

Evaluación de funciones objetivo para un modelo multiobjetivo de un problema de localización de albergues temporales y asignación de afectados durante un sismo en la ciudad de Bucaramanga

Laritza Daniela Velásquez Grazt, Melissa Andrea Zabala Solano

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Industrial

Director

Daniel Orlando Martínez Quezada

Magister en Ingeniería Industrial

Codirector

Henry Lamos Díaz

PhD en Física - Matemáticas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2019

AGRADECIMIENTOS

Primero agradecer a Dios por permitirnos vivir todo el maravilloso proceso de este proyecto que estuvo acompañado de varias lecciones y aprendizajes que tendremos atesorados.

Gracias al profesor Daniel Martínez, Director de este trabajo de grado, por compartirnos sus conocimientos, consejos y enseñanzas.

Gracias al profesor Henry Lamos por apoyarnos durante el desarrollo del proyecto con sus consejos y experiencia.

Gracias al grupo de investigación OPALO, por acogernos durante este proceso y brindarnos las herramientas necesarias para culminar con éxito este trabajo.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander por todo nuestro recorrido como ingenieras industriales en formación, porque nos formó como profesionales y como personas.

Finalmente, agradecemos a los profesores que compartieron este camino con nosotras y nos compartieron valiosos conocimientos y su experiencia con esmero y dedicación.

A todos ellos muchas gracias.

DEDICATORIA

A Dios por permitirme culminar esta maravillosa etapa, siendo mi guía y brindándome sabiduría y paciencia.

A mis padres por cada una de las acciones que realizaban siempre en pro de que tuviera un mejor futuro, por acompañarme y apoyarme incondicionalmente y por todas las enseñanzas y consejos que hoy me convierten en la persona que soy.

A mi hermana por su apoyo en cada nuevo reto que aparecía en el camino y por escuchar cada preocupación brindándome un buen consejo.

A mi compañera Melissa por darme la oportunidad de compartir este camino juntas con todas sus dificultades y alegrías.

Laritza Daniela Velásquez Grazt

A Dios por ser mi guía en todo momento y no dejarme desistir en medio del camino.

A mis padres quiénes han sido ejemplo de dedicación y entrega en todo este tiempo, a quiénes les debo todo y son mi motivación.

A mis princesas (Ma' Ofelia, tiuchis, nani y cami) que siempre han estado para mi y me han demostrado que con amor y confianza en Dios todo es posible.

A los mejores amigos (A.J.A.B) que dejó mi paso por la gloriosa Universidad Industrial de Santander.

A mi compañera Daniela porque gracias a su apoyo y dedicación conseguimos este anhelado logro a pesar de las dificultades.

Melissa Andrea Zabala Solano

Tabla de Contenido

Introducción	17
1. Generalidades del proyecto	22
1.1 Planteamiento del problema.....	22
1.2 Justificación del proyecto	24
1.3 Objetivos	27
1.3.1 Objetivo general.....	27
1.3.2 Objetivos específicos	27
2. Revisión literaria.....	28
3. Marco teórico	32
3.1 Logística humanitaria.....	32
3.2 Asignación y distribución de albergues	33
3.3 Gestión de desastres.....	34
3.3.1 Definición de desastre.....	34
3.3.2 Principales efectos de los desastres.....	35
3.3.3 Gestión de desastres.....	36
3.4 Definición de albergue.....	38
3.4.1 Tiempo de duración de un albergue temporal.....	40
3.4.2 Consideraciones para la ubicación de albergues.....	41
3.5 Problemas de optimización multiobjetivo	42

3.5.1 Frente de Pareto	44
3.5.2 Solución de problemas de optimización multiobjetivo.....	46
3.5.2.1 Método épsilon restricción.....	47
3.6 Problemas de localización.....	50
3.6.1 Localización.....	50
3.6.2 Instalación	51
3.6.3 Clientes	51
4. Caso de estudio	51
4.1 Datos iniciales para la generación de las soluciones	52
4.1.1 Ubicaciones potenciales y estimación de la capacidad para los albergues.....	52
4.1.2 Clasificación de las manzanas según su nivel de vulnerabilidad.....	55
4.1.3 Generación del escenario	57
5. Definición del modelo de programación multiobjetivo	59
5.1 Objetivos del modelo	59
5.2 Formulación matemática del modelo base.....	59
5.3 Primera variación de las funciones objetivo	61
5.4 Segunda variación de las funciones objetivo	61
6. Resultados computacionales	62
6.1 Análisis de los óptimos de Pareto	64
6.2 Análisis de la cantidad de albergues habilitados.....	68

6.3 Análisis de los resultados del objetivo de minimización de la distancia	73
6.4 Análisis de los resultados del objetivo de minimización de la vulnerabilidad	76
7. Conclusiones	79
8. Recomendaciones	81
Referencias Bibliográficas	82

Lista de Tablas

Tabla 1 Cumplimiento de objetivos específicos del proyecto	21
Tabla 2. Eventos catastróficos más representativos ocurridos en Colombia por actividad sísmica	24
Tabla 3. Revisión de la literatura	32
Tabla 4. Ubicaciones candidatas para la localización de albergues.....	52
Tabla 5. Características para cada nivel de vulnerabilidad de los albergues candidatos	56
Tabla 6. Cantidad de manzanas por nivel de vulnerabilidad	57
Tabla 7. Funciones objetivo utilizadas para cada variación	62
Tabla 8. Promedio de albergues habilitados por variación	73

Lista de Figuras

Figura 1. Etapas de la gestión de desastres. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies	37
Figura 2. Tipología de los albergues temporales. Sociedad Nacional de la Cruz Roja Colombiana.	39
Figura 3. Representación del espacio solución y espacio objetivo en optimización multiobjetivo.	43
Figura 4. Frente de Pareto de un problema de minimización.	45
Figura 5. Representación gráfica del método ϵ -constraint.....	48
Figura 6. Pseudocódigo del método epsilon-constraint.	50
Figura 7. Ubicaciones candidatas para la localización de albergues	55
Figura 8. Clasificación de la población según nivel de vulnerabilidad..	56
Figura 9. Ejemplo de la caracterización de la zona poblada 89110 de Bucaramanga.	57
Figura 10. Ejemplo de la caracterización del escenario generado para la zona poblada 89110 de Bucaramanga.....	58
Figura 11. Diagrama de flujo de la implementación metodología ϵ -restricciones en el modelo.....	58
Figura 14. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 1.	65
Figura 15. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 2.	66
Figura 16. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 3.	66
Figura 17. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 4.	67
Figura 18. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 5.	67
Figura 19. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 6.	68

Figura 21. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 1.....	69
Figura 22. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 2.....	70
Figura 23. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 3.....	70
Figura 24. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 4.....	71
Figura 25. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 5.....	71
Figura 26. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 6.....	72
Figura 27. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados de distancia recorrida por variación...	74
Figura 28. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para el modelo base..	76
Figura 29. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 1. ...	76
Figura 31. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 3. ...	77
Figura 32. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 4. ...	77
Figura 33. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 5. ...	78
Figura 34. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 6. ...	78

Lista de Apéndices

**(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la
Biblioteca UIS)**

Apéndice A. Artículo académico.....	21
Apéndice B. Resultados computacionales.....	62
Apéndice C. Código en Python.....	63

Resumen

Título: Evaluación de funciones objetivo para un modelo multiobjetivo de un problema de localización de albergues temporales y asignación de afectados durante un sismo en la ciudad de Bucaramanga.*

Autores: VELÁSQUEZ GRAZT, Laritza Daniela, ZABALA SOLANO, Melissa Andrea.**

Palabras clave: Logística humanitaria, gestión de desastres, modelos de optimización, localización, asignación, optimización multiobjetivo, método épsilon-constraint.

Descripción:

Entre las decisiones importantes que se deben tomar tras la ocurrencia de un desastre, se encuentran la localización de albergues temporales y la asignación de afectados, actividades que hacen parte de la etapa de preparación en la gestión de desastres; lo anterior con el fin de fortalecer los planes de emergencia basados en la mitigación de los daños ante la ocurrencia de un evento catastrófico, garantizando la estabilidad y seguridad de la comunidad. Para la investigación actual, se realiza una evaluación de diferentes funciones objetivo apropiadas para el contexto de la gestión de desastres, las cuales se incorporan en un modelo multiobjetivo para la localización de albergues temporales y asignación de afectados en caso de ocurrencia de un sismo en la ciudad de Bucaramanga. Los objetivos contemplados para el modelo son la minimización de la distancia que recorren los afectados hasta el albergue asignado y la minimización del nivel de vulnerabilidad de los albergues habilitados. A su vez, se propone la utilización del método épsilon-constraint como estrategia para la generación del frente de Pareto, este método permite convertir un modelo multi-objetivo en mono-objetivo manteniendo fija una de las funciones objetivo y determinando las demás como restricciones, al final se obtendrán las soluciones óptimas del frente de Pareto.

Finalmente, los resultados son comparados a nivel de su desempeño y se logra identificar que grupo de funciones objetivo arrojan los mejores resultados para el escenario planteado.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Daniel Orlando Martínez Quezada, Magister en Ingeniería Industrial.

Abstract

Title: Evaluation of the objective functions for a multi-objective model of a problem location of temporary affairs and assigning people during an earthquake in the city of Bucaramanga.*

Authors: VELÁSQUEZ GRAZT, Laritza Daniela, ZABALA SOLANO, Melissa Andrea.**

Keywords: Humanitarian logistics, management of disasters, models of optimization, localization, mapping, multiobjective optimization, epsilon-constraint method.

Description:

Among the important decisions that must be made through the occurrence of a disaster is the temporary shelters's location and the affected's allocation, this activity has part of preparation stage of the management of disasters; whose purpose is strengthen emergency plans based on the mitigation of damages and guarantee stability and security of the community. For the current research, a performance evaluation of different objective functions disaster management appropriate for the context is carried out, these objective functions are incorporated into a multi-objective model for temporary shelters's location and the affected's allocation in case of occurrence of a catastrophic event during an earthquake in Bucaramanga city. The objectives contemplated for the model are the minimization of the distance traveled by those affected to the assigned shelter and the minimization of vulnerability level for the shelters enabled. At the same time, the use of the epsilon-constraint method is proposed as a strategy for generating the Pareto front, this method allows converting a multi-objective model into a mono-objective keeping one of the objective functions fixed and determining the others as constraints, and then the optimal Pareto front solutions will be obtained.

Finally, the results are compared at a performance level and a group of functions with the best results for the proposed scenario is identified.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Daniel Orlando Martínez Quezada, Magister en Ingeniería Industrial.

Introducción

Los sismos suelen ser eventos altamente catastróficos por ser imprevisibles, lo que genera una constante incertidumbre en aquellas poblaciones donde la actividad sísmica es alta. Colombia y en general todos los países de Sur América y el mundo que limitan con el Océano Pacífico, al estar ubicados en el Cinturón de fuego del Pacífico son considerados regiones con un alto riesgo sísmico.

El Servicio Geológico Colombiano ha catalogado 4 lugares en el país como zonas de alto riesgo, las cuales están localizadas en Nariño, Chocó, Caldas y Santander, en este último departamento se ubica el municipio de Los Santos, considerado como el segundo nido sísmico del mundo, después de la región del Hindu kush, Afganistán. Vargas (2015), presidente de la Sociedad Colombiana de Geología y profesor del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional, refiere que la región de Los Santos registra hasta 40 movimientos telúricos diarios, aunque en magnitudes muy pequeñas. En cercanías a este municipio se encuentra la ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander, la cual por su ubicación se ve directamente afectada por los constantes movimientos de tierra lo que la hace propensa a la ocurrencia de eventos catastróficos.

El impacto que logre ocasionar un desastre natural no se encuentra asociado únicamente a la alta posibilidad de que los fenómenos naturales que se presenten sean intensos, sino también está asociado a las condiciones de vulnerabilidad de las edificaciones, que, en caso de ser alta, está directamente relacionada con las pérdidas, tanto humanas como materiales, producto de un sismo. Siendo así, la vulnerabilidad está estrechamente ligada a la falta de resiliencia de una población ante una catástrofe natural. De lo anterior, surge la importancia de fortalecer el desarrollo de planes departamentales que contribuyan a mitigar este riesgo.

La gestión de desastres es vital en casos de emergencias, la Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos, FEMA por sus siglas en inglés, define la gestión de desastres como el conjunto de procesos diseñados para ser implementados durante las diferentes etapas de los desastres, estos son: mitigación, preparación, respuesta y recuperación, los cuales permiten prevenir o reducir sus efectos.

La primera y segunda fase son calificadas como las más importantes, sin embargo, son las que menor cantidad de estudios y desarrollos presentan. La falta de recursos, planificación, prevención, capacitación y sumado a ello la falta de un sistema de alerta podría ocasionar que un desastre sea mucho más catastrófico.

En la tercera fase se ejecutan las actividades de respuesta durante el evento catastrófico, o en su defecto, inmediatamente ocurrido el evento. Dentro de las actividades de respuesta se encuentran la evacuación de la población, asistencia, búsqueda y rescate.

Finalmente, en la fase de recuperación se propende por reparar el sistema de producción con miras a reavivar la economía y conseguir nuevamente el nivel de desarrollo previo al desastre.

Como parte esencial en la fase de preparación se encuentra la asignación de albergues temporales, los cuales harán las veces de refugios para los sobrevivientes del desastre natural, lo anterior enfocado a reducir los impactos negativos a las comunidades afectadas. El contar con una planificación adecuada de la ubicación y asignación de los albergues es un factor clave, Zhao *et al.* (2017) refiere que de este modo se podría reducir efectivamente el tiempo de evacuación, mejorando en la misma medida su eficiencia.

La logística humanitaria es el área de estudio que se encarga de estimar, proveer, almacenar, transportar y distribuir el personal y los servicios que son necesarios en las zonas afectadas por algún tipo de desastre; actualmente se ha demostrado bastante interés por parte de los investigadores, dado que en los últimos años han ocurrido desastres naturales que han ocasionado efectos devastadores en varios países del mundo, logrando pérdidas tanto humanas como materiales. A pesar de lo anterior, la fase de preparación o previa al desastre continúa siendo poco estudiada, por ello, se evidencia la necesidad de aumentar el análisis y los estudios enfocados en esta fase; Cárdenas y López (2017) sugieren que esta fase tiene como propósito reducir los efectos potenciales antes de que ocurra el desastre. Estos problemas pueden ser estudiados y generar soluciones eficientes a través de la investigación de operaciones.

La investigación de operaciones utiliza el método científico a través de modelos matemáticos para representar una situación real, luego aplica técnicas matemáticas para dar solución a estos modelos y generar soluciones a problemas que afectan a la humanidad. Basados en el método anterior, se abarca la problemática que presenta actualmente la ciudad de Bucaramanga, al ser catalogada como de alto nivel sísmico, y por este motivo, estar expuesta a la ocurrencia de un desastre natural de gran magnitud, teniendo como enfoque la ubicación de albergues y asignación de personas afectadas.

Martínez (2017) propone un modelo de localización y asignación multiobjetivo para un problema de localización de albergues temporales y asignación de afectados en su tesis de maestría, el cual es tomado como base para esta investigación. Considera dos objetivos, la minimización de la distancia recorrida total de los afectados y la minimización de la vulnerabilidad acumulada de los albergues habilitados. Este modelo permite soluciones con niveles extremos (niveles mínimos y máximos) para sus dos objetivos lo que se considera que no es apropiado para

aplicaciones reales. Con el fin de identificar que funciones son más apropiadas en el contexto de la gestión de desastres se proponen diferentes funciones de distancia y vulnerabilidad para ser evaluadas en este modelo.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 1 se encuentra la definición del proyecto y se mencionan los objetivos, en la sección 2 la revisión literaria, la sección 3 contiene el marco teórico, en la sección 4 se encuentra la descripción general del caso de estudio, en la sección 5 la definición del modelo matemático y de las funciones objetivo y en la sección 6 se presentan los resultados obtenidos y el análisis de éstos.

En la tabla 1 se presentan los objetivos específicos asociados al presente proyecto junto con los numerales asociados del documento.

Tabla 1

Cumplimiento de objetivos específicos del proyecto.

Cumplimiento de objetivos	
Objetivo específico	Numerales asociados
Revisar la literatura relacionada con funciones objetivo, utilizadas en los problemas de localización de albergues temporales en el caso de un evento catastrófico.	Capítulo 2
Construir un modelo de programación multiobjetivo que permita la minimización de la distancia y la vulnerabilidad para la selección de albergues que serían asignados a los afectados en caso de la ocurrencia de desastres durante un sismo.	Capítulo 5
Comparar el desempeño de las funciones objetivo del modelo resultante para las diferentes métricas de distancia y la vulnerabilidad utilizando el lenguaje de programación Python.	Capítulo 6
Analizar los resultados dados por las funciones objetivo del modelo resultante a partir de las diferentes métricas.	Capítulo 6
Elaborar un artículo académico de carácter publicable basado en los resultados de la investigación.	Apéndice A

1. Generalidades del proyecto

1.1 Planteamiento del problema

Según el Servicio Geológico de Colombia (2018), Bucaramanga, capital del departamento de Santander, ha sido catalogada como una zona de alta actividad sísmica, a pesar de no tener registros oficiales de terremotos o sismos con víctimas fatales hasta el momento. Para la ciudad existen dos fuentes de amenaza sísmica, la primera es el nido sísmico de Los Santos, ubicado a unos 35 Km al sur, en el área de la Mesa de los Santos a una profundidad de 160 Km, uno de los más activos del mundo debido a que chocan la placa tectónica de Nazca, la placa Continental de Suramérica y la placa del Caribe; la segunda fuente es la presencia de fallas geológicas cercanas como la del Suárez, Surata y Santa Marta-Bucaramanga.

Sumado a lo anterior, la ciudad podría enfrentar consecuencias devastadoras si ocurriera algún desastre natural de gran magnitud, ya que, a pesar de ser una de las pioneras en la aplicación de la norma sismorresistente en las edificaciones, existen muchos barrios con viviendas de más de 20 años de construidas que poseen un alto riesgo de vulnerabilidad si llega a ocurrir un terremoto, agregado a esto cuenta con zonas de remoción de masa que fueron construidas antes del Código Colombiano de Construcción.

Los desastres naturales cada vez se presentan con mayor frecuencia y a mayor escala, teniendo en cuenta la situación descrita anteriormente, se hace necesario gestionar adecuadamente el riesgo en su etapa de planificación en la ciudad de Bucaramanga, logrando así la disminución de los daños físicos y el impacto social. La localización de albergues o espacios que sirvan como refugio

para las personas afectadas durante la ocurrencia de estos eventos es un pilar fundamental para apoyar la toma de decisiones en el área de logística humanitaria dentro de esta planificación.

Martínez (2017) en su tesis de maestría propone un modelo de localización y asignación multiobjetivo para un problema de localización de albergues temporales y asignación de afectados, este modelo considera la minimización de la distancia recorrida total de los afectados y la vulnerabilidad acumulada de los albergues habilitados. El modelo actual permite soluciones con niveles de vulnerabilidad extremos (niveles mínimos y máximos), con ello se minimiza la sumatoria total de cada objetivo, pero no es apropiado para aplicaciones reales. Es por esto, que en este trabajo se propone estudiar diferentes funciones de distancia y vulnerabilidad que serán evaluadas en este modelo, y así identificar funciones objetivo más apropiadas para el contexto de la gestión de desastres.

La localización de albergues es un tema difícil de abordar, ya que se deben tener en cuenta varios criterios que no se traducen directamente en costos, por tal motivo, se selecciona la optimización multiobjetivo para abordar varios criterios al tiempo. Existen varias metodologías de solución para problemas de optimización multiobjetivo, la correcta elección de alguna de estas alternativas depende de varios factores, como nivel de exactitud, la complejidad del problema, el tiempo disponible para el desarrollo y los parámetros asignados. Para el desarrollo de este proyecto, se propone la utilización de la metodología ϵ -restricciones.

En cuanto a los criterios de evaluación para la selección de una solución, teniendo en cuenta que el resultado de un modelo multiobjetivo no arroja una única solución, sino un conjunto de soluciones no dominadas, se analizaron las métricas desarrolladas para la evaluación de la calidad de la aproximación del Frente de Pareto y se concluyó utilizar la métrica S que mide la calidad de

una aproximación del Frente de Pareto con el tamaño del espacio dominado por dicha aproximación, entre más grande sea el espacio dominado mejor es la aproximación.

1.2 Justificación del proyecto

En la actualidad el 44% del territorio colombiano se encuentra expuesto a amenaza sísmica alta e intermedia, principalmente en las regiones Pacífica y Andina, lo cual significa que 960 municipios, entre ellos los de mayor población, están expuestos a este tipo de desastres naturales. A nivel municipal, Cali representa la población con mayor exposición a amenazas sísmicas, seguido de otras capitales como Cúcuta, Bucaramanga, Pereira, Villavicencio, Pasto y Manizales (Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial Región de América Latina y el Caribe, 2012).

En tabla 2 se presentan los eventos catastróficos más representativos del país organizados por orden cronológico.

Tabla 2.
Eventos catastróficos más representativos ocurridos en Colombia por actividad sísmica.

Ciudad	Fecha	Descripción
Tunjuelo (Bogotá)	16 de marzo de 1644	Uno de los primeros sismos de los archivos históricos del país que generó grandes pérdidas humanas y económicas, pero que, por su fecha, no se tiene información precisa sobre los daños causados.
Cúcuta o Terremoto de los Andes	18 de mayo de 1875	Con epicentro en la ciudad de Cúcuta, se vio afectada también la población del estado venezolano de Táchira.

Tabla 2
Continuación

Ciudad	Fecha	Descripción
Tumaco (Nariño)	12 de diciembre de 1979	Con magnitud de 7,9 grados en la escala de Richter, seguido de olas de 5 y 6 metros, de grietas que cuartearon sus calles y de agua que a chorros brotaba del piso, destruyó mil viviendas. La tragedia ocasionó la muerte de más de 450 personas a lo largo de la costa pacífica entre Tumaco y Guapi (Cauca).
Popayán	31 de marzo de 1983	Con magnitud de 5.5 en la escala de Richter. El 70% de los edificios sufrieron desperfectos de mayor o menor cuantía. Dos mil quinientas viviendas (12% del total) fueron completamente destruidas y seis mil (34%) fueron severamente dañadas. El terremoto ocurrió cuando se estaban celebrando los oficios del Viernes Santo y la Catedral sufrió serios daños. Como consecuencia, el 25% de todas las muertes causadas por el terremoto ocurrieron allí.
Armenia (Quindío),	25 de enero de 1999	Con una intensidad de 6.4 grados en la Escala de Richter, es un desastre natural que afectó a 18 ciudades y 28 pueblos de los departamentos del eje cafetero, y en menor grado, las ciudades de Pereira y Manizales. Cerca del 60% de las estructuras existentes en Armenia colapsaron, debido a la gran cantidad de edificaciones antiguas, construidas sin requerimientos técnicos y la falta de planeación urbana y estudios de tierra. El terremoto, inicialmente, produjo la muerte de mil personas.

Nota: Adaptado de (Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA), 2018)

Los sismos suelen ser muy catastróficos por ser imprevisibles, lo cual genera una constante incertidumbre en las poblaciones donde se presenta mayor actividad sísmica. Según la Red Sismológica Nacional de Colombia (2018), la ciudad de Bucaramanga presenta una alta actividad sísmica, asociada a su ubicación, haciéndola propensa a la ocurrencia de eventos catastróficos. Por tal razón, se hace prioritario obtener herramientas actualizadas que alimenten el plan de emergencias para la ciudad, y con esto generar respuestas oportunas y eficaces ante estas catástrofes.

Las poblaciones que aún no cuentan con planes de contingencia ante eventos destructivos masivos presentan una tendencia a aumentar su vulnerabilidad, por lo que se vuelve vital la gestión de desastres, definida por la FEMA como el conjunto de procesos diseñados para ser implementados antes, durante y después de los desastres, que permiten prevenir o mitigar sus efectos.

Una de las fases de la gestión de desastres es la preparación, la cual comprende un ciclo continuo de planeación, organización, capacitación, equipamiento, ejercicios, evaluación y mejoramiento de actividades para asegurar una coordinación efectiva y el aumento de capacidades para prevenir, proteger, responder, recuperar y mitigar los desastres naturales. (Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos, 2011)

Dentro de la fase de preparación es esencial la planificación de la asignación de albergues temporales y el análisis de su nivel de vulnerabilidad; lo anterior, teniendo en cuenta que los albergues tienen como principal función el dar alojamiento y bienestar a las personas afectadas por un desastre garantizando su seguridad tanto física como emocional. Bucaramanga actualmente no cuenta con una definición concisa de estos lugares, por lo cual, se hace importante abordar el tema

desde un ámbito investigativo que logre gestionar una adecuada ubicación y asignación de los albergues para alimentar.

En consecuencia, el presente trabajo de investigación es importante y viable en el área de la Ingeniería Industrial, donde por medio de la investigación de operaciones se evaluarán diferentes funciones de distancia y vulnerabilidad en un modelo multiobjetivo de localización y asignación con el propósito de identificar que funciones objetivo son más apropiadas para el contexto de la gestión de desastres en Bucaramanga. Desde este punto de vista, el trabajo aportará elementos clave para la toma de decisiones enfocados en encontrar herramientas que contribuyan a mitigar los posibles daños físicos y emocionales como efectos de una catástrofe, garantizando así la seguridad y estabilidad de la comunidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar funciones objetivo de distancia y vulnerabilidad para un modelo multiobjetivo en un problema de localización de albergues temporales y asignación de afectados durante un sismo en la ciudad de Bucaramanga.

1.3.2 Objetivos específicos

- Revisar la literatura relacionada con funciones objetivo, utilizadas en los problemas de localización de albergues temporales en el caso de un evento catastrófico.

- Construir un modelo de programación multiobjetivo que permita la minimización de la distancia y la vulnerabilidad para la selección de albergues que serían asignados a los afectados en caso de la ocurrencia de desastres durante un sismo.
- Comparar el desempeño de las funciones objetivo del modelo resultante para las diferentes métricas de distancia y la vulnerabilidad utilizando el lenguaje de programación Python.
- Analizar los resultados dados por las funciones objetivo del modelo resultante a partir de las diferentes métricas.
- Elaborar un artículo académico de carácter publicable basado en los resultados de la investigación.

2. Revisión de la literatura

A continuación, se presenta un resumen en orden cronológico de los artículos consultados y estudiados, los cuales están enfocados en la gestión de desastres y la asignación de recursos, muchos de ellos utilizaron métodos que tienen gran relación con el presente proyecto.

Nolz, Doerner y Hartl (2010) presentan un modelo bi-objetivo en el cual se quiere minimizar los tiempos de viaje y la distancia entre los afectados por el desastre y los puntos de distribución de recursos, el modelo se soluciona por medio de un algoritmo evolutivo multiobjetivo que permite al tomador de decisiones encontrar soluciones de compromiso.

Mirzapour, Wong y Govindan (2013) consideraron un problema de ubicación de centros de socorro y la asignación de afectados a este a través de un modelo de programación no lineal entera mixta, lo que persigue el modelo es minimizar la distancia desde los centros de socorro a las

regiones que presentan demanda de afectados y con ello, disminuir el tiempo de evacuación en una situación donde se presente una inundación.

Barzinpour y Esmaeili (2014) desarrollaron un nuevo modelo de programación lineal multiobjetivo entero mixto para la fase de preparación en la gestión de desastres, especialmente para la asignación de personas afectadas a las instalaciones de gestión de emergencias establecidas, inspirado en un caso real de estudio de un distrito en Irán. El modelo es resuelto para una zonificación virtual y los resultados en este caso muestran que se pueden reducir los costos logísticos y aumentar la cobertura total simultáneamente, a su vez, se puede brindar colaboración a áreas vecinas para la mejora en la toma de decisiones.

Barzinpour, Saffarian, Makui y Teimoury (2014) formularon un modelo multiobjetivo para determinar simultáneamente la ubicación de los centros de distribución de productos de socorro y la asignación de las áreas afectadas a estos centros, para la solución del modelo matemático se basaron en un algoritmo genético, y se comparan estos resultados con los generados por el algoritmo de recocido simulado y el software LINGO y se concluye que los primeros resultados proporcionan soluciones eficientes.

Osorio, Brailsford y Smith (2014) abordaron el tema de la cadena de suministro de sangre, más específicamente, la selección de tecnología y la asignación de donantes. Para lo anterior, se propone un modelo de optimización bi-objetivo, donde se determinan variables de asignación de los donantes a los procesos de captación de sangre, a su vez, seleccionará de manera óptima los tipos de tecnología a utilizar. Las funciones objetivo a minimizar son los donantes requeridos para la atención de la demanda y el costo total de efectuar un proceso de captación determinado, logrando con esto seleccionar la mejor manera de llevar a cabo los procesos de captación teniendo

en cuenta la optimización de costos y la eficiencia en el uso del recurso donantes, el cual es bastante escaso. El modelo fue configurado en hojas de cálculo, resuelto a través de Open Solver 2.1 y VBA, la metodología de solución para optimización multi-objetivo utilizada en este caso fue épsilon-restricciones.

Shahparvari, Chhetri, Abareshi, Abbasi y Alahakoon (2015) abordaron principalmente tres desafíos clave que incluyen la evacuación oportuna, la asignación de refugio y el enrutamiento, en incendios forestales. El modelo matemático utilizado para la solución de los problemas anteriormente presentados se resuelve mediante la aplicación del enfoque épsilon constraint. Al utilizar un modelo multiobjetivo las funciones objetivo se optimizan simultáneamente para maximizar la cantidad total de evacuados y, a la vez, minimizar el número de vehículos de rescate y refugios asignados.

Sebatli, Cavdur y Kose-Kucuk (2017) presentaron un modelo de programación estocástica-número entero de dos etapas, con el que se da solución a un problema de distribución de suministros y asignación de instalaciones para almacenar los suministros minimizando la distancia total recorrida, la demanda insatisfecha y el número total de instalaciones utilizadas. Es importante tener en cuenta que la estructura de los programas estocásticos de dos etapas permite tomar algunas decisiones antes de la ocurrencia de un acontecimiento futuro (desastre, para este caso particular), partiendo de la premisa de los posibles resultados del evento mediante la utilización de algunos de los escenarios descriptivos para representar dichos resultados posibles ya que el futuro no se conoce con certeza.

Prabowo, Dwicahyani, Jauhari, Aisyati y Laksono (2017) desarrollaron modelos de logística humanitaria para optimizar las soluciones a un problema de ubicación de refugios, asignación y

evacuación de afectados por desastres ocasionados por erupción volcánica en el Monte Merapi, Indonesia. Construyeron un modelo matemático y propusieron varios procedimientos para la solución del problema planteado. El objetivo del modelo era minimizar los costos totales del sistema a implementar y determinar soluciones óptimas en los tres niveles de alerta (fase de alerta, fase de peligro y fase posterior del desastre). Se obtuvieron resultados que brindaban soluciones más efectivas a un costo menor, utilizando los refugios en su nivel de capacidad máximo.

Zhao *et al.* (2017) plantearon un modelo multi-objetivo de ubicación de refugios en caso de terremoto y asignación de afectados minimizando el tiempo total de evacuación y el área total de refugio; partiendo de la premisa de la importancia de la determinación de la ubicación de los refugios de emergencia y la asignación de la población afectada a dichos refugios en la gestión de emergencias.

En la tabla 3 se presentan varios trabajos de investigación relacionados con la localización y asignación de instalaciones como refugios en caso de desastres, ubicación de instalaciones para la distribución de recursos, tiempos de desplazamiento mínimo hasta los albergues, asignación de recursos, y algunos otros temas relacionados con la gestión humanitaria. Estos realizan aportes importantes a la toma de decisiones basados en el desarrollo de herramientas de simulación, métodos de lógica difusa, modelos de programación multiobjetivo, desarrollo de algoritmos para modelos de asignación, entre otros métodos que permiten obtener un panorama más claro para el caso específico de esta investigación.

Tabla 3.
Revisión de la literatura

Temas relacionados	Autores
Localización y asignación de instalaciones.	(Gama, Santos, & Scaparra, 2015); (Xiujuan, Wei, Ma, & Hu, 2015); (Pérez, Canales, Vergara, & Candia, 2016); (Cavdur, Kose-Kucuk, & Sebatli, 2016); (Khanduzi, Peyghami, & Sangaiah, 2017); (Xiujuan, Wei, Ma, Qin, Junlin, & Wang, 2017); (Prabowo, Dwicahyani, Jauhari, Aisyati, & Laksono, 2017); (Huiyong, Laijun, Huang, & Hu, 2017)
Ubicación de instalaciones para la distribución de recursos	(Barzinpour, & Esmaeili, 2013); (Barzinpour, Saffarian, & Maloui, 2014); (Espíndola, Albores, & Brewster, 2017); (Laijun, Huiyong, Sun, Huang, Hu, Wang, & Fei, 2017)
Asignación y distribución de recursos	(Xinhua, & Hu, 2014); (Zhaopin, Guofu, Liu, Yue, & Jianguo, 2016); (Khanduzi, Peyghami, & Sangaiah, 2017)
Asignación de labores de emergencia	(Altay, 2011); (Amiri, & Khorsi, 2015); (Hooshangi, & Alesheikh, 2017)
Redes de transporte	(Amiri, & Jabalameli, 2011); (He, & Peeta, 2014); (Moreno, Alem, & Ferreira, 2015)

Nota: Adaptado de (Web of Science, 2018).

3. Marco teórico

3.1 Logística humanitaria

Comúnmente la logística se usa para referirse al proceso de coordinación y movimiento de recursos, llámese recursos a las personas, materiales, inventario y/o equipos, de un lugar a otro.

La logística humanitaria conserva el mismo concepto de la logística, pero en este caso se asocia al producto con las donaciones hechas por otras personas y los clientes de estos productos son las

personas afectadas por un desastre natural. Holguín, Jaller, Van Wassenhove, Pérez y Wachtendorf (2012) afirman:

La logística humanitaria está definida desde dos extremos, el primero abarca esfuerzos logísticos humanitarios llevados a cabo en la recuperación de desastres a largo plazo y la asistencia humanitaria, donde la eficiencia operativa, similar a la logística comercial, es una consideración primordial, en el otro extremo se encuentran las operaciones logísticas humanitarias posteriores a un desastre involucradas en la respuesta a desastres y las actividades de recuperación a corto plazo que representan un entorno operacional muy diferente, a menudo en entornos caóticos donde las necesidades urgentes, las decisiones de vida o muerte y los escasos recursos son la norma (p.494).

La logística humanitaria se ha convertido en una línea de investigación basada en los conceptos de la logística, pero centrada en situaciones de desastres naturales, que se pueden utilizar tanto para una respuesta inmediata como para una medida de largo plazo. Pérez-Galarce, Canales, Vergara y Candia-Véjar (2016) definen logística humanitaria como:

El proceso de planificación, ejecución y control de la eficiente y rentable información de flujo y almacenamiento de bienes y materiales, así como la relacionada, desde el punto de origen al punto de consumo con el fin de aliviar el sufrimiento de las personas vulnerables (p.11).

3.2 Asignación y distribución de albergues

La determinación de la ubicación de los refugios de emergencia durante eventos catastróficos y la asignación de la población afectada es una cuestión decisiva que enfrenta la planificación de albergues en la gestión de desastres.

Es muy importante tener en cuenta las fases de un sistema de gestión de desastres (mitigación, preparación, respuesta y recuperación), de esta manera es posible definir un conjunto de condiciones de trabajo, operaciones, modelos y simulaciones que permitan realizar implementaciones de una forma coherente y eficiente de modo que ayuden en la toma de buenas decisiones en caso de desastre.

Zhao *et al.* (2017) proponen dar solución a un problema multiobjetivo en el que el objeto de estudio es el análisis de ubicación y asignación de albergues en caso de un terremoto y explorar las relaciones entre la población de evacuación, tiempo de evacuación, y el área total de la vivienda mediante la localidad de Jinzhan en el distrito de Chaoyang, Beijing, China, como un caso de estudio. El modelo busca minimizar el tiempo total ponderado de evacuación y el área total de refugio, considerando una serie de escenarios. En este estudio, se supone que todos los miembros de una comunidad se asignarán al mismo refugio usando la ruta más corta de la comunidad para el refugio seleccionado.

3.3 Gestión de desastres

3.3.1 Definición de desastre. El Decreto N° 919 de 1989 reglamentario de la Ley 46 de 1998 que creó el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres de Colombia, en su artículo 18 define “Desastre” como: “Daño Grave o alteración grave de las condiciones normales de vida en un área geográfica determinada, causada por fenómenos naturales y por efectos catastróficos de la acción del hombre en forma accidental, que requiera para ello de la especial atención de los organismos del estado y de otras entidades de carácter humanitario o de servicio social”.

3.3.2 Principales efectos de los desastres. Son de importante consideración los efectos de los desastres, teniendo en cuenta que resultan irreversibles en la mayoría de los casos, y más en países del tercer mundo que carecen de los recursos suficientes para sobreponerse a fenómenos de gran magnitud. El principal efecto está relacionado con la cantidad de pérdidas humanas a causa de un desastre natural y el número de muertes, el cual es directamente proporcional a la magnitud del desastre y la ubicación o zona de ocurrencia.

Zapata (2006) considera los siguientes impactos de los desastres teniendo en cuenta distintos ámbitos:

En el ámbito económico se tiene en cuenta la destrucción de capital y de infraestructura, ocasionando incurrir en mayores gastos y costos por las pérdidas ocasionadas. Más allá del impacto económico, se destaca el impacto social, ya que se crea la necesidad de restituir su capacidad de producción y obtener ingresos tras ocurrido el desastre.

La concentración de los efectos en zonas con un porcentaje elevado de población vulnerable por su condición (niveles de pobreza, bajo índice de desarrollo humano, hogares de jefatura femenina, presencia de población indígena y composición multiétnica del tejido social) hace evidente que más allá del monto económico de los daños y pérdidas, el efecto se resiente sobre todo en el ámbito social, con consecuencias difíciles de cuantificar en el tejido social.

En cuanto al impacto ambiental, se considera la fragilidad ambiental y la elevación del riesgo luego de la ocurrencia del evento catastrófico.

Zapata (2006) plantea que una forma de contrarrestar estos efectos es poner en práctica planes de ordenamiento territorial y asentamientos humanos, códigos de construcción y estándares de

seguridad para enfrentar múltiples riesgos de amenaza, los cuales al convertirse en desastres reducen el bienestar colectivo, y a su vez, obligan a reconstruir infraestructura, lo que requiere de grandes esfuerzos y de endeudamiento externo.

3.3.3 Gestión de desastres. La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia (2015) en el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres define el manejo de desastres como el proceso que se compone de la preparación para la respuesta a emergencias, la preparación para la recuperación pos-desastre, la ejecución de dicha respuesta y de la respectiva recuperación la cual comprende los procesos de rehabilitación y reconstrucción.

Haddow, Bullock y Coppola (2007) refieren que la gestión de desastres puede ser definida como la disciplina que intenta representar la manera de evitar y hacer frente a los riesgos. Un sistema de gestión de desastres es un ciclo que comprende cuatro etapas: mitigación, preparación, respuesta y recuperación. La mitigación consiste en la aplicación de medidas que evitan el desastre o que contribuyen a su disminución en caso de que ocurra.

La preparación permite a la población organizarse y prepararse para actuar de manera apropiada en caso de desastre, es decir, la planificación logística para las operaciones de ayuda, el establecimiento de planes de comunicación, la asignación de responsabilidades, la coordinación de las operaciones y la formación de personal de apoyo que será el responsable del desarrollo de todo lo antes planeado. La respuesta implica el uso de los recursos y procedimientos planteados para contrarrestar la emergencia de acuerdo con la previa planificación, intervención inmediata del personal de apoyo y la entrega de todos los equipos a las zonas de rescate. Finalmente, recuperación se hace referencia a las actividades que cubren los efectos a largo plazo, tales como la estabilización y restauración de la zona afectada.

La reducción del riesgo es el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes (mitigación del riesgo) y a evitar la configuración de nuevos riesgos en el territorio (prevención del riesgo). Las medidas de mitigación y prevención que se adopten con antelación tienen el propósito de disminuir 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.

En la figura 1 se muestra un esquema de las etapas de la gestión de desastres definidas por la *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies*, se puede concluir que estas etapas se dividen en dos momentos cruciales, antes de la ocurrencia del desastre y después de que este ocurra; en el primer momento existen dos etapas, la primera referente a la preparación para el desastre y la segunda a la mitigación de los efectos del mismo y en el segundo momento están definidas tres etapas la primera corresponde a la respuesta ante la ocurrencia del desastre, la segunda referente a la reducción de los riesgos después del desastre y la última la recuperación.

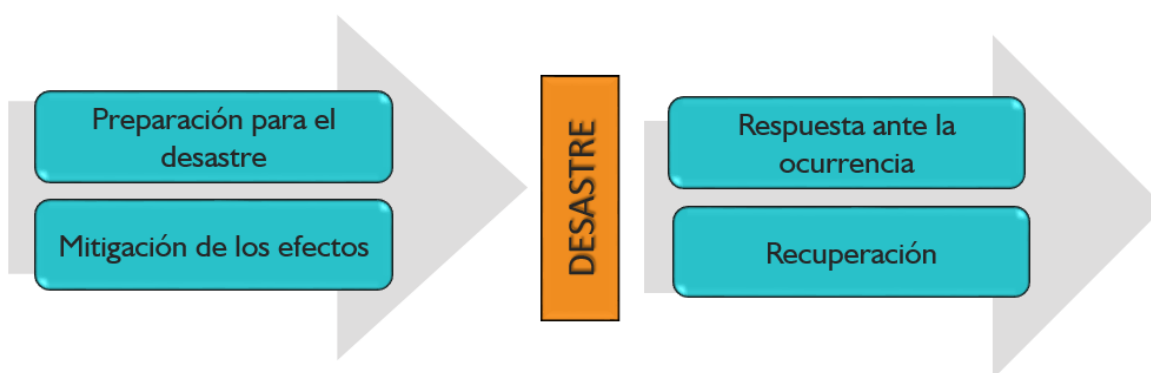


Figura 1. Etapas de la gestión de desastres. *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies*. Adaptado de <https://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/gestion-de-desastres/>

3.4 Definición de albergue

La Sociedad Nacional de la Cruz Roja Colombiana (2008) en el Manual Nacional para el Manejo de Albergues Temporales define la palabra albergue como:

Un lugar físico creado e identificado como una zona segura, que cuenta con todos los medios necesarios para hospedar por un periodo corto, mediano y largo a un grupo de personas afectadas por los resultados del impacto de una amenaza, garantizando la dignidad humana, conservando la unidad familiar y la estabilidad física, mental y psicológica de las personas afectadas (p.17).

La Sociedad Nacional de la Cruz Roja Colombiana (2008) refiere que un refugio de emergencia o albergue sirve para varias funciones vitales, como, la protección contra el desastre, el almacenamiento de objetos y la protección de la propiedad, la seguridad emocional y la privacidad.

A continuación, se presentan otras definiciones con el fin de aclarar este concepto.

- Refugio (Punto de encuentro): Espacio de paso, que proporciona techo, alimentación y abrigo a las víctimas de una emergencia o desastre, mientras la comunidad se traslada a un Alojamiento o Albergue Temporal. Son utilizados cuando no existe un plan de prevención previamente estipulado.
- Alojamiento temporal: Espacio provisional que brinda las condiciones básicas para alojarse mientras se guía a la comunidad a una solución de Albergue, son utilizados cuando no existe un plan de prevención previamente estipulado.

- Albergue temporal: Es el lugar donde se proporciona temporalmente techo, alimentación, vestido y salud a personas vulnerables, antes, durante o después de la ocurrencia de un fenómeno destructivo.

La figura 2 muestra un resumen de la tipología de los albergues según las condiciones y el número de personas que requieran del albergue.



Figura 2. Tipología de los albergues temporales. Sociedad Nacional de la Cruz Roja Colombiana. Adaptado de http://web.cruzrojacolombiana.org/publicaciones/pdf/manual_final_albergues_temporales_1912011_035711.pdf

3.4.1 Tiempo de duración de un albergue temporal. El tiempo de duración de un albergue temporal no es una decisión unilateral de los gobiernos o las entidades humanitarias o privadas que responden por la operación de los albergues, sino también de la comunidad que se encuentra albergada. Por lo anterior, se debe realizar una gestión constante donde el albergue se convierta en un ente permeable y participativo para superar la emergencia o el desastre por medio de programas de rehabilitación y reconstrucción.

Los albergues durarán poco tiempo siempre y cuando se entreguen rápidamente soluciones definitivas a los damnificados. Sin embargo, existe una variabilidad muy alta en la duración de un albergue teniendo en cuenta la magnitud de la emergencia y la capacidad local de rehabilitar o reconstruir.

La Sociedad Nacional de la Cruz Roja Colombiana (2008) propone los siguientes parámetros para definir la duración de los albergues.

- A Corto Plazo: Para emergencias pequeñas o menores, donde el número de personas afectadas es mínimo y la capacidad local es suficiente para atender la emergencia. Se establecen refugios en los puntos de encuentro y estos deben tener un rango de operación en promedio de 24 horas.
- A Mediano Plazo: Para emergencias que son más complejas donde la afectación es mayor e intervienen los gobiernos departamentales e incluso el nacional. Estos alojamientos temporales pueden tener un rango de operación de 10 a 30 días.
- A Largo Plazo: Para eventos catastróficos de gran magnitud o eventos recurrentes como los naturales, los sociales, de orden público o tecnológico que requieren atención permanente. En este parámetro los albergues que se utilizan pueden ser de cualquier tipo. El rango de

operación será de 30 a 90 días y pueden ser prorrogables en tiempo según el avance de las acciones de rehabilitación y reconstrucción.

Los costos de manutención de un albergue son altos, por esta razón, retornar a las condiciones normales de vida de la comunidad se debe realizar de una manera ágil por medio de estrategias para la rehabilitación de los damnificados y de soluciones por parte de los entes encargados de la administración de estos albergues.

3.4.2 Consideraciones para la ubicación de albergues. Kilci, Kara y Bozkaya (2015) refieren que la Media Luna Roja turca define las ubicaciones potenciales de las áreas de refugio temporal considerando criterios como la accesibilidad al refugio, cercanía a centros de atención médica y a establecimientos de suministro de recursos, la idoneidad de la topografía del terreno, la estructura eléctrica y de aguas residuales del lugar, entre otros criterios.

Li, Zhao, Huang y Hu (2017) sugieren que la infraestructura existente en las zonas urbanas, tales como escuelas, gimnasios, estadios, zonas verdes e incluso una plaza de mercado o supermercado pueden ser transformados en refugios de emergencia a través de la adaptación de las instalaciones de emergencia.

Los gobiernos locales en el desarrollo de sus planes de ordenamiento territorial y en sus planes de emergencia deben incorporar posibles escenarios que sean útiles para la implementación de los albergues bien sea de tipo campamento o en infraestructura y tener en cuenta la propiedad del predio o instalaciones para formar el albergue, ya que las propiedades privadas cuando no son del orden comunitario son difíciles de manejar.

Es importante conocer las características generales al momento de identificar los espacios en los que se puede hacer la implementación de un albergue temporal. La Sociedad Nacional de la Cruz Roja Colombiana (2008) presenta algunos criterios claves para la ubicación de albergues:

- Accesibilidad
- Criterios no estructurales
- Topografía
- Criterios estructurales
- Área de superficie
- Criterios geológicos, hidrológicos y climáticos
- Seguridad

3.5 Problemas de optimización multiobjetivo

López (2013) refiere que en los problemas de optimización primero se definen qué criterios se van a optimizar, y estos serán definidos luego en las funciones objetivo. Si solo existe un criterio, la optimización es de tipo mono-objetivo. Se presenta un ejemplo a continuación, el diseño de un nuevo automóvil, cuyo criterio a optimizar es su eficiencia en el consumo de combustible, por lo tanto, la solución óptima es el prototipo que presenta el menor consumo de combustible por kilómetro.

López (2013) afirma:

En los problemas planteados en el mundo real, por lo general, se optimizan varios criterios simultáneamente, lo que se define como optimización multiobjetivo. Continuando con el ejemplo anterior, se quiere minimizar el consumo de combustible, y a su vez, maximizar el uso

de componentes comunes con plataformas desarrolladas en el pasado. Estos dos objetivos son contrarios, en este caso, el desafío está en encontrar el conjunto de soluciones que optimizan ambos criterios a la vez (p.43).

El modelo matemático de un problema multiobjetivo busca encontrar un vector de variables de decisión $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$ que cumpla con un conjunto de restricciones formuladas mediante la pertenencia a un conjunto D y dadas las funciones objetivo $f_1, f_2, \dots, f_n$ definidas sobre D . Usualmente el problema a minimizar se presenta como $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$:

$$\begin{aligned} \min: & f(x) \\ & x \in D \end{aligned} \tag{1}$$

Las funciones objetivo representan diferentes criterios para evaluar una solución haciendo inviable una comparación directa con otras soluciones al encontrar múltiples funciones objetivo para cada una de estas, por ende, se crea la necesidad de comparar una solución con otra y determinar cuál es mejor. A raíz de esta situación surge el concepto de dominancia, con el fin de clasificar las diferentes soluciones encontradas y determinar aquellas de mejor calidad. En la figura 3 se muestra una representación del espacio solución y el espacio objetivo en un modelo de optimización multiobjetivo.

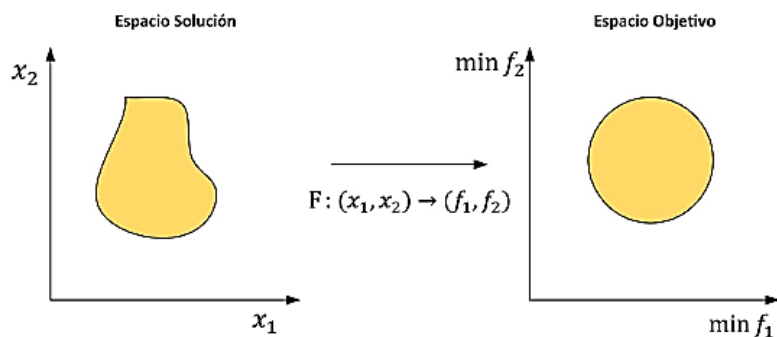


Figura 3. Representación del espacio solución y espacio objetivo en optimización multiobjetivo. Adaptado de Martínez (2017)

López (2013) refiere que a diferencia de la optimización mono-objetivo donde la solución es única, en la optimización multiobjetivo la solución está compuesta por un conjunto de elementos óptimos, y se requiere de la intervención de un tomador de decisiones (*Decision Maker*) para seleccionar uno de estos elementos teniendo en cuenta los criterios.

Caramia y Dell'Olmo (2008) sugieren que actualmente, las aplicaciones reales interfieren con la idea de plantear una función de un solo objetivo (mono-objetivo) sujeta a un conjunto de restricciones, ya que con la introducción de la optimización multiobjetivo se gestiona más información, al considerar simultáneamente dos o más objetivos, produciendo así soluciones con un mayor nivel de equidad.

3.5.1 Frente de Pareto. (López, 2013) define el óptimo como un conjunto de buenas soluciones de compromiso, en lugar de ser una única solución mejor. Por medio de este conjunto de soluciones, se brinda al tomador de decisiones (Decision Maker -DM) las mejores alternativas entre las disponibles, y con ello, se seleccione una al final.

Aranda y Orjuela (2015) definen óptimo de Pareto como “un punto $x^* \in X$ es óptimo de Pareto si no existe otro punto $x \in X$ tal que $F(x) \leq F(x^*)$ y $F_i(x) < F_i(x^*)$ al menos en una función” (p.37).

En la figura 4 se representa la definición de frente de Pareto, donde la solución “a” pertenece a conjunto de soluciones óptimas (o soluciones no dominadas) dado que no puede encontrarse una solución “b” tal que mejore uno de los objetivos sin empeorar al menos uno de los otros. En este caso, la solución “c” es dominada por “a” y por “b”.

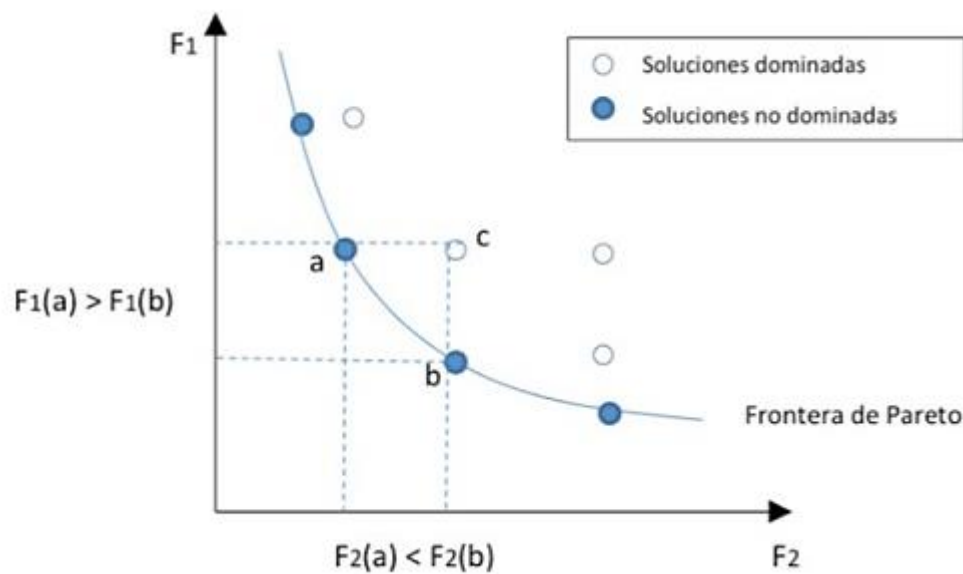


Figura 4. Frente de Pareto de un problema de minimización. Adaptado de Aranda y Orjuela (2015)

Aranda y Orjuela (2015) afirman que:

La frontera de Pareto obtenida puede ser lineal, cóncava, convexa, continua o discontinua dependiendo de las funciones objetivo integrantes del problema. Todas las soluciones pertenecientes a la frontera son igualmente buenas, y no se puede especificar si alguna de las soluciones es preferible a las otras, excepto en aquellos casos en que se haya definido una preferencia a priori (p.37).

Existen algunas herramientas informáticas, metodologías de solución o algoritmos, que proporcionan soluciones que satisfacen el objetivo global del problema, pero que no cumplen con la propiedad de Optimalidad de Pareto, anteriormente descrita, de este modo surge la definición de Óptimo de Pareto débil.

3.5.2 Solución de problemas de optimización multiobjetivo. Caramia y Dell'Olmo (2008) refieren que el frente de Pareto no se obtiene de manera eficiente en muchos casos, y si teóricamente fuera posible encontrar todos estos puntos exactos, tendrían un tamaño exponencial. Por lo anterior, se utilizan métodos de aproximación, aunque estos no representan una opción secundaria para el tomador de decisiones, teniendo en cuenta que muchos problemas de la vida real es difícil tener toda la información para formularlos de manera correcta y/o completa; el tomador de decisiones tiende a aprender tan pronto como estén disponibles algunas soluciones preliminares. Es de gran ayuda tener algunas soluciones aproximadas para determinar si se requiere un método exacto y explotar tal solución mejorando la formulación del problema.

Osorio, Brailsford y Smith (2014) hacen referencia a la existencia de varias técnicas de optimización multiobjetivo, describen brevemente tres de ellas, primero se encuentra el método de *épsilon-restricciones* (*épsilon constraint method*) el cual consiste en elegir una función objetivo que será determinada como la principal y se configuran las demás como restricciones unidas a un grupo de parámetros que se definen como *épsilon*, designados a cada función objetivo definida como restricción, el objetivo final es convertir un modelo multiobjetivo en mono-objetivo. En segundo lugar, está el método de programación por metas, el cual presenta la misma forma del modelo de programación lineal, con una función objetivo que optimizar sujeta a una o más restricciones, pero teniendo en cuenta dos conceptos nuevos, el primero es el de las restricciones de meta en lugar de las restricciones de recurso y el segundo el de rango de prioridad entre las funciones de objetivo. Por último, se encuentra el método de pesos ponderados, en el cual cada función del problema multiobjetivo es tratada individualmente. A cada una de estas funciones, se les asigna un valor, que representa la importancia relativa dentro del problema multiobjetivo.

3.5.2.1 Método *épsilon* restricción. La metodología *épsilon*– restricciones para la solución de problemas multiobjetivo fue propuesta por Haimes, Lasdon, y Wismer (1975). Osorio, Brailsford y Smith (2014) describen la técnica como un método que convierte un modelo multi-objetivo en mono-objetivo, escogiendo una función objetivo como la principal y configurando las demás como restricciones, asociadas a un conjunto de parámetros llamados *épsilon*, determinados en particular para cada función objetivo presentada como restricción.

Caramia & Dell'Olmo (2008) describen el método de la siguiente manera, el tomador de decisiones elige un objetivo de n para ser minimizado, los objetivos restantes se limitan a ser menores o iguales a los valores objetivo dados.

Osorio Muriel, Brailsford y Smith (2014) refieren que en la optimización multiobjetivo no existe una solución única, sino que se habla de un conjunto de soluciones que conforman el frente de Pareto. La ventaja de la obtención del frente es que permite al tomador de decisiones tener un panorama más amplio que la obtención de una única solución, a través de otras técnicas, que finalmente dependen de los parámetros asignados.

Mavrotas (2009) sugiere la siguiente formulación general del método:

Encuentre:

$$x \in E^n$$

Para minimizar:

$$F_s(x) \tag{2}$$

Sujeto a:

$$F_i(x) \leq \varepsilon_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, k; i \neq s$$

$$g_j(x) \leq 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, m$$

Donde x es el vector de las variables de decisión, $F_s(x)$ y $F_i(x)$ son las funciones objetivo y E^n la región factible. Los ε_i representan los valores de las funciones objetivos y se van alterando para obtener el conjunto óptimo de Pareto en un rango deseado, este procedimiento se observa en la figura 5, donde se muestra una frontera de Pareto de un modelo con dos funciones objetivos, se minimiza la primera (F_1) y se restringe la segunda (F_2). El valor ε_2 representa el valor al que se restringe F_2 y con cada nivel de ε_2 se obtiene un punto óptimo de Pareto.

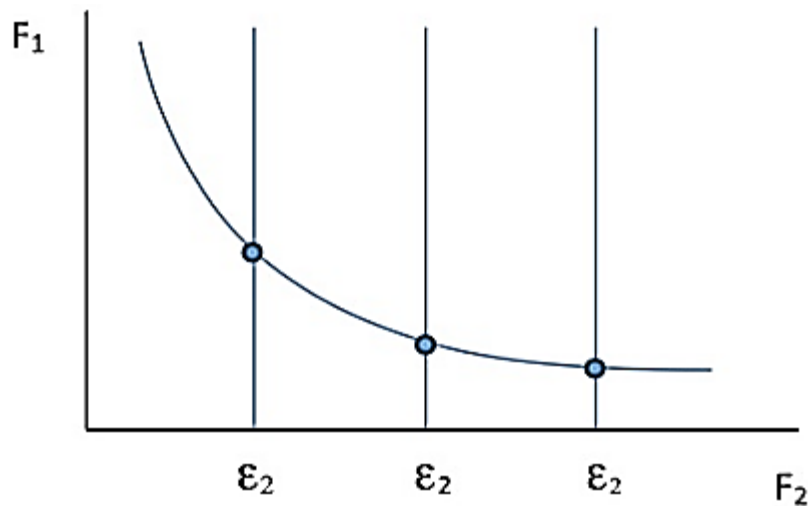


Figura 5. Representación gráfica del método ε -constraint. Adaptado de Aranda y Orjuela (2015)

Torres y Pulido (2018) definen en su trabajo de grado de pregrado el procedimiento para un problema bi-objetivo en donde los dos objetivos son de maximización:

En primer lugar, se soluciona el problema con el primer objetivo Z_1 y, una vez obtenido el valor de las variables de decisión, calculando el valor del segundo objetivo Z_2 . A continuación, se soluciona el problema con el segundo objetivo Z_2 y una vez obtenido el valor de las variables de decisión, se calcula el valor del primer objetivo Z_1 . Por ahora ya se tienen dos puntos

eficientes del espacio de objetivos. El siguiente paso es escoger una de las funciones objetivo (por ejemplo, se escoge Z_1) y ponerla como restricción. Suponiendo que L_2 corresponde al valor de Z_2 cuando se maximiza Z_1 . Si se añade la restricción $Z_2 \leq L_2$ y se soluciona el problema, se volvería a obtener la misma solución para Z_1 . Pero si se añade la siguiente restricción $Z_2 \leq L_2 + \epsilon$, en donde ϵ es un valor positivo relativamente pequeño, y se soluciona el problema, es posible que la nueva solución de Z_1 sea inferior o igual, pero obviamente nunca superior, ya que, al añadir una nueva restricción, se reduce el espacio de decisiones factible. Por lo tanto, a medida que se va incrementando el valor de ϵ y resolviendo nuevas instancias del problema, se van generando nuevas soluciones de Z_1 . El proceso se para cuando el lado derecho de la restricción, $L_2 + \epsilon$, alcanza el valor óptimo de Z_2 . El problema reside en encontrar el valor de ϵ adecuado para poder generar el máximo número de puntos eficientes en el espacio de objetivos. En otras palabras, se trata de encontrar el número adecuado de problemas lineales a resolver (p.47).

Veerapen, Ochoa, Harman y Burke (2015) sugirieron un pseudocódigo del método de épsilon-restricciones, el cual se muestra en la figura 6. La idea principal es comenzar resolviendo uno de los dos objetivos, para este caso f_1 , se genera la solución x^1 , $f_1(x^1)$ es el mejor valor posible para f_1 . El espacio de búsqueda estará limitado por $f_2 \geq f_2(x^1) + \delta$ y se resolverá para f_1 dentro de ese espacio. El proceso es repetido siempre que se encuentre una nueva solución para f_1 . Durante el procedimiento, f_2 aumenta gradualmente mientras f_1 va disminuyendo.

Se observa que δ es un parámetro clave, para obtener una aproximación del frente de Pareto, δ puede usarse para generar soluciones que tendrán por lo menos δ diferencia entre los valores de f_2 . En este punto se quiere hallar el frente de Pareto exacto, δ debe establecerse en el valor representativo más pequeño.

```

Determine  $x^1$  an optimal solution for  $f_1$ 
 $A \leftarrow \{x^1\}$ 
 $\epsilon_2 \leftarrow f_2(x^1) + \delta$ 
while  $\max_{x \in X} \{f_1(x) | f_2(x) \geq \epsilon_2\}$  is feasible do
     $\hat{x} \leftarrow \max_{x \in X} \{f_1(x) | f_2(x) \geq \epsilon_2\}$ 
     $A \leftarrow A \cup \hat{x}$ 
     $\epsilon_2 \leftarrow f_2(\hat{x}) + \delta$ 
end while
Filter dominated solutions in  $A$ 

```

Figura 6. Pseudocódigo del método epsilon-constraint. Adaptado de Veerapen, Ochoa, Harman & Burke (2015)

3.6 Problemas de localización

Moreno, Ferreira y Alem (2016) afirman:

El problema de localización tiene como fin determinar en cual de los posibles puntos referentes debe funcionar o se debe habilitar una determinada unidad o edificación (bodegas, centros de auxilio, centros de distribución, plantas, etc) considerando que la demanda debe ser atendida por estas unidades habilitadas (p.356).

Ahuja, Orlin, Pallotino, Scaparra y Scutella (2002) sugirieron tres elementos clave en los problemas de localización, los cuales se describen a continuación:

3.6.1 Localización. Hace referencia al conjunto de puntos elegibles en el espacio de solución, determina el lugar específico donde se deben ubicar las instalaciones. Existen tres formas de representarlo especialmente: continua, discreta y de red.

En el caso de una representación discreta se conoce generalmente un conjunto de sitios potenciales para la localización de una instalación específica en el espacio geográfico que se está considerando y el resultado es la selección de uno o varios sitios posibles.

En el caso de una representación continua, se tiene un espacio determinado por coordenadas que varían de modo continuo y en las cuales la generación de los sitios candidatos para la localización de deja al modelo, ya que se asume que no se conocen estos sitios de antemano.

Cuando se usa una red, se hace generalmente con la teoría de grafos que resulta ser de mucha utilidad; sirve tanto para problemas continuos como discretos, usándose para esta última un conjunto de nodos en un espacio determinado que representan los posibles puntos de localización de las instalaciones.

3.6.2 Instalación. Denota una cantidad de elementos, por lo general almacenes, plantas, escuelas, centros de distribución, etc., para los cuales se va a establecer una posición espacial con la finalidad de optimizar la interacción con otros elementos preexistentes en un lugar geográfico.

3.6.3 Clientes. Es usada comúnmente para denotar a personas que requieren un bien o servicio, que están distribuidas sobre un conjunto de puntos con ubicación específica en un espacio, cuentan con una demanda determinada y un comportamiento que en ocasiones puede ser arbitrario al momento de ser asignado a una instalación.

4. Caso de estudio

El presente caso de estudio se centra en la ciudad de Bucaramanga ante la ocurrencia de un sismo. Al ejecutar este tipo de operaciones se pueden presentar objetivos contradictorios, para el caso actual, por un lado, se tiene la minimización de la distancia que deben recorrer las personas afectadas hasta los albergues que les sean asignados sin considerar la vulnerabilidad de estos albergues; por otro lado, la minimización de la vulnerabilidad de los albergues que son habilitados sin tener en cuenta la distancia que se recorra para llegar hasta ahí.

Se plantea entonces un problema multiobjetivo compuesto por los dos objetivos anteriormente mencionados y se utiliza la metodología de ϵ -constraint para dar solución al problema y obtener así el conjunto de puntos óptimos que conforman el frente de Pareto, lo que generará al final una herramienta que apoya la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de desastres.

4.1 Datos iniciales para la generación de las soluciones

4.1.1 Ubicaciones potenciales para los albergues. En la tabla 4 se presenta la información detallada de las ubicaciones potenciales para los albergues temporales en la ciudad de Bucaramanga y la capacidad máxima de personas a albergar posterior a un terremoto, información tomada de los trabajos de investigación de (Martínez, 2017) y (Becerra y Hernández, 2016). Por medio del ID (identificación) podemos contabilizar un total de 73 ubicaciones candidatas para los albergues, discriminadas entre colegios, universidades, canchas, coliseos y parques dentro de los cuales se construyen tiendas de campaña.

Tabla 4.
Ubicaciones candidatas para la localización de albergues.

Nombre	ID	Longitud	Latitud	Capacidad	Vulnerabilidad
Bilingue Divino Niño	1	73,120024	7,082978	349	1
Bilingue la Consolata	2	73,129714	7,0995	242	2
Cafe Madrid	3	73,140328	7,163089	332	3
Caldas	4	73,103993	7,100433	1308	2
Santísima Trinidad Bucaramanga	5	73,12335	7,12586	101	2
Santander SEDE A	6	73,122482	7,139245	865	2
Santander SEDE E	7	73,119759	7,119855	64	5
Sagrado Corazón Jesus	8	73,130719	7,135519	120	2
Federico Ozanam	9	73,11101	7,08328	647	4
Franciscano del Virrey Solís	10	73,12362	7,130799	78	2
Gimnasio San Sebastián	11	73,098442	7,10181	885	1
Incades	12	73,122569	7,12091	408	4
Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	13	73,130323	7,098785	214	1

Tabla 4.
Continuación

Nombre	ID	Longitud	Latitud	Capacidad	Vulnerabilidad
La Salle Bucaramanga	14	73,113938	7,100397	652	2
Metropolitano Real de Minas	15	73,117344	7,102871	687	1
Militar General Santander	16	73,110649	7,12934	890	4
Psicopedagógico Carl Rogers	17	73,119794	7,12375	60	4
San Pedro Claver	18	73,113328	7,117414	219	1
Normal Superior de Bucaramanga SEDE A	19	73,117442	7,127571	990	1
Gimnasio Superior	20	73,119194	7,098407	236	1
San José de la Salle SEDE A	21	73,114288	7,099462	231	2
Andrés Páez de Sotomayor	22	73,137115	7,112541	340	2
Aurelio Martínez Mutis	23	73,123718	7,106008	399	1
Aurelio Martínez Mutis SEDE B	24	73,115964	7,108703	124	1
Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia	25	73,107207	7,126136	371	1
Camacho Carreño	26	73,131435	7,115181	283	3
Centro Piloto Simón Bolívar	27	73,126738	7,135493	579	4
Club Unión SEDE A	28	73,135096	7,139432	262	4
Comuneros	29	73,12861	7,136105	363	2
De Audición Y Del Lenguaje Centrabilitar	30	73,133181	7,116235	141	4
Gabriela Mistral	31	73,112859	7,099585	368	2
INEM Custodio García Rovira SEDE A	32	73,118643	7,085428	1649	2
Jorge Ardila Duarte SEDE A	33	73,116966	7,111158	180	1
José Celestino Mutis	34	73,131457	7,099916	689	2
La Juventud SEDE A	35	73,128346	7,144745	241	4
La Juventud SEDE B	36	73,12815	7,14955	140	4
Luis Carlos Galán Sarmiento	37	73,142394	7,093291	312	1
Nacional de Comercio SEDE A	40	73,12281	7,10687	447	1
Nuestra Señora del Pilar SEDE E	41	73,119364	7,095874	75	2
Gustavo Cote Uribe	42	73,14028	7,14986	250	3
Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A	43	73,13101	7,121682	957	2

Tabla 4.
Continuación

Nombre	ID	Longitud	Latitud	Capacidad	Vulnerabilidad
Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C	44	73,134831	7,122618	76	5
Técnico Superior Damaso Zapata SEDE A	45	73,119274	7,138641	1457	2
Santo Ángel	46	73,13107	7,15006	371	3
Santa María Goretti SEDE A	47	73,124173	7,105069	253	1
Provenza SEDE A	48	73,113415	7,083033	241	4
Promoción Social del Norte SEDE A	49	73,126105	7,144025	201	3
Politécnico SEDE A	50	73,123195	7,106195	567	2
Universidad Industrial de Santander	38	73,120236	7,139337	9863	1
Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA	39	73,119945	7,133343	1438	2
Cancha de futbol el Mutis	51	73,133146	7,098085	309	1
Coliseo Bicentenario	52	73,116241	7,138972	173	1
Coliseo Edmundo Luna	53	73,11994	7,104906	378	1
Coliseo Vicente Diaz Romero	54	73,115491	7,1369	442	1
Estadio Alfonso López	55	73,116454	7,13677	1350	1
Estadio de Atletismo La Flora	56	73,105998	7,100278	1452	1
Estadio La Marte	57	73,117032	7,138565	354	1
Cancha Campo Hermoso	58	73,136679	7,10706	1026	1
Velódromo Alfonso Flórez Ortiz	59	73,11565	7,135268	752	1
Los Naranjos	60	73,126175	7,102308	962	1
Antonia Santos	61	73,122042	7,122544	617	1
Centenario	62	73,124608	7,121891	99	1
Cristo Rey	63	73,129111	7,136575	876	1
Las Cigarras	64	73,121492	7,103713	1486	1
Los Sarrapios	65	73,107515	7,118928	336	1
De los Niños	66	73,119102	7,125417	1456	1
Infantil Provenza	67	73,115829	7,082269	250	1
Las Palmas	68	73,112613	7,11955	504	1
Mejoras Publicas	69	73,115057	7,121648	444	3
Romero	70	73,128414	7,113334	427	1
San Francisco	71	73,125024	7,131226	711	1
San Pio	72	73,110644	7,118542	1429	1
Santander	73	73,122859	7,119639	421	1

Nota: Adaptado de Martínez (2017).

En la figura 7 se representa gráficamente, por medio del sistema de información geográfico Google Maps, las potenciales ubicaciones para los albergues.

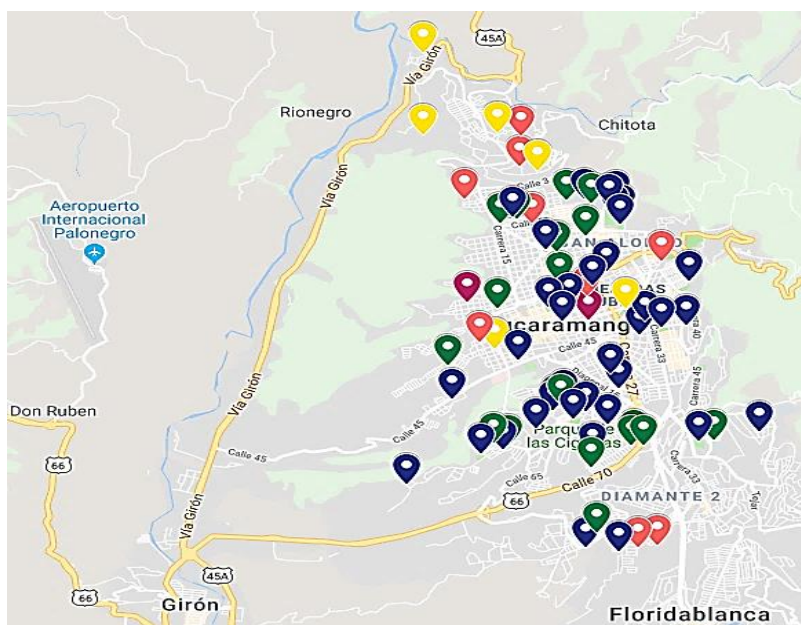


Figura 7. Ubicaciones candidatas para la localización de albergues. Adaptado de Martínez (2017).

4.1.2 Clasificación de las manzanas según su nivel de vulnerabilidad. Martínez (2017) en su trabajo de grado de maestría refiere una división de la ciudad de Bucaramanga por sectores, cada uno diferenciado por un color diferente, según su nivel de vulnerabilidad de acuerdo con el censo del 2005, esta información se consolida en una aplicación web en el dominio <http://dssdmbucaramanga.uis.edu.co:8080>. Los niveles de vulnerabilidad van de 1 a 5, siendo 1 vulnerabilidad baja y 5 vulnerabilidad alta.

En la tabla 5 se resume las características para cada nivel de vulnerabilidad de los albergues candidatos.

Tabla 5.
Características para cada nivel de vulnerabilidad de los albergues candidatos.

Vulnerabilidad	Características
5	Cerca de fallas activas, en áreas de alta remoción de masa, deslizamientos y reptaciones, edificaciones de mampostería, pórtico de concreto o acero y muro estructural
4	Lejos de fallas, en áreas de alta y media remoción de masa, tipologías de mampostería y muro estructural
3	Cerca de fallas, en áreas de alta y media remoción de masa, todas las tipologías menos tapia.
2	Lejos de fallas, alta remoción de masa y rellenos, mampostería y muro estructural
1	Cerca de fallas, en áreas de rellenos, estructuras de tapia, pórticos y muro estructural.

Nota: Adaptado de Martínez (2017).

En la figura 8 se puede observar la información que consolidada en el sistema de información geográfico Google Maps y la representación de cada color.

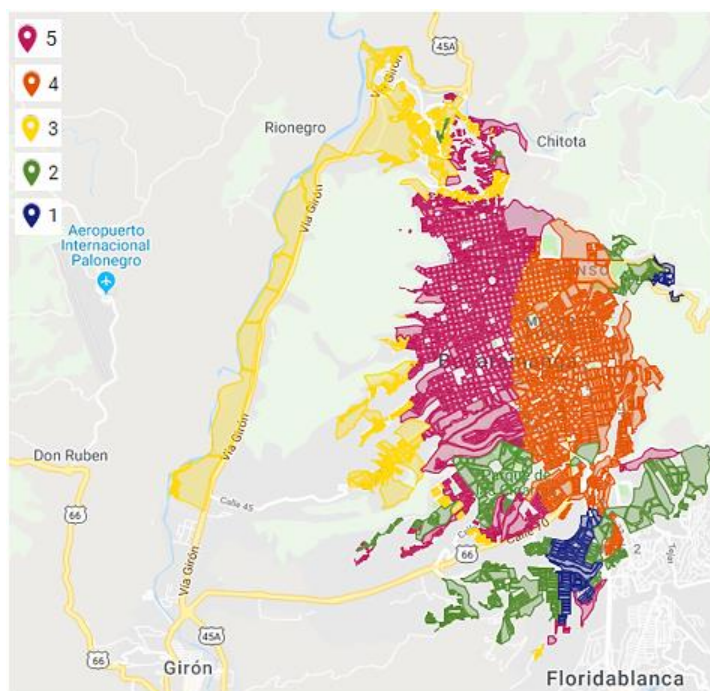


Figura 8. Clasificación de la población según nivel de vulnerabilidad. Adaptado de Martínez (2017).

La información relacionada con la cantidad de manzanas por nivel de vulnerabilidad se encuentra en la tabla 5, de la cual se concluye que un 60% de las manzanas en Bucaramanga están calificadas con una vulnerabilidad de 1 y 2.

Tabla 6.

Cantidad de manzanas por nivel de vulnerabilidad.

Nivel de vulnerabilidad	Número de manzanas
1	1099
2	729
3	593
4	549
5	101
TOTAL	3071

Nota: Adaptado de Martínez (2017).

4.1.3 Generación del escenario. Se plantea un escenario de prueba para la ejecución de las variaciones del modelo, el cual fue obtenido por medio del generador de escenarios propuesto por Martínez (2017) en su tesis, este escenario genera la cantidad de afectados del total de personas que conforman una zona poblada en Bucaramanga considerando una magnitud de 8, una profundidad de 4 km para el sismo, un índice de desarrollo humano de 0.7 y una densidad poblacional de 30.47 personas por km cuadrado para la ciudad de Bucaramanga, estos datos se representan en las figuras 9 y 10.

```

▼ 1 {6}
  name : 89110
  id   : 1
  longitud : -73.1250298600678
  latitud : 7.14343683836251
  personas : 45
  vulnerabilidad : 3

```

Figura 9. Ejemplo de la caracterización de la zona poblada 89110 de Bucaramanga. Adaptado de Martínez (2017).

```

▼ 1 {6}
  name : 89110
  id   : 1
  longitud : -73.1250298600678
  latitud : 7.14343683836251
  personas : 0
  vulnerabilidad : 3

```

Figura 10. Ejemplo de la caracterización del escenario generado para la zona poblada 89110 de Bucaramanga Adaptado de Martínez (2017).

4.1.4 Implementación de la metodología épsilon-restricciones en el modelo. En la figura 11 se muestra un diagrama de flujo para representar como se implemento la metodología épsilon-restricciones en el modelo base.

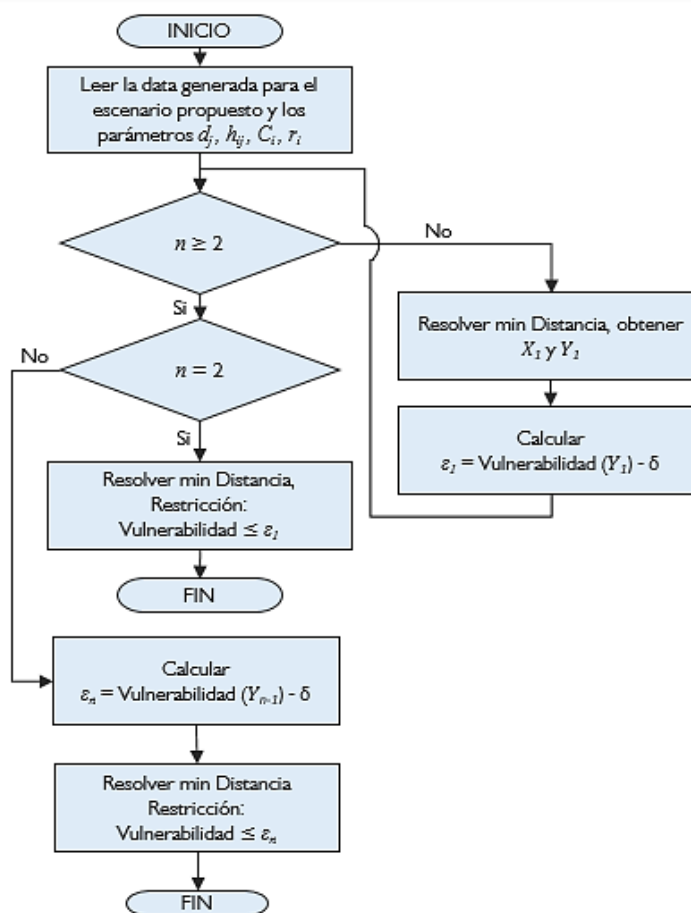


Figura 11. Diagrama de flujo de la implementación metodología épsilon-restricciones en el modelo.

5. Definición del modelo de programación multiobjetivo

5.1 Objetivos del modelo

Los objetivos del modelo de optimización parten de la minimización de la distancia recorrida por los clientes hasta los albergues habilitados y minimización de la vulnerabilidad de los albergues habilitados; estos objetivos están sujetos al cumplimiento de condiciones del contexto tales como capacidad de las instalaciones, criterios de dependencia entre las instalaciones, entre otros.

Martínez (2017) propone un modelo abordado como un Problema de Localización de Instalaciones (FLP, Facilities Location Problem) con restricciones de capacidad, el cual considera la minimización de la distancia recorrida total de los afectados y la vulnerabilidad acumulada de los albergues habilitados. El modelo no es apropiado para las aplicaciones reales, teniendo en cuenta que admite soluciones con niveles de vulnerabilidad extremos (niveles mínimos y máximos), se realiza entonces un estudio y análisis de funciones de distancia y vulnerabilidad que sean más apropiadas en el contexto de gestión de desastres y las cuales serán evaluadas en el modelo de localización asignación presentado por Martínez (2017).

Teniendo en cuenta que se planteó un modelo multiobjetivo se propone el uso del método ϵ -restricción para obtener el frente de Pareto y con ello las soluciones para las diferentes funciones objetivo evaluadas.

5.2 Formulación matemática del modelo base

El modelo matemático base a utilizar para la ubicación de albergues y asignación de afectados en caso de ocurrencia de un sismo de la ciudad de Bucaramanga, basados en la distancia recorrida por los afectados y la vulnerabilidad de los albergues (Martínez, 2017).

Índices

i Ubicaciones candidatas

j Nodos Cliente

Parámetros

d_j Cantidad de afectados en el nodo de demanda j

h_{ij} Distancia entre el albergue i y el cliente j

C_i Capacidad del albergue i

r_i Vulnerabilidad del albergue i

Variables de decisión

X_{ij} 1 si el cliente i es servido por el albergue j , 0 en otro caso

Y_i 1 si el albergue i es habilitado, 0 en otro caso

Ecuaciones

$$\text{Minimizar } f_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{ij} \times X_{ij} \quad (3)$$

$$\text{Minimizar } f_2 = \sum_{i=1}^m r_i \times Y_i \quad (4)$$

Sujeto a.

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (5)$$

$$X_{ij} \leq Y_i \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n d_i * X_{ij} \leq C_i * Y_i \quad \forall i \quad (7)$$

Las ecuaciones (3) y (4) representan las funciones objetivo, que corresponden a la distancia total del viaje de la población afectada a los albergues asignados y el total de la vulnerabilidad de los albergues habilitados. La ecuación (5) representa la asignación de cada cliente a un único albergue, (6) asegura la asignación de todos los nodos clientes a los albergues habilitados y (7) asegura que no se exceda la capacidad de cada albergue. Con lo anterior se pretende minimizar tanto la distancia recorrida por los afectados hasta el albergue asignado y minimizar la vulnerabilidad de los albergues asignados.

5.3 Primera variación de las funciones objetivo

Ecuaciones

$$\text{Minimizar } f_1 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{ij} * X_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij}} \quad (8)$$

$$\text{Minimizar } f_2 = \frac{\sum_{i=1}^m r_i * Y_i}{\sum_{i=1}^m Y_i} \quad (9)$$

Las ecuaciones (8) y (9) representan las funciones objetivo, que corresponden a la minimización de la distancia promedio recorrida por la población afectada a los albergues asignados y la minimización de la vulnerabilidad promedio de los albergues habilitados respectivamente.

5.4 Segunda variación de las funciones objetivo

Ecuaciones

$$\text{Minimizar } f_1 = \text{MAX } h_{ij} \times X_{ij} \quad (10)$$

$$\text{Minimizar } f_2 = \text{MAX } r_i \times Y_i \quad (11)$$

Las ecuaciones (10) y (11) representan las funciones objetivo para la segunda variación planteada con respecto al modelo base de (Martínez Quezada, 2017), que para este caso corresponden a la minimización de la máxima distancia recorrida hasta los albergues asignados y la minimización de la máxima vulnerabilidad de los albergues habilitados respectivamente.

Una vez planteadas las funciones objetivo que serán evaluadas en el modelo se procede a generar una serie de escenarios producto de la combinación de estas funciones objetivo, para un total de 4 escenarios. Con esto se pretende integrar las variaciones para cada uno de los objetivos del modelo, asociados a distancia y vulnerabilidad, y así obtener las mejores soluciones posibles. Las combinaciones realizadas se muestran en la tabla 7.

Tabla 7.
Funciones objetivo utilizadas para cada variación.

Variación	Funciones objetivo utilizadas
Modelo base	Sumatoria total (X1Y1)
Variación 1	Promedio (X2Y2)
Variación 2	Máximo (X3Y3)
Variación 3	Sumatoria total y promedio (X1Y2)
Variación 4	Promedio y sumatoria total (X2Y1)
Variación 5	Promedio y máximo (X2Y3)
Variación 6	Máximo y promedio (X3Y2)

Nota: Adaptado de Rodríguez, Albores y Brewster (2017), Barzinpour y Esmaeili (2014)

6. Resultados computacionales

Las funciones objetivo seleccionadas en este proyecto de investigación se evaluaron haciendo uso del método epsilon-constraint, para generar las soluciones del frente de Pareto. El lenguaje de

programación utilizado fue Python un lenguaje de programación poderoso y fácil de aprender, que cuenta con estructuras de datos de alto nivel eficientes y un enfoque simple para la programación orientada a objetos. La librería utilizada para modelar el problema es CVX.Py, la cual se decidió utilizar teniendo en cuenta que su conjunto de instrucciones es más sencillo de comprender y ha demostrado lograr mejores resultados en cuanto a su rendimiento. Por último, se utiliza como programa de solución de optimización Gurobi, el cual es compatible con una gran variedad de lenguajes de programación y modelado entre ellos Python.

Moreno, Ferreira y Alem (2016) indican que con el método ϵ -constraint se obtienen más soluciones no dominadas que con otros métodos empleados para dar solución a problemas multiobjetivo, por lo tanto, se selecciona este método para dar solución al problema.

El método de los pesos ponderados también es muy utilizado a la hora de resolver problemas multiobjetivo, sin embargo, el método ϵ -constraint cuenta con varias ventajas sobre este, Mavrotas (2009) sugiere que una de estas ventajas es que el método de pesos ponderados se aplica a la región factible original y los resultados a una solución extrema en problemas lineales, se generan solo soluciones extremas eficientes, mientras el método ϵ -restricción altera la región factible original y produce soluciones eficientes no extremas, por ende, el método de pesos ponderados gasta muchas ejecuciones que son redundantes ya que puede existir una gran cantidad de combinaciones de pesos que darán como resultado la misma solución extrema eficiente, con el método ϵ -restricción se explotan casi todas las ejecuciones y se produce una solución eficiente diferente, obteniendo así una representación más abundante del conjunto eficiente.

Para inicializar el código en Python (ver Apéndice C) se establecen los parámetros generales que corresponden a la demanda de los clientes, la distancia entre la población y los albergues y la

capacidad y vulnerabilidad de los albergues, la parte del código donde se refleja el ingreso de estos datos se muestra en la figura 12.

```
In [ ]: nombre_escenario = "escenario1"
escenario = json.loads(open('../escenario.json').read())
albergues = json.loads(open('../alberguesA.json').read())
poblacion = json.loads(open('../poblacion.json').read())
distancias = json.loads(open('../Arcosa.json').read())

n_albergues = len(albergues) #numero de albergues (Lo recorre i)
n_poblacion = len(poblacion) #numero de poblaciones (Lo recorre j)

C = np.zeros((n_albergues,)) # Capacidad de los albergues
r = np.zeros((n_albergues,)) # vulnerabilidad de los albergues
d = np.zeros((n_poblacion,)) # demanda del cliente
h = np.zeros((n_albergues,n_poblacion)) # distancia entre el albergue y el cliente

for i in range(n_albergues):
    C[i] = albergues[i]["capacidad"]
    r[i] = albergues[i]["vulnerabilidad"]

for j in range(n_poblacion):
    d[j] = escenario[j]["personas"]

k = 0
for i in range(n_albergues):
    for j in range(n_poblacion):
        h[i][j] = distancias[k]["distancia"]
        k = k+1
```

Figura 12. Demanda de los clientes, distancia entre la población y los albergues y caracterización de los albergues. Adaptado del lenguaje de programación Python.

6.1 Análisis de los óptimos de Pareto

En la figura 13 se muestran los resultados obtenidos para el modelo base. Se define como modelo base al propuesto en el proyecto de Martínez (2017) cuyas funciones objetivo son la sumatoria total para los objetivos de distancia recorrida por los afectados y de vulnerabilidad de los albergues asignados. Cada punto en la gráfica representa el resultado para una solución y en total se obtienen 17 soluciones. Los valores para los puntos débiles de Pareto se encuentran demarcados por el círculo naranja.

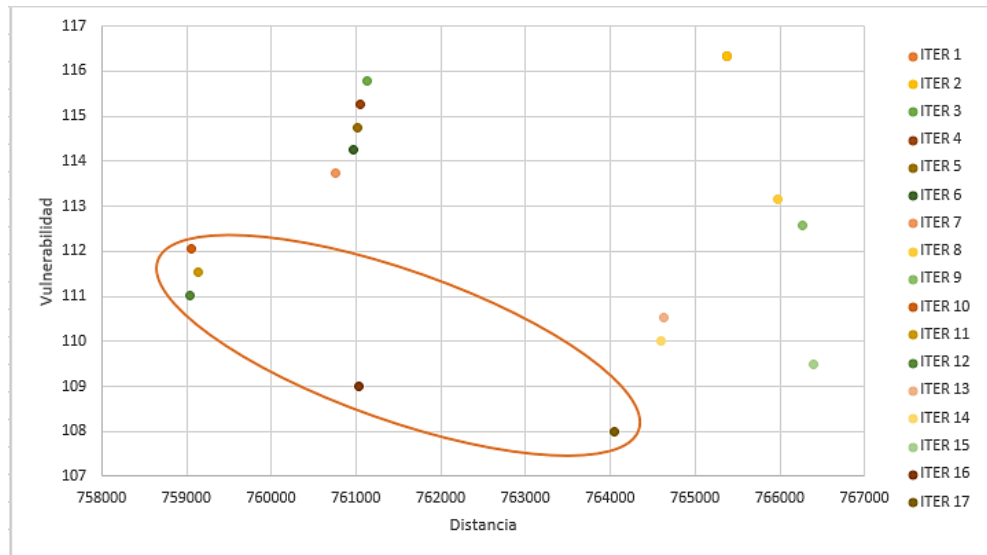


Figura 13. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para el modelo base.

En la figura 14 se muestran los resultados obtenidos para la primera variación evaluada, en la cual las funciones objetivo están asociadas al promedio para los dos objetivos distancia recorrida y la vulnerabilidad. El valor para el frente de Pareto se encuentra en la solución 17 demarcada con el círculo naranja, en la cual se obtiene el menor valor posible tanto para la distancia como para la vulnerabilidad.

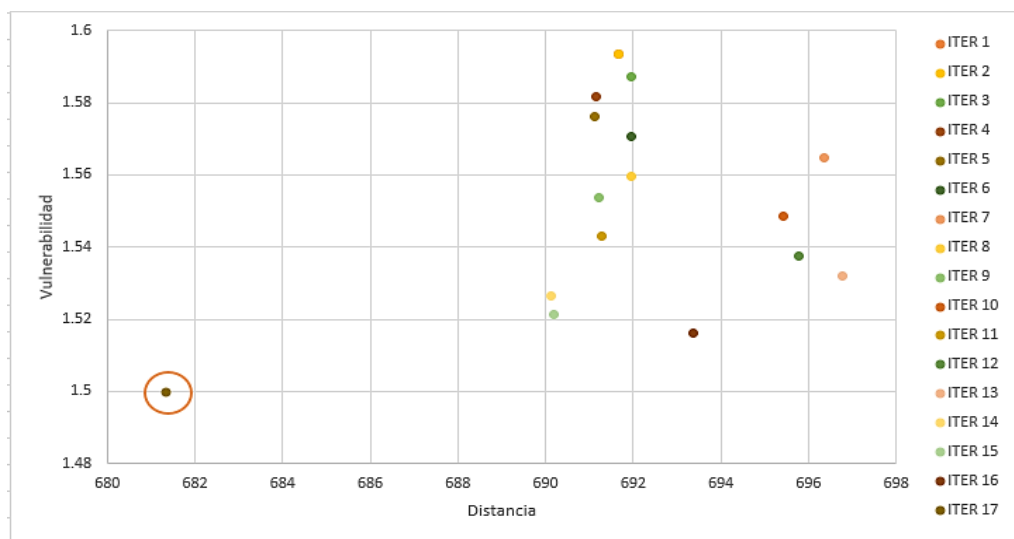


Figura 124. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 1.

En la figura 15 se muestran los resultados obtenidos para la segunda variación evaluada, donde las funciones objetivo están dadas por el máximo valor para ambos objetivos, distancia y vulnerabilidad. Los valores para los puntos débiles de Pareto se encuentran en las soluciones demarcadas con los círculos naranjas.

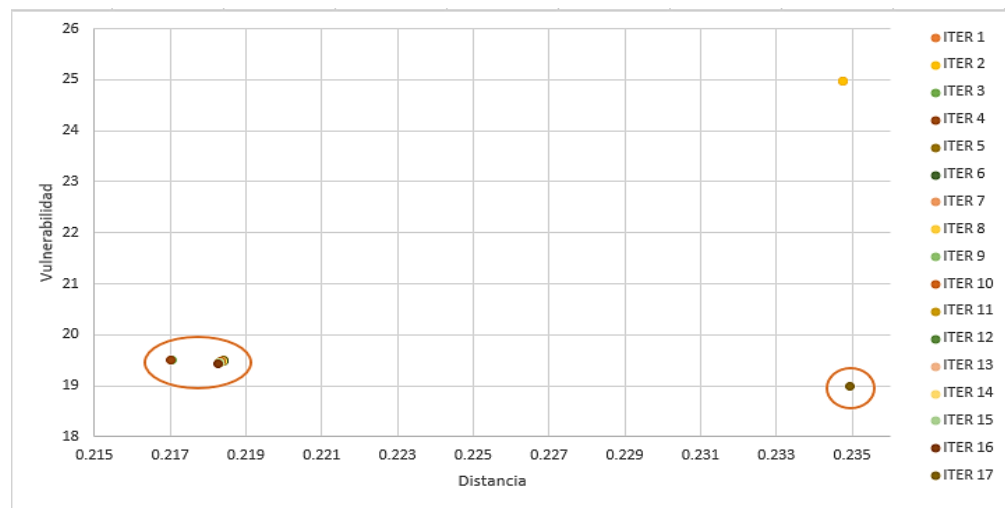


Figura 135. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 2.

En la figura 16 se muestran los resultados para la tercera variación, cuyas funciones objetivo son la sumatoria total para el objetivo de distancia y el promedio para vulnerabilidad. Los puntos débiles de Pareto se encuentran en las soluciones demarcadas con el círculo naranja.

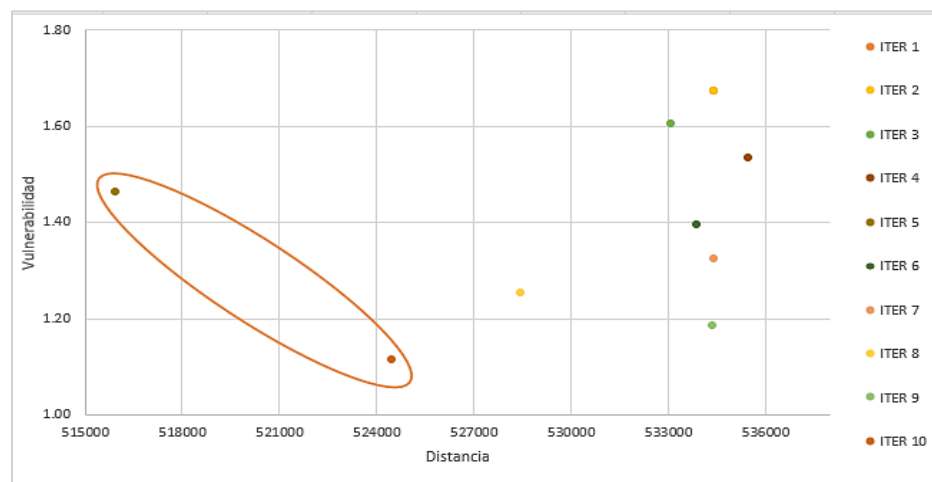


Figura 146. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 3.

En la figura 17 se muestran los resultados para la cuarta variación, las funciones objetivo para este caso son promedio para el objetivo de distancia y la sumatoria total para vulnerabilidad. Los puntos débiles de Pareto se encuentran en las soluciones demarcadas con el círculo naranja.

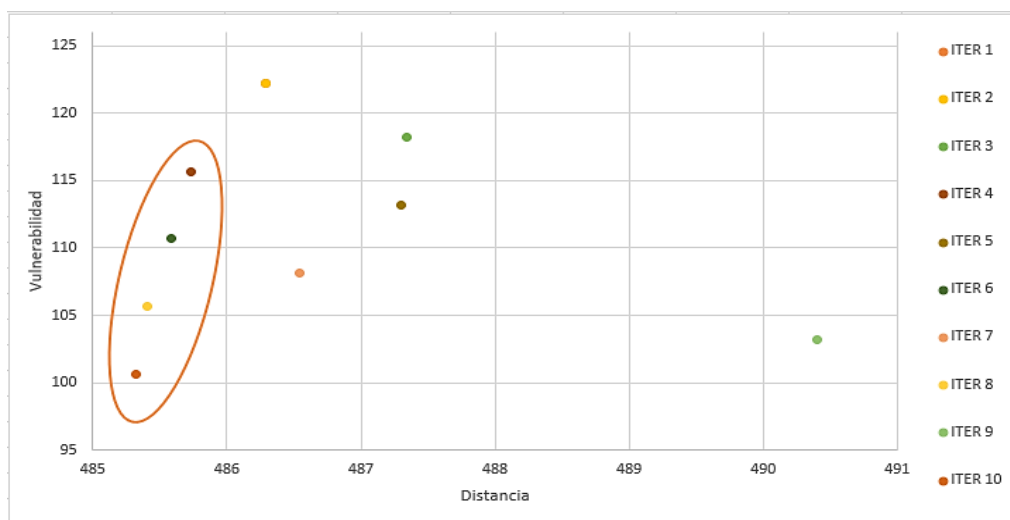


Figura 157. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 4.

En la figura 18 se muestran los resultados obtenidos para la quinta variación evaluada, las funciones objetivo para este caso están dadas por el promedio para el objetivo de distancia y el máximo valor para el objetivo de vulnerabilidad. Los valores para los puntos débiles de Pareto se encuentran en las soluciones demarcadas con el círculo naranja.

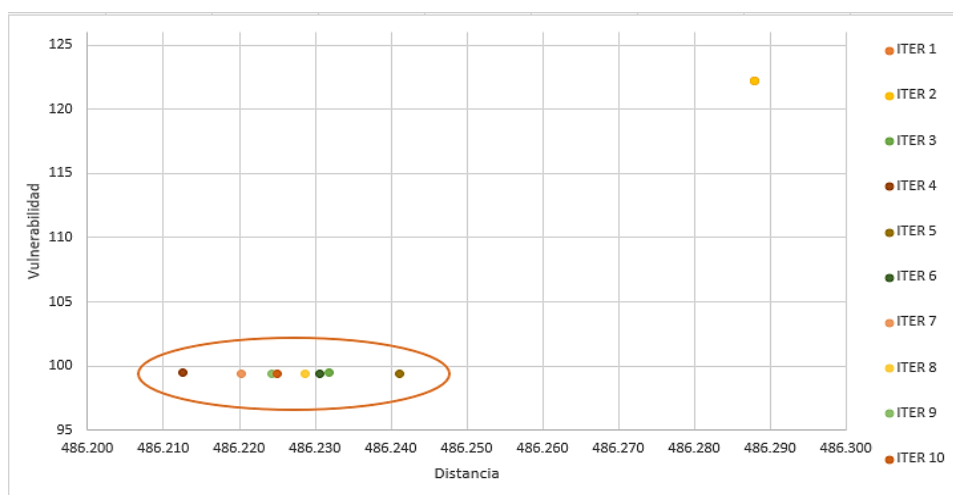


Figura 168. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 5.

En la figura 19 se muestran los resultados obtenidos para la sexta variación evaluada, las funciones objetivo para este caso están dadas por el máximo valor para el objetivo de distancia y el promedio para vulnerabilidad. Los valores para los puntos débiles de Pareto se encuentran en las soluciones demarcadas con los círculos naranjas.

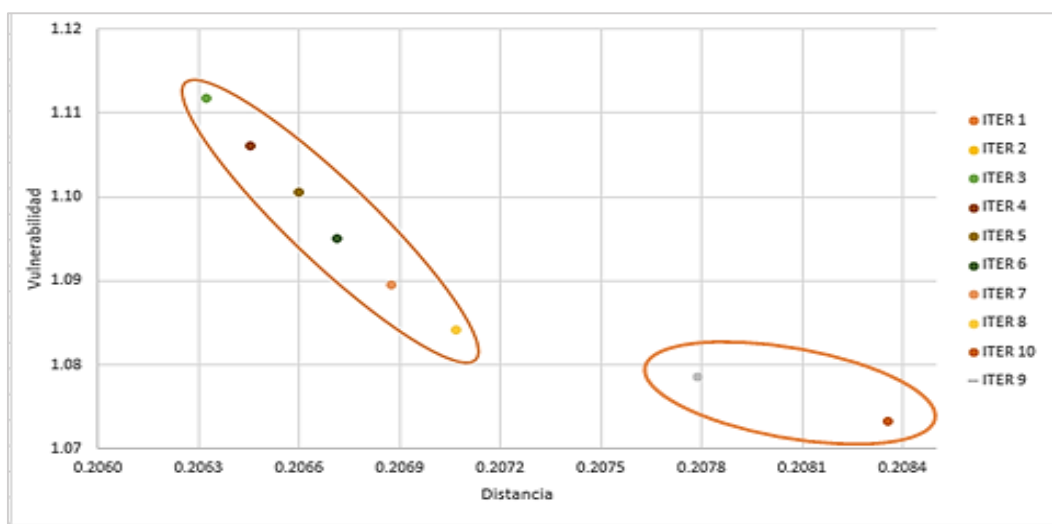


Figura 179. Resultados de distancia y vulnerabilidad por solución para la variación 6.

Al implementar el código este llega hasta un límite de soluciones encontradas, y a partir de ahí, los resultados, que para este caso serían los valores de distancia y vulnerabilidad, ya no varían más, luego de esto el código se detiene y ya no se generan más soluciones. Finalmente, se puede concluir de las gráficas anteriormente mostradas que para el modelo base y las variaciones 1 y 2 se generaron 17 soluciones y para las variaciones 3, 4, 5 y 6 se generaron 10 soluciones.

6.2 Análisis de la cantidad de albergues habilitados

A continuación, se presentan los resultados comparativos de la cantidad de albergues habilitados y la distancia recorrida en cada solución para cada uno de los casos representados por diagramas de barras en las figuras 20 a la 26.

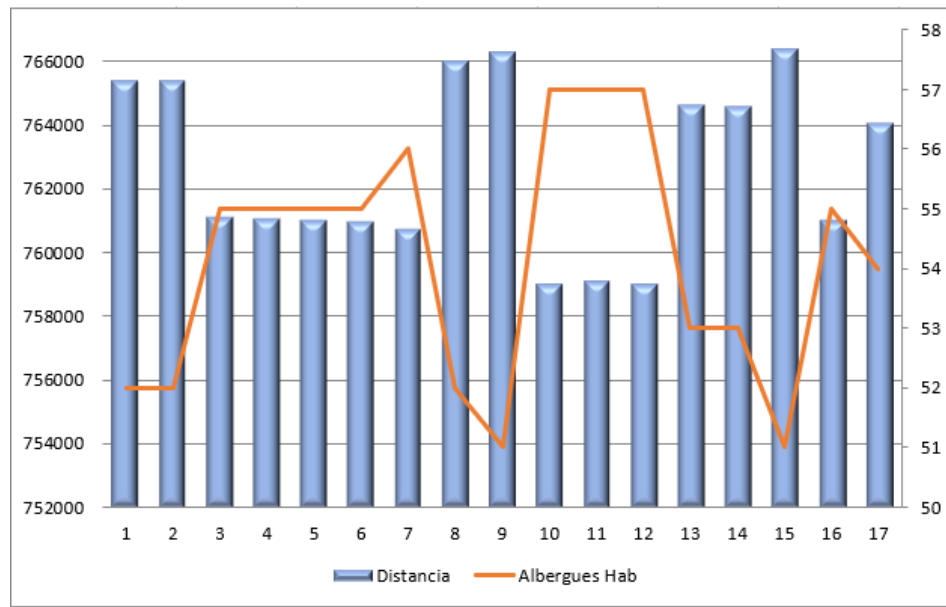


Figura 20. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para el modelo base.

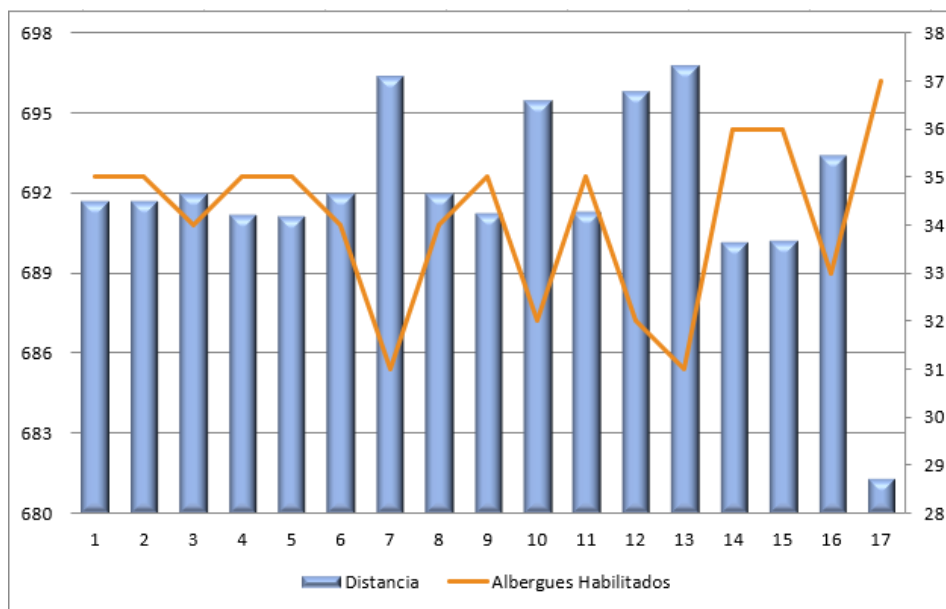


Figura 181. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 1.

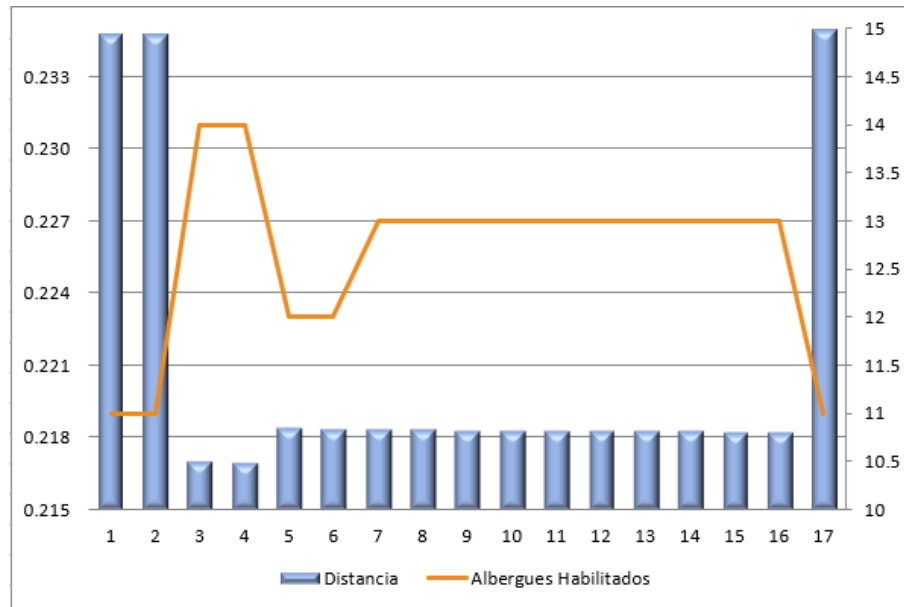


Figura 192. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 2.

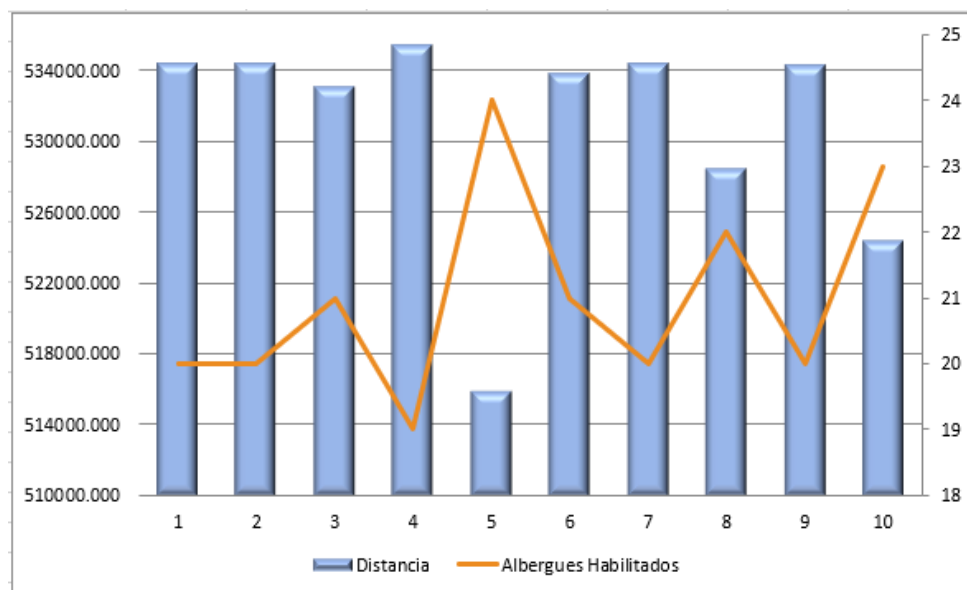


Figura 203. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 3.

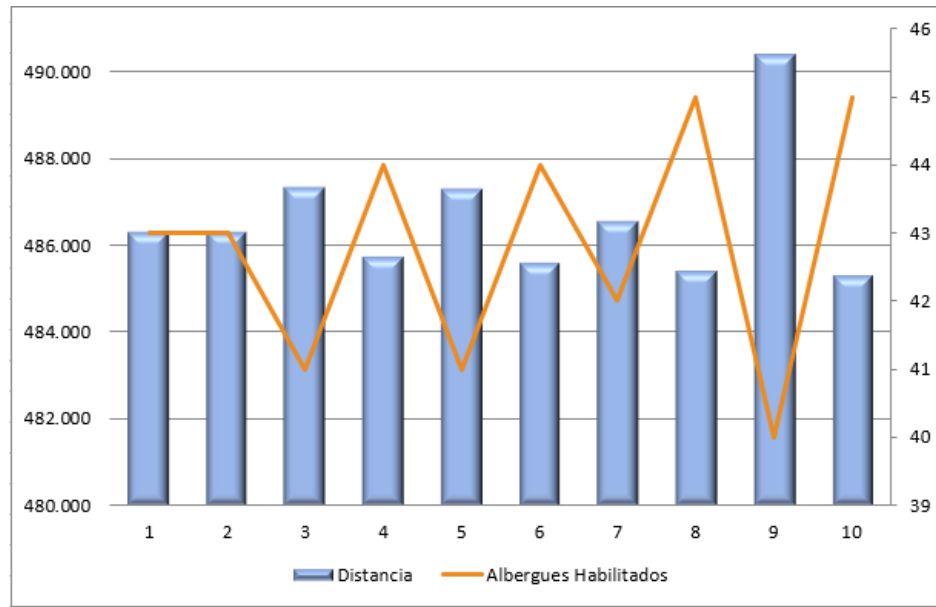


Figura 214. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 4.

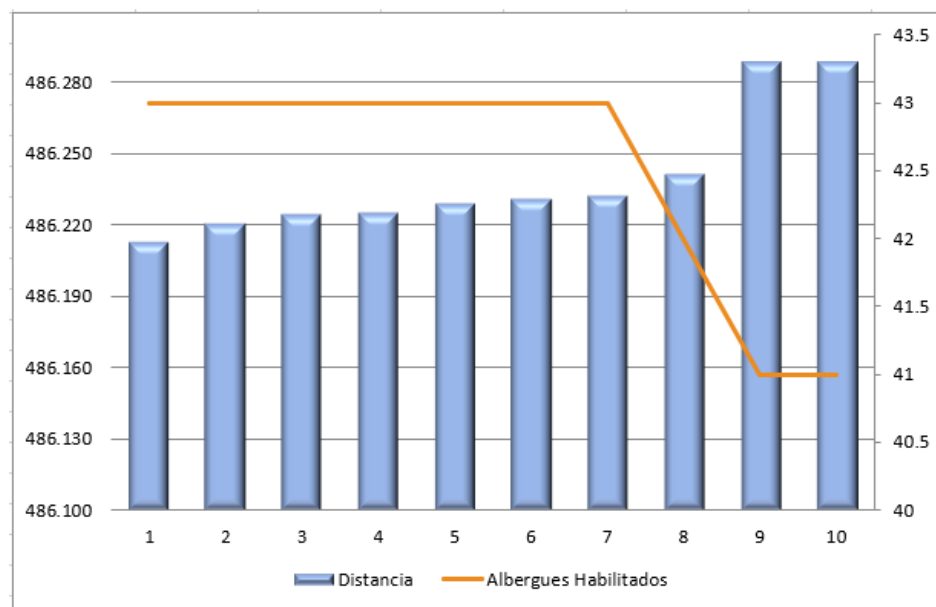


Figura 225. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 5.

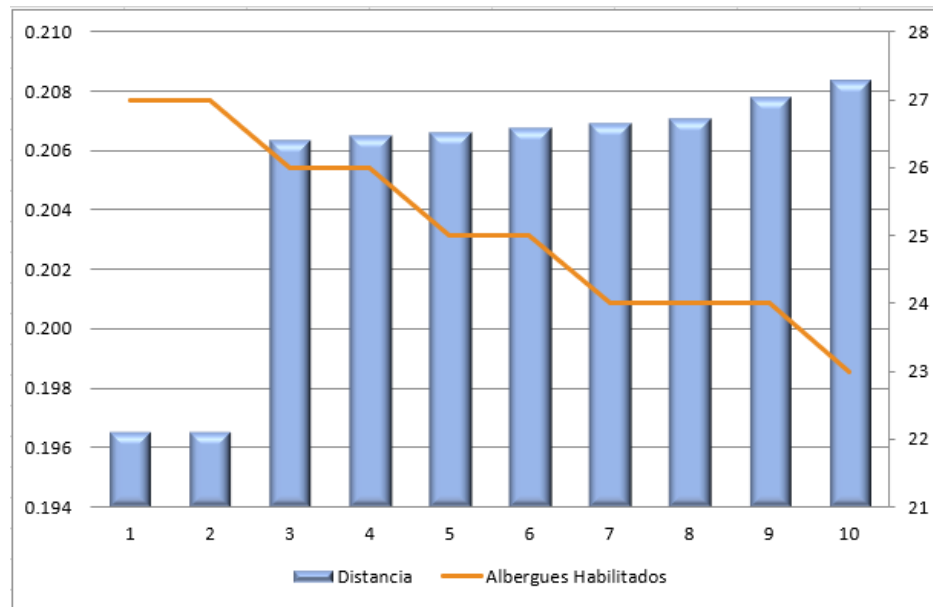


Figura 236. Cantidad de albergues habilitados y distancia recorrida por solución para la variación 6.

Como se puede observar en las figuras 20 a la 26 la distancia recorrida por los afectados hasta los albergues asignados es inversamente proporcional a la cantidad de albergues que se habilitan, es decir, a mayor cantidad de albergues habilitados menor será la distancia recorrida hasta la ubicación asignada; teniendo en cuenta que al obtener una mayor cantidad de albergues habilitados habrá mayor posibilidad de asignar a cada afectado a un albergue más cercano, y así, recorrer una menor distancia.

Se presenta en la tabla 8, el promedio de los albergues habilitados para cada una de las variaciones evaluadas en el modelo.

Tabla 8.
Promedio de albergues habilitados por variación.

Variación	Promedio albergues habilitados
Modelo base	54
Variación 1 (X2Y2)	36
Variación 2 (X3Y3)	13
Variación 3 (X1Y2)	21
Variación 4 (X2Y1)	43
Variación 5 (X2Y3)	43
Variación 6 (X3Y2)	25
PROMEDIO TOTAL	34

Nota: Adaptado de Python.

De la tabla anterior, se observa que el mayor número de albergues habilitados se presenta al evaluar el modelo base, seguido de las variaciones 4 y 5; en estas dos últimas se evalúa la función de promedio combinada con la función de sumatoria total y con la función del máximo valor en las variaciones 4 y 5 respectivamente, además de esto, se puede notar que en la variación 1 donde ambos objetivos se evalúan a través de la función de promedio se obtiene una cantidad de albergues habilitados superior al promedio de todas las variaciones. Con esto se concluye que la función de promedio (variación 1) presenta un punto medio en cuanto al número de albergues habilitados y en la misma medida el valor de la distancia en metros recorrida por los afectados en caso de ocurrencia de un desastre.

6.3 Análisis de los resultados del objetivo de minimización de la distancia

Las distancias que recorren los afectados desde cualquier manzana en donde se ubican hasta cualquier albergue van desde 0 hasta 16.000 metros.

Se presentan los resultados obtenidos para el objetivo de minimizar la distancia. Estos resultados se muestran en la figura 27 representados en un diagrama de cajas y bigotes para su posterior análisis.

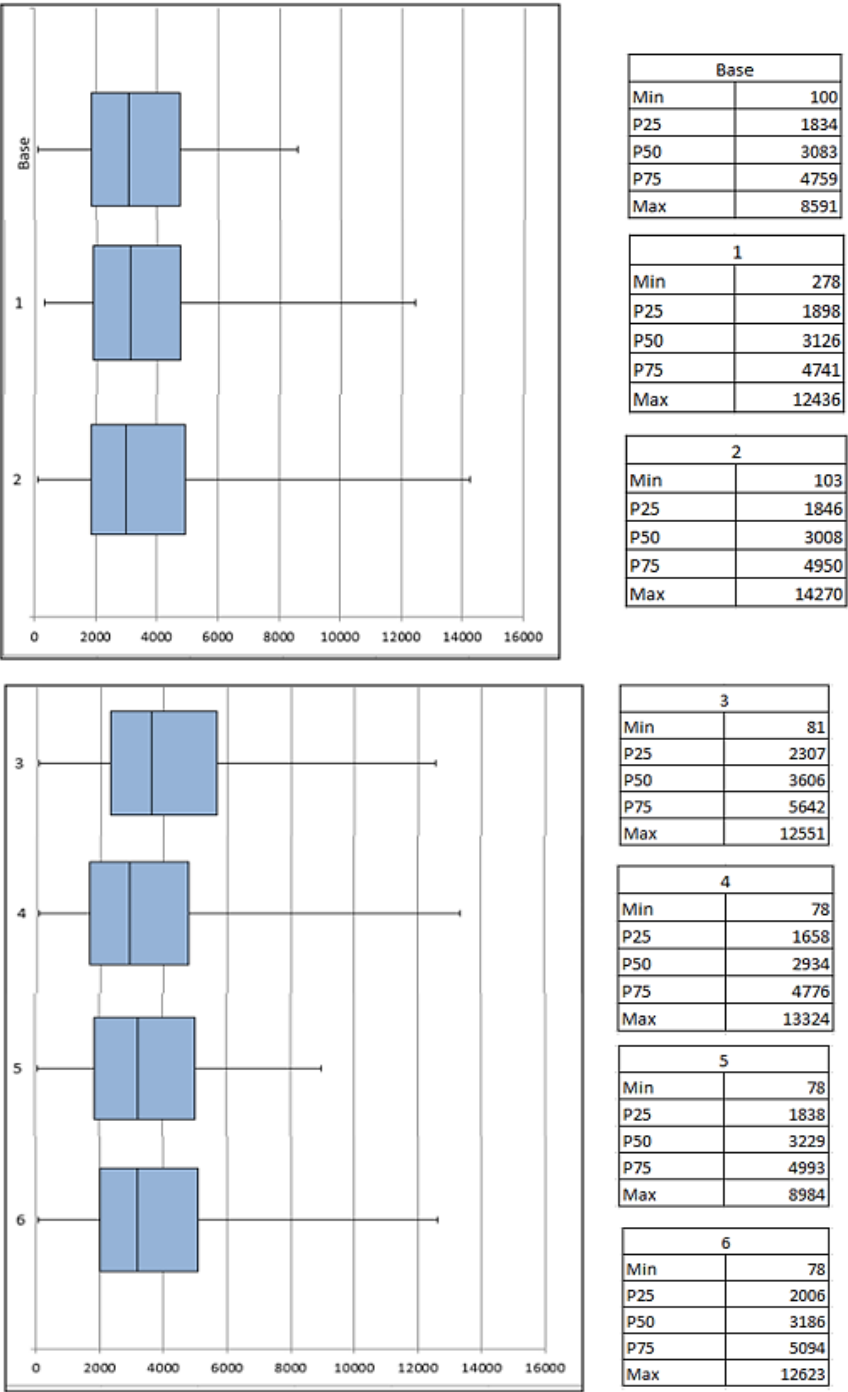


Figura 247. Diagrama de cajas y bigotes de los resultados de distancia recorrida por variación.

En la figura anterior se observa que la menor distancia recorrida para todos los casos sería de 78 metros, la mayor de 14.270 metros y el promedio varía entre 2900 y 3000.

Es evidente que la concentración de los datos de la distancia recorrida por los afectados hasta el albergue asignado se encuentra entre 2000 y 4000 metros, además podemos concluir, teniendo en cuenta los resultados mostrados en la tabla 8, que a mayor número de albergues habilitados menor es la distancia recorrida y viceversa; muestra de ello es la variación 2; en esta la cantidad de albergues se reduce y la distancia recorrida hasta los albergues se incrementa a pesar de que el número de personas atendidas es menor asociado a que la capacidad total de los albergues habilitados no es suficiente para atender a la toda la población afectada.

En el análisis de datos se puede asociar al modelo base con la variación 5, dado que esta última se aproxima a la primera con respecto a la mínima, al valor medio y a la máxima distancia con la diferencia de que el número de albergues es menor y se utilizan con mayor eficiencia los espacios destinados para cada persona en los albergues.

Existe gran diferencia entre las variaciones 4 y 5 a pesar de que, en ambas el número de albergues habilitados es el mismo, pero los albergues asignados son diferentes. Para ambos casos, la distancia se evalúa con la ecuación de promedios mientras que la vulnerabilidad, en la variación 4 es evaluada con la función de sumatoria total y en la variación 5 se enfoca en minimizar la máxima vulnerabilidad de los albergues lo que se ve representado finalmente en la distancia recorrida, la cual presenta un promedio menor para la variación 4.

6.4 Análisis de los resultados del objetivo de minimización de la vulnerabilidad

A continuación, se presentan en las figuras 28 a la 34 los resultados de la cantidad de albergues habilitados teniendo en cuenta de su nivel de vulnerabilidad, representados en un diagrama circular.

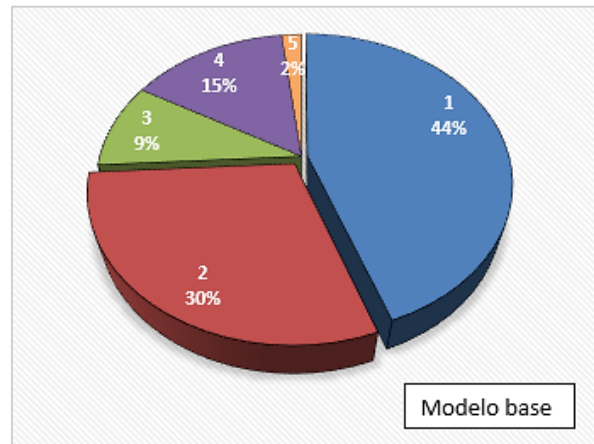


Figura 258. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para el modelo base.

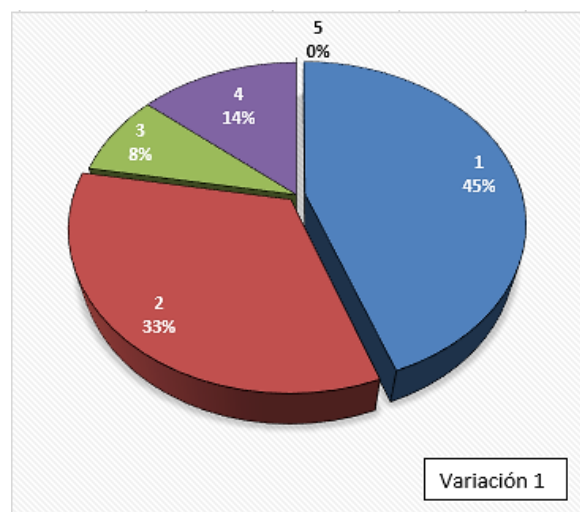


Figura 269. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 1.

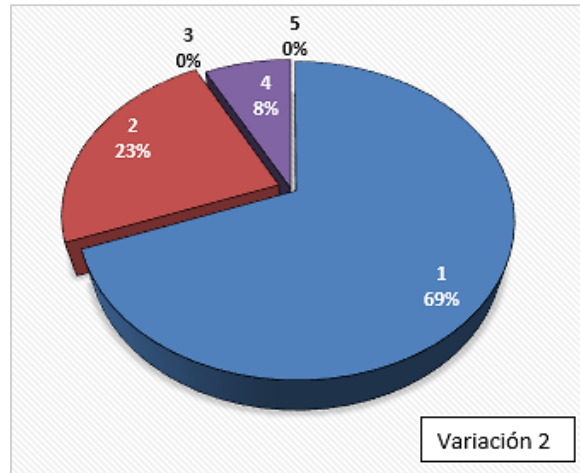


Figura 30. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 2.

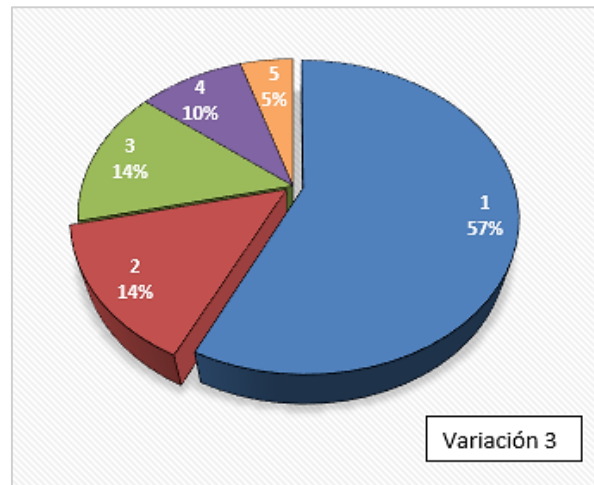


Figura 271. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 3.

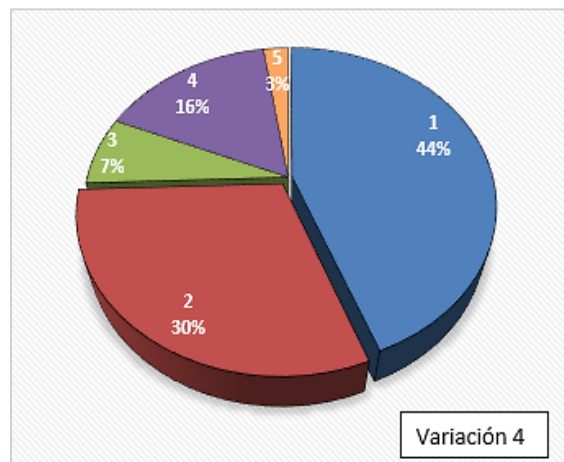


Figura 282. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 4.

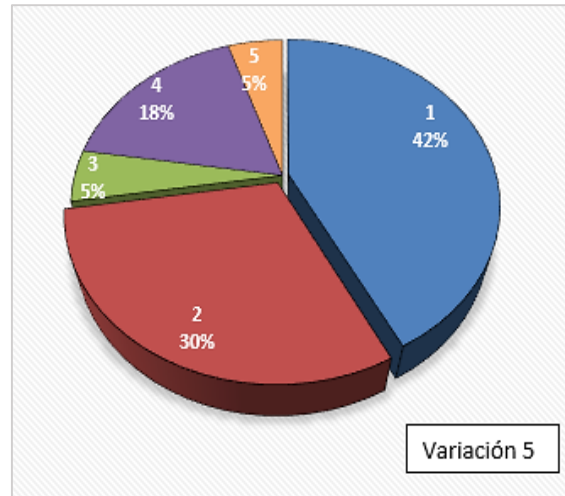


Figura 293. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 5.

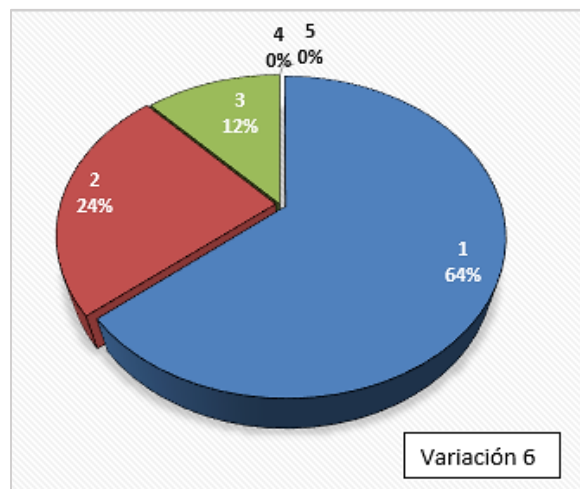


Figura 304. Cantidad de albergues habilitados por nivel de vulnerabilidad para la variación 6.

Del total de las figuras anteriormente mostradas se infiere que la mayoría de albergues habilitados están clasificados en un nivel de vulnerabilidad entre 1 y 2; son muy pocos los casos donde se habilitan albergues con vulnerabilidad 5 y en las variaciones donde se presentan estos no superan los 3 albergues del total que fueron habilitados.

7. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se toma de base un modelo de programación multiobjetivo planteado con anterioridad que contempla dos objetivos, la minimización de la distancia recorrida por los afectados hasta el albergue y la minimización de la vulnerabilidad de los albergues habilitados; con el fin de identificar funciones objetivo más apropiadas para el contexto de la gestión de desastres, se seleccionaron las funciones de promedio y del máximo valor, apoyadas en casos de estudio y literatura asociados a la gestión de desastres. Los resultados al final proporcionan un apoyo en la toma de decisiones relacionadas con la localización de albergues temporales y asignación de afectados en Bucaramanga.

A través de este documento se perciben los alcances y la importancia de la gestión de desastres, siendo parte fundamental de su fase de preparación la ubicación de albergues y asignación de afectados procurando que el desplazamiento hasta el albergue asignado sea el menor posible y su nivel de vulnerabilidad bajo.

Durante la revisión de la literatura no fue posible hallar suficiente documentación con respecto a la logística humanitaria y la gestión de desastres en el país a pesar de que es evidente el cambio climático y el aumento de desastres naturales alrededor del mundo, esto ocasiona un nivel de respuesta deficiente para la atención de afectados ante la ocurrencia de un desastre natural.

La implementación del código arrojó resultados que cumplen los objetivos propuestos para el modelo, los cuales son minimización de la distancia y de la vulnerabilidad. Comparando las diferentes variaciones del modelo se puede concluir que la variación 5, donde se evalúa para el objetivo de distancia la función promedio y para el objetivo de vulnerabilidad la función del máximo valor, presenta resultados favorables con respecto al modelo base, propuesto por Martínez

(2017), el cual es el punto de partida para asociar los resultados con mejor desempeño de los objetivos del modelo. Para los resultados de distancia en la variación 5 se obtuvo para el valor mínimo, promedio y valor máximo 78, 3.229 y 8.984 metros respectivamente, contando con un nivel de vulnerabilidad en promedio de 2 para los albergues habilitados.

Los resultados arrojados en todas las variaciones muestran valores para la distancia en promedio de 2000 y 3000 metros y la mayoría de los datos se concentra en un intervalo de entre 2000 y 6000 metros. Lo anterior se presenta teniendo en cuenta que se está implementado un modelo multiobjetivo el cual se enfoca en minimizar dos objetivos al tiempo, distancia y vulnerabilidad, esto conlleva a que los albergues habilitados sean en su mayoría los de menor nivel de vulnerabilidad y a su vez se intenta que las distancias recorridas hasta los albergues sean las menores posibles.

No es posible concluir que a mayor número de albergues habilitados se genere mejor asignación de los afectados, si algunos albergues habilitados quedan con mucha capacidad disponible y partiendo del hecho de que exista un caso hipotético de distribución de recursos a los albergues, los costos en transportar estos recursos se incrementarían al tener cubrir todos los albergues habilitados, si por el contrario se asignan afectados hasta alcanzar el tope de la capacidad de cada albergue se reducen los costos al tener que desplazarse hacia menos albergues.

8. Recomendaciones

En la actualidad son muy pocas las investigaciones desarrolladas por universidades colombianas respecto a temas relacionados con logística humanitaria y gestión de desastres, por lo que se hace necesario promover e incentivar desde las aulas de clase a los estudiantes y de esta manera elevar el número de investigaciones en este campo que servirían para el desarrollo de planes de gestión del riesgo en las zonas del país con mayor probabilidad de presentar desastres naturales.

La información recolectada en el presente proyecto puede ser utilizada en futuras investigaciones, en las cuales se podrá abarcar otros temas relacionados como tiempo de desplazamiento hasta los albergues, caracterización de los albergues, costo de transporte de recursos para la atención de afectados, entre otros afines.

El desarrollo del proyecto de investigación permite dar cuenta de que en estas áreas del saber en específico (Logística Humanitaria y Gestión de desastres) es posible el adelanto de nuevas investigaciones de caso mono-objetivo o multi-objetivo haciendo uso de métodos de optimización diferentes a epsilon-constraint, mejoras a las investigaciones ya planteadas e implementación de diferentes metaheurísticas y heurísticas, con el fin de mejorar los resultados y realizar grandes aportes en estos campos de investigación.

Extender investigaciones de gestión de desastres en el área metropolitana de Bucaramanga para casos diferentes como inundaciones, desplazamientos de tierras, entre otros, dados los antecedentes en desastres naturales en zonas como Girón y Floridablanca donde se han afectado gran cantidad de personas.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA). (2018). *www.fema.gov*.
- Ahuja, R., Orlin, J., Pallotino, S., Scaparra, M., & Scutella, M. (2002). A Multi-Exchange Heuristic for the Single Source Capacitated Facility Location Problem. *MIT Sloan Working*, 32.
- Aranda Pinilla, J. A., & Orjuela Castro, J. A. (2015). Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura. *Una revisión de la literatura. En Ingeniería*, 37-63.
- Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial Región de América Latina y el Caribe. (2012).
- Barzinpour, F., & Esmaeili, V. (2014). A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 5-8.
- Barzinpour, F., Saffarian, M., Makui, A., & Teimoury, E. (2014). Metaheuristic Algorithm for Solving Biobjective Possibility Planning Model of Location-Allocation in Disaster Relief Logistics. *Journal of Applied Mathematics*, 1-17.
- Becerra, A., & Hernández, A. (2016). Un Algoritmo Evolutivo para el Problema de Distribución de Recursos Humanos Pos- Desastre Sísmicos en la Ciudad de Bucaramanga. *Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Industrial*. Bucaramanga, Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Caramia, M., & Dell'Olmo, P. (2008). *Multi-objective Management in Freight Logistics*. Roma: Springer-Verlag London Limited.

Cárdenas Aguirre, D., & López Vargas, J. (2017). Gestión de la logística humanitaria en las etapas previas al desastre: revisión sistemática de la literatura. *Investig. Desarro. Innov. Vol. 7*, 203-216.

Cepeda, J. A. (2012). *Mejoramiento del proceso productivo de metálicas García*. Bucaramanga.

D., J. R. (s.f.). *Paritarios*. Obtenido de http://www.paritarios.cl/especial_las_5s.htm

DANE. (2012). Clasificación industrial internacional uniforme de todas las actividades económicas CIIU. Rev. 4. Bogotá.

Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos. (Septiembre de 2011). *Agencia Federal de Gestión de Emergencias de los Estados Unidos*. Obtenido de <https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1718-25045-3265/npg.pdf>

Dias, A., & de Vasconcelos, J. (2002). Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems. *IEEE Transactions on Magnetics*.

Gabriel. (2013). *Emprendices*. Obtenido de <https://www.emprendices.co/estrategia-de-las-5s-metodologia-mejorar-estacion-de-trabajo/>

Glosario de contabilidad - Gestión de inventarios. (s.f.). Obtenido de <https://debitoor.es/glosario/definicion-gestion-de-inventarios>

Haddow, G., Bullock, J., & Coppola, D. (2007). Introduction to emergency management. *Elsevier Science*.

Harrington, H. J. (1997). *Academia*. Obtenido de http://www.academia.edu/11065235/MEJORAMIENTO_DE_LOS_PROCESOS_DE_LA_EMPRESA_H.James_harrington

Holguín-Veras, J., Jaller, M., Van Wassenhove, L., Pérez, N., & Wachtendorf, T. (2012). On the Unique Features of Post-Disaster Humanitarian Logistics. *Journal of Operations Management*, 494-506.

Ingeniería industrial online - 5's. (s.f.). Obtenido de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/gestion-y-control-de-calidad/metodologia-de-las-5s/>

Ingeniería industrial online - Clasificación de inventarios. (s.f.). Obtenido de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/administraci%C3%B3n-de-inventarios/clasificaci%C3%B3n-de-inventarios/>

Ingeniería industrial online - Siete despilfarros. (s.f.). Obtenido de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/gesti%C3%B3n-y-control-de-calidad/los-siete-despilfarros-guia-para-eliminar-desperdicios/>

Kilci, F., Kara, B., & Bozkaya, B. (2015). Locating Temporary Shelter Areas after an Earthquake: A case for Istanbul. *European Journal of Operational Research*, 323-332.

Krajewski, L. J., & Ritzman, L. P. (2000). *Administración de operaciones: estratégica y análisis*, 5ta edición. Pearson education.

Li, H., Zhao, L., Huang, R., & Hu, Q. (2017). Hierarchical earthquake shelter planning in urban areas: A case for Shanghai in China. *Elsevier*, 16.

Logística y abastecimiento - Almacenamiento. (s.f.). Obtenido de <https://logisticayabastecimiento.jimdo.com/almacenamiento/>

Logística y abastecimiento - Gestión de inventarios. (s.f.). Obtenido de <https://logisticayabastecimiento.jimdo.com/gesti%C3%B3n-de-inventarios/>

López, J. (2013). Optimización Multi-objetivo. Aplicaciones a problemas del mundo real. 43.

Martínez Quezada, D. O. (2017). Diseño de un sistema de apoyo a la toma de decisiones - DSS para la gestión de las etapas pre-desastre de sismos en Bucaramanga, basado en técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning).

Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective. *Applied Mathematics and Computation*, 455-465.

Mirzapour, A., Wong, K., & Govindan, K. (2013). A Capacitated Location-Allocation Model for Flood Disaster Service Operations with Border Crossing Passages and Probabilistic Demand Locations. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-11.

Moreno, A. E., & Cáceres, Y. A. (2015). *Mejoramiento de los procesos logísticos de la empresa J'S servipetrol LTDA*. Bucaramanga.

Moreno, A., Ferreira, D., & Alem, D. (2016). Modelo biobjetivo para el problema de localización de centros de auxilio y distribución de productos en situaciones de respuesta a desastres. *DYNA*, 356-366.

Nolz, P., Doerner, K., & Hartl, R. (2010). Water distribution in disaster relief. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 693-708.

Ortega, G. P., & Camargo, A. M. (2005). *Propuesta metodológica para el mejoramiento de procesos utilizando el enfoque Harrington y la Normal ISO 9004*.

- Osorio Muriel, A., Brailsford, S., & Smith, H. (2014). Un modelo de optimización bi-objetivo para la selección de tecnología y asignación de donantes en la cadena de suministro de sangre. *Sistemas y Telemática*, 9-24.
- Pérez Galarce, F., Canales, L., Vergara, C., & Candia Véjar, A. (2016). An optimization model for the location of disaster refuges. *Elsevier*, 11.
- Pérez-Galarce, F., Canales, L. J., Vergara, C., & Candia-Véjar, A. (2016). An optimization model for the location of disaster refuges. *Elsevier*, 11.
- Pico, G. O., & Vilorio, R. A. (2011). *Mejoramiento de los procesos productivos y logísticos en la fábrica de lubricantes Terpel S.A.* Bucaramanga.
- Pimiento, N. R. (2004). Análisis y mejoramiento de los procesos de la empresa. En N. R. Pimiento, *Análisis y mejoramiento de los procesos de la empresa*. Bucaramanga.
- Pimiento, N. R. (2014). *Técnicas básicas para el análisis y mejoramiento de la productividad en procesos de manufactura*. Bucaramanga.
- Pimiento, N. R., & Hernández, E. A. (2007). *Mejorando la productividad en procesos de manufactura - Guía práctica para el mejoramiento*. Bucaramanga .
- Prabowo, A. R., Dwicahyani, A. R., Jauhari, W. A., Aisyati, A., & Laksono, P. W. (2017). Development and application of humanistic logistics models for optimizing location-allocation problem solutions to volcanic eruption disaster, Case study: Volcanic eruption of Mount Merapi, Indonesia. *Cogent Engineering*.

- Rodríguez Espíndola, O., Albores, P., & Brewster, C. (2017). Disaster preparedness in humanitarian logistics: A collaborative approach for resource management in floods. *ELSEVIER*, 16.
- Sebatli, A., Cavdur, F., & Kose-Kucuk, M. (2017). Determination of relief supplies demands and allocation of temporary disaster response facilities. *Transportation Research Procedia*, 245-254.
- Shahparvari, S., Chhetri, P., Abareshi, A., Abbasi, B., & Alahakoon, D. (2015). Multi-Objective Decision Analytics for Short-Notice Bushfire Evacuation: An Australian Case Study. *Australasian Journal of Information Systems*, 133-151.
- Slide Share - Almacenamiento en logística. (2012). Obtenido de <https://es.slideshare.net/jimmytovarmorales/almacenamiento-en-logistica>
- Sociedad Nacional de la Cruz Roja Colombiana. (2008). *Cruz Roja Colombiana*. Obtenido de http://web.cruzrojacolombiana.org/publicaciones/pdf/manual_final_albergues_temporales_1912011_035711.pdf
- Torres Quijano, C. A., & Pulido Montaña, D. F. (2018). Selección de zonas óptimas para localización de plantas fotovoltaicas como apoyo a red de alumbrado público en la Provincia de Soto a partir de un modelo de programación multiobjetivo.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia. (2015). *Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Colombia*. Obtenido de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/PNGRD-2015-2025-Version-Preliminar.pdf>

- Vargas, C. (10 de Marzo de 2015). Vivir en La Mesa de Los Santos, el segundo nido sísmico del mundo. *El Tiempo*, pág. párr.4.
- Veerapen, N., Ochoa, G., Harman, M., & Burke, E. (2015). An Integer Linear Programming approach to the single and bi-objective Next Release Problem. *Information and Software Technology*, 1-13.
- Web of Science. (2018). *login.webofknowledge.com*.
- Zapata Martí, R. (2006). Los efectos de los desastres en 2004 y 2005: La necesidad de adaptación de largo plazo. *CEPAL - Serie Estudios y Perspectivas*.
- Zen en la organización. (2009). Obtenido de <https://zenempresarial.wordpress.com/2009/12/24/las-5-s%C2%B4s-seiso-o-limpieza/>
- Zhao, X., Xu, W., Ma, Y., Qin, L., Zhang, J., & Wang, Y. (2017). Relationships Between Evacuation Population Size, Earthquake Emergency Shelter Capacity, and Evacuation Time. *International Journal of Disaster Risk Science*, 457-470.