de completo facilita el desarrollo de la hibridación y a su vez la obtención de resultados minimizando así el costo computacional. Se recomienda ajustar el algoritmo final para que su desempeño y toma de resultados sean mucho más cómodos.

Referencias bibliográficas

- Aguiar Pulido, V. (2014). *Resolución de problemas de optimización combinatoria utilizando técnicas de computación evolutiva. Una aplicación a la biomedicina*. TESIS DOCTORAL.
- Angarita, A. G. (2018). *Un modelo para la localización de depósitos centrales y ruteo de vehículos de dos escalones aplicado a la distribución de recursos humanitarios durante las fases de pre y pos-desastre (2E-LRP)*. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Obtenido de <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/10610/1/173637.pdf>
- Barrera Navarro, A. R., & Hernandez Gomez, A. P. (2016). *Un algoritmo evolutivo para el problema de distribucion de recursos post desastres sismicos en la ciudad de bucaramanga*. Bucaramanga .
- Barreto, M., & Niño, P. N. (2016). *Un algoritmo memético para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga*. Tesis De Pregrado, Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga.
- Birge, j., & Louveaux, F. (2011). *Introduccion a la programacion estocastica*. Springer.
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*.
- Broto, A. (24 de Enero de 2019). *La ONU destaca la baja mortalidad por desastres en 2018 pero alerta sobre El Niño*. Obtenido de <https://www.efe.com/efe/espana/sociedad/la-onu-destaca-baja-mortalidad-por-desastres-en-2018-pero-alerta-sobre-el-nino/10004-3876923>
- Cachay, O., Raffo, E., & Acevedo, A. (2012). El empleo de modelos metaheurísticos en la logística industrial. El caso del enrutamiento de vehículos. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 73.
- Campos, A., Holm-Nielsen, N., Díaz, C., Rubiano, D., Costa, C., Ramirez, F., & Dickson, E. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia Un aporte para la construcción de políticas públicas*. Obtenido de <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>
- Capacci, A., & Mangano, S. (2015). Las catastrofes naturales. *Cuadernos de geografia*, 40.

- Ceballos, P. (2015). *Aproximación al Estado de Investigación en Logística Humanitaria: Un enfoque Bibliométrico*. Tesis Maestria, Universidad Nacional De Colombia, Caldas, Manizales. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/52171/1/1053800788.2015.pdf>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2019). *Publications*. Obtenido de <https://www.cred.be/publications>
- Cornejo, C., Vargas, J., Aragón, L., & Serpa, V. (2013). Localización de almacenes y distribución de ayuda humanitaria para atención de damnificados en caso de desastre natural. *LACCEI*.
- Cotes , N., & Cantillo, V. (2019). Including deprivation costs in facility location models for humanitarian relief logistics. *ELSEVIER*.
- Cunquero, R. M. (2000). *Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria*.
- EFE Verde. (24 de Enero de 2019). *Los desastres naturales en 2018 causaron más de 10.000 muertos, según la ONU*. Obtenido de <https://www.efeverde.com/noticias/desastres-naturales-muertos-onu/>
- Garey, M., & Johnson, D. (1979). *Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness*. Philadelphia: W.H.Freeman & Co Ltd.
- González, M. I., & Chiroles, S. (2010). Seguridad del agua en situaciones de emergencia y desastres. Peligros microbiológicos y su evaluación. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*.
- Goyes, J. (2016). *Logística humanitaria: seguridad agroalimentaria*. Universidad Del Rosario, Bogotá D.C. Obtenido de <https://repository.urosario.edu.co/bitstream/handle/10336/12334/GoyesLesmes-JessicaAndrea-2016.pdf?sequence=8>
- Health Library for Disaster. (2001). *Biblioteca Virtual de la Salud y Desastres*. Obtenido de <http://helid.digicollection.org/es/>
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introduccion a la investigacion de operaciones*. Mexico D.F: McGraw-Hill.
- Huang, C.-Y., Lai, C.-Y., & Cheng, K.-T. (2009). Fundamentals of algorithms - Branch-and-Bound Algorithm Design. 173-234. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374364-0.50011-4>

- International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. (2019). *Que es un desastre*.
Obtenido de <https://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/sobre-desastres/que-es-un-desastre/>
- Ley 1523. (24 de abril de 2012). *Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1523_2012.html
- Logistec. (17 de Febrero de 2015). *Logística humanitaria. del concepto a la práctica en el plano internacional*. Obtenido de <https://www.revistalogistec.com/index.php/logistica/global/item/453-logistica-humanitaria-del-concepto-a-la-practica-en-el-plano-internacional>
- López, J. C., & Cárdenas, D. M. (2017). Gestión de la logística humanitaria en las etapas previas al desastre: revisión sistemática de la literatura. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*.
- Loree, N., & Aros-Vera, F. (2018). Points of distribution location and inventory management model for Post-Disaster Humanitarian Logistics. *ELSEVIER*.
- Maldonado Rondon, E., & Chio Cho, G. (2005). *Vulnerabilidad sismica en centros urbanos*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia. (2021). *Gestión del Riesgo de Desastres*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-del-riesgo-de-desastres#anexos>
- Ministerio de Educación Nacional. (2006). *Normas Técnicas Colombianas NTC 4595 y NTC 4596*. Obtenido de https://www.mineduccion.gov.co/1621/articles-96894_Archivo_pdf.pdf
- Ni, W., Shu, J., & Song, M. (2017). Ubicación y preposicionamiento de inventario de emergencia para operaciones de respuesta a desastres: modelo robusto Min-Max y un estudio de caso del terremoto de Yushu. *Production and Operations Management* , 5-6.
- Oficina de Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios. (4 de Abril de 2018). *COLOMBIA Desastres Naturales 2017 A 4 de abril de 2018*. Obtenido de https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/20180420_snapshot_desastres_naturales_2017_-_v2.pdf
- Perez , J., & Gardey, A. (2008). *Definicion modelo matematico*. Obtenido de <https://definicion.de/modelo-matematico/>

- Perez, N., & Holguín, J. (2015). Inventory-Allocation Distribution Models for Postdisaster Humanitarian Logistics with Explicit Consideration of Deprivation Costs. *Transportation science*, 2-5.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, PNUD Chile. (2012). *Conceptos Generales sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Contexto del País*. Obtenido de https://www.preventionweb.net/files/38050_38050conceptosbsicos.pdf
- Quiroga, J. A. (2019). *Análisis de la relación entre la política de gestión de inventario y el tiempo de respuesta del sistema logístico humanitario cooperativo colombiano, mediante gestión de proyectos y dinámica de sistemas*. Tesis de maestría, universidad de la sabana.
- Reyes, L. (2015). *Localizacion de instalaciones y ruteo de personal especializado en logistica humanitaria post-desastre - caso inundaciones*. Universidad de la Sabana, Bogota D.C.
- Sánchez, M. (2000). Optimización combinatoria. *Revista didáctica de las matemáticas*.
- Santana, A. (2015). *Estado del arte de los modelos de optimizacion en la logistica de atencion a desastres*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Statista Research Department. (18 de Septiembre de 2019). *Los desastres naturales en el mundo - Datos estadísticos*. Obtenido de <https://es.statista.com/temas/3597/desastres-naturales/>
- Van Wassenhove, L. (2006). Logística de ayuda humanitaria: gestión de la cadena de suministro en marcha. *Journal of the Operational Research Society*.
- Vélez, M., & Montoya, J. A. (2007). Metaheurísticos: una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones. *Revista EIA*.
- Vidal, A. (2013). *Algoritmos heurísticos en optimización*. Tesis de Maestría, Universidad de Santiago de Compostela.
- Yepes, V. (2012). *¿Qué es un modelo matemático de optimización?* Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2012/09/19/modelo-matematico-optimizacion/>