

**UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN MULTIOBJETIVO EN LA FASE DE  
PREPARACIÓN PARA DESASTRES POR SISMOS EN LA CIUDAD DE  
BUCARAMANGA**

**MARÍA ALEJANDRA CONTRERAS ARÉVALO  
ANDREA CRISTINA MARTINEZ GALVIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN MULTIOBJETIVO EN LA FASE DE  
PREPARACIÓN PARA DESASTRES POR SISMOS EN LA CIUDAD DE  
BUCARAMANGA.**

**MARÍA ALEJANDRA CONTRERAS ARÉVALO  
ANDREA CRISTINA MARTINEZ GALVIS**

**Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial**

**Director**

**HENRY LAMOS DIAZ**

**Ph.D. Fisica - Matematica**

**Codirectora**

**KARIN JULIETH AGUILAR IMITOLA**

**Ingeniera Industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

*A Dios por permitirme seguir el camino. A mi esposo Francisco Javier y mis hijos Azul y Celeste, por su paciencia y comprensión. A mi compañera Maria Alejandra por su valentía. Y a toda mi familia por su gran apoyo.*

**Andrea C. Martínez**

*A Dios por sus infinitas bendiciones.*

*A mi familia, por siempre estar acompañándome. A mi abuela por su inmenso apoyo, a Eliana por escucharme siempre y a mi hijo que lo es todo en mi vida.*

*A todas las personas que con su colaboración y apoyo hicieron posible este proyecto.*

*A mis amigos de luchas y alegrías gracias por hacer parte de mí.*

*A Fabián, por su compañía y apoyo, gracias por mostrarte siempre nuevas formas de ver la vida.*

**María Alejandra Contreras Arévalo**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	18
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	21
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	22
1.3 OBJETIVOS	24
1.3.1 Objetivo general	24
1.3.2 Objetivos específicos	24
1.4 METODOLOGÍA	25
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	28
3. MARCO TEÓRICO	42
3.1 LOGÍSTICA HUMANITARIA	42
3.1.1 Desastres	43
3.1.2 Principales efectos de los desastres	44
3.1.3 Instalaciones	44
3.1.4 Albergues Temporales	46
3.1.4.1 Propósito	46
3.1.4.2 Definición	46
3.1.4.3 Tipos de Albergues Temporal	46
3.1.4.4 Variables de localización y funcionamiento	47

3.1.4.5 Variables de duración	48
3.2 PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN MULTIOBJETIVO	49
3.2.1 Problemas de cobertura	51
3.3 OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA	52
3.4 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL	54
3.5 MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA	55
3.5.1 Algoritmos Exactos	56
3.5.2 Algoritmos Heurísticos	56
3.5.3 Heurísticas constructivas	56
3.5.4 Métodos de búsqueda local	56
3.5.5 Algoritmo metaheurísticos	57
3.6 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA	57
3.6.1 Programación genética	58
3.6.2 Programación evolutiva	59
3.6.3 Estrategia evolutiva	60
3.6.4 Algoritmos Genéticos	60
3.6.5 Elementos de un Algoritmo Genético	61
4. CONSTRUCCIÓN DE LA RED DE INSTALACIONES Y CLIENTES	64
4.1 CONJUNTO DE ALBERGUES	64
4.2 CONJUNTO DE CLIENTES	67
5. PROPUESTA DE ALGORITMO EVOLUTIVO PARA LA LOCALIZACIÓN MULTIOBJETIVO	72
5.1 NSGA II	74

5.1.1 Funcionamiento del algoritmo NSGA II	75
6. DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO	80
7. IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE ALBERGUES	83
7.1 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL	83
7.1.1 Codificación de las soluciones.	83
7.1.2 Población Inicial $P_i$	85
7.1.3 Cruce	85
7.1.4 Mutación	86
7.2 ALGORITMO NSGA II	87
8. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO	89
9. ANÁLISIS DE ESCENARIOS	96
10. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	115
11. RECOMENDACIONES	116
BIBLIOGRAFÍA	117

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Áreas de intervención en la cadena de socorro	45
Figura 2. Representación de las instalaciones y los nodos de demanda	54
Figura 3. Principales componentes de la programación evolutiva	59
Figura 4. Diagrama de flujo de un algoritmo Genético	63
Figura 5. Ubicación de albergues potenciales en la ciudad.	66
Figura 6. Plano de la zonificación sísmica de la ciudad de Bucaramanga	68
Figura 7. Ubicación de nodos clientes.	69
Figura 8. Espacio objetivo factible y frente óptimo de Pareto en una función con dos objetivos	74
Figura 9. Selección de individuos del NSGA II	76
Figura 10. Seudocódigo algoritmo clasificación no dominada	77
Figura 11. Estimación de distancia de hacinamiento.	77
Figura 12. Seudocódigo algoritmo de distancia de hacinamiento.	78
Figura 13. Diagrama de Flujo del Algoritmo NSGA II	79
Figura 14. Ejemplo de la representación binaria para problemas de localización.	84
Figura 15. Ejemplo de representación entera para problemas de localización.	84
Figura 16. Cruce uniforme	86
Figura 17. Ejemplo operador de mutación con intercambio de asignación.	87
Figura 18. Tamaño de población	90
Figura 19. Número de Generaciones	91
Figura 20. Probabilidad de Cruce	91
Figura 21. Cumplimiento de capacidad	92
Figura 22. Frente de Pareto de la Instancia 1	93
Figura 23. Frente de Pareto de la Instancia 2	94

Figura 24. Frente de Pareto de la Instancia 3	94
Figura 25. Mapa de zonas	97
Figura 26. Daño general de la ciudad de Bucaramanga por intensidad sísmica.	99
Figura 27. Porcentaje de daño por zonas	103
Figura 28. Nodos de demanda de la Comuna 12	104
Figura 29. Frente de Pareto 1	105
Figura 30. Frente de Pareto 2	105
Figura 31. Solución gráfica	114

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Trabajo de los autores en logística humanitaria	35
Tabla 2. Crecimiento poblacional estimado	70
Tabla 3. Información por Comunas	71
Tabla 4. Resumen del Desempeño	95
Tabla 5. Comunas pertenecientes a cada zona según estudio de vulnerabilidad.	98
Tabla 6. Barrios pertenecientes a cada comuna afectada.	100
Tabla 7 . Resumen de Parámetros NSGA II	104
Tabla 8. Resultados para la generación de 1200 individuos	106
Tabla 9. Resultados para la generación de 2000 individuos	107
Tabla 10. Albergues habilitados	107
Tabla 11. Información de los albergues	109

## LISTA DE ANEXOS<sup>1</sup>

ANEXO A. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

ANEXO B. CAPACIDADES DE LAS INSTALACIONES

ANEXO C. INSTANCIAS

ANEXO D. MATRIZ DE DISTANCIAS

ANEXO E. ALGORITMO EN MATLAB

ANEXO F. ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

---

<sup>1</sup> Ver documentos adjuntos en el CD-ROM

## RESUMEN

**TITULO:** “UN PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN MULTIOBJETIVO EN LA FASE DE PREPARACIÓN PARA DESASTRES POR SISMOS EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA”<sup>\*</sup>

**AUTORES:** CONTRERAS ARÉVALO, María Alejandra  
MARTINEZ GALVIS, Andrea Cristina<sup>\*\*</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Logística humanitaria, modelos de optimización, ubicación y selección de albergues, problema de localización de instalaciones, optimización multicriterio, algoritmo evolutivo.

### DESCRIPCIÓN:

Este trabajo presenta una optimización multiobjetivo a través de un algoritmo elitista NSGAII para el problema de localización de albergues temporales en la fase de preparación para desastres por sismos en la ciudad de Bucaramanga. El diseño del modelo matemático incluyó la minimización de la distancia recorrida por la población afectada a los albergues y la maximización de la mínima utilización de la capacidad de los albergues, buscando garantizar mayor cobertura en el servicio. Se desarrolló un escenario de aplicación con datos estimados según un sismo de intensidad 6 en la escala de Richter; mediante la construcción de una red de instalaciones y clientes y de esta forma generar una primera aproximación a la solución del problema. Este trabajo presenta una optimización multiobjetivo a través de un algoritmo elitista NSGAII para el problema de localización de albergues temporales en la fase de preparación para desastres por sismos en la ciudad de Bucaramanga. El diseño del modelo matemático incluyó la minimización de la distancia recorrida por la población afectada a los albergues y la maximización de la mínima utilización de la capacidad de los albergues, buscando garantizar mayor cobertura en el servicio. Se desarrolló un escenario de aplicación con datos estimados según un sismo de intensidad 6 en la escala de Richter; mediante la construcción de una red de instalaciones y clientes y de esta forma generar una primera aproximación a la solución del problema.

---

<sup>\*</sup> Proyecto de Grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.  
Director: PhD. Henry Lamos Díaz. Codirectora: Ing. Industrial Karin Aguilar Imitola

## ABSTRACT

**TITLE:** “MULTIOBJECTIVE LOCATION PROBLEM IN DISASTER PREPAREDNESS PHASE FOR EARTHQUAKES IN THE CITY OF BUCARAMANGA”<sup>\*</sup>

**AUTHORS** CONTRERAS ARÉVALO, María Alejandra  
MARTINEZ GALVIS, Andrea Cristina<sup>\*\*</sup>

**KEYWORDS** Humanitarian logistics, optimization models, location, shelter site selection, facility location problem, multi-criteria optimization, evolutionary algorithm.

### DESCRIPTION

This project presents a multi-objective optimization through an elitist NSGAII algorithm for the location problem of temporary shelters in the phase of disaster preparedness for earthquakes in the city of Bucaramanga. The design of the mathematical model included minimizing the distance traveled by the affected population to shelters and maximizing of the minimum capacity utilization of shelters, seeking to ensure maximum coverage in the service. A scenario application was developed by an earthquake estimated intensity 6 on Richter scale data; by building a network of facilities and customers and thus generate a first approach to solving the problem. This project presents a multi-objective optimization through an elitist NSGAII algorithm for the location problem of temporary shelters in the phase of disaster preparedness for earthquakes in the city of Bucaramanga. The design of the mathematical model included minimizing the distance traveled by the affected population to shelters and maximizing of the minimum capacity utilization of shelters, seeking to ensure maximum coverage in the service. A scenario application was developed by an earthquake estimated intensity 6 on Richter scale data; by building a network of facilities and customers and thus generate a first approach to solving the problem. by building a network of facilities and customers and thus generate a first approach to solving the problem.

---

<sup>\*</sup> Project of grade

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.  
Director: PhD. Henry Lamos Díaz. Codirectora: Ing. Industrial Karin Aguilar Imitola.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad es posible evidenciar el incremento de fenómenos naturales que azotan las diferentes poblaciones del mundo. El crecimiento acelerado de la población y la masiva urbanización que de ésta se deriva, conllevan a faltas de planificación que ponen en riesgo la integridad de los habitantes e incrementan su vulnerabilidad ante los eventuales desastres que se puedan llegar a presentar.

Los desastres naturales son impredecibles. Se pueden tener registros de sus ocurrencias, el tiempo, duración y magnitud con las que se presentan, pero estos datos solo constituyen estimaciones a posteriores desastres con gran margen de incertidumbre. Por esta razón, en la actualidad surge el concepto de gestión del riesgo de desastre, que está entendido como el conjunto de políticas, instrumentos y medidas orientadas a reducir los efectos adversos de fenómenos peligrosos<sup>2</sup>. Entre sus etapas más importantes están la prevención, mitigación y preparación para los desastres, los cuales permiten contar con una respuesta oportuna y eficaz al momento de una eventualidad.

La preparación para enfrentar un desastre enmarca varias consideraciones de tipo logístico y humanitario; los alojamientos temporales son uno de ellos, ya que constituyen el lugar donde se les dará protección a los damnificados y su ubicación debe ser estratégica, fuera de peligro. Actualmente existen en la literatura, modelos en investigación operativa que hacen posible modelar la ubicación de dichos alojamientos, como el modelo operacional del Problema de

---

<sup>2</sup> MATURANA, Alberto. Evaluación de riesgos y gestión en desastres. 10 preguntas para la década actual. Revista Médica Clínica Las Condes. 2011, Vol 22, p. 545-555.

Localización de Instalaciones, el cual podrá proporcionar los lugares más aptos para albergues y atender a cabalidad las necesidades de los damnificados.

Colombia es un país que está ubicado en una zona que posee diversas amenazas naturales y los desastres se han presentado afectando seriamente a la población. La ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander, tiene una alta actividad sísmica debido a su ubicación; por lo tanto, el riesgo de desastre por sismo es alto y es importante señalar que la preparación para la ocurrencia de estos eventos es clave para reducir y mitigar los daños en la población vulnerable.

Esta investigación pretende planificar la ubicación de alojamientos temporales en la etapa de preparación de desastres por sismo, solucionando el problema de localización de instalaciones a través del diseño y construcción de un algoritmo evolutivo; con el propósito de proporcionar una respuesta adecuada en el momento en que se presente un evento en la ciudad de Bucaramanga.

<b>CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS</b>	
<b>OBJETIVO ESPECÌFICO</b>	<b>NUMERALES RELACIONADOS</b>
Revisar la literatura sobre logística humanitaria y modelos para su representación	<b>3.1</b>
Revisar la literatura existente sobre planes locales de emergencia en Latinoamérica.	<b>3.1</b>
Construir la red de instalaciones y clientes de posibles albergues.	<b>4</b>
Desarrollar un algoritmo evolutivo para la solución del problema multiobjetivo de localización	<b>7</b>
Implementar en Matlab el algoritmo construido para la solución del problema multiobjetivo de localización.	<b>Anexo 5</b>
Validar el algoritmo para medir su desempeño computacional.	<b>8</b>
Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos de la investigación realizada.	<b>Anexo 6</b>

## 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia se presentan un gran número de fallas sísmicas debido a su ubicación; en particular la ciudad de Bucaramanga es considerada como una región de alta amenaza sísmica porque confluye el movimiento de las placas tectónicas de la cordillera oriental que la hacen propensa a fenómenos de origen geológico. El Nido Sísmico que afecta a Bucaramanga se encuentra localizado a unos 35 Km. al sur de la ciudad, en el área de la Mesa de los Santos a una profundidad de 160 Km., donde chocan la placa tectónica de Nazca, la placa Continental de Suramérica y la placa del Caribe, las cuales afectan con su activación continua, la generación de micro–temblores y temblores de baja intensidad el área del Municipio de Bucaramanga.<sup>3</sup>

Después de los terremotos que han ocurrido durante el 2010 al 2015 (Haití, Chile, India) hay preocupación e incertidumbre de si algo similar pudiera ocurrir en Bucaramanga. Pero en la ciudad hay pocos elementos técnicos debidamente documentados que definan con cierto nivel de confiabilidad la magnitud de esta amenaza. Además, durante los últimos años se ha acrecentado la vulnerabilidad de numerosos barrios por la masiva urbanización sin planificación, en viviendas mal construidas y terrenos no apropiados, exponiendo a sus habitantes, generalmente de bajos ingresos, a amenazas naturales y poniéndolos en peligro inminente.

---

<sup>3</sup> INGEOMINAS. Mapas. [en línea] Disponible en: <http://www.ingegominas.gov.co>.

En virtud de lo anterior, se hace necesaria una adecuada estrategia en gestión del riesgo ya que los daños físicos y el impacto social en la población, podrían reducirse en gran medida, si la ciudad está preparada.

Con el propósito de apoyar la toma de decisiones en el ámbito logístico dentro de esta gestión, existe la planificación estratégica de localización de albergues de emergencia ante un desastre natural para disponer de lugares previamente capacitados y definidos para este fin. Así, el problema abordado en esta investigación es localizar los albergues temporales necesarios según una determinada población afectada por un desastre, en este caso sismo, utilizando un modelo matemático como una representación cercana a la realidad, que permita a los habitantes estar preparados y mitigar los daños tanto económicos como sociales que un desastre sísmico pueda llegar a causar.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

Los desastres naturales son impredecibles, ya que por su naturaleza se encuentran fuera del control humano. La planificación para la atención de estos desastres se convierte en una necesidad fundamental enfocada a salvaguardar las vidas humanas y minimizar el impacto socioeconómico y ambiental.

Colombia se encuentra ubicada en una zona sismológicamente activa, ya que convergen la Placa de Nazca, la Placa Suramericana y la Placa del Caribe; la interacción de éstas, da lugar a una actividad sísmica y volcánica frecuente y persistente en el territorio colombiano. Según un estudio realizado en el año 2012 por el Banco Mundial y el Fondo Mundial para la Reducción y Recuperación de Desastres, el 87% de colombianos se encuentran en zona de amenaza sísmica.

La ciudad de Bucaramanga se encuentra ubicada en una región con alto grado de amenaza por sismos, debido a que varias fallas regionales (Santa Martha-Bucaramanga, Suárez y Surata) convergen en el municipio. Por esta razón se hace necesario contar con un plan local de emergencias que permita dar una respuesta adecuada y eficaz al momento que se presente un desastre por sismos en la ciudad.

La existencia e implementación de un plan local de emergencia que contemple la preparación para la ocurrencia de un posible desastre, requiere del diseño y construcción de un programa complejo en el cual se definirían las diferentes actividades enfocadas a disminuir el impacto de la catástrofe, entre las cuales se destaca la localización estratégica de albergues temporales para las víctimas.

Los albergues temporales son espacios abiertos o cerrados, permanentes o adaptados, cuya función principal es dar alojamiento y bienestar a las víctimas de una emergencia o desastre, deben proteger contra el calor, frío, viento y lluvia, y garantizar la seguridad emocional y física de los usuarios.

Según la búsqueda y revisión de diferentes planes locales de emergencia, en las ciudades de Cali, Bogotá, y Medellín, se destaca la localización de estos albergues tomando como punto de partida instituciones educativas, iglesias, sedes sociales y lugares aledaños. En contraste con la ciudad de Bucaramanga, la inexistencia de criterios y falta de definición para la localización de estos sitios, amerita la creación y el diseño de una herramienta computacional que sirva para encontrar la ubicación idónea de los albergues temporales que requerirá el plan local de emergencia de la ciudad.

En este sentido se hace viable e importante el presente trabajo de investigación desde la Ingeniería Industrial, por ser ésta una disciplina significativa en sus aportes para el estudio, diseño y construcción de un algoritmo que permita obtener

una solución que mejore la localización de éstas instalaciones, aplicado al contexto de logística humanitaria.

La comprensión alcanzada con este trabajo investigativo permitirá aportar elementos prácticos, funcionales y eficaces a la hora de tomar decisiones estratégicas, en la construcción de planes locales de emergencia, beneficiando a la sociedad en general, permitiéndole disponer de recursos previamente localizados y adaptados, con el fin de mitigar el daño físico y emocional que un desastre de este tipo pueda llegar a causar.

Del mismo modo, esta investigación fortalecerá desde el grupo de investigación de la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales OPALO, el desarrollo de una nueva línea de investigación en la optimización de logística humanitaria.

### **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general** Desarrollar un algoritmo evolutivo para la solución del problema multiobjetivo de localización de albergues.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Revisar la literatura sobre logística humanitaria y modelos para su representación.
- Revisar la literatura existente sobre planes locales de emergencia en Latinoamérica.
- Construir la red de instalaciones y clientes de posibles albergues.

- Desarrollar un algoritmo evolutivo para la solución del problema multiobjetivo de localización.
- Implementar en Matlab el algoritmo construido para la solución del problema multiobjetivo de localización.
- Validar el algoritmo para medir su desempeño computacional.
- Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos de la investigación realizada.

## 1.4 METODOLOGÍA

### Fase 1. Revisión Bibliográfica

- Seleccionar de la bibliografía existente en bases de datos (*Springer Link, Elsevier, Proquest, Scopus, Web of Science entre otras*), información sobre logística humanitaria y modelos para su representación, para lograr una mayor comprensión del tema a estudiar a través de la investigación de diferentes autores.
- Recopilar información de diferentes fuentes (*internet, alcaldía, manuales, normas, leyes, etc.*), sobre planes locales de emergencia en Latinoamérica en general, y específicamente en Colombia, para comprender la forma en que estos países gestionan el riesgo.
- Identificar en la literatura el uso de diferentes métodos de investigación operativa para la solución del problema de localización de albergues temporales en caso de desastres.

## **Fase 2. Construcción de la red de instalaciones de posibles clientes.**

- Establecer los criterios de selección de instalaciones para los diferentes sitios candidatos (*colegios, escuelas, instalaciones deportivas, etc.*), en la ciudad de Bucaramanga, con apoyo de la información que puedan proporcionar diferentes estudios (*zonificación sísmica, plan y estrategia municipal para la gestión del riesgo, materiabilidad de viviendas, entre otras*).
- Elegir el método más adecuado para modelar la distancia de los nodos en la red e identificar los nodos de demanda y oferta.
- En un mapa de la ciudad de Bucaramanga, representar la red de instalaciones de posibles clientes.

## **Fase 3. Estudiar el algoritmo**

- Comprender las bases y fundamentos teóricos del algoritmo evolutivo.

## **Fase 4. Formular modelo matemático**

- Determinar los objetivos, parámetros, variables y restricciones del problema de localización.
- Construir el modelo matemático para la localización de albergues temporales.

## **Fase 5. Diseñar el algoritmo.**

- Construir el algoritmo evolutivo para la solución del problema de localización de instalaciones en la fase de preparación por sismos en la ciudad de Bucaramanga.

### **Fase 6. Implementar el algoritmo.**

- Conocer y estudiar el funcionamiento del lenguaje de programación Matlab, para implementar el algoritmo diseñado.
- Ejecutar el programa y verificar los resultados de acuerdo a los parámetros del modelo, restricciones y objetivos planteados, para ajustarlo en caso de ser necesario.

### **Fase 7. Validar el algoritmo.**

- Crear un escenario de desastre por sismo en la ciudad de Bucaramanga y validar el modelo según la coherencia de sus resultados.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En los últimos tiempos, el mundo, debido a sus constantes cambios tanto naturales como los provocados por el hombre, se ha visto azotado por innumerables desastres naturales. La IFRC<sup>4</sup> define un desastre como "un acontecimiento repentino, calamitoso que interrumpe seriamente el funcionamiento de una comunidad o la sociedad y causa pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, que exceden la capacidad de la comunidad o sociedad para adaptarse usando sus propios recursos".

Después de un desastre a gran escala, las personas deben intentar seguir con sus vidas, para esto deben efectuar una serie de actividades y el gobierno debe hacer frente a las necesidades de la población afectada. Las operaciones de desastre, según la definición de Altay y Green<sup>5</sup>, representan el conjunto de actividades realizadas antes, durante y después de un desastre con el fin de disminuir su impacto.

Es ahí donde este conjunto de acciones toma su nombre, logística de emergencia o logística humanitaria, Sheu<sup>6</sup> la define como el proceso de planificación, gestión y control del flujo de los recursos para proporcionar alivio a las personas afectadas. Así como la logística empresarial debe enfrentar varios retos, según Balcik y Beamon<sup>7</sup>, la logística humanitaria debe superar los siguientes desafíos:

---

<sup>4</sup> INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES. IFRC.: What is a Disaster?, 2012. Disponible en línea en: <http://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/about-disasters/what-is-a-disaster/>.

<sup>5</sup> ALTAY, N.; GREEN, W.G. OR/MS Research in disaster operations management. European Journal of Operational Research, 2006, Vol 175, No 1, p. 475–493.

<sup>6</sup> SHEU JB. Challenges of emergency logistics management. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2007, Vol 43, No 6, p. 655.

- Incertidumbres adicionales (rutas inutilizables, seguridad, capacidades de las instalaciones, incertidumbres de la demanda).
- Comunicación y coordinación (daños a las líneas de comunicación, participación terceros, el gobierno y la población civil, la inaccesibilidad a la información precisa de la demanda en tiempo real).
- Prestación eficiente y oportuna.
- Recursos limitados (suministro, gente, capacidad de transporte, combustible).

Las operaciones esenciales de la logística de emergencia, para lograr dar una atención rápida y eficaz a las zonas afectadas por los desastres, pueden dividirse en tres etapas<sup>8</sup> :

1. **Preparación o prevención:** Esta etapa busca identificar lugares seguros para alojar a la población afectada y cubrir sus necesidades básicas (alimentación, salud y hospedaje) durante el desastre. Dentro de las actividades que se realizan en esta etapa se encuentran: la ubicación de albergues y centros de distribución, la definición de un inventario pre-posicionado y la especificación de rutas para evacuar a la población y transportar suministros.
2. **Respuesta al desastre:** Esta etapa incluye actividades que se realizan una vez que se presenta el desastre. Estas son: Toma de decisiones con información incompleta, alerta de evacuación, preparación de recursos para atender a la población y coordinación de acciones.

---

<sup>7</sup> BALCIK B.; BEAMON, B.M. Facility location in humanitarian relief. International Journal of Logistics: Research and Applications, 2008, Vol 11, No 2, p. 101.

<sup>8</sup> WASSENHOVE, L. N. Blackett memorial lecture. Humanitarian and logistics: supply chain management in high gear, Journal of the Operational Research Society, 2006, Vol. 57, p. 475- 489.

3. **Reconstrucción:** Esta última etapa se inicia una vez que terminan las operaciones de ayuda, y su objetivo es asistir a los individuos para que se reintegren a sus actividades normales lo más pronto posible.

Este proyecto está enfocado esencialmente en la etapa de preparación de la logística de emergencia. Dentro de esta etapa hay una actividad destacada que es la ubicación de albergues o refugios temporales, ya que generalmente al ocurrir un desastre de gran magnitud un considerable número de personas queda sin hogar y se deben establecer zonas de refugio especialmente diseñadas para abastecer las necesidades primarias de la población afectada hasta que se complete el proceso de reconstrucción de desastre.

Varias organizaciones humanitarias como la Media Luna Roja y el Movimiento de la Cruz Roja, iniciaron un proyecto en el año 1997 para mejorar la calidad de las operaciones humanitarias posteriores a los desastres llamado Proyecto Esfera<sup>9</sup>. La filosofía se basa en dos principios:

- La población afectada tiene el derecho a vivir con dignidad y recibir la asistencia necesaria.
- Siempre que el sufrimiento humano sea causado por un desastre o conflicto, se debe tomar cualquier acción necesaria para suprimirla.

Esta publicación es una importante fuente de información en el sector humanitario, ya que es el documento más completo que define los estándares de las operaciones de socorro humanitario, compilado por las organizaciones con más experiencia en el sector.

---

<sup>9</sup> SPHERE PROJECT. Sphere Project Humanitarian Charter and Minimum Standards in Disaster Response, 2011. Disponible en: <<http://www.ifrc.org/PageFiles/95530/The-Sphere-Project-Handbook-20111.pdf>>.

Dentro del Proyecto Esfera se especifica la importancia de la planeación estratégica de las áreas de refugio o albergues, las cuales deben estar ubicadas a una distancia considerable de las zonas de amenaza, deben contar con los servicios esenciales, el aseguramiento suficiente de materiales de ayuda (tiendas de campaña, kits de refugio y kits de construcción), la propiedad y usos de cada área, así como los permisos necesarios.

El problema de ubicación de los albergues o zonas de refugio temporales generalmente se aborda como un caso especial de localización de instalaciones teniendo como objetivos la maximización del número de personas cubiertas, minimización de la distancia entre instalaciones y población afectada y selección del conjunto más fiable de instalaciones.

El primer modelo de localización de instalaciones de emergencia fue propuesto por Toregas<sup>10</sup> en 1971, Location Set Covering Problem (LSCP), su objetivo fue encontrar el mínimo número de instalaciones para cubrir todos los puntos de demanda; más adelante Church y Revelle<sup>11</sup> presentaron un modelo donde se maximizaba la cobertura de la demanda y se denominó Maximal Covering Location Problem (MCLP).

Otras contribuciones al problema se han presentado por:

Anping<sup>12</sup>, considera el problema de la ubicación de los sitios de refugio después de un tifón en China, mediante la formulación de dos modelos matemáticos deterministas.

---

<sup>10</sup> TOREGAS, Constantine et al. The Location of Emergency Service Facilities. En: Operations Research, 1971, Vol 19, No 6, p. 1363—1373.

<sup>11</sup> CHURCH, Richard y REVELLE, Charles., Op. cit., p.101

<sup>12</sup> ANPING, P. The applications of maximal covering model in typhoon emergency shelter location problem. In Industrial engineering and engineering management (IEEM), 2010, p. 1727–1731.

Li y Jin<sup>13</sup>, consideran la naturaleza estocástica de los huracanes e introducen esta aleatoriedad mediante la generación de distintos escenarios y probabilidades respectivas de ocurrencia. Utilizan un programa estocástico de dos etapas. La fase de preparación decide los lugares, las capacidades y recursos de los nuevos refugios permanentes, y tanto los evacuados y los recursos se distribuyen a los refugios en la fase de respuesta. Se aplica el algoritmo en forma de L para descomponer el problema y el modelo se aplica a un caso de huracán en la región de la Costa del Golfo de los EE.UU.

Dalal et al<sup>14</sup>, presentan el problema de localización de refugios para un ciclón. Proponen un algoritmo para resolver el problema de localización que utiliza una matriz de distancia de los pueblos, se aplica el método Elzinga-Hearn iterativa, agruparlos en grupos circulares, y determinar el tamaño de la vivienda. Se lleva a cabo en un paquete de software, que lee los registros de la aldea de una base de datos, ejecuta los pasos del algoritmo, y escribe los resultados en un archivo. La originalidad de la obra radica en la adaptación del método Elzinga-Hearn iterativa para agrupar las aldeas en grupos circulares e implementar el algoritmo de solución.

Liu et al.<sup>15</sup>, definen los criterios para el problema de localización refugio. Utilizan el terremoto de Wenchuan (12 mayo 2008) como un evento de antecedentes para analizar y aplicar los principios de la selección del sitio de refugios de emergencia para un terremoto. Con investigaciones de campo y análisis de imágenes de teledetección, identifican la distribución de fallas activas y las ubicaciones de las zonas en las que los edificios están en riesgo de daño intensivo. Los principios

---

<sup>13</sup> LI, L., JIN, M. Sheltering Planning and Management for Natural Disasters. THC-IT-2010 Conference y Exhibition, 2010.

<sup>14</sup> DALAI, J; MOHAPATRA, P.K.; y MITRA, G.C. Locating cyclone shelters: A case. Disaster Prevention and Management, 2007, Vol 16, No 2, p. 235–244.

<sup>15</sup> LIU, Q.; RUAN, X. y SHI, P. Selection of emergency shelter sites for seismic disasters in mountainous regions: Lessons from the 2008 Wenchuan Ms8.0 Earthquake, China. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, Vol 40, No 4, p. 926–934.

que subyacen a la selección de los sitios de alojamiento de emergencia son los siguientes: (1) Mantenerlos lejos de las zonas de fallas activas, con la distancia en función de las características de la falla, incluyendo la naturaleza de las estructuras. (2) Las estrategias de mitigación de desastres deben desarrollarse como un sistema multidimensional de la gestión de los riesgos naturales, las actividades humanas, y la expansión urbana, la participación de mantener lejos de las pendientes vulnerables y establecer un sistema de alerta temprana; (3) Debe considerarse la accesibilidad de las regiones montañosas (4) El gobierno y las agencias de la ley de decisiones en China deben establecer nuevos códigos de diseño de sismo para edificios, haciendo hincapié en la importancia de los servicios públicos (como escuelas, instituciones de bienestar colectivos, e instalaciones médicas) como refugios de emergencia durante los terremotos desastrosos.

Li et al.<sup>16</sup>, proponen un modelo de programación de dos niveles basado en escenarios para optimizar la selección de los lugares de refugio después de un huracán y proporcionan un estudio con datos basados en Carolina del Norte. También analizan las necesidades de evacuación. Demuestran (1) La criticidad de considerar múltiples escenarios de huracanes en la ubicación de los refugios, y; (2) La importancia de considerar las demandas de transporte de todos los evacuados al seleccionar ubicaciones de los refugios públicos

Kilci et al<sup>17</sup>, proponen un método con programación lineal entera mixta para la selección de la ubicación de los sitios de alojamiento temporal. El modelo matemático maximiza el peso mínimo de áreas de refugio abiertas al decidir sobre la ubicación de las zonas de refugio, los puntos de población asignada a cada

---

<sup>16</sup> LI, A. C., NOZICK, L., XU, N., y DAVIDSON, R. Shelter location and transportation planning under hurricane conditions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, Vol 48, No 4, p. 715–729.

<sup>17</sup> KILCI F., KARA B., BOSKAYA B., Locating temporary shelter áreas after an earthquake: A case for Turkey, *European Journal of Operational Research*. 2015, Vol. 243, p. 323-332.

área de refugio abierto y controla la utilización de zonas de refugio abiertos. Validan el modelo matemático a través de un escenario base utilizando datos reales de Kartal, Estambul, Turquía.

Alçada-Almeida, Tralhão, Santos y Coutinho- Rodrigues<sup>18</sup> localizan los sitios de refugio e identifican rutas de evacuación utilizando un enfoque multi-objetivo, apoyándose en el Sistema de Información Geográfica (SIG), El sistema se aplica a un caso de evacuación por incendios en la ciudad de Coimbra, Portugal.

Jia, Ordoñez y Dessouky<sup>19</sup>, proponen un modelo general de localización de instalaciones para situaciones de emergencia a gran escala. Este modelo se puede presentar como un modelo de cobertura, un modelo p-mediana o un modelo p-centro, cada uno adaptado para diferentes necesidades en una emergencia a gran escala.

Bozorgi, Jabalameli y Mirzapour<sup>20</sup>, presentan un enfoque de programación estocástica robusta multiobjetivo para la logística de apoyo bajo incertidumbre, consideran la demanda, los suministros, los costos de adquisición y transporte como parámetros inciertos; además, el modelo considera la incertidumbre de los lugares donde pueden surgir esas demandas.

Por otro lado, se buscó evidencia de problemas en logística humanitaria en los que se utiliza más de un objetivo:

---

<sup>18</sup> ALÇADA-ALMEIDA, L.; TRALHÃO, L.; SANTOS, L. y COUTINHO-RODRIGUES, J. A multiobjective approach to locate emergency shelters and identify evacuation routes inurban areas. *Geographical Analysis*. 2009, Vol 41, No 1, p. 9–29.

<sup>19</sup> JIA, Hongzhong; ORDÓÑEZ, Fernando y DESSOUKY, Maged M. Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. En: *Computers and Industrial Engineering*. 2007, Vol. 52, No. 2, p. 257—276.

<sup>20</sup> BOZORGI-AMIRI, Ali; JABALAMELI, M. S.; y MIRZAPOUR, M.J. A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. En: *OR Spectrum*. 2013. Vol. 35, No. 4, p. 905-933.

**Tabla 1. Trabajo de los autores en logística humanitaria**

<b>AUTOR</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>PROBLEMA</b>	<b>MODELO APLICADO</b>
Barbarosoglu et al. <sup>21</sup>	Tiempo y costo.	Propuesta en dos fases para operaciones de desastre asistidas por helicóptero: Fase Táctica. Numero de helicópteros y tripulación. Fase Operativa: Definición de rutas, para evacuación y entrega de ayuda en zonas afectadas bajo restricciones de itinerarios, transbordos y capacidad.	Aplican un método multicriterio interactivo.
Ozdamar et al. <sup>22</sup>	Demanda insatisfecha.	Distribución de diversos artículos desde los centros de acopio a los de distribución ubicados en las zonas afectadas.	Modelo de flujo en redes multiperiodo.
Drezner et al. <sup>23</sup>	Distancia de recorrido y equidad en la atención o distribución de ayuda	Localización de puntos para la recogida de heridos en Orange County, CA	Búsqueda Tabú.
Bozkurt et al. <sup>24</sup>	Tiempo de	Localización de	Modelo entero

<sup>21</sup> BARBAROSOĞLU, G; ÖZDAMAR, L; ÇEVİK, A. Decision Aiding: An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. En: European Journal of Operational Research. 2002. Vol. 140, p. 118-133.

<sup>22</sup> ÖZDAMAR, L; ERTEM, MA. Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics. En: European Journal of Operational Research. 2015. Vol. 244, p. 55-65.

<sup>23</sup> DREZNER, T; DREZNER, Z; SALHI, S. A multi-objective heuristic approach for the casualty collection points location problem. En: Journal of the Operational Research Society. 2006. Vol. 57, no. 6, p. 727-734.

<sup>24</sup> BOZKURT, M; DURAN, S. Effects of Natural Disaster Trends: A Case Study for Expanding the Pre-Positioning Network of CARE International. En: INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH. Vol. 9, no. 8, p. 2863-2874.

<b>AUTOR</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>PROBLEMA</b>	<b>MODELO APLICADO</b>
	respuesta dado un presupuesto fijo	almacenes y determinación de la cantidad de inventario pre-posicionado para 48 productos que cubren necesidades básicas de una población afectada.	mixto de localización e inventario.
Balcik et al. <sup>25</sup>	Demanda satisfecha y costo total.	Determinación del itinerario de entrega de suministros	Modelación en dos fases: 1) Rutas por vehículo y 2) Uso de programación entera para definir periodos de entrega y cantidades.
Doerner et al. <sup>26</sup>	Costo, riesgo, cobertura y equidad.	Localización de instalaciones y definición de rutas para distribuir ayuda en caso de tsunamis en Sri Lanka.	Algoritmo genético.
Nolz et al. <sup>27</sup>	Distancia entre población y puntos de distribución, equidad, cobertura y costo,	Distribución de agua potable durante una emergencia considerando cobertura en área afectada.	Algoritmo memético especial.
Yuan. <sup>28</sup>	Tiempo de evacuación y	Diseño de rutas para la evacuación	Colonia de hormigas.

<sup>25</sup> BEAMON, BM; BALCIK, B. Performance measurement in humanitarian relief chains. En: International Journal of Public Sector Management. 2008. Vol. 21,no. 1, p. 4-25,

<sup>26</sup> DOERNER, K; GUTJAHR, W; NOLZ, P. Multi-criteria location planning for public facilities in tsunami-prone coastal areas. En: OR Spectrum. Country of Publication: Germany. 2009. Vol.31, no. 3, p. 185-212.

<sup>27</sup> NOLZ, P; DOERNER, K; HARTL, R. Water distribution in disaster relief. En: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. Country of Publication: UK. 2010. Vol. 40, no. 8, p. 693-708.

<sup>28</sup> YUAN, J; et al. Integrated network approach of evacuation simulation for large complex buildings. En: FIRE SAFETY JOURNAL. 2009. Vol. 44, no. 2, p. 266-275.

AUTOR	OBJETIVOS	PROBLEMA	MODELO APLICADO
	características de la ruta.	considerando daños provocados en rutas e información en tiempo real.	
Tinguaro-Rodriguez et al. <sup>29</sup>	Número de personas muertas, heridas, damnificadas y que quedaron sin hogar	Diseño de un Sistema de Evaluación y Diagnostico de Desastres (SEDD=System of Evaluation and Diagnostics of Disasters) que pronostica las consecuencias de un desastre con base en información histórica y descripciones verbales de la situación.	Lógica borrosa.
Nolz et al. <sup>30</sup>	Riesgo en el transporte de suministros, cobertura del sistema logístico y tiempo real de viaje.	Diseño de un sistema logístico que garantice la distribución adecuada de ayuda después de que ha ocurrido un desastre considerando los daños a la infraestructura en el área que puedan afectar la distribución de suministros.	Algoritmo memético
Liberatore et al. <sup>31</sup>	Seguridad de las vías de transporte,	Distribución de suministros a la	Modelo jerárquico RechADS que

<sup>29</sup> TINGUARO RODRIGUEZ, J; et al. A Disaster-Severity Assessment DSS Comparative Analysis. En: OR Spectrum. 2011. Vol. 33, no. 3, p. 451-479.

<sup>30</sup> NOLZ, P; SEMET, F; DOERNER, K. Risk approaches for delivering disaster relief supplies. En: OR Spectrum. 2011. Vol. 33, no. 3, p. 543-569.

AUTOR	OBJETIVOS	PROBLEMA	MODELO APLICADO
	total de personas asistidas.	población afectada por un desastre natural considerando que la infraestructura de comunicación está afectada por lo cual no todos los vehículos pueden ir desde los centros de distribución hacia las zonas afectadas.	asigna prioridades de ayuda de tal manera que se logre la máxima cobertura (mayor número de personas asistidas). Se enlazan las actividades de distribución con la de recuperación.

En Latinoamérica existen muy pocos países que están a la bandera en logística humanitaria. Se evidenció que algunos autores de países como Chile, México y Colombia, han adelantado investigaciones con respecto a estos temas:

Bohorquez<sup>32</sup> propone un modelo de programación lineal que pretende minimizar el tiempo de respuesta a la población afectada y establecer la cantidad de alimento, el tipo de transporte y la ruta adecuada.

Cornejo<sup>33</sup>, efectúa un estudio para conocer el lugar donde se deberían localizar centros de distribución después de la ocurrencia de un terremoto, utilizando un

---

<sup>31</sup> LIBERATORE, F; et al. A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in Humanitarian Logistics. En: Computers and Operations Research. Vol. 42, Multiple Criteria Decision Making in Emergency Management, p. 3-13. 2014.

<sup>32</sup> BOHORQUEZ, L. Análisis del tiempo de respuesta en la distribución de alimentos en la etapa inmediata del desastre para la zona norte establecida por la Cruz Roja Colombiana. Tesis de posgrado. Universidad de la Sabana, Chía, Cundinamarca, Colombia. 2012. 101p

<sup>33</sup> CORNEJO, C. Reducción del Riesgo de Desastres en Chile. En: Segundo encuentro de universitarios trabajando para la reducción de riesgos de desastres REDULAC-CHILE: 9 y 10 de enero de 2014. Concepción, Universidad de Concepción. ONEMI. 23p.

modelo de programación lineal entera mixta para determinar la cantidad óptima de almacenes.

Canales y Vergara<sup>34</sup>, analizan la localización de albergues de emergencia desde el punto de vista de flujos de personas desde una manzana a un albergue, y entre albergues con capacidades en salud.

Acosta y Almendras<sup>35</sup> abordan el problema teniendo en cuenta la materialidad de cada vivienda y las consecuencias sobre éstas luego de un terremoto, y utiliza un modelo minimizando las distancias recorridas por las personas.

Iniestra, Arroyo y Enríquez<sup>36</sup> abordaron el problema de un plan de evacuación por inundación en la ciudad Mexicana de Villahermosa, con la apertura de albergues y centros de distribución, con un inventario pre-posicionado de paquetes de ayuda y la asignación de individuos a albergues y rutas para su evacuación, utilizando un modelo de programación lineal entera con dos objetivos: minimizar el tiempo total requerido para evacuar a las personas y minimizar el costo total de abrir albergues y centros de distribución, y de usar las rutas de comunicación para trasladar a la población y abastecer los albergues.

Rosquillas, Mendoza, Rocha, Gámez, Frias y Granados<sup>37</sup> realizan un estudio de planificación estratégica de refugios temporales en la ciudad de Tijuana, México,

---

<sup>34</sup> CANALES, L., VERGARA, C. (2013). Localización de albergues en logística humanitaria. En: X Congreso ÓPTIMA 2013 del Instituto Chileno de Investigación Operativa (ICHIO): 27-30 de octubre de 2013. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Industrial. Concepción, Chile. 8p.

<sup>35</sup> ACOSTA, L; ALMENDRAS, D. Localización de albergues para hogares afectados por un desastre natural. En: XLIII Simposio Brasileiro de PESQUISA OPERACIONAL: 15 – 18 de agosto de 2011. Ubatuba, Sao Paulo, Brasil. 10p.

<sup>36</sup> INIESTRA, Juan; ARROYO, Pilar; ENRIQUEZ, Ruth. Un modelo bicriterio para la ubicación de albergues, como parte de un plan de evacuación en caso de inundaciones. Revista de Ingeniería Industrial. Universidad del Bio-Bio, Chile, 2012. Vol. 11, no. 2, p. 35-36.

<sup>37</sup> ROSQUILLAS, Antonio; MENDOZA, Luis; ROCHA, Ernesto; GAMEZ, Ena; FRIAS, Ana; GRANADOS, Orlando. Risk mapping for strategic planning of shelter response in Tijuana, Baja California, México. Global Risk Identification Programme.

en caso de sismo, pero no se aborda el problema a partir de técnicas de investigación de operaciones.

Ortiz<sup>38</sup>, aborda el problema de localización de albergues en respuesta a un desastre en el centro metropolitano de Concepción, Chile, mediante la formulación de un algoritmo de programación matemática.

Por otra parte, en la revisión se encontraron diferentes Planes de emergencias y contingencias de algunos países latinoamericanos Chile<sup>39</sup>, Perú<sup>40</sup>, República Dominicana<sup>41</sup>, donde se observan las formas similares de gestionar el riesgo por diferentes tipos de desastres, sin embargo, no hay evidencia, por parte de los entes gubernamentales, del uso de programación matemática para abordar estos desastres en sus diferentes fases.

En Colombia, se encuentran muy pocos datos específicos de investigaciones realizadas en logística humanitaria y aplicación de programación matemática. Al consultar los Planes Locales de Emergencia de ciudades como Cali, Bogotá, Medellín y Manizales, se observa que dentro de éstos se contemplan las diferentes actividades a realizar en el momento de un posible desastre por sismo, tratando de disminuir el impacto social del mismo, pero no hay una efectiva planeación en la fase de preparación para el desastre.

---

<sup>38</sup> ORTIZ, Pablo. Propuesta de planificación de contingencias para la reducción del riesgo de desastres en el centro metropolitano de Concepción. Universidad del Bio-Bio, Facultad de Ingeniería Industrial. Resumen ejecutivo. 2014.

<sup>39</sup> PLAN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL. Instrumento Indicativo para la Gestión Integral, 2002. Gobierno de Chile. Disponible en: < [http://www.onemi.cl/wp-content/themes/onemi-bootstrap-master/library/doc/plan\\_nacional\\_0\\_0.pdf](http://www.onemi.cl/wp-content/themes/onemi-bootstrap-master/library/doc/plan_nacional_0_0.pdf) >.

<sup>40</sup> PLAN SECTORIAL DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS Y DESASTRES. 2004. Peru. Disponible en: < [http://www.minsa.gob.pe/ogdn/cd1/pdf/NLS\\_04/plansectorialsalud.pdf](http://www.minsa.gob.pe/ogdn/cd1/pdf/NLS_04/plansectorialsalud.pdf) >.

<sup>41</sup> PLAN NACIONAL DE GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES. 2011. República Dominicana. Disponible en: < <http://faolex.fao.org/docs/pdf/dom146528.pdf> >.

Por otra parte, la legislación colombiana es muy clara en cuanto a gestión del riesgo ya que según:

Ley 1523 de 2012, “se adopta la política Nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres SNGRD, donde se orienta a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible”.

De acuerdo a esta Ley todos los municipios colombianos, deben adoptar la política pública de Gestión del Riesgo, donde deben elaborar el Plan Municipal de Gestión del Riesgo y la elaboración de la estrategia para la respuesta a emergencias.

En conclusión, se evidencian pocos trabajos de investigación que apliquen técnicas de investigación de operaciones en la localización de instalaciones para logística humanitaria en Colombia. Por otro lado y acorde con la legislación actual, el municipio de Bucaramanga viene adelantando el proceso de construcción del Plan Municipal de Gestión del Riesgo y la elaboración de la estrategia para la respuesta a emergencias, esto hace necesaria la planeación estratégica de todas las fases de un desastre sobre todo la preparación en cuanto a la ubicación de alojamientos o albergues temporales en el momento de un sismo de gran magnitud, para disminuir considerablemente la vulnerabilidad de la población ante esta ocurrencia.

Un análisis bibliométrico se presenta en el Anexo 1.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 LOGÍSTICA HUMANITARIA

La logística es el proceso de planificación de diferentes actividades con el fin de que un producto o servicio llegue al usuario final de forma adecuada, a tiempo y con el menor costo, por éste motivo es un área fundamental en la cadena de suministro. En la actualidad muchas compañías cuentan con un departamento de logística, el cual se encarga de coordinar mediante un sistema logístico y secuencial, todos los aspectos relacionados con las compras, manejo de inventarios y materia prima, transportes, mantenimientos preventivos y demás actividades que conforman el proceso de producción o comercialización.

Así mismo, la logística es fundamental en las operaciones de emergencia ante un desastre, en este campo es denominada “logística humanitaria” y contribuye con la movilización del personal capacitado, del equipo y material requerido por los organismos de socorro, hasta la evacuación de las personas afectadas o heridos y la reubicación de las mismas. Esto requiere un sistema que permita dirigir e implementar las acciones de respuestas para que sean no solo rápidas sino ágiles y lo más efectivas posibles. Para tener un concepto claro y completo de logística humanitaria, Thomas y Mizushima<sup>42</sup> la definen como "el proceso de planificación, implementación y control eficiente, flujo rentable y almacenamiento de bienes y materiales, así como la información relacionada desde el punto de origen al punto de consumo con el propósito de hacer frente a las necesidades de los beneficiarios finales". Asimismo, incluye la tarea de proporcionar una ayuda

---

<sup>42</sup> THOMAS, Ansiya y MIZUSHIMA, Mitsuko. Logistics training: necessity or luxury?, Forced Migration Review. 2005. Vol. 22, p. 60-61.

continúa ya sea por largos periodos como para dar apoyo a refugiados o brindar asistencia rápida o temporal a una población afectada por algún tipo de desastre repentino, ya sea de origen natural o provocado.

La logística humanitaria se centra en atender desastres que incluyen terremotos, tsunamis, huracanes, epidemias, inundaciones, sequías, hambrunas, los ataques terroristas y situaciones de guerras, así como la combinación de diversos desastres que pueden ocurrir simultáneamente<sup>43</sup>. De igual manera apoya la atención efectiva a las zonas afectadas, en tres etapas, antes (prevención), durante (atención y ayuda) y después (reconstrucción y recuperación) de la ocurrencia de un desastre.

Por este motivo es un aspecto clave en la atención de un desastre y la manera como se organiza la cadena de suministro determina en cierta medida el impacto que se tenga en la calidad y velocidad de la ayuda. La logística humanitaria abarca un amplio proceso en el que interactúan muchos factores que pueden alterar la capacidad de respuesta en el momento que se requiera, ya que según sea el tipo de desastre se deben tener unas consideraciones inmediatas que pueden afectar los tiempos de respuesta, el desplazamiento necesario para brindar ayudas y la disponibilidad de las misas, entre otras.

**3.1.1 Desastres** Un desastre es un fenómeno que puede ser de origen natural o creado por acción humana. El término suele aplicarse según la Organización Panamericana de la Salud a una situación de ruptura del funcionamiento normal de un sistema o comunidad, que causa fuerte impacto sobre las personas, sus obras y su ambiente, superando la capacidad local de respuesta. En Colombia de acuerdo a la ley 1523 de 2012 la ocurrencia de un destare exige del Estado y del

---

<sup>43</sup> KOVACS, Gyongyi y SPENS Karen. Humanitarian logistics in disaster relief operations, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2007. Vol. 37, p. 99-114.

sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción.

**3.1.2 Principales efectos de los desastres** Tras la ocurrencia de un desastre, sus efectos están determinados por el grado de impacto del mismo y la forma como éste afecta a una región, ya que generan diferentes tipos de necesidades sobre la población y su entorno. Algunos de los principales efectos que se pueden presentar son las enfermedades por contaminación del agua, desplazamientos de la población y exposición a la intemperie, escasez de alimentos, afectación de la salud mental y daños a las infraestructuras de servicios vitales. Por este motivo es importante contar con un plan local de emergencia que permita dar respuesta oportuna y evitar situaciones no deseadas y así mitigar los efectos adversos.

**3.1.3 Instalaciones** Después de la ocurrencia de un desastre, se activan varios mecanismos que permiten dar atención oportuna a éste. Las cadenas de intervención en un post desastre son estructuras operativas que se establecen de común acuerdo entre las entidades que prestan asistencia en caso de desastre, aceptadas y reconocidas por todas las instituciones, con el fin de garantizar la atención integral de las personas afectadas, procurando una adecuada coordinación interinstitucional y una óptima utilización de los recursos<sup>44</sup>. En estas cadenas confluyen los eslabones de cada área de intervención (ver figura 1) de acuerdo a su nivel de competencia así:

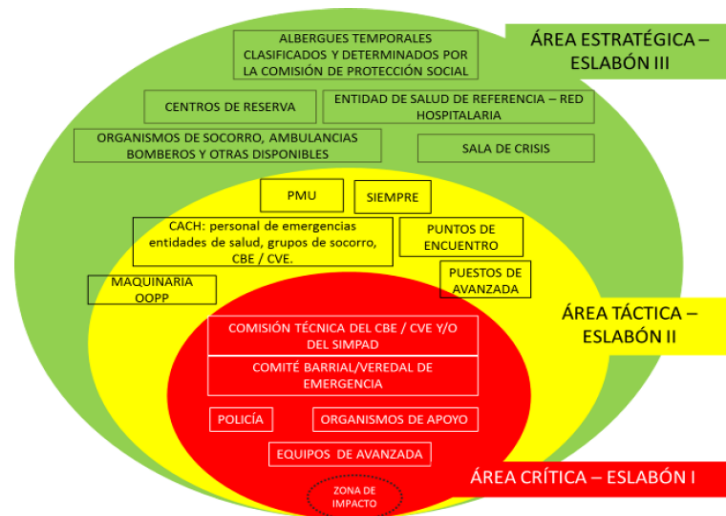
- Área de intervención crítica: hace referencia a la zona del impacto generada por el evento, a la cual solo deben ingresar los equipos de socorro que son los primeros en responder ante una emergencia.

---

<sup>44</sup> Secretaría del medio ambiente, sub secretaria del SIMPAD, Plan de emergencia Comuna 11, Medellín, 2012. p. 297-299

- Área de intervención táctica: esta área es la que da soporte y presta apoyo a las unidades que operan en la zona de impacto. La componen recursos y elementos que se instalan de manera temporal, como el puesto de mando unificado PMU, responsable de coordinar el tránsito y correcto uso de recursos entre los eslabones y el MEC, módulo de estabilización y clasificación de heridos, donde se determina el tipo de atención y el traslado de los afectados, de ser necesario según su gravedad, al centro asistencial.
- Área de intervención estratégica: consta de recursos y elementos disponibles para la atención de emergencias prestando apoyo a todas las estructuras desplegadas. En este eslabón se encuentran los albergues temporales y los centros de acopio, lugares donde se concentran los recursos mientras esperan su distribución.

**Figura 1. Áreas de intervención en la cadena de socorro**



Fuente: Plan local de Emergencia Comuna 11, Medellín.

### **3.1.4 Albergues Temporales**

**3.1.4.1 Propósito** Los albergues temporales son espacios creados para brindar protección y seguridad a las personas damnificadas por un desastre. El Estado debe proporcionarles una respuesta adecuada acorde con los principios constitucionales para el ejercicio de sus derechos y deberes ciudadanos. En estos espacios se debe garantizar la participación en la vida cotidiana de los damnificados, así como el acompañamiento psicosocial para mitigar los daños recibidos y poder mejorar su calidad de vida.

**3.1.4.2 Definición** Los albergues temporales son definidos por La Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja como un lugar físico creado e identificado como seguro, que cuenta con todos los medios necesarios para hospedar por un periodo corto, mediano o de largo plazo a un grupo de personas afectadas por el impacto de una amenaza, garantizando la dignidad humana, conservando la unidad familiar y la cultura de las personas afectadas, así como su estabilidad física, mental y psicológica.

**3.1.4.3 Tipos de Albergues Temporal** Existen varios tipos de albergues temporales dependiendo de la complejidad del desastre y de la capacidad con la que cuente el territorio donde se origine la situación de emergencia. Estos albergues son:

Auto Albergue: Se presenta cuando las personas afectadas pueden ser acogidas en viviendas de familiares o amigos de manera temporal.

Comunitarios: Se ubican en escenarios deportivos, salones comunales, parques, entre otros lugares, donde generalmente cuentan con los servicios básicos y el fácil acceso a hospitales y vías principales. En Colombia está restringido el uso de

colegios y escuela como sitios de alojamiento temporal ya que esta situación puede alterar el curso normal de las actividades que prestan las instituciones.

Campamentos de Emergencia: Se constituyen con elementos móviles como tiendas de campaña, carpas o materiales livianos de fácil remoción que permiten la permanencia temporal de personas o familias afectadas en condiciones dignas. Para este tipo de albergue es necesario la implementación de todos los servicios básicos para su funcionamiento.

Fijos: Lo constituyen edificaciones que cuentan con los servicios básicos necesarios para el alojamiento de las personas, que pueden ser adaptadas o construidas específicamente para este fin.

Multialbergue: Este tipo de albergue se presenta en desastres de gran magnitud donde se hace necesario la ubicación de los damnificados en zonas diferentes de un mismo sector. Lo componen varios tipos de albergue, los cuales varían dependiendo el terreno y los recursos con que se cuente. El manejo y control del multialbergue obedece a un mismo desastre y a la misma administración.

Subsidios de arriendos: Consisten en dar un recurso económico a personas o familias afectadas para que arrienden o alquilen un lugar con las condiciones adecuadas de vivienda y seguridad. Este subsidio generalmente es otorgado por el estado.

**3.1.4.4 Variables de localización y funcionamiento** Independientemente del tipo de albergue temporal que se vaya a utilizar, éste debe cumplir ciertas especificaciones importantes al momento de ser localizado. Los albergues temporales deben localizarse en zonas alejadas de la zona de amenaza, se debe tener en cuenta el acceso a vías principales, la proximidad del albergue a la vivienda de los afectados y la distancia del mismo a las instalaciones de servicios

esenciales. De igual modo, para el funcionamiento del mismo se requiere de 3,5 metros cuadrados de espacio mínimo a asignar a cada persona, además se debe contar por lo menos con 45 metros cuadrados de espacio asignado para servicios públicos destinados a baños, duchas y áreas comunes<sup>45</sup>.

**3.1.4.5 Variables de duración** La duración de un albergue puede ser variable, ya que depende de la magnitud del desastre que se haya presentado y de la capacidad local de reconstruir las instalaciones afectadas. Por eso se cuenta con ciertos parámetros que permiten definir la duración que pueden tener los mismos.

A Corto Plazo: Se presenta en emergencias pequeñas, con un mínimo número de personas afectadas y la capacidad local es suficiente para atender la emergencia. Por lo general se establecen refugios en los puntos de encuentro y estos deben tener un rango de operación promedia de 24 horas.

A Mediano Plazo: Se presenta cuando las emergencias son más complejas, la afectación ha sido mayor, y es necesaria la intervención de los gobiernos departamentales e incluso el nacional. Estos Alojamientos Temporales pueden tener un rango de operación de 10 a 30 días.

A Largo Plazo: En este caso sería un evento catastrófico, y requiere toda la atención de las entidades encargadas y el gobierno nacional. El rango de operación puede darse de 30 a 90 días y pueden ser prorrogables en tiempo según el avance de las acciones de rehabilitación y reconstrucción y la capacidad que tenga el país afectado.

---

<sup>45</sup> KILCI, F., KARA, B., & BOZKAYA, B. Locating temporary shelter areas after an earthquake: a case for Turkey. European Journal Of Operational Research. 2015. Vol. 243 p. 324-326.

### 3.2 PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN MULTIOBJETIVO

Los problemas de localización abarcan situaciones en las cuales se requiere encontrar la mejor opción en un contexto espacial para ubicar ciertas instalaciones. Como lo describen Bosque y Moreno, son un conjunto de procedimientos matemáticos que intentan buscar soluciones al problema de establecer la ubicación de una instalación de manera que se optimicen ciertos criterios considerados importantes a la hora de que los usuarios utilicen dicha instalación<sup>46</sup>.

De esta manera, se tiene un conjunto de clientes, distribuidos en un área geográfica que generan una demanda; se intenta suplir esa demanda sirviéndolos con una o más instalaciones que se requieren ubicar, teniendo en cuenta ciertas consideraciones tales como espacios físicos, ambientales, rutas, construcciones, distancias, costos, etc. Por lo general, en casos donde se tiene conocimiento previo de las posibles ubicaciones potenciales de instalaciones, los problemas de localización se suelen formular utilizando modelos de optimización discreta o combinatoria.

Según Scaparra y Scutellà<sup>47</sup>, en el problema de localización se identifican tres elementos fundamentales: las instalaciones, las localizaciones y los clientes.

- Instalaciones

Denota una cantidad de “objetos”, por lo general almacenes, plantas, escuela, centros de distribución, etc., para los cuales se va a establecer una posición

---

<sup>46</sup> BOSQUE SENDRA, J. y MORENO JIMÉNEZ, A. (1990): "Facility location analysis and planning: a GIS approach", EGIS'90. First European Conference on Geographical Information Systems. Utrecht, EGIS Foundation, pp. 87-94.

<sup>47</sup> SCAPARRA, M. y SCUTELLÀ, M. (2001): Facilities, locations, customers: building block of location models. Technical Report TR-01-18, Università de Pisa, Pisa.

espacial con la finalidad de optimizar la interacción con otros objetos preexistentes en un lugar geográfico.

Las instalaciones cuentan con tres características principales como lo son el número, que puede ser preestablecido o una variable a determinar en el proceso de decisión; el tipo, donde se involucran consideraciones de capacidad, servicio y estructura; y el costo asociado a la apertura o mantenimiento de las mismas.

- Localizaciones

Hace referencia al conjunto de puntos elegibles en el espacio de solución, determina el lugar físico donde se deben ubicar las instalaciones. Existen tres formas de representarlo espacialmente: 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.

Para la 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 se 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.

- Clientes

Esta palabra es comúnmente usada para denotar a personas que requieren un bien o servicio, que están distribuidos 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.

**3.2.1 Problemas de cobertura** Constituyen un tipo de problema a tratar dentro del área de la localización de instalaciones. Se enfocan en encontrar ciertas áreas geográficas para la ubicación de las instalaciones, de manera que los potenciales clientes tengan acceso a los servicios ofrecidos con el fin de brindarles cobertura del servicio.

En esta área existen modelos más específicos como los siguientes:

***Problema de máxima cobertura:*** considera un conjunto discreto de nodos que tienen un peso asociado, el cual indica el nivel de importancia. Asimismo, se considera un conjunto de posibles ubicaciones para las instalaciones que prestaran el servicio. La demanda de los clientes se considera fija. El objetivo es encontrar para un número  $p$  de instalaciones determinadas las mejores ubicaciones de manera que se maximice la cobertura del servicio con una distancia predefinida.

***Problema de localización de máxima cobertura con capacidad:*** en esta extensión del problema de máxima cobertura se tiene en cuenta que en la realidad la capacidad no es infinita. De este modo, no se considera que las instalaciones que van a servir la demanda de los clientes tienen capacidad ilimitada.

**Problemas de localización de máxima cobertura sin capacidad:** como su nombre lo indica, en este problema no se tiene en cuenta las capacidades de las instalaciones. De igual manera, se tiene un costo de apertura para cada una de las instalaciones que van a ser localizadas, y el número de instalaciones a localizar no se conoce con anterioridad. Su objetivo es minimizar el costo total con respecto a la distancia, la demanda y los costos fijos asociados a la apertura de las instalaciones.

**Problema de la  $p$  mediana:** consiste en ubicar  $p$  instalaciones, definidas en un principio, dentro de  $n$  posibles localizaciones, a las cuales se les asigna un conjunto de  $m$  nodos de demanda a satisfacer. El objetivo es minimizar la distancia ponderada entre los nodos de demanda y las instalaciones.

### 3.3 OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA

La optimización combinatoria es una disciplina de la matemática moderna aplicada y de la ciencia de la computación, cuyo dominio comprende problemas que se caracterizan por tener un conjunto con cantidades finitas de soluciones factibles discretas.

En los problemas de optimización combinatoria el objetivo es encontrar la mejor solución posible existente o solución óptima (sea máximo o mínimo) de una determinada función o funciones sobre el conjunto de soluciones. Dependiendo del número de funciones que se empleen los problemas combinatorios pueden ser monobjetivos (una sola función) y multiobjetivo (más de una función).<sup>48</sup>

---

<sup>48</sup> SANCHEZ, Miguel, Optimización combinatorial. En: Matemáticas del siglo XX: Una mirada en 101 artículos [En línea] Universidad de la Laguna, 2000, p. 115-120 [Consultado 11 Feb. 2013]. Disponible en: < <http://www.sinewton.org/numeros/numeros/43-44/Articulo22.pdf> >

Un problema de optimización combinatoria puede ser definido por<sup>49</sup>:

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

El conjunto de todas las posibles asignaciones factibles es:

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

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

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

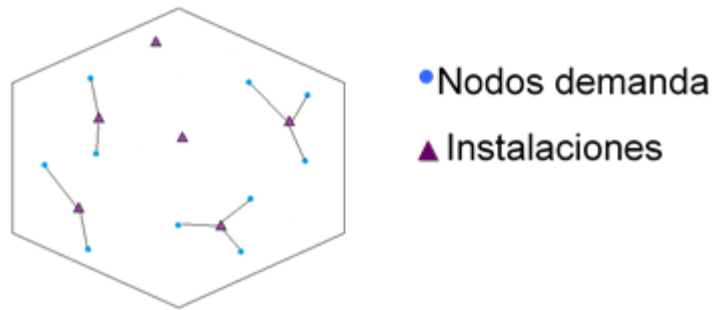
Para este tipo de problemas, las variables que se tienen son agrupadas en conjuntos que representan objetos que incluyen una estructura de datos compleja, ya sea de grafos, permutaciones, arboles, etc. Dichas variables se ubican en posiciones determinadas que generan la configuración que va a ser estudiada por la combinatoria.

Expresando la optimización combinatoria en el problema de localización de instalaciones se tendría un grafo  $G$ , en el que los vértices representan centros de demanda y los arcos un sistema de comunicaciones; se pretende ubicar un número de instalaciones que proporcionan servicios a los centros de demanda, optimizando alguna función en la que intervienen usualmente las distancias.

---

<sup>49</sup> BLUM, Christian y ROLI, Andrea. Metaheuristic in combinatorial Optimization: Overview and conceptual comparison. En: ACM Computing Surveys (CSUR). 2008. Vol. 35, no. 3, pag. 268.

**Figura 2. Representación de las instalaciones y los nodos de demanda**



Una característica de los problemas de optimización combinatoria es que siempre hay un algoritmo exacto que obtiene una solución óptima<sup>50</sup>, aunque no lo haga de forma eficiente, dado que el tiempo que emplea en encontrar una solución crece exponencialmente con el tamaño del problema. Por este motivo, los problemas de optimización se clasifican generalmente por su complejidad computacional.

### **3.4 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL**

La teoría de la complejidad computacional estudia los recursos requeridos durante el procesamiento computacional de un algoritmo para resolver un problema. Esto implica que el tiempo de ejecución de un algoritmo debe verse como una función que depende de las entradas que se le da a éste y del tamaño que tengan. De esta manera, se pueden evidenciar principalmente dos criterios de eficiencia: tiempo y espacio, los cuales son recursos computacionales necesarios para su cálculo.

Según el modelo computacional de Turing, los problemas que se presentan pueden clasificarse por el grado de dificultad al resolver los algoritmos, ya que se

---

<sup>50</sup>DUARTE MUÑOZ, Abraham; PANTRIGO FERNÁNDEZ, J. J.; GALLEGO CARRILLO, M. Metaheurísticas. *Madrid: Dykinson, 2007.* p 2.

han identificado problemas que son intratables, clasificados como NP (nondeterministic polynomial time) los cuales son imposibles de resolver en un tiempo razonable cuando el número de variables que los componen son una cantidad extremadamente grande<sup>51</sup>, a la clase NP pertenecen los siguientes problemas:

- **Problemas P:** Son aquellos que pueden ser resueltos en un tiempo polinómico por medio de algoritmos deterministas, por lo que se conocen las variables de entrada que los pueden resolver.
- **Problemas NP-completos:** Para estos problemas la solución no ha podido ser resuelta de manera exacta por algoritmos deterministas en tiempo polinomial, por ese motivo se intentan resolver por algoritmos no deterministas preferiblemente con soluciones de complejidad polinomial. Se dice que un problema es NP si puede ser reducido a un problema cuya solución sirva para resolver el problema original.
- **Problemas NP-hard:** Son similares o incluso más difíciles de resolver que los anteriores ya que necesitan tiempo exponencial para ser solucionados.

### 3.5 MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN COMBINATORIA

Los problemas de optimización tienen formas muy variadas y cada una con características muy diferentes. La variación en las características de los problemas afecta de forma importante a los modelos de resolución de los mismos, por ellos

---

<sup>51</sup> CHÁVEZ, Marco Antonio Cruz; BERNAL, Pedro Moreno; ABARCA, Jesús del Carmen Peralta. Aplicación de la teoría de la complejidad en optimización combinatoria. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 2014, no 20, p. 39

se han creado muchos métodos que intentan abordar el proceso de optimización. Éstos pueden clasificarse en:

**3.5.1 Algoritmos Exactos** Son aquellos que garantizan una solución óptima de los resultados, pero no tienen tiempo de complejidad polinómica para resolver los problemas de tipo NP o NP-hard, ya que éste crece exponencialmente con el tamaño del problema. A esta categoría pertenecen el método simplex, Branch and Bound y el algoritmo de ramificación y acotamiento.

**3.5.2 Algoritmos Heurísticos** Los métodos heurísticos son procedimientos que encuentran soluciones de buena calidad (óptimos locales) sin llegar a obtener necesariamente la solución óptima del problema. Estos algoritmos son fáciles de implementar y encuentran buenas soluciones con esfuerzos computacionales relativamente pequeños. Las técnicas heurísticas pueden dividirse principalmente en dos categorías: heurísticas constructivas y métodos de búsqueda local.

**3.5.3 Heurísticas constructivas** Se orientan a procedimientos que obtienen una solución de manera gradual mediante iteraciones a partir del análisis y selección paulatina de sus componentes. Se construye agregando partes, generalmente operaciones, a la solución inicial hasta completar la solución.

**3.5.4 Métodos de búsqueda local** Funcionan con estructuras de vecindario, parte de una solución inicial y avanza buscando mejoras hasta construir una mejor solución en el mismo. Para cada vecindario las soluciones con el mejor valor de la función objetivo se denominan óptimos locales. La principal desventaja de estos métodos es que quedan atrapados fácilmente en óptimos locales dejando espacios de solución sin explorar; para contrarrestar esto los nuevos métodos de búsqueda local integran metaheurísticas que dirigen el proceso de búsqueda.

**3.5.5 Algoritmo metaheurísticos** Las metaheurísticas según Glover<sup>52</sup>, son estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos para la resolución de problemas con un alto rendimiento, que explora y aprovecha los espacios de búsqueda para encontrar soluciones casi óptimas de problemas difíciles de optimización combinatoria.

Las metaheurísticas usualmente se aplican a problemas que no tienen un algoritmo o heurística específica que dé una solución satisfactoria; o bien cuando no es posible implementar ese método óptimo. De esta manera, existen diferentes algoritmos metaheurísticos que se han propuesto para resolver problemas de optimización combinatoria, entre los cuales está la búsqueda tabú, el recocido simulado, la optimización por enjambre de partículas, entre otros.

### **3.6 COMPUTACIÓN EVOLUTIVA**

La evolución se puede describir como un proceso de optimización en el cual, el objetivo es mejorar la capacidad de un organismo o sistema para sobrevivir en entornos cambiantes, dinámicos y competitivos. En la evolución biológica las teorías Darwinianas y Lamarckiana han sido las más representativas. La primera está enfocada en la supervivencia y reproducción de los individuos con características más sobresalientes para que sean heredadas a su descendencia, la segunda teoría basa su idea principal en la adaptación de los individuos a lo largo de su vida y la conservación de aquellos rasgos que sean importantes para ellos.

---

<sup>52</sup> GLOVER, Fred. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. En: Computers & Operations Research. Vol 13 (1986); p. 533-549.

Los principios evolutivos de estas teorías son mimetizados en técnicas de computación evolutiva mediante algoritmos que son usados para buscar soluciones óptimas a un problema. En estos algoritmos de búsqueda se tiene cierta cantidad de posibles soluciones a un problema y la meta es encontrar la mejor solución en un intervalo de tiempo determinado. Si este espacio de búsqueda arroja pocas soluciones posibles, todas las soluciones podrían ser exploradas en una ventana de tiempo razonable y se podría encontrar la solución óptima. No obstante, esta búsqueda resulta poco práctica si el espacio de búsqueda crece en gran tamaño.

La computación evolutiva resuelve los problemas a través de sistemas que utilizan modelos computacionales de procesos evolutivos como la selección natural, supervivencia del más apto y reproducción, así como los componentes propios que poseen los sistemas de computación para la ejecución del algoritmo.

Los procesos de búsqueda evolutivos están demarcados por los componentes de los Algoritmos Evolutivos (EA) como lo son: la codificación, la función de la evaluación de la aptitud, la generación de la población inicial y los operadores de selección y reproducción.

Las diversas formas en las cuales han sido implementados los componentes de los EA han dado paso a modelos que se han desarrollado en la historia de la computación evolutiva, como los descritos a continuación.

**3.6.1 Programación genética** La Programación genética (GP) fue desarrollada originalmente para programas de computación evolucionados por Koza<sup>53</sup>. En un programa genético generalizado la representación más usada es un árbol de

---

<sup>53</sup> KOZA, John R, Genetic programming: A Paradigm for Genetically Breeding Populations of Computer Programs to Solve Problems, En: Technical Report STAN-CS90-1314, Department of Computer Science, Stanford University, 1990.

funciones y valores de tamaño variable y el operador de reproducción más usado es el cruce de subárboles (*subtree crossover*), que consiste en el intercambio de un subárbol completo entre padres.

**3.6.2 Programación evolutiva** La programación evolutiva (EP) surge como un enfoque alternativo a la inteligencia artificial gracias a las investigaciones realizadas por Fogel<sup>54</sup>. Ésta programación representa los fenotipos de los individuos como unas máquinas de estado finito que sean capaces de responder a los estímulos del entorno y el desarrollo de operadores que permitan efectuar un cambio en el comportamiento y en la estructura durante el tiempo.

La EP usa representaciones que se adecuan generalmente al dominio del problema. El funcionamiento de este algoritmo evolutivo es la selección de todos los individuos en la población que serán los N padres, seguido de la mutación de cada uno de ellos para obtener la descendencia N, y por último se realiza la selección probabilística basada en la aptitud para formar la siguiente generación (Figura 9).

**Figura 3. Principales componentes de la programación evolutiva**



---

<sup>54</sup> FOGEL, Lawrence. Autonomous Automata. En: Industrial Research. Vol.4, Ed. 2, (1962), p.14-19.

**3.6.3 Estrategia evolutiva** Originalmente el modelo de la estrategia evolutiva (ES) fue presentado por Rechenberg<sup>55</sup> (1960), aunque Schwefel<sup>56</sup> fue quien realizó una mayor exploración en el tema. En esta estrategia, cada individuo es representado por bloques de construcción genética y un conjunto de parámetros que modela el comportamiento de los individuos en el entorno. Utiliza la recombinación dentro de los operadores de su sistema, lo cual diferencia esta estrategia con los otros algoritmos evolutivos.

El algoritmo inicializa seleccionando los padres de forma uniformemente aleatoria, la nueva generación se realiza a través del uso del operador de recombinación y los individuos que sobreviven son seleccionados de forma determinística. Los principales operadores de reproducción son la *mutación Gaussiana* y la *recombinación intermedia*.

**3.6.4 Algoritmos Genéticos** Desarrollados por Holland<sup>57</sup> en 1975, los algoritmos genéticos (por sus siglas en inglés GA) son uno de los modelos de la computación evolutiva más importante y utilizados en la solución de problemas generales, ya que permiten explorar una mayor cantidad de posibles soluciones que los programas tradicionales. Además han arrojado resultados buenos en un tiempo razonable a problemas de tipo NP-Hard.

El GA es un método de búsqueda estocástico y de búsqueda global que tiene la aleatoriedad como factor fundamental dentro de su proceso, debido a que es usado en la selección y reproducción, no necesita requerimientos particulares, por lo tanto, se puede aplicar a cualquier problema.

---

<sup>55</sup> RECHENBERG, Ingo. Evolutions strategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution. Frammann-Holzboog, Stuttgart, 1973.

<sup>56</sup> SCHWEFEL, Hans-Paul. Evolutions strategie und numerische Optimierung, Technical University Berlin, 1975.

<sup>57</sup> HOLLAND, John. Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press. Ann arbor, 1975.

El algoritmo genético inicia su procedimiento con la selección de la población mediante la generación aleatoria de un conjunto de cromosomas. Éstos, conocidos también como genotipos, son los códigos de una solución que se representan generalmente como una cadena de números y cada uno de ellos es denominado *gen*. A todos los cromosomas se les evalúa la aptitud o función objetivo para formar una nueva población, este ciclo de una población a otra es llamado generación. De acuerdo a esta evaluación, se seleccionan los cromosomas actuales y se les aplican los operadores de cruce y mutación. Después de varias generaciones ejecutadas, el sistema genético codifica el cromosoma que representa la solución óptima del problema (Figura 4).

Los resultados de estos algoritmos suelen ser moderadamente buenos, sin embargo, la calidad de las soluciones se podría mejorar mediante la hibridación del GA con un método de búsqueda local que permita intensificar en la búsqueda del espacio de soluciones.

**3.6.5 Elementos de un Algoritmo Genético** Los algoritmos genéticos tienen ciertos elementos que lo conforman, y a su vez los diferencia de los demás. Éstos son:

- **Población inicial:** corresponde a una generación aleatoria de soluciones con base en el problema tratado.
- **Representación:** es la relación entre la codificación de las variables (genotipo) y las soluciones factibles (fenotipo) del problema. Las codificaciones generalmente son mediante cadenas binarias o números enteros.
- **Función de evaluación:** denominada también aptitud, permite evaluar cuantitativamente cada una de las posibles soluciones o individuos de la población.

- **Operadores genéticos:** permiten generar nuevos individuos bajo cierta probabilidad. Entre los operadores más usados comúnmente se encuentran:

*Cruce:* Es un operador de reproducción, crea mejores generaciones y nuevas líneas a partir de dos padres, representados en cromosomas, los cuales intercambian parte de sus genes. Los tipos de cruce más usados son el cruce en uno o dos puntos y el cruce uniforme.

*Mutación:* este proceso se aplica después de cada cruce. Radica en la creación de nuevos individuos alterando la combinación genética a través de la modificación de uno de sus genes, con el fin de agregar diversidad a las características de la población. Se aplica una pequeña probabilidad de mutación  $P_m$  a cada gen, la cual evita una alteración significativa de la descendencia y conserva características de sus padres. Este algoritmo se emplea para preservar la diversidad de las soluciones y lograr una exploración más amplia del espacio de solución.

- **Selección:** Los individuos que conformarán las siguientes generaciones naturalmente son aquellos que posean el mayor valor de la función de evaluación. Para la selección de dichos individuos existen tres esquemas que permiten determinar los que formarán parte de la nueva generación. Estos esquemas son los siguientes:

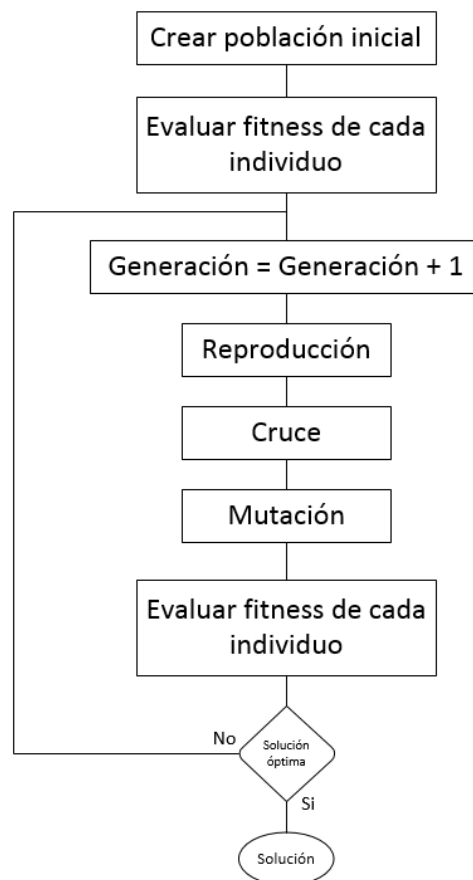
*Selección por torneo:* consiste en escoger dos cromosomas aleatorios del grupo que está disponible, para realizar una comparación entre ellos mediante la evaluación de la aptitud. El cromosoma que obtenga el mayor valor es seleccionado y puede ser reproducido.

*Selección aleatoria:* se selecciona al azar los padres de un cromosoma de los que están disponibles. Se evalúa cada uno de ellos tomando en cuenta el valor

de la aptitud y el que tome un valor inferior al establecido es eliminado inmediatamente de la población.

*Método de la ruleta:* consiste en asignar cada individuo de la población a una porción de la ruleta, la cual es proporcional al valor de la función aptitud y del promedio de éstas de los demás individuos. El individuo tendrá más posibilidad de ser seleccionado si el valor de aptitud del cromosoma es mayor comparado con otro, de igual manera este método permite la elección de individuos con el peor valor de aptitud, ya que es un proceso probabilístico.

**Figura 4. Diagrama de flujo de un algoritmo Genético**



## **4. CONSTRUCCIÓN DE LA RED DE INSTALACIONES Y CLIENTES**

El propósito de este estudio es determinar la mejor localización de albergues temporales a los cuales, una población afectada por un desastre sísmológico pueda desplazarse junto a su familia, con el fin de minimizar el impacto psicológico.

Para abordar este problema se construye una red donde se definen las instalaciones que hacen referencia a las localizaciones de los posibles albergues, y los puntos de demanda agregada que corresponde al conjunto de nodos cliente que representan la población afectada.

### **4.1 CONJUNTO DE ALBERGUES**

Según el Proyecto Esfera<sup>58</sup>, las poblaciones afectadas por cualquier tipo de desastre “disponen de suficientes espacios vitales cubiertos que ofrecen confort térmico, una buena ventilación y protección contra los rigores del clima y garantizan la privacidad, la seguridad y la salud, permitiendo al mismo tiempo realizar las actividades domésticas esenciales y de apoyo a los medios de subsistencia.” “Todas las personas afectadas por el desastre disponen de una superficie cubierta mínima de 3,5m<sup>2</sup> por persona y todas las soluciones de alojamiento y los materiales cumplen las normas técnicas y de rendimiento reconocidas y son culturalmente aceptables”.

---

<sup>58</sup> SPHERE PROJECT. Sphere Project Humanitarian Charter and Minimum Standards in Disaster Response, 2011. Disponible en: <<http://www.ifrc.org/PageFiles/95530/The-Sphere-Project-Handbook-20111.pdf>>.

Considerando lo anterior, para definir los albergues se proponen los colegios, parques y zonas deportivas disponibles en la ciudad de Bucaramanga, ya que estas instalaciones ofrecen fácil acceso, cuentan con servicios básicos (agua, luz y drenaje), servicios sanitarios y espacio suficiente (3.5 m<sup>2</sup> por persona) para albergar a un alto número de personas. Según el Manual de albergues temporales de la Cruz Roja Colombiana<sup>59</sup>, estos lugares se utilizan de manera transitoria y son los escenarios idóneos para alojamiento de personas cuando se presentan grandes desastres por sismos o terremotos destructivos.

Para estimar la capacidad de cada instalación se considera un porcentaje del área total, dependiendo del tipo de las mismas.

- En los colegios, se tienen dos áreas, áreas de las aulas y áreas de las zonas deportivas. Se toma el área de las aulas como área utilizable para el alojamiento de personas, ya que se debe considerar un espacio destinado a servicios que serían ubicadas en las áreas de las zonas deportivas de dichas instalaciones.
- En los parques se considera un área de arborización y zonas comunes del 50%. De igual manera, se contempla un 40% para las zonas deportivas. Estos porcentajes son una estimación basada en los datos proporcionados por la sección de Planeación de la Alcaldía Municipal de Bucaramanga y son sensibles a modificaciones oportunas, según el escenario de daños que se esté evaluando.

Teniendo definidas las áreas utilizables, estos valores se dividen entre los 3.5 m<sup>2</sup> recomendados como la superficie mínima por persona albergada, lo cual da origen

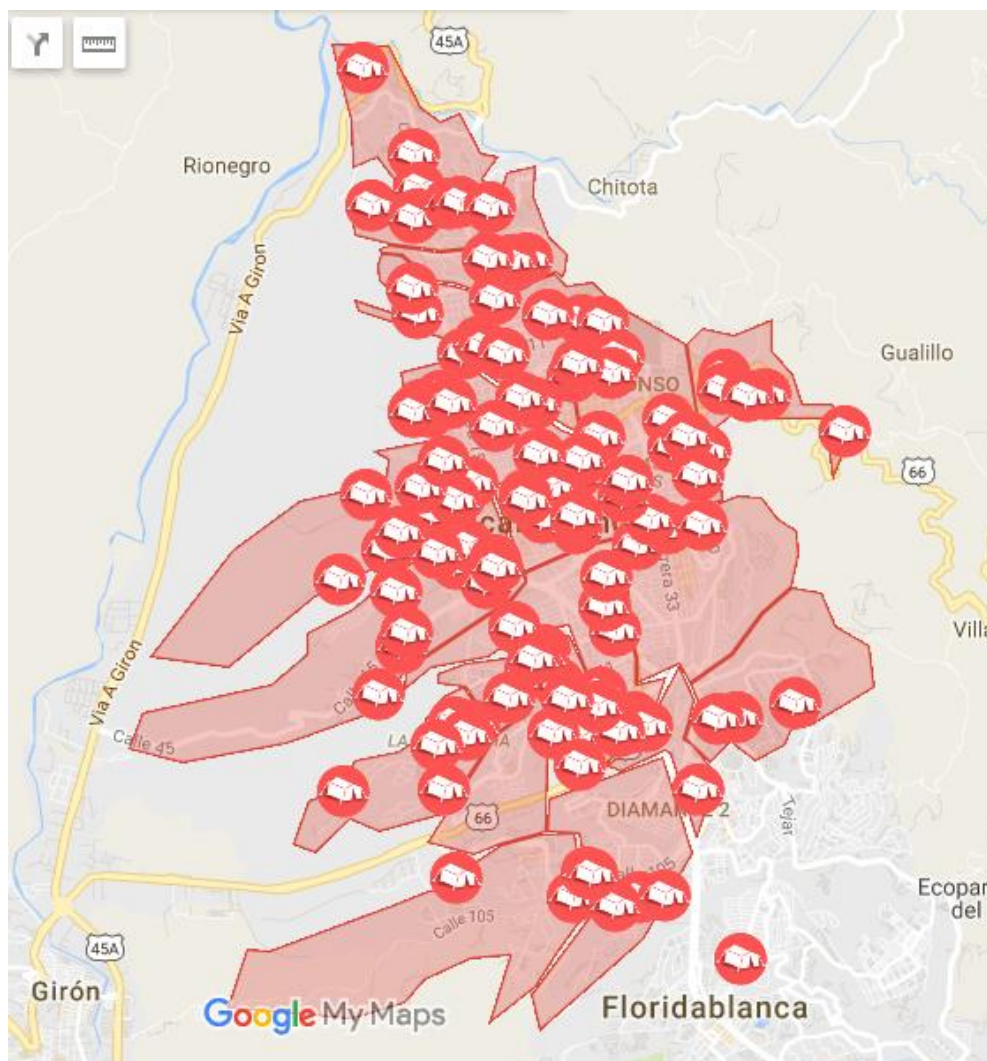
---

<sup>59</sup> MANUAL NACIONAL PARA EL MANEJO DE ALBERGUES TEMPORALES, Sociedad Nacional de La Cruz Roja Colombiana, Dirección General del Socorro Nacional, 2008 Disponible en <<http://www.cruzrojacolombiana.org/sites/default/files/manual%20albergues%20temporales.pdf> >

a la capacidad total de refugio en cada instalación. Esta información se puede consultar en el Anexo 2.

De esta manera, el total de albergues potenciales establecidos para la ciudad es de 123. Para localizarlos en el mapa, se utiliza la herramienta de búsqueda geo-referenciada Google Maps. Estas ubicaciones se presentan en la figura 5.

**Figura 5. Ubicación de albergues potenciales en la ciudad.**



Es importante tener en cuenta que los sitios elegidos como albergues mostrados anteriormente, no necesariamente van a estar libres de daños y listos para usarse, debido a que no es posible pronosticar la magnitud del sismo y garantizar que la ubicación de los albergues esté fuera de las zonas afectadas

## **4.2 CONJUNTO DE CLIENTES**

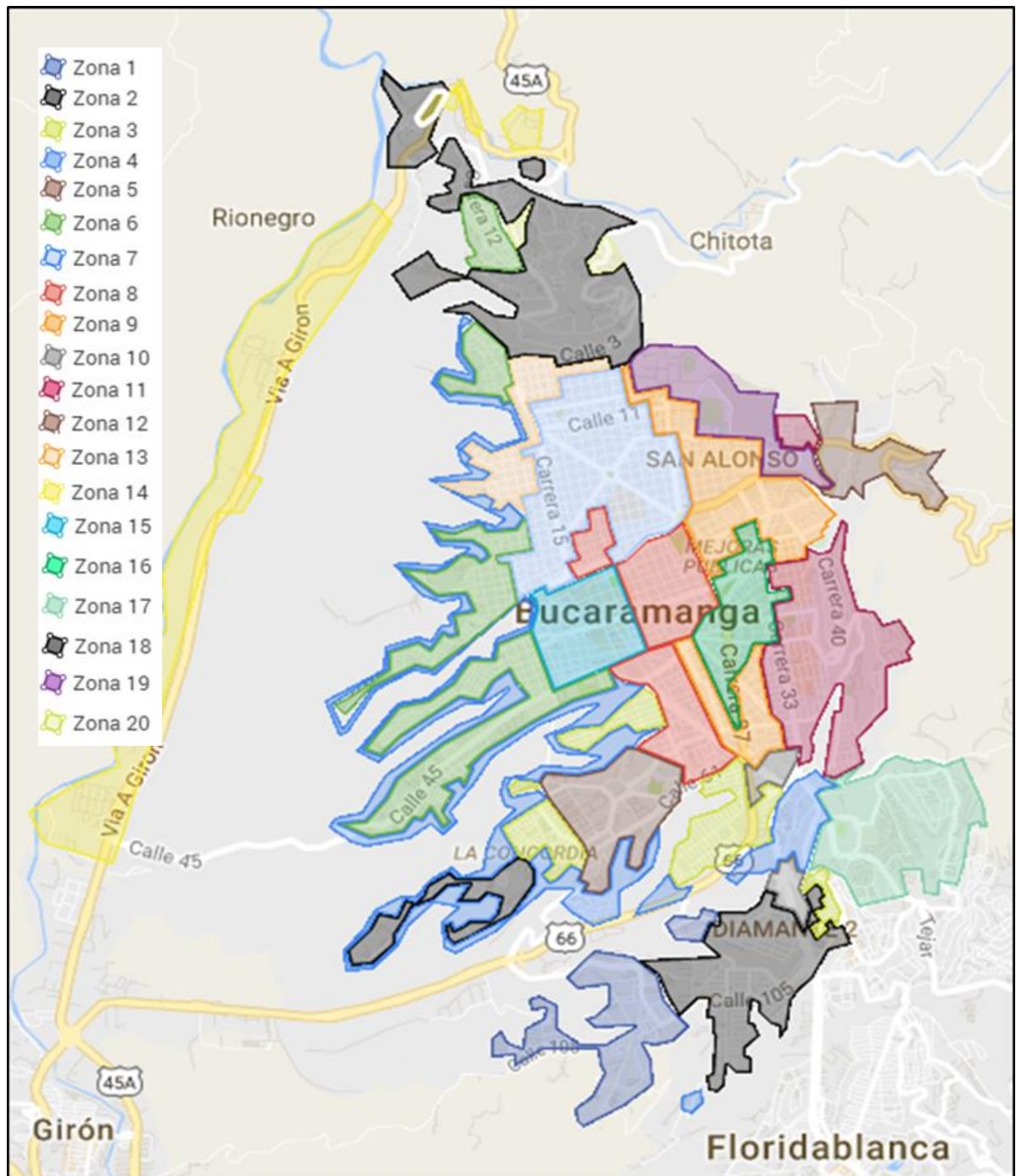
Para definir los nodos pertenecientes al conjunto de clientes, primero se especifican las zonas de la ciudad que se verían afectadas en caso de sismo, basado en el estudio de vulnerabilidad sísmica de la ciudad de Bucaramanga<sup>60</sup>, donde se delimita la ciudad en zonas de acuerdo a las tipologías estructurales prevalecientes. El mapa se detalla en la figura 6.

A continuación, se establecen como unidades de demanda las manzanas pertenecientes a estas zonas, las cuales se delimitan como polígonos geo-referenciados por medio de la herramienta Google maps, la cual permite calcular el área aproximada de cada polígono, para luego determinar su centroide. Seguidamente, se miden las distancias desde cada centroide a cada uno de los potenciales albergues, para esto se utiliza la API de Google maps, así se construye la matriz de distancias. Ver Anexo 3.

---

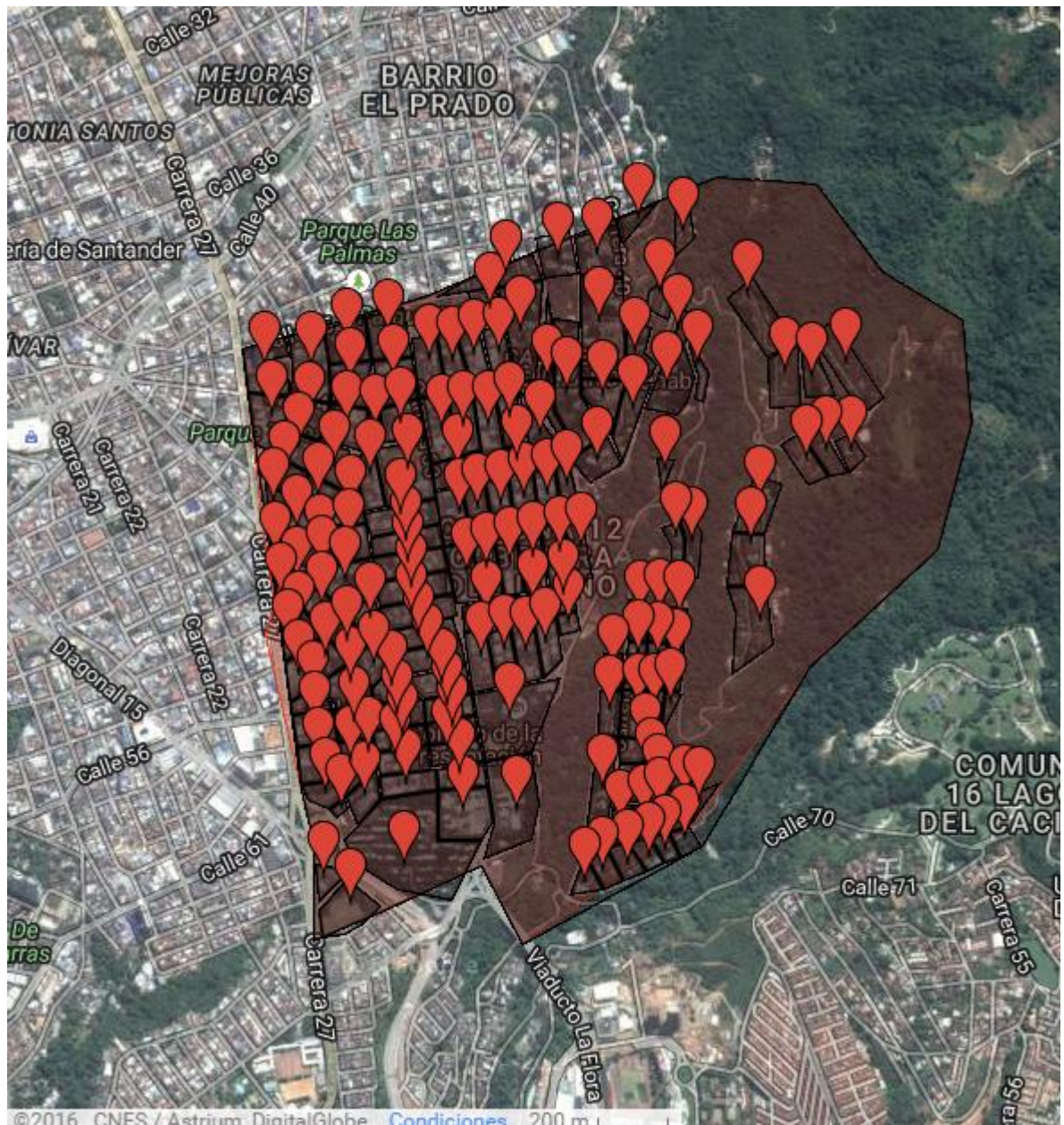
<sup>60</sup> CHIO, Gustavo y MALDONADO, Esperanza. Identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga. Revistas UIS Ingenierías, 2005. Vol. 4, No.2, p. 99-116.

Figura 6. Plano de la zonificación sísmica de la ciudad de Bucaramanga



Fuente: Adaptación del Archivo del grupo INME

Figura 7. Ubicación de nodos clientes.



El número de personas damnificadas asociado al nodo de demanda, se estima a través de los datos proporcionados por el DANE<sup>61</sup>. Dado que el último censo

<sup>61</sup> DANE. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Censo Poblacional 2.005. Disponible en: < <http://www.dane.gov.co/index.php/esp/poblacion-y-registros-vitales/censos/censo-2005>>

poblacional se realizó en el año 2005, se proyecta el número de habitantes a 2015 con un crecimiento poblacional del 1,5%, según datos estadísticos del crecimiento poblacional del Banco Mundial.

Con base en lo anterior, se estima que la población de la ciudad para el 2015 asciende a 610.509 habitantes, los cuales están distribuidos en 17 comunas, según se muestra a continuación.

**Tabla 2. Crecimiento poblacional estimado**

HABITANTES BUCARAMANGA 2005 - 2015		
COMUNA	Habitantes 2005	Habitantes 2016
1	54,183	62,882
2	35,035	40,660
3	44,662	51,832
4	38,191	44,322
5	42,092	48,849
6	28,143	32,661
7	28,933	33,578
8	18,411	21,367
9	16,623	19,292
10	32,299	37,484
11	28,459	33,028
12	33,404	38,767
13	52,290	60,685
14	22,936	26,618
15	8,627	10,012
16	15,045	17,460
17	26,723	31,013
<b>Total Hab.</b>	<b>526,056</b>	<b>610,509</b>

Por cada comuna se cuenta el número de cuadras y luego con el número de habitantes por comuna se calcula un promedio de personas que habitan una manzana. Esto representa el número de personas asignadas a un nodo de demanda y varía dependiendo de la comuna. El número de habitantes promedio por manzana en Bucaramanga es de 392 habitantes.

**Tabla 3. Información por Comunas**

COMUNAS CON MAYOR IMPACTO EN CASO DE DESASTRE POR TERREMOTO		
COMUNA	MANZANAS	POBLACION PROM.
1	151	416
2	83	490
3	194	267
6	213	153
12	158	245
13	228	266
14	83	321

Es necesario considerar que la estimación de la demanda de cada uno de los nodos depende del grado de afectación del sismo y de la decisión de cada una de las personas afectadas de llegar a estos albergues, ya que algunos damnificados podrán albergarse en las viviendas de familiares y conocidos, además se considera que las personas acudirán por sus propios medios a los albergues abiertos, y que los entes municipales encargados, tendrán que atender las necesidades primarias de estas personas.

## 5. PROPUESTA DE ALGORITMO EVOLUTIVO PARA LA LOCALIZACIÓN MULTIOBJETIVO

En los problemas de localización es muy común tener un objetivo relacionado con maximizar, pero dependiendo del entorno en que se esté trabajando el problema, pueden existir más de un objetivo y éstos generalmente entran en conflicto. De esta manera se hace necesario modelar algunas decisiones de localización como problemas multiobjetivo.

Un problema de localización multiobjetivo se representa de la siguiente manera:

$$(PLM) \quad \text{Min } \{ f_1(x), \dots, f_k(x) \}$$

$$\text{Sujeto a:} \quad x \in \Omega$$

Donde  $x$  es un vector de variables de decisión que describe la configuración del sistema,  $f_k(x)$  es la función objetivo que evalúa el  $k$ -ésimo criterio de decisión ( $k=1, \dots, K$ ); y  $\Omega$  el conjunto de soluciones (configuraciones) factibles<sup>62</sup>.

En la localización multiobjetivo comúnmente se presentan conflictos entre los objetivos tratados, debido a que una solución óptima para un objetivo puede no serlo para los otros, lo cual hace que dicha solución no se pueda escoger como el óptimo del problema y se busque entonces el conjunto de soluciones que satisfagan los objetivos, denominado conjunto de soluciones óptimas de Pareto.

---

<sup>62</sup> VILLEGAS, Juan. Problemas de localización multiobjetivo. 2003. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Maestría Ingeniería Industrial. Tesis.

## Dominancia de Pareto

Sean  $x_1$  y  $x_2$  soluciones factibles del problema, se dice que  $x_1$  domina a  $x_2$  si:

- La solución  $x_1$  no es peor que  $x_2$  en todos los objetivos.
- La solución  $x_1$  es estrictamente mejor que  $x_2$  en por lo menos un objetivo.

Si no se cumple alguna de estas condiciones la solución  $x_1$  no domina a la solución  $x_2$ .

Las soluciones factibles del problema que dominan a las otras funciones se conocen como soluciones no dominadas y entran a hacer parte del conjunto denominado óptimo de Pareto<sup>63</sup>. Este conjunto se puede definir así<sup>64</sup>:

*Sean  $x, y \in \Omega$ . Un par de soluciones factibles del problema de localización multiobjetivo, Se dice que  $y$  domina a  $x$  (i.e,  $y \preceq x$ ) para todo  $k$ , y existe algún  $k$  tal que la desigualdad se cumple en forma estricta. Una solución factible que no es dominada por ninguna otra solución es llamada eficiente de Pareto o no dominada.*

$\Omega$ : el conjunto de soluciones factibles

Sea  $P$ , el conjunto óptimo de Pareto:

$$P = \{ x \in \Omega : \text{no existe } x' \in \Omega, f(x') \preceq f(x) \}$$

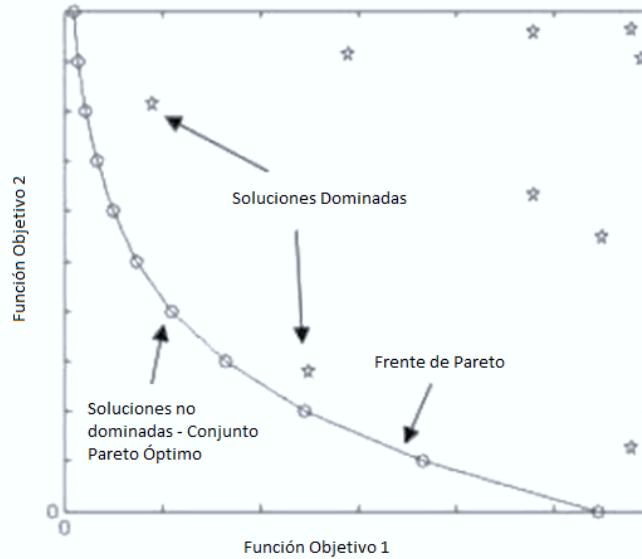
---

<sup>63</sup> MOLINA, Alexander; CORREA, Carlos; BOLAÑOS, Ricardo. Algoritmo Multiobjetivo NSGA II aplicado al problema de la mochila. En: Scientia Et Technica 2009 XIV. 2008, p. 206-211.

<sup>64</sup> VILLEGAS, Juan. Problemas de localización multiobjetivo. 2003. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Maestría Ingeniería Industrial. Tesis.

La imagen del conjunto óptimo de Pareto en el espacio objetivo se le conoce como frente de Pareto. La forma de este frente indica el intercambio entre las funciones objetivo tratadas. (Figura 8)

**Figura 8. Espacio objetivo factible y frente óptimo de Pareto en una función con dos objetivos**



En la figura se muestra la solución a un problema de minimización de dos objetivos. El frente está formado por las soluciones óptimas del espacio objetivo factible, donde se encuentran las soluciones dominadas del problema.

### 5.1 ALGORITMO NSGA II

El NSGA-II, (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, versión II), pertenece a la gama de algoritmos evolutivos que permite encontrar este conjunto de soluciones.

Fue propuesto por Deb. et al.<sup>65</sup>, en el año 2000 en el Laboratorio de Algoritmos Genéticos del Instituto Tecnológico Kanpur en India.

Es una versión mejorada del algoritmo NSGA, que años atrás (1.994), Deb había propuesto. El NSGA-II utiliza una jerarquización de Pareto e incluye un mecanismo para la preservación de diversidad. Sus principales características son<sup>66</sup>:

- Ordenamiento no-dominado mediante una técnica de comparación donde todos los individuos son ordenados de acuerdo a su nivel de dominancia. Esto permite disminuir la complejidad en la búsqueda de dominancia de  $O(MP^3)$ , como lo hacía la versión anterior del NSGA y era muy complejo al ser utilizado ya que consumía muchos recursos, a  $O(MP^2)$ , siendo M el número de funciones objetivo y P el tamaño de la población utilizada.
- Al implementar el elitismo permite un rendimiento más rápido y permite preservar las mejores soluciones a lo largo de las generaciones.
- Se basa en la distancia de apilamiento (crowding distance), una técnica que no requiere especificar parámetros adicionales para la preservación de diversidad en la población.

**5.1.1 Funcionamiento del algoritmo NSGA II** El algoritmo NSGA II trabaja con dos tipos de algoritmos de ordenamiento<sup>67</sup>:

- **Algoritmo de ordenamiento no dominado:** Este busca las soluciones más próximas al Frente de Pareto y calcula para cada solución, cuantas otras

---

<sup>65</sup> DEB, K.; PRATAP, A; AGARWAL, S; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. En: IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6 No.2, p.182 – 197,

<sup>66</sup> LANDA, Ricardo. Algoritmos culturales aplicados a optimización con restricciones y optimización multiobjetivo. Master's thesis, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección Computación, CINVESTAV IPN, 2002.

<sup>67</sup> MOLINA, Alexánder; CORREA, Carlos; BOLAÑOS, Ricardo. Algoritmo Multiobjetivo NSGA II aplicado al problema de la mochila. En: Scientia Et Technica 2009 XIV. 2008, p. 206-211.

soluciones dominan y cuantas son dominadas por ésta. Así en cada iteración se crea un nuevo frente con las soluciones retiradas del conjunto. Figura 9.

- **Ordenamiento por la distancia de apilamiento (crowding):** Este busca las soluciones mejor distribuidas en el espacio. Una función calcula las distancias entre soluciones que se encuentran en el mismo frente con las áreas menos pobladas dentro del espacio de búsqueda. Figura

**Figura 9. Selección de individuos del NSGA II**

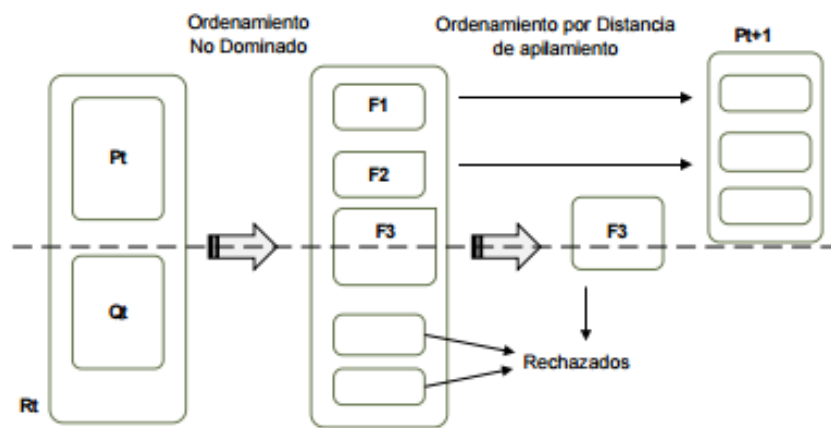


Figura 10. Seudocódigo algoritmo clasificación no dominada

---

**Algoritmo 3** CLASIFICACIÓN NO DOMINADA

---

```

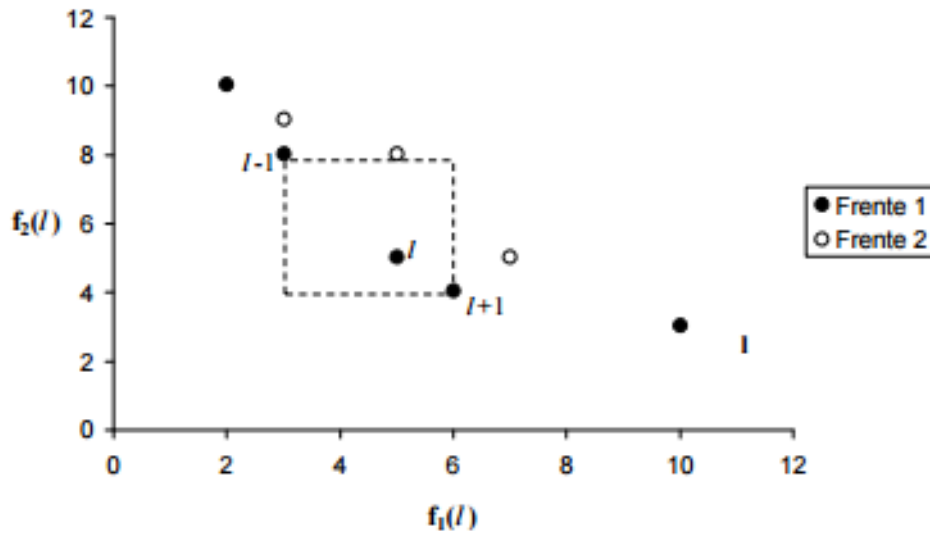
1: for all  $x \in \mathcal{R}_t$  do
2:   for all  $y \in \mathcal{R}_t$  do
3:     if  $x \prec y$  then
4:        $\mathcal{D}^x \leftarrow \mathcal{D}^x \cup \{y\}$ 
5:        $o^y \leftarrow o^y + 1$ 
6:     else if  $y \prec x$  then
7:        $\mathcal{D}^y \leftarrow \mathcal{D}^y \cup \{x\}$ 
8:        $o^x \leftarrow o^x + 1$ 
9:     end if
10:  end for
11: end for
12:  $c \leftarrow 1$  (Contador de frentes)
13:  $l \leftarrow 1$  (Contador de cromosomas)
14: while  $l < L$  do
15:   for all  $x \in \mathcal{R}_t$  do
16:     if  $o^x = 0$  then
17:        $\mathcal{F}_c \leftarrow \mathcal{F}_c \cup \{x\}$ 
18:        $l \leftarrow l + 1$ 
19:       for all  $y \in \mathcal{D}^x$  do
20:          $o^y \leftarrow o^y - 1$ 
21:       end for
22:     end if
23:   end for
24:   Densidad Local de  $\mathcal{F}_c$  (Algoritmo 4)
25:    $c \leftarrow c + 1$ 
26: end while

```

---

Fuente: Problemas de localización multiobjetivo, Juan Guillermo Villegas (2003).

Figura 11. Estimación de distancia de hacinamiento.



Fuente: Problemas de localización multiobjetivo, Juan Guillermo Villegas (2003).

**Figura 12. Seudocódigo algoritmo de distancia de hacinamiento.**

---

**Algoritmo 4 ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD LOCAL**

---

```
1:  $b \leftarrow |\mathcal{F}_c|$  (Número de soluciones en el frente)
2: for all  $x \in \mathcal{F}_c$  do
3:    $e^x \leftarrow 0$  (Inicialice las distancias)
4: end for
5: for all  $k$  do
6:   Organizar  $\mathcal{F}_c$  usando el  $k$ -ésimo objetivo
7:    $e^l = e^b = \infty$  (Los puntos extremos siempre se seleccionan)
8:   for all  $l = 2$  to  $(b - 1)$  do
9:      $e^l \leftarrow e^l + (f_k^{l+1} - f_k^{l-1})$ 
10:  end for
11: end for
```

---

Fuente: Problemas de localización multiobjetivo, Juan Guillermo Villegas (2003).

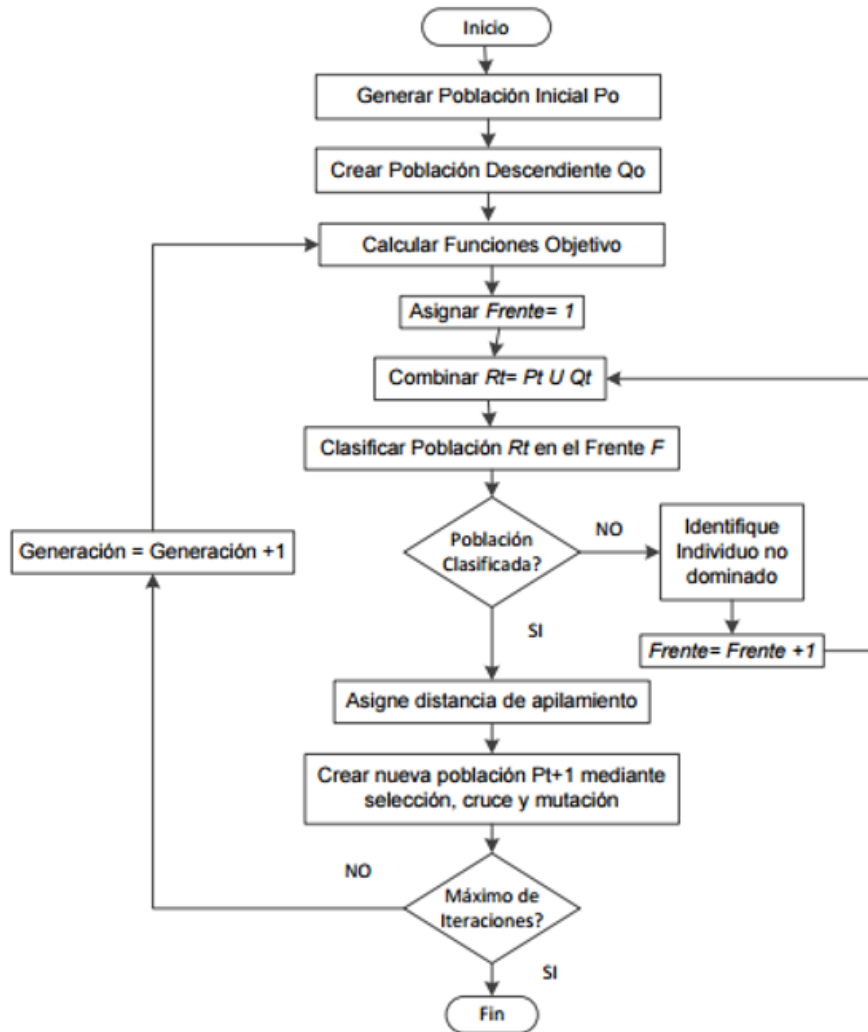
El algoritmo NSGA II está conformado por 4 etapas<sup>68</sup>: Generación de la población inicial, cruce, mutación y selección. El primer paso es generar una población inicial que conformarían el conjunto de padres  $P_t$  ( $N$  individuos) a partir de ésta aplicando operadores de selección, cruce y mutación, se crea un conjunto de hijos  $Q_t$  ( $N$  individuos). Las dos poblaciones se unen para conformar el conjunto  $R_t$  de tamaño  $2N$ . Con ésta nueva población  $R_t$  se empieza a hacer la clasificación no dominada en diferentes frentes de Pareto ( $F_1, F_2, F_3 \dots F_n$ ), ésta es generada a partir de configuraciones de frentes no dominados. La nueva población comienza a ser conformada con el mejor frente no dominado ( $F_1$ ), continuando con las soluciones del segundo frente ( $F_2$ ) y así sucesivamente. El conjunto  $R_t$  es de tamaño  $2N$  y solo se necesitan  $N$  individuos para la población descendiente debido a esto, se deben descartar  $N$  configuraciones. Se prefieren los individuos que pertenezcan al menor frente, si ambos pertenecen al mismo frente se prefiere la solución con menos soluciones alrededor, aquí es donde se utiliza la selección por distancia de apilamiento. Lo que se pretende con esta forma de selección es asegurar

---

<sup>68</sup> GUTIERREZ, Fernando. Optimización Multiobjetivo Usando Algoritmos Genéticos Culturales. Tesis para Obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Computación. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Unidad Zacatenco Departamento de Computación. 2011.

diversidad dentro del mismo frente de Pareto, es decir, cuando la población en su totalidad converge al frente de Pareto óptimo, el algoritmo asegura que las soluciones están distanciadas unas de las otras<sup>69</sup>.

**Figura 13. Diagrama de Flujo del Algoritmo NSGA II**



<sup>69</sup> DEB, K.; PRATAP, A; AGARWAL, S; MEYARIVAN, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. En: IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2002. Vol. 6 No.2, p.182 – 197.

## 6. DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO

Para el diseño del modelo matemático se tienen en cuenta los siguientes supuestos:

- El problema de localización de albergues se define como un problema de localización – asignación de instalaciones.
- El conjunto de albergues potenciales es conocido y cada uno de los sitios destinados para ello cumplen con los criterios establecidos.
- Un albergue se abre, aunque su porcentaje de utilización sea mínimo, ya que es importante el alojamiento de las personas damnificadas.

El modelo propuesto para el problema de localización se describe de la siguiente forma:

### **Definición de conjuntos:**

*I*: Conjunto de albergues candidatos.

*J*: Conjunto de nodos clientes a ser asignados a un albergue.

### **Índices:**

*i*: índices de los nodos albergue.  $\{i = 1, \dots, m\}$

*j*: Índice de los nodos clientes.  $\{j = 1, \dots, n\}$

### Definición de parámetros:

$D_j$	Demanda del cliente $j$ .	[No. personas afectadas]
$H_{ij}$	Distancia entre albergue $i$ y cliente $j$ .	[Km]
$CAP_i$	Capacidad de albergue $i$ .	[No. personas que puede albergar]

### Variables de decisión:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si el cliente } i \text{ es atendido por el albergue } j \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{Se abre el albergue } i \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

### Función objetivo

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} H_{ij} * X_{ij} \quad (1)$$

$$\max \quad \text{Arg} \min_i \sum_{j \in J} \frac{D_j * X_{ij}}{CAP_i} > 0 \quad (2)$$

Sujeto a:

1. Cada nodo de cliente es atendido por un solo albergue.

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (3)$$

2. Cada nodo de cliente es asignado a albergues abiertos.

$$X_{ij} \leq Y_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4)$$

3. La demanda total asignada a cada albergue  $i$ , debe ser inferior a su capacidad.

$$\sum_{j \in J} D_j * X_{ij} \leq CAP_i Y_i \quad \forall i \in I \quad (5)$$

4. Variables binarias

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

$$Y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

La función objetivo (1) minimiza la distancia recorrida por los nodos de demanda o clientes al albergue asignado, la función objetivo (2) maximiza el porcentaje mínimo de capacidad utilizada no cero de los albergues para garantizar que se obtenga mayor cobertura de servicio.

## 7. IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE ALBERGUES

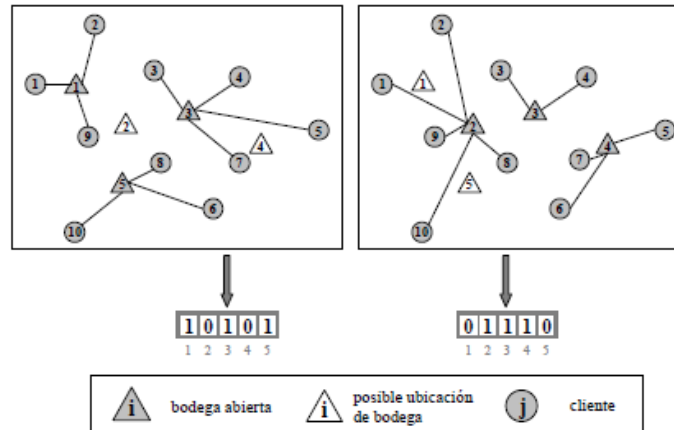
Para abordar el problema de localización de albergues se desarrollan dos algoritmos evolutivos, el algoritmo genético y el NSGA II. El primero toma la población inicial de tamaño  $N$  generada aleatoriamente verificando las restricciones de capacidad y mediante los operadores de cruce y mutación se obtiene la generación de hijos que será la población base de tamaño  $2N$  para el NSGA II.

### 7.1 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL

**7.1.1 Codificación de las soluciones.** En el desarrollo de esta investigación se utilizan dos representaciones para la solución inicial.

La primera consta de una cadena binaria de longitud  $m$ , cada posición indica un albergue disponible. Si el valor de la  $i$ -ésima posición equivale a 1, el albergue correspondiente se encuentra abierto, de lo contrario está cerrado. Esta representación se detalla en la figura 14.

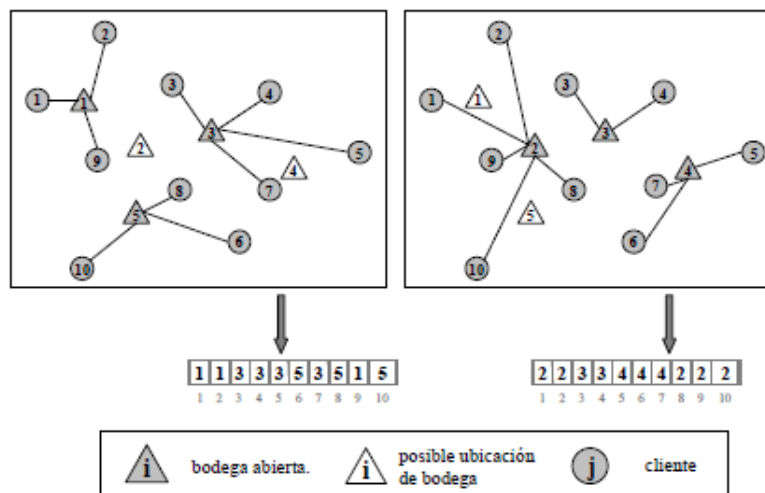
**Figura 14. Ejemplo de la representación binaria para problemas de localización.**



Fuente: Problemas de localización multiobjetivo, Juan Guillermo Villegas (2003).

Con ésta primera parte solo se considera la apertura de los albergues disponibles (variables  $Y_i$ ), para completar la representación de la solución se continúa con la asignación de los nodos de demanda (variables  $X_{ij}$ ) a los albergues, compuesta por una cadena de  $n$  números enteros, donde cada posición señala a cuál albergue está asignado el  $j$ -ésimo cliente. Figura 15.

**Figura 15. Ejemplo de representación entera para problemas de localización.**



Fuente: Problemas de localización multiobjetivo, Juan Guillermo Villegas (2003).

**7.1.2 Población Inicial  $P_i$**  La población inicial se obtiene partiendo de la representación entera. En ella se genera una cadena aleatoria de números enteros de longitud  $n$  (nodos de demanda), asignándose a cada posición un valor del intervalo  $[1, m]$  de posibles albergues. En adelante se evalúa si el albergue correspondiente al número asignado al nodo de demanda tiene capacidad suficiente para albergarlo. De ser así, se asigna, de lo contrario evalúa el siguiente albergue disponible hasta encontrar alguno que lo aloje.

En caso de que ningún albergue tenga capacidad suficiente para el nodo de demanda tratado, se le asignará el número 0.

En cada asignación se evalúa que la capacidad del albergue no sea violada, parando la asignación de nodos de demanda cuando la capacidad está llena. Las restricciones son las siguientes:

Sea  $D$ , la demanda de los nodos y  $Cap$ , la capacidad de los albergues:

- $D = Cap$ , se detiene la asignación y se cierra el albergue.
- $D \leq Cap$ , se asigna el nodo de demanda.
- $D \geq Cap$ , no se puede asignar, evalúa el siguiente albergue disponible.

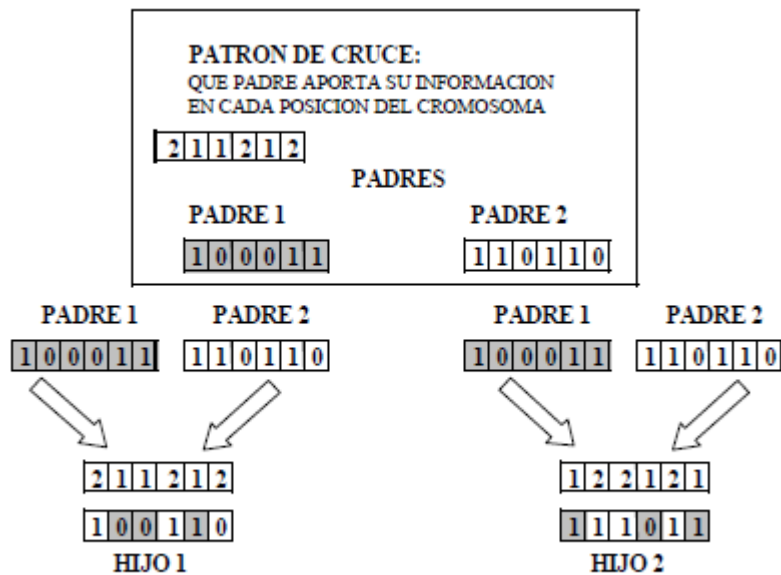
De esta forma se obtiene el conjunto de padres  $P(t)$  de tamaño  $N$ .

**7.1.3 Cruce** El cruce se realiza al conjunto de padres  $P(t)$ , para obtener los hijos  $C(t)$ . El operador utilizado para este procedimiento es el cruce uniforme.

El cruce uniforme funciona mediante la generación de un patrón aleatorio entre  $[1, 2]$ , el cual determina a que padre le corresponde aportar la información para cada una de las posiciones del cromosoma. De esta forma cada padre tiene una probabilidad  $pc$  de ser seleccionado para cada una de las posiciones del cromosoma,  $pc$  es un parámetro del algoritmo.

El segundo hijo se genera invirtiendo los números del patrón, por ejemplo, en la posición donde inicialmente le corresponde al padre 1, para este cambia a 2, siendo ahora el padre 2 el que proporciona su información. En la Figura 16 se ilustra mejor este ejemplo.

**Figura 16. Cruce uniforme**

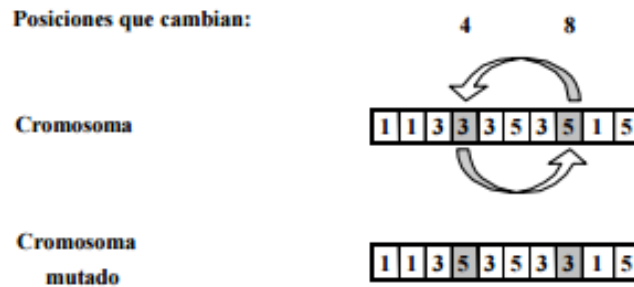


Fuente: Problemas de localización multiobjetivo, Juan Guillermo Villegas (2003).

**7.1.4 Mutación** Con la mutación se genera una nueva solución a partir de una ya existente mediante la modificación del valor de alguna de las posiciones del cromosoma.

Dadas las dos representaciones que conforman el cromosoma, para este caso se procede a mutar la parte entera. Para ello, se utiliza el operador con intercambio de asignación, este operador asigna algunos clientes seleccionados aleatoriamente a otros albergues que también son seleccionados aleatoriamente. Un ejemplo muestra mejor este operador. Figura 17.

**Figura 17. Ejemplo operador de mutación con intercambio de asignación.**



Fuente: Problemas de localización multiobjetivo, Juan Guillermo Villegas (2003).

Para completar la solución del cromosoma, en la representación binaria, una vez mutada la parte entera, se procede a realizar la asignación con la nueva configuración para los albergues que han sido abiertos.

Una vez aplicados estos operadores, obtenemos el conjunto de hijos  $C(t)$  que unidos al conjunto de padres  $P(t)$ , conformarán la población  $R(t)$  con la que se inicia la aplicación del algoritmo NSGA II.

## 7.2 ALGORITMO NSGA II

Con la población resultante de unir padres e hijos  $R(t)$  que se obtuvo del procedimiento anterior, se aplica el algoritmo de clasificación no dominada y a cada cromosoma se le asigna como función de adaptación el frente al que pertenece ( $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ ). Los padres de la generación siguiente  $P(t+1)$ , se seleccionan tomando los primeros frentes de  $R(t)$  hasta tener exactamente  $N$  soluciones. En la operación de selección se utiliza la distancia de apilamiento o crowding distance, como medida secundaria de adaptación, es decir, cuando se comparan dos cromosomas de un mismo frente es mejor aquel que tenga menos

soluciones en su vecindad. En general, se prefiere el cromosoma que pertenezca al frente menor y si ambos pertenecen al mismo frente se prefiere el que se encuentre en una región menos densa.

## 8. VALIDACIÓN DEL ALGORITMO

El diseño de medidas para realizar la comparación de algoritmos multiobjetivo es un campo activo de investigación. El resultado de un algoritmo evolutivo multiobjetivo no es una sola solución, sino un conjunto de soluciones no dominadas<sup>70</sup>. De esta manera, se encuentra en la literatura que la mayoría de problemas de localización de instalaciones abordados se trabajan con un único objetivo. Dado que el algoritmo propuesto es multiobjetivo, no es posible realizar la evaluación del mismo mediante la comparación de instancias de la literatura, ya que solo contemplan un solo valor.

Debido a que por lo general para este problema se encuentran datos de instancias monobjetivo, los parámetros de estas se adoptaron y se trataron como problemas multiobjetivo. Se tomaron tres instancias de un problema de localización capacitado; las instancias escogidas son la Cap 41, Cap 91 y Cap 123 (Anexo 4). En adelante, se hará referencia a éstas, como instancia 1, instancia 2 e instancia 3, respectivamente.

De esta manera se analizan tres aspectos para realizar la validación del presente algoritmo; el tiempo de ejecución, el cumplimiento de restricciones de capacidad y medidas de calidad tales como, el número de soluciones en el Frente de Pareto y el área del frente respecto a un punto anti ideal.

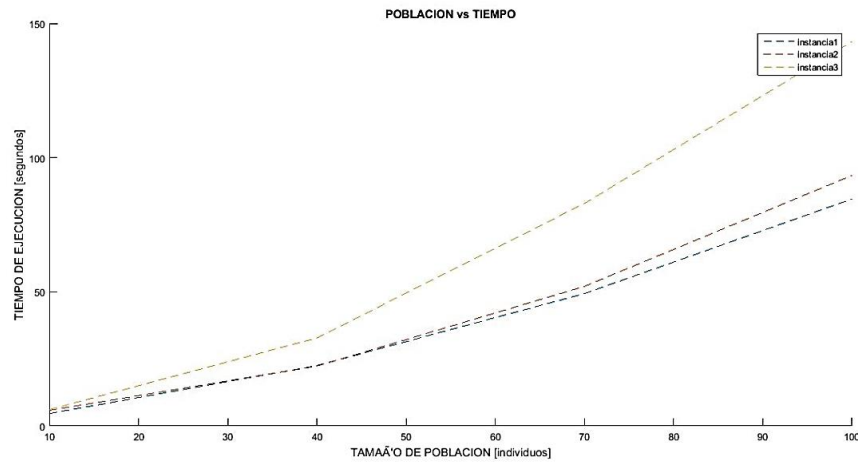
---

<sup>70</sup> VILLEGAS, Juan. Problemas de localización multiobjetivo. 2003. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Maestría Ingeniería Industrial. Tesis. p. 21.

- Tiempo de Ejecución

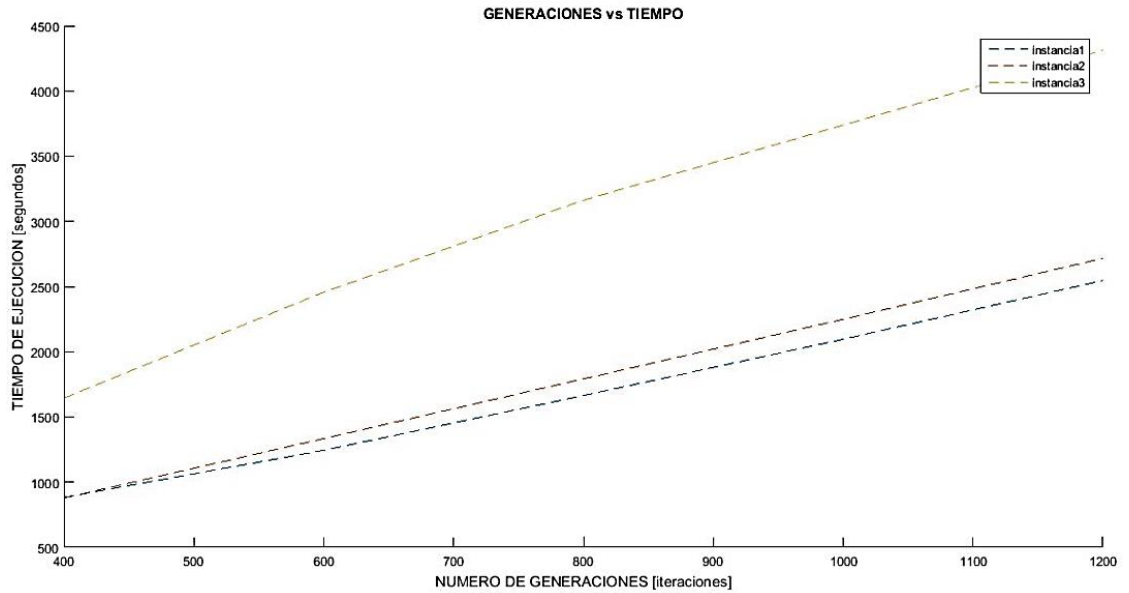
Para este análisis se varían los parámetros de entrada correspondientes al tamaño de población, el número de generaciones y la probabilidad de cruce. Los resultados de este análisis se pueden a continuación:

**Figura 18. Tamaño de población**



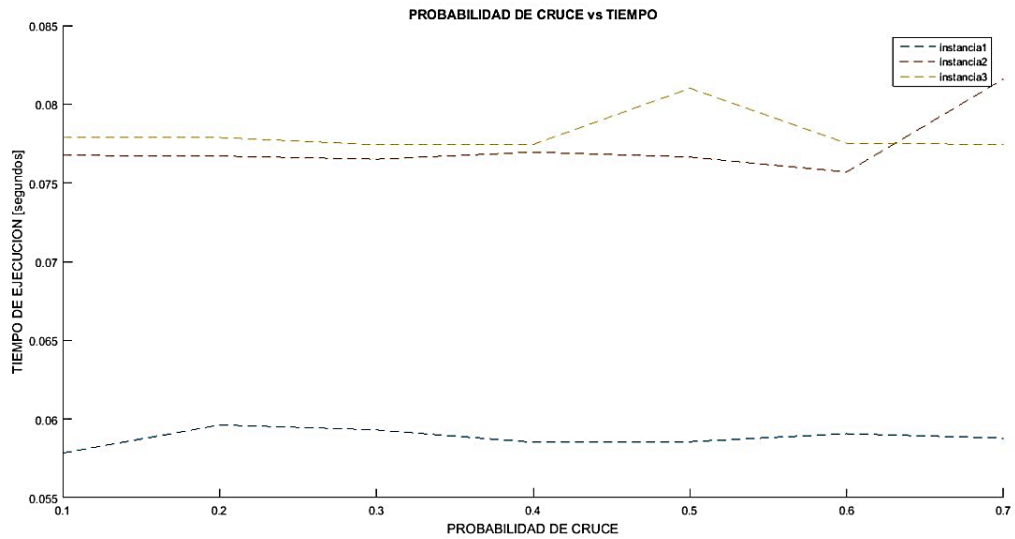
El tamaño de población usado comprende de 10 a 100 individuos. Se puede observar que el aumento de la población tiene una repercusión significativa en el tiempo que se tarda el algoritmo en llegar a la respuesta.

**Figura 19. Número de Generaciones**



El número de generaciones está comprendido entre 400 y 1200. De igual manera, se presenta una relación proporcional al aumentar el número de generaciones, aumenta el tiempo de ejecución del algoritmo.

**Figura 20. Probabilidad de Cruce**

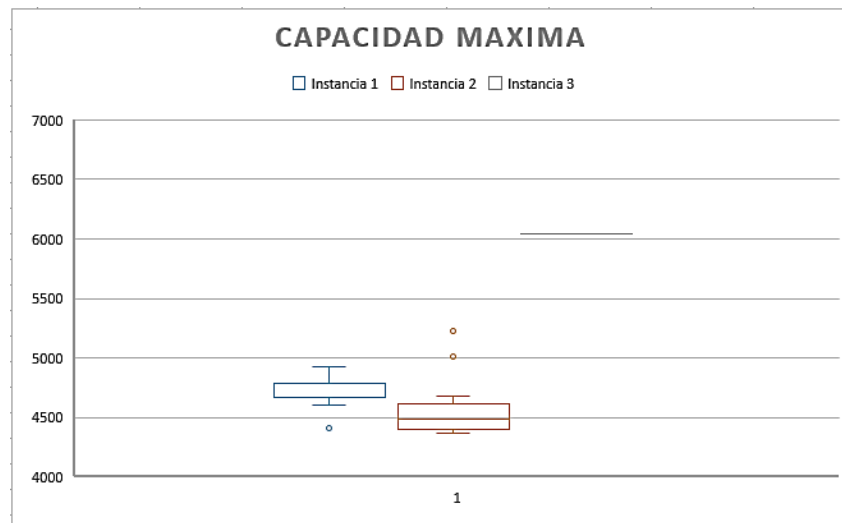


La probabilidad de cruce muestra un comportamiento independiente con respecto al tiempo, ya que las variaciones que se le hagan a las mismas no se ven reflejadas en el tiempo de ejecución.

- Cumplimiento de restricciones de capacidad

Se considera la capacidad usada de cada albergue y se toma la máxima capacidad de utilización de éstos para cada una de las soluciones de la población final. El resultado del análisis de esta información se presenta en la figura 22.

**Figura 21. Cumplimiento de capacidad**



Los resultados permiten ver que para todas las instancias consideradas se cumplen las condiciones de capacidad siendo los límites de capacidad para las instancias 1, 2 y 3 de 5000, 15000 y 15000 respectivamente.

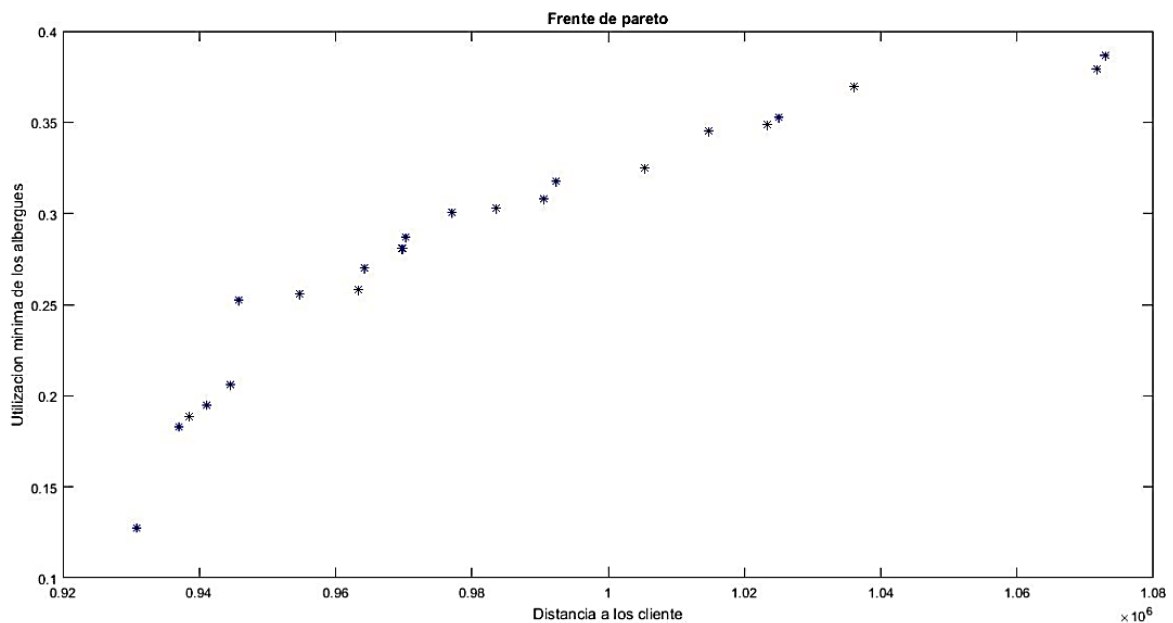
- Medidas de calidad

La Calidad de una aproximación del frente de Pareto está dada por el área comprendida entre dicha aproximación y un punto de referencia. Para evaluar la

calidad de la aproximación del Frente de Pareto existen diferentes métricas, en este caso en particular, se usa la métrica  $S$ , la cual permite medir la calidad de una aproximación del Frente de Pareto con el tamaño del espacio dominado por dicha aproximación<sup>71</sup>. Entre más espacio dominado haya, mejor se considera la aproximación.

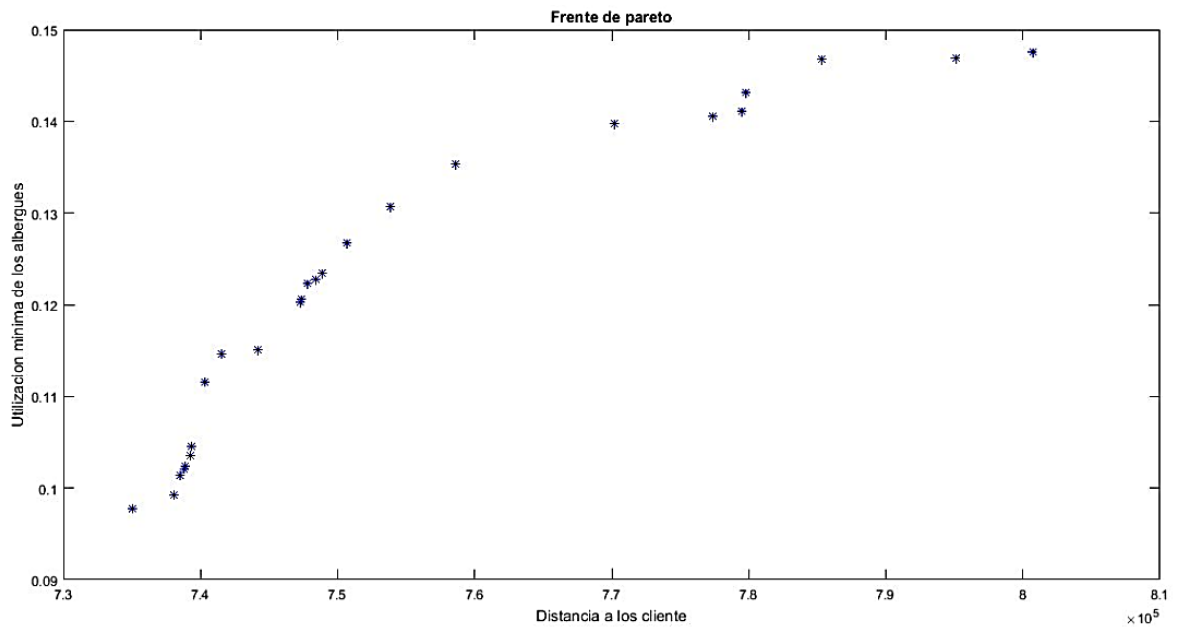
De esta manera, se toma el punto anti ideal (solución que tiene la máxima distancia y el mínimo de utilización de los albergues) y se calculan cada una de las áreas por parejas de los puntos del Frente de Pareto respecto a este punto. La unión del espacio dominado por todas las soluciones que componen la aproximación del frente es el valor de la métrica  $S$ .

**Figura 22. Frente de Pareto de la Instancia 1**

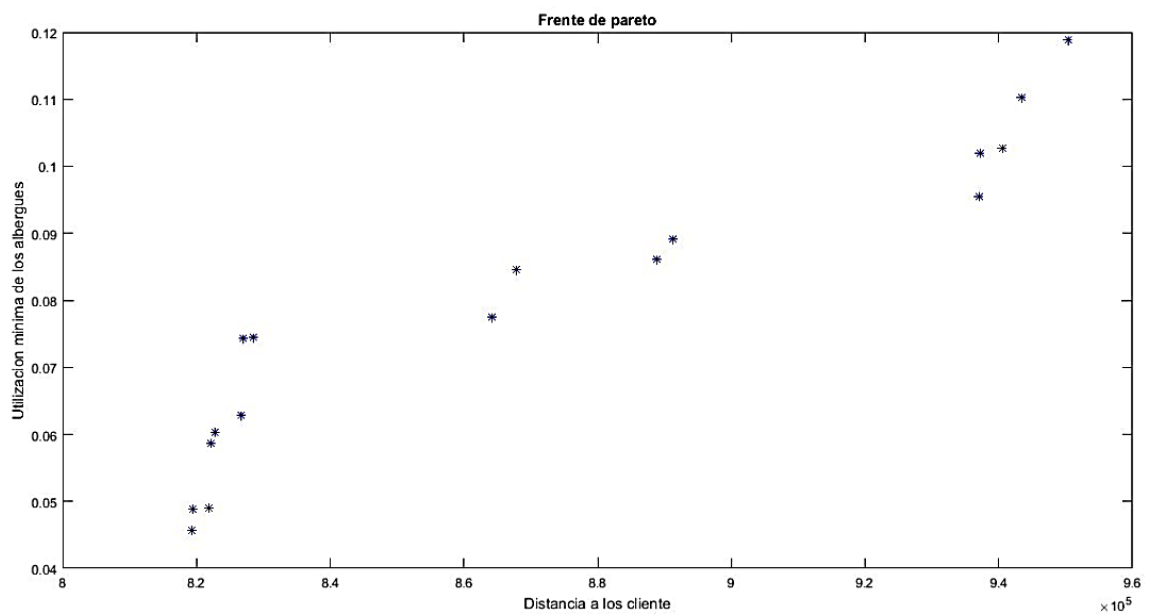


<sup>71</sup> VILLEGAS, Juan. Problemas de localización multiobjetivo. 2003. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Maestría Ingeniería Industrial. Tesis. p. 21.

**Figura 23. Frente de Pareto de la Instancia 2**



**Figura 24. Frente de Pareto de la Instancia 3**



En las figuras 23, 24 y 25, se muestra el Frente de Pareto para cada instancia, que muestra el conjunto de soluciones no dominadas. En las dos primeras instancias

se evidencia un número considerable de puntos que permiten una mejor aproximación al frente, en la tercera instancia hay una disminución de los puntos, debido a que el espacio de búsqueda es menor por tener un matriz de distancias cuadrada ( $m=n$ ). En la tabla se muestra el resumen del desempeño, en términos de calidad del algoritmo en las instancias evaluadas.

**Tabla 4. Resumen del Desempeño**

<b>Instancia</b>	<b>Clientes</b>	<b>Instalaciones</b>	<b>Cardinalidad del Frente</b>	<b>S</b>
1	50	16	34	3685.235
2	50	25	25	159.596733
3	50	50	17	569.286333

Los parámetros del algoritmo utilizados son: un tamaño de población de 50 individuos, un límite máximo de 800 generaciones y una probabilidad de cruce de 0.25. Los parámetros usados anteriormente se determinaron con base en el trabajo “Problemas de Localización Multiobjetivo” <sup>72</sup>.

---

<sup>72</sup> VILLEGAS, Juan. Problemas de localización multiobjetivo. 2003. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Maestría Ingeniería Industrial. Tesis

## 9. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

En la presente investigación, se propone un algoritmo NSGA II para dar solución al problema de localización de albergues ante un desastre por sismo.

Para elegir el escenario de aplicación de este problema se toma como base el estudio titulado “Identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga”, realizado por Chío y Maldonado<sup>73</sup>(2005). En este estudio se clasifica la ciudad en 20 zonas de acuerdo a las características de la construcción de las edificaciones (materiales, tipo de edificación, etc.) y además se presentan escenarios simulados con diferentes intensidades sísmicas (VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII)<sup>74</sup>. Cada escenario según la intensidad analizada, presenta estimaciones de daños totales por zonas y mapas de vulnerabilidad para toda la ciudad. En la figura 1 se muestra el mapa de la ciudad de Bucaramanga con las 20 zonas mencionadas.

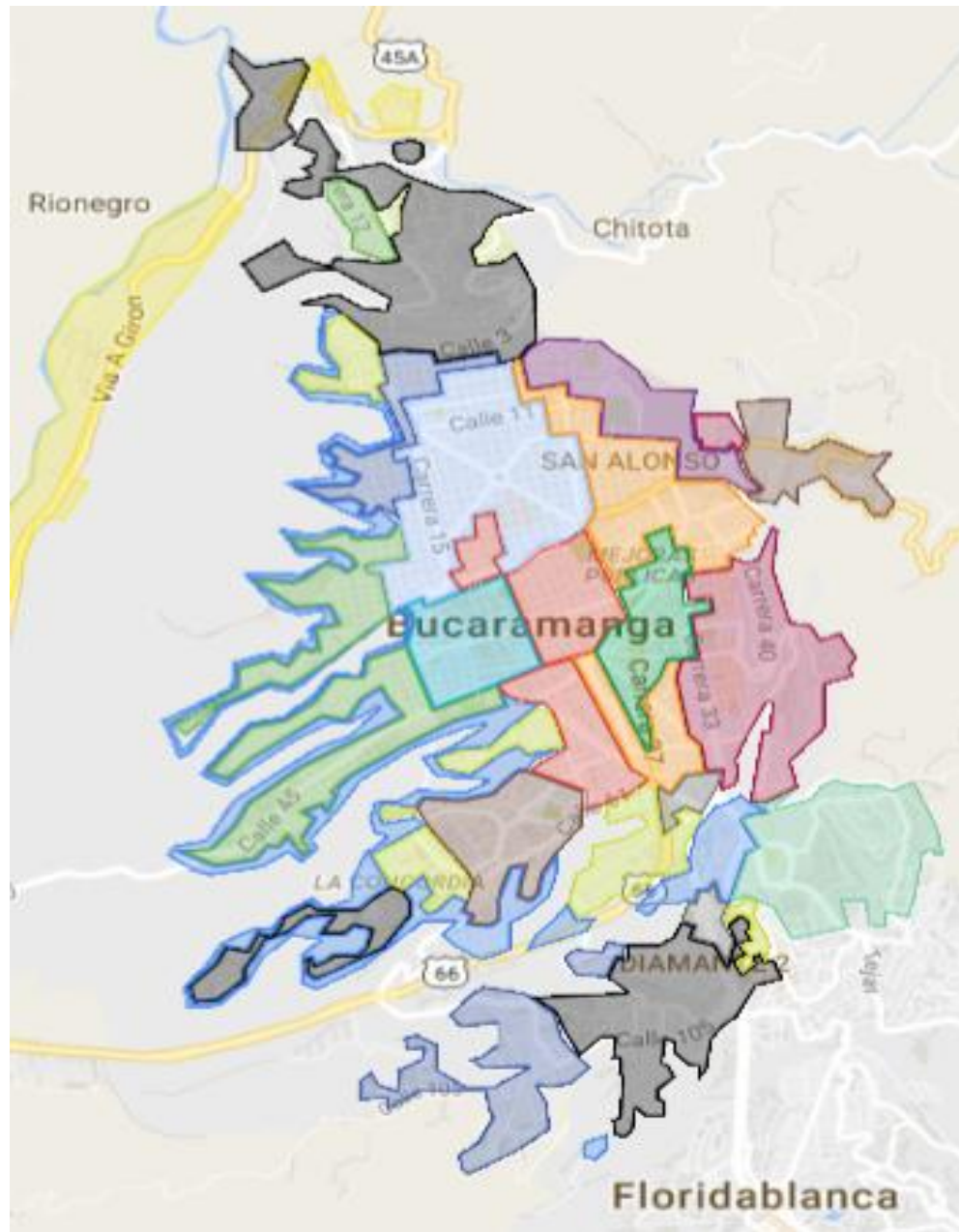
Es importante mencionar que la ciudad de Bucaramanga está dividida en comunas, (unidades administrativas que agrupan varios barrios o sectores determinados y facilitan la administración de los servicios que se brindan a la población). Razón por la cual, se toma como referencia esta representación geográfica para la presentación de los datos y el análisis del escenario de sismo.

---

<sup>73</sup>CHIO, Gustavo. Y MALDONADO, Esperanza.

<sup>74</sup> RICHTER, Charles. La escala sismológica de Richter o escala de magnitud local (ML), es una escala logarítmica arbitraria que asigna un número para cuantificar la energía liberada en un terremoto, denominada así en honor del sismólogo estadounidense.

**Figura 25. Mapa de zonas**



Dado que la delimitación de las zonas mostradas anteriormente no coinciden con la delimitación geográfica de las comunas de la ciudad, se incluyen estas zonas dentro de las comunas para proceder con su estudio. En la tabla 1 se puede apreciar las zonas que pertenecen a cada comuna.

**Tabla 5. Comunas pertenecientes a cada zona según estudio de vulnerabilidad.**

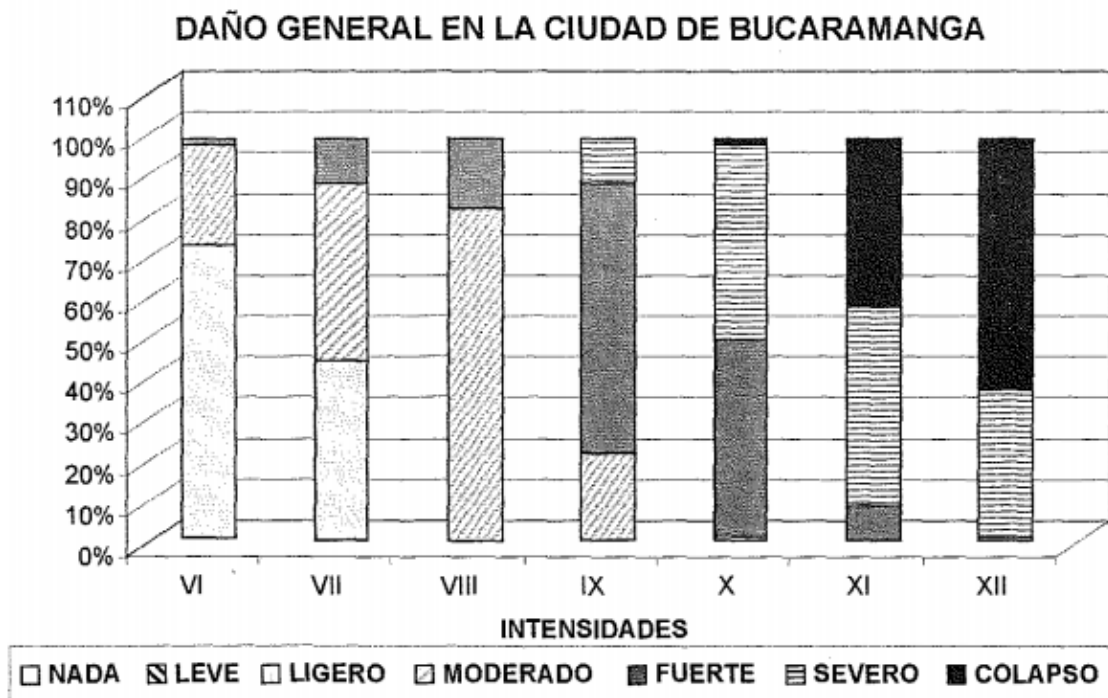
	Zonas
Comuna 1	18, 20 y 6
Comuna 2	18 y 20
Comuna 3	4, 6, 7, 9, 14 y 19
Comuna 4	4, 6, 7, 8 ,14
Comuna 5	4, 6, 15
Comuna 6	3, 4, 8, 9, 16
Comuna 7	3, 4, 5, 8
Comuna 8	3, 4, 5
Comuna 9	2, 3, 4, 10
Comuna 10	1, 2, 10
Comuna 11	1, 2
Comuna 12	9, 10, 11, 16
Comuna 13	9, 9A, 11, 16, 19
Comuna 14	12
Comuna 15	8, 15
Comuna 16	4, 17
Comuna 17	2, 3, 4

Finalmente, con los datos anteriores se toma un escenario de sismo de intensidad VI, ya que según “La caracterización general del escenario de riesgo por sismo de la ciudad de Bucaramanga”, realizada por la CDMB<sup>75</sup> , los antecedentes geológicos de la ciudad permiten estimar que existe un alto riesgo de ser sacudidos por un sismo de intensidades entre VI y VII en la escala de Richter.

<sup>75</sup> CDMB; Corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga. Caracterización general del escenario de riesgo por sismo de Bucaramanga. (2011). Disponible en <<http://cedir.gestiondelriesgo.gov.co/dvd/DVD%2004/Santander/2011%20Bucaramanga/Cap.%20%20-Sismo%20en%20Bucaramanga%20CDMB.pdf>>.

Para esta intensidad los daños generados son de aproximadamente: 72% ligeramente dañado, 25% moderadamente dañado y 3% fuertemente dañado. Figura 2.

**Figura 26. Daño general de la ciudad de Bucaramanga por intensidad sísmica.**








Fuente: Zonas sísmicamente Vulnerables. Chío y Maldonado. (2005)



Las zonas de mayor afectación con este grado de intensidad son la zona 12, zona 18, y la zona 11. Que corresponden a las comunas 1, 2, 3, 6, 12, 13 y 14.

Para una mejor visualización de estas zonas y con el fin de tener claridad de la ubicación de las mismas, en la tabla 2 se relacionan los barrios pertenecientes a las comunas afectadas.

**Tabla 6. Barrios pertenecientes a cada comuna afectada.**

	<b>COMUNA 1 NORTE</b>
	Barrios
	El Rosal
	Colorados
	Café Madrid
	Las Hamacas
	Altos del Kennedy
	Kennedy
	Balcones del Kennedy
	Las Olas
	Villa Rosa
	Minuto de Dios
	Tejar Norte
	Miramar
Miradores del Kennedy	
El Pablón	
	<b>COMUNA 2 NORORIENTAL</b>
	Los Ángeles
	Villa Helena I y II
	José María Córdoba
	Esperanza I, II y III
	Lizcano I y II
	Regadero Norte
	San Cristóbal
	La Juventud
	Transición I, II, III, IV y V
	La Independencia
	Villa Mercedes
	Bosque Norte

	<b>COMUNA 3 SAN FRANCISCO</b>
	Norte Bajo
	San Rafael
	El Cinal
	Chapinero
	Comuneros
	La Universidad
	Mutualidad
	Modelo
	San Francisco
	Alarcón
	UIS
	<b>COMUNA 6 LA CONCORDIA</b>
	La Concordia
	San Miguel
	Candiles
	Aeropuerto Gómez Niño
	Ricaurte
	La Ceiba
	La Salle
	La Victoria
	<b>COMUNA 12 CABECERA DEL LLANO</b>
	Cabecera del Llano
	Sotomayor
	Antiguo Campestre
	Bolarquí
	Mercedes
	Perta del Sol
	Conucos
	El Jardín
	Pan de Azúcar
	Los Cedros
	Terrazas
	La Floresta

	<b>COMUNA 13 ORIENTAL</b>
	Los Pinos
	San Alonso
	Galán
	La Aurora
	Las Américas
	El Prado
	Mejoras Públicas
	Antonia Santos
	Bolívar
	Álvarez
	<b>COMUNA 14 MORRORICO</b>
	Vegas de Morrорico
	El Diviso
	Morrорico
	Albania
	Miraflores
	Buenos Aires
	Limoncito
	Los Sauces

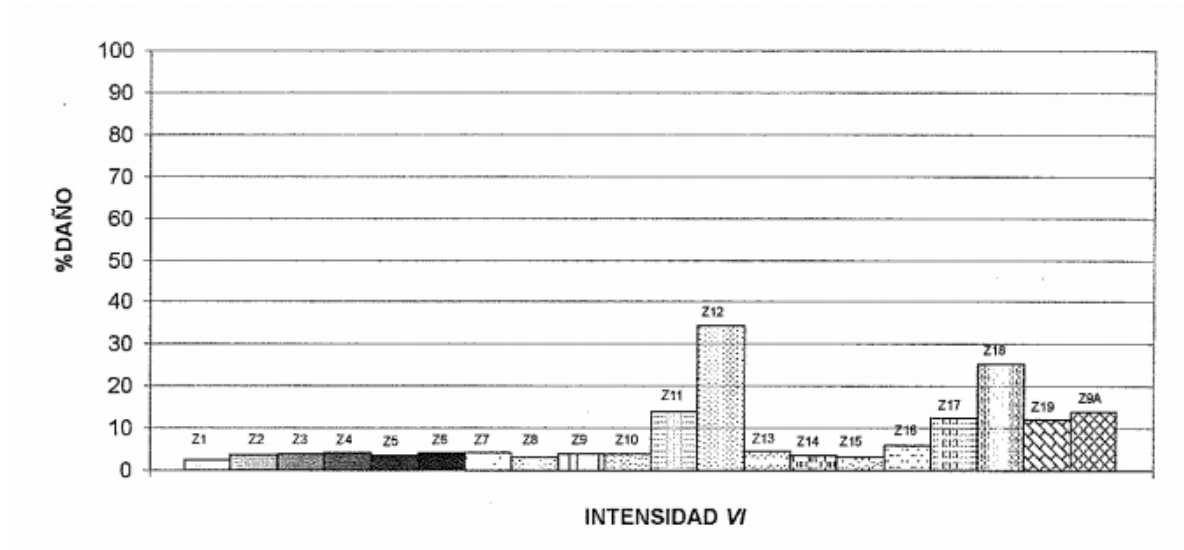
Como muestra se selecciona la comuna 12, ya que ésta se compone de varias zonas afectadas, es decir, diferentes tipos de edificaciones y construcciones y por lo tanto diferentes porcentajes de daño según la intensidad sísmica elegida. Para el análisis se considera un 15 % de daño, como resultado del promedio de los porcentajes de daño de la comuna por las diferentes zonas que la conforman.

En la figura 3 se muestra el porcentaje de daño para la intensidad de sismo elegida para el análisis.

En esta comuna mediante la herramienta Google Maps, se identifican un total de 159 manzanas (nodos de demanda). Figura 4.

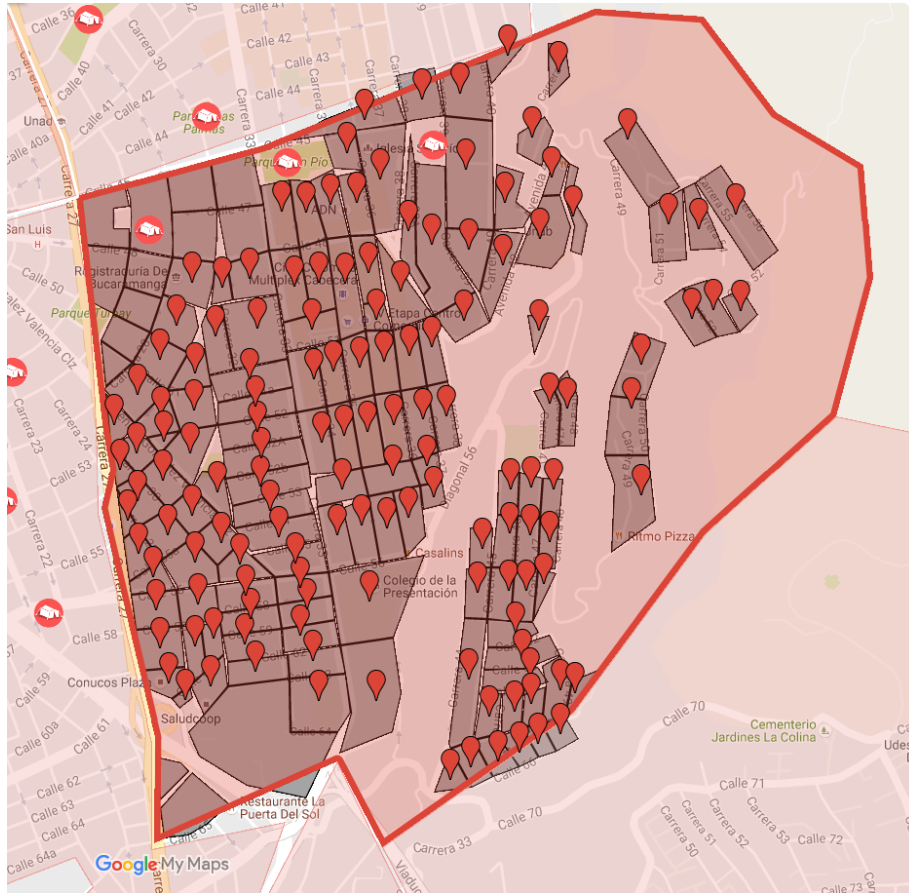
La demanda por cada nodo se considera uniforme, tomando 245 como población por manzana y un porcentaje de afectados igual al porcentaje de daño, dando una demanda promedio de 37 personas por manzana.

**Figura 27. Porcentaje de daño por zonas**



Fuente: Zonas sísmicamente Vulnerables. Chío y Maldonado. (2005)

**Figura 28. Nodos de demanda de la Comuna 12**



**EJECUCIÓN DEL ALGORITMO**

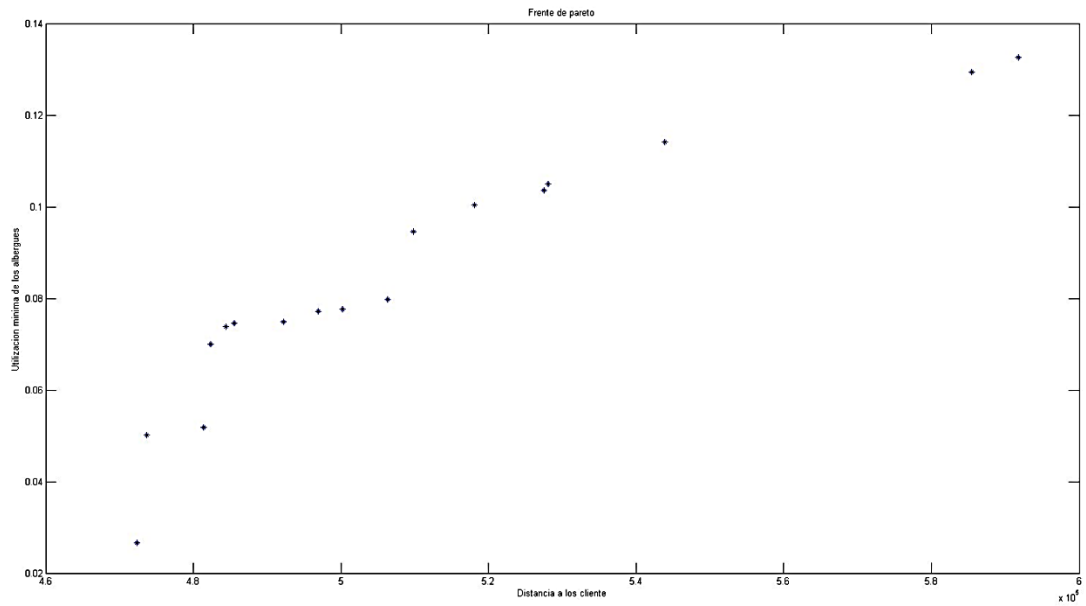
Una vez seleccionado el escenario, el algoritmo es ejecutado mediante los datos de entrada mencionados anteriormente y los parámetros mostrados en la tabla 3, arrojando soluciones en un tiempo computacional relativamente corto.

**Tabla 7 . Resumen de Parámetros NSGA II**

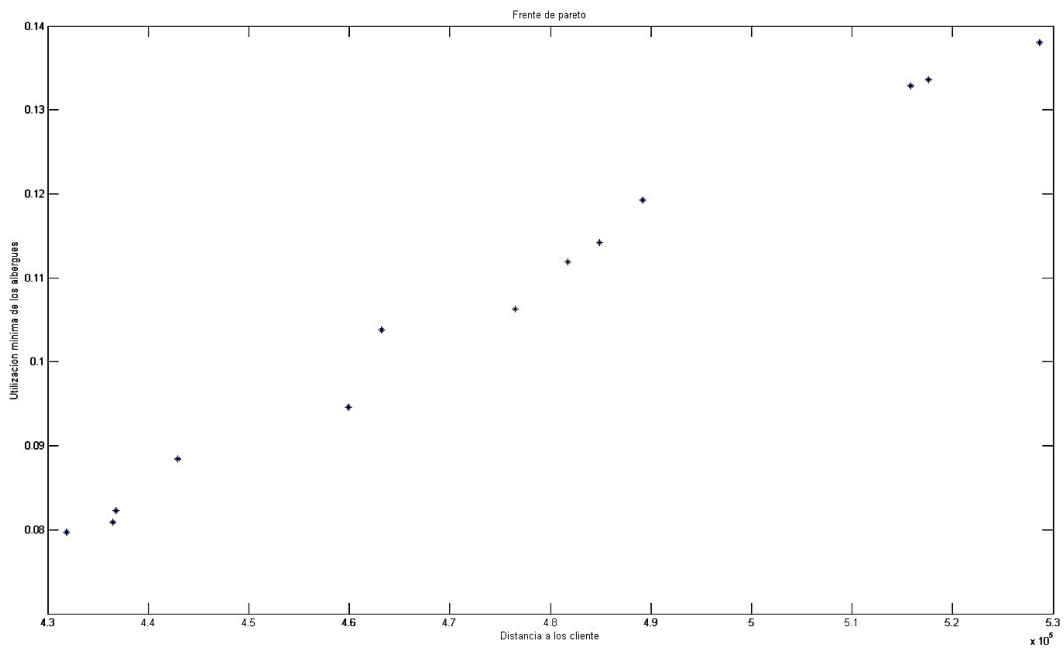
Frente	Tamaño de Población	Generaciones	Probabilidad de Cruce
1	50	1200	0.25
2	50	2000	0.25

En las figuras 28 y 29, se presentan los frentes de Pareto obtenidos del algoritmo para el escenario descrito.

**Figura 29. Frente de Pareto 1**



**Figura 30. Frente de Pareto 2**



## RESULTADOS

A continuación, se muestran las soluciones obtenidas por el algoritmo NSGA II, donde la primera columna corresponde al valor de la función objetivo 1, la columna 2 al valor de la función objetivo 2, la columna 3 el frente al que pertenece cada solución y la columna 4 es la distancia crowding calculada por el algoritmo durante el proceso de selección de los frentes.

**Tabla 8. Resultados para la generación de 1200 individuos**

f1	f2	Frente	Distancia
501937	-0,10378682	1	0,05970448
490870	-0,09462916	1	0,2310938
504471	-0,11077844	1	0,13870756
500498	-0,10356893	1	0,0711597
507986	-0,11161388	1	0,15892056
569620	-0,12946116	1	0,88641586
502046	-0,10632184	1	0,14034854
492148	-0,10018051	1	0,23103567
586482	-0,13430127	1	0,20060199
486781	-0,07974138	1	Inf
488522	-0,08841099	1	0,28830207
508717	-0,11922664	1	0,80370671
610625	-0,1380597	1	Inf
586482	-0,13430127	1	0,27794152

**Tabla 9. Resultados para la generación de 2000 individuos**

f1	f2	frente	distancia
521264	-0,14230769	1	0,3751209
460919	-0,10466761	1	0,13218837
566542	-0,14624506	1	Inf
447936	-0,0523338	1	Inf
535353	-0,14595661	1	0,12185979
498193	-0,14015152	1	0,33960576
452379	-0,08841099	1	0,28231784
449490	-0,07312253	1	0,42162271
453634	-0,09635417	1	0,17940766
457989	-0,10081744	1	0,14994631
485564	-0,11922664	1	0,40084379
471852	-0,11189516	1	0,12750087
461087	-0,11077844	1	0,16914065
492015	-0,13357401	1	0,20486425

En la tabla 6 se muestra un resumen de los albergues habilitados en cada una de las soluciones generadas. En la primera fila se tiene el número de las soluciones generadas (1-23) y debajo de ellas se encuentra el número correspondiente a cada albergue habilitado. En la tabla 7 se muestran los albergues numerados con su respectivo nombre y dirección.

**Tabla 10. Albergues habilitados**

SOLUCIONES																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	3	2	2	3	2	2	2	3	2	2
4	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	3	3	3	4	3	3
6	4	4	4	4	6	6	4	4	4	4	4	6	6	4	4	6	4	4	4	6	4	4
7	6	5	6	6	7	7	6	6	6	6	6	7	7	6	6	7	6	6	6	7	6	6

SOLUCIONES																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
9	7	6	7	7	9	9	7	7	7	7	7	9	9	7	7	9	7	7	7	9	7	7
10	9	7	9	9	10	10	9	9	9	9	9	10	10	9	9	10	9	9	9	10	9	9
11	10	9	10	10	11	11	10	10	10	10	10	11	11	10	10	11	10	10	10	11	10	10
12	11	10	11	11	12	12	11	11	11	11	11	12	12	11	11	12	11	11	11	12	11	11
13	12	11	12	12	13	13	12	12	12	12	12	13	13	12	12	13	12	12	12	13	12	12
14	13	12	13	13	14	14	13	13	13	13	13	14	14	13	13	14	13	13	13	14	13	13
16	14	13	14	14	16	16	14	14	14	14	14	16	16	14	14	16	14	14	14	16	14	14
17	16	14	16	16	17	17	16	16	16	16	16	17	17	16	16	17	16	16	16	17	16	16
18	17	16	17	17	18	18	17	17	17	17	17	18	18	17	17	18	17	17	17	18	17	17
20	18	17	18	18	20	20	18	18	18	18	18	20	20	18	18	20	18	18	18	20	18	18
21	20	18	20	20	21	21	20	20	20	20	20	21	21	20	20	21	20	20	20	21	20	20
22	21	20	21	21	22	22	21	21	21	21	21	22	22	21	21	22	21	21	21	22	21	21
24	22	21	22	22	24	24	22	22	22	22	22	24	24	22	22	24	22	22	22	24	22	22
25	24	22	24	24	25	25	24	24	24	24	24	25	25	24	24	25	24	24	24	25	24	24
26	25	24	25	25	26	26	25	25	25	25	25	26	26	25	25	26	25	25	25	26	25	25
29	26	25	29	29	29	29	26	29	26	26	26	29	29	26	26	29	29	29	29	29	26	26
30	29	26	30	30	30	30	29	30	29	29	29	30	30	29	29	30	30	30	30	30	29	29
31	30	29	31	31	31	31	30	31	30	30	30	31	31	30	30	31	31	31	31	31	30	30
33	31	30	33	33	33	33	31	33	31	31	31	33	33	31	31	33	33	33	33	33	31	31
34	33	31	34	34	34	34	33	34	33	33	33	34	34	33	33	34	34	34	34	34	33	33
35	34	33	35	35	35	35	34	35	34	34	34	35	35	34	34	35	35	35	35	35	34	34
36	35	34	37	37	36	36	35	37	35	35	35	37	36	35	35	36	37	37	37	37	35	35
37	37	35	39	39	37	37	36	39	37	36	37	39	37	37	37	37	39	39	39	39	37	36
39	39	36	40	40	39	39	37	40	39	37	39	40	39	39	39	39	40	40	40	40	39	37
40	40	37	41	41	40	40	39	41	40	39	40	41	40	40	40	41	41	41	41	41	40	39
41	41	39	42	42	41	41	40	42	41	40	41	42	41	41	41	41	42	42	42	42	41	40
42	42	40	44	44	42	42	41	44	42	41	42	44	42	42	42	42	44	44	44	44	42	41
44	44	41	45	45	44	44	42	45	44	42	44	45	44	44	44	44	45	45	45	45	44	42
45	45	42	47	47	45	45	44	47	45	44	45	47	45	45	45	45	47	47	47	47	45	44
47	47	43	48	48	47	47	45	48	47	45	47	48	47	47	47	47	48	48	48	48	47	45
48	48	44	50	50	48	48	47	50	48	47	48	50	48	48	48	48	50	50	50	50	48	47
50	50	45	51	51	50	50	48	51	50	48	50	51	50	50	50	51	51	51	51	51	50	48
51	51	47	53	53	51	51	50	53	51	50	51	53	51	51	51	53	53	53	53	53	51	50
53	53	48	54	54	53	53	51	54	53	51	53	54	53	53	53	54	54	54	54	54	53	51
54	54	50	55	55	54	54	53	55	54	53	54	55	54	54	54	55	55	55	55	55	54	53

SOLUCIONES																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
55	55	51	56	56	55	55	54	56	55	54	55	56	55	55	55	55	56	56	56	56	55	54
56	56	53	57	57	56	56	55	57	56	55	56	57	56	56	56	56	57	57	57	57	56	55
57	57	54	59	59	57	57	56	59	57	56	57	59	57	57	57	57	59	59	59	59	57	56
59	59	56	60	60	59	59	57	60	59	57	59	60	59	59	59	59	60	60	60	60	59	57
60	60	57	61	61	60	60	59	61	60	59	60	61	60	60	60	60	61	61	61	61	60	59
61	61	58	62	62	61	61	60	62	61	60	61	62	61	61	61	61	62	62	62	62	61	60
62	62	59	63	63	62	62	61	63	62	61	62	63	62	62	62	62	63	63	63	63	62	61
63	63	60	64	64	63	63	62	64	63	62	63	64	63	63	63	63	64	64	64	64	63	62
64	64	61	65	65	64	64	63	65	64	63	64	65	64	64	64	64	65	65	65	65	64	63
65	65	62	67	67	65	65	64	67	65	64	65	67	65	65	65	65	67	67	67	67	65	64
67	67	63	68	68	67	67	65	68	67	65	67	68	67	67	67	67	68	68	68	68	67	65
68	68	64	69	69	68	68	67	69	68	67	68	69	68	68	68	68	69	69	69	69	68	67
69	69	65	70	70	69	69	68	70	69	68	69	70	69	69	69	69	70	70	70	70	69	68
70	70	66	71	71	70	70	69	71	70	69	70	71	70	70	70	70	71	71	71	71	70	69
71	71	67	72	72	71	71	70	72	71	70	71	72	71	71	71	71	72	72	72	72	71	70
72	72	68	73	73	72	72	71	73	72	71	72	73	72	72	72	72	73	73	73	73	72	71
73	73	69	74	74	73	73	72	74	73	72	73	74	73	73	73	73	74	74	74	74	73	72
74	74	70	75	75	74	74	73	75	74	73	74	75	74	74	74	74	75	75	75	75	74	73
75	75	71	77	77	75	75	74	77	75	74	75	77	75	75	75	75	77	77	77	77	75	74
77	77	72			77	77	75		77	75	77		77	77	77	77					77	75
79		73			79		77			77			79									77
		74					79			79												79
		75																				

**Tabla 11. Información de los albergues**

Dirección	Nombre del Albergue	No.
Cl 33A #41-2 a 41-38, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Álvarez	<u>1</u>
Cl 3A, Bucaramanga, Santander, Colombia	IE Santander	<u>2</u>
Cra. 25 #31-1 a 31-113, Bucaramanga, Santander, Colombia	IE Carl Roger	<u>3</u>
Cl. 102 #30-1 a 30-111, Bucaramanga, Santander, Colombia	IE la libertad	<u>4</u>
Cl. 105 #15e-199 a 15e-297, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio bilingüe Divino Niño	<u>5</u>

<b>Dirección</b>	<b>Nombre del Albergue</b>	<b><u>No.</u></b>
Cra. 27a #45a-35, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio San Pedro Claver	<u>6</u>
Cra. 27 #68-60, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa San José de la Salle SEDE A	<u>7</u>
Cl. 108 #23b-1 a 23b-39, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Federico Ozanam	<u>8</u>
Cra. 34 #20-187 a 20-273, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Militar General Santander	<u>9</u>
Cra. 50 #24-1 a 24-17, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Oriente Miraflores SEDE A	<u>10</u>
Cl. 111 #21b-1 a 21b-53, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Infantil Provenza	<u>11</u>
Cra. 38 #32-16, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Las Américas	<u>12</u>
Cra. 11 #65-2 a 65-58, Bucaramanga, Santander, Colombia	Gimnasio Superior	<u>13</u>
Cl. 14 #32-181, Bucaramanga, Santander, Colombia	Velódromo Alfonso Flórez Ortiz	<u>14</u>
Cl. 16a Nte. #4-30, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Gustavo Cote Uribe	<u>15</u>
Cra. 21 #68-1 a 68-113, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa San José de la Salle SEDE A	<u>16</u>
Estudiantes 9, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE A	<u>17</u>
Cl. 18 #24-61, Bucaramanga, Santander, Colombia	Calle 18 -24	<u>18</u>
Cl. 22 Nte. #12-1 a 12-109, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Maipore SEDE A	<u>19</u>
Cra. 19 #104-72 a 104-102, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa INEM Custodio García Rovira SEDE A	<u>20</u>
Cl. 27a #25-119 a 25-173, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio de la Santísima Trinidad Bucaramanga	<u>21</u>
Cl. 28 #21-1 a 21-101, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Franciscano del Virrey Solís	<u>22</u>
Cra. 11, Bucaramanga, Santander, Colombia	CENTRO EDUCATIVO PROTECCION DEL NIÑO	<u>23</u>

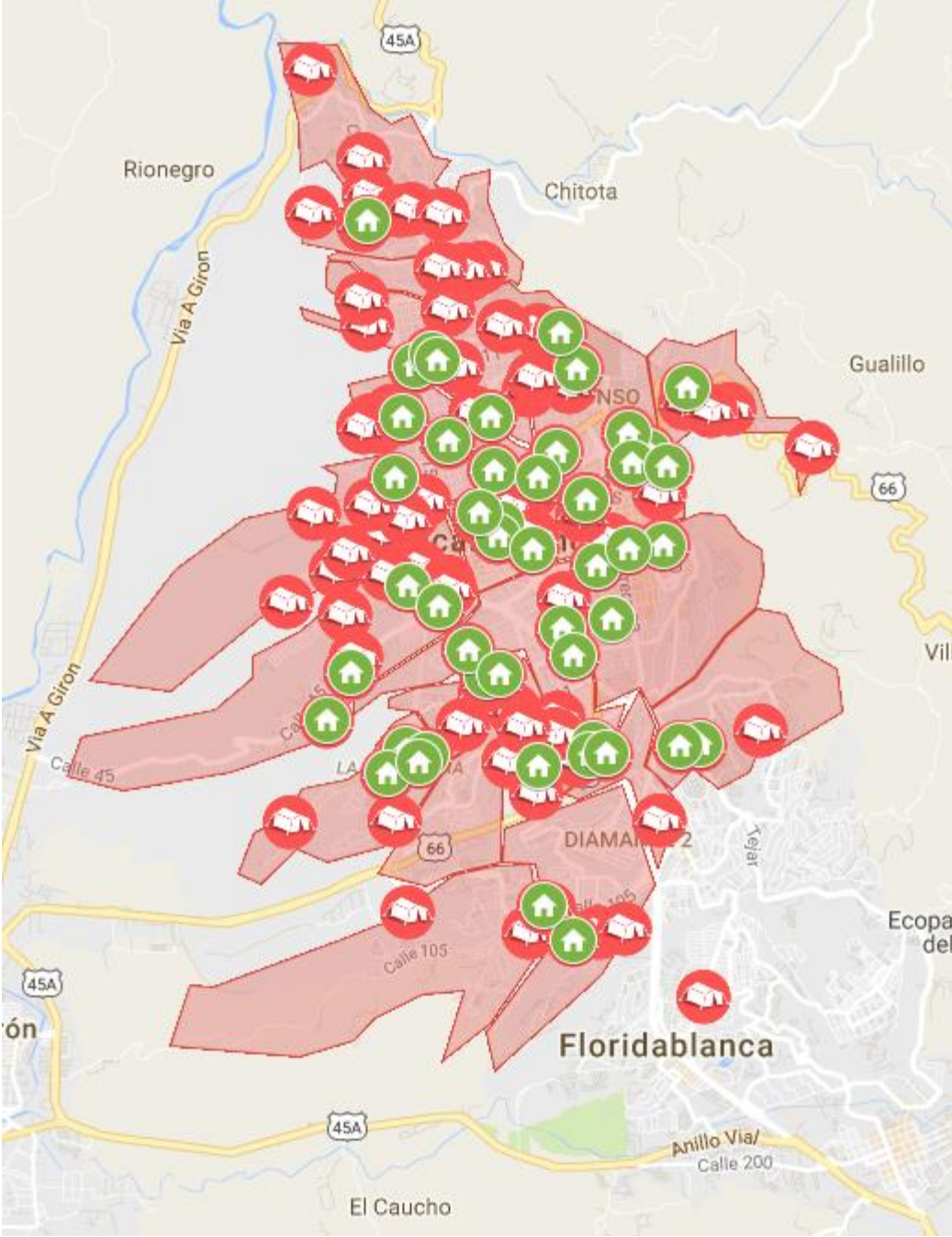
<b>Dirección</b>	<b>Nombre del Albergue</b>	<b>No.</b>
Cra. 15 #10a-1 a 10a-29, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Del Sagrado Corazón Jesús	<u>24</u>
Cl. 30 #30-63, Bucaramanga, Santander, Colombia	Escuela Normal Superior de Bucaramanga SEDE A	<u>25</u>
Cl. 32 #21-60 a 21-120, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Antonia Santos	<u>26</u>
Cra. 23 #108-59, Bucaramanga, Santander, Colombia	INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROVENZA - SEDE A	<u>27</u>
Cra. 5 Oe. #30-1 a 30-55, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Francisco de Paula Santander	<u>28</u>
Cl. 34 #20-2 a 20-100, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Incades	<u>29</u>
Cl. 34a #43-38, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia	<u>30</u>
Tv. 72 #35-198, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Caldas	<u>31</u>
Cra. 53 #73-2 a 73-214, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Gimnasio San Sebastián	<u>32</u>
Cl. 36 #19-1 a 19-109, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Santander	<u>33</u>
Cra. 12 #15-1 a 15-95, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE F	<u>34</u>
Cra. 18 #9-1 a 9-101, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Cristo Rey	<u>35</u>
Cra. 21 #15-57, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque San Francisco	<u>36</u>
Cra. 26 #30-129, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque de los niños	<u>37</u>
Cl. 37 #27-167 a 27-203, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Mejoras Públicas	<u>38</u>
Cl. 39 #22-1 a 22-93, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Simón Bolívar	<u>39</u>
Cl. 41 #8-2 a 8-48, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Camacho Carreño	<u>40</u>
Cra. 19 #31-76, Bucaramanga, Santander,	Parque Centenario	<u>41</u>

<b>Dirección</b>	<b>Nombre del Albergue</b>	<b><u>No.</u></b>
Colombia		
Cra. 39 #45-1 a 45-111, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque de las Estatuas	<u>42</u>
Cra. 11 #36-2 a 36-12, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque García Rovira	<u>43</u>
Cl. 45 #0-2 a 0-268, Bucaramanga, Santander, Colombia	Polideportivo Campo Hermoso	<u>44</u>
Cl. 45 #11-39 a 11-113, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Romero	<u>45</u>
Cra. 39 #41-2 a 41-168, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque de los Leones	<u>46</u>
Cra. 30 #8-2 a 8-124, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Técnico Superior Dámaso Zapata SEDE A	<u>47</u>
Viaducto La Flora, Bucaramanga, Santander, Colombia	Estadio de Atletismo La Flora	<u>48</u>
Cra. 11 #15 Norte-88, Bucaramanga, Santander, Colombia	Cancha de Fútbol barrio Kennedy	<u>49</u>
Cra. 27 #69-61, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Gabriela Mistral	<u>50</u>
Cra. 22 #1 Norte-1 a 1 Norte-83, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Técnico Rafael García Herreros	<u>51</u>
Cra. 15 #5 Norte-7 a 5 Norte-127, Bucaramanga, Santander, Colombia	POLIDEPORTIVO NORTE	<u>52</u>
Cra. 13 #41-1 a 41-97, Bucaramanga, Santander, Colombia	CENTRO EDUCATIVO PROTECCION DEL NIÑO	<u>53</u>
Cra. 18 #10-2 a 10-54, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Comuneros	<u>54</u>
Cra. 18 #19-65, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Americano de Bucaramanga	<u>55</u>
Dg. 31 #52-96, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Diagonal 31	<u>56</u>
Cl. 50 #9 Oeste-103, Bucaramanga, Santander, Colombia	Instituto Educativo Campo Hermoso SEDE A	<u>57</u>
Cl. 51 #13-136 a 13-222, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Técnico Empresarial José María	<u>58</u>
Cra. 30, Bucaramanga, Santander, Colombia}	EL ROSAL	<u>59</u>

<b>Dirección</b>	<b>Nombre del Albergue</b>	<b><u>No.</u></b>
Cl. 53 #21-56, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A	<u>60</u>
Cl. 54a #13-2 a 13-78, Bucaramanga, Santander, Colombia	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A	<u>61</u>
Cl. 56 #21-3 a 21-79, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Aurelio Martínez Mutis SEDE B	<u>62</u>
Cra. 33 #46-61, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque San Pio	<u>63</u>
Cl. 57 #7W-11, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa José Celestino Mutis	<u>64</u>
Cl. 60 #7W-108, Bucaramanga, Santander, Colombia	Cancha de Fútbol del Mutis	<u>65</u>
Cl. 61 #2W-34, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Bilingüe la Consolata	<u>66</u>
Cl. 61 #5-2 a 5-40, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque y Canchas Los Naranjos	<u>67</u>
Cl. 62 #3 Oeste-1 a 3 Oeste-87, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	<u>68</u>
Cl. 64 #17E-103, Bucaramanga, Santander, Colombia	Parque Cieba & Corona	<u>69</u>
Cl. 64a #17a-2 a 17a-60, Bucaramanga, Santander, Colombia	Colegio Metropolitano Real de Minas	<u>70</u>
Cl. 8 #29-2 a 29-228, Bucaramanga, Santander, Colombia	Institución Educativa Técnico Superior Dámaso Zapata SEDE A	<u>71</u>

La representación gráfica de una de las mejores soluciones es la siguiente:

Figura 31. Solución gráfica



## 10. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

La construcción de la red de instalaciones y clientes por medio de Google Maps fue una herramienta muy importante en esta investigación, ya que permitió disminuir la complejidad en la presentación de los datos y facilitó la recolección de los mismos.

Con base al análisis realizado en la validación del algoritmo, se encuentra que las variaciones en el tamaño de la población y el número de generaciones afectan directamente el tiempo de ejecución del mismo, es decir, se requirió más trabajo computacional debido a los procesos de ordenamiento no dominado. Por otro lado, la probabilidad de cruce fue indiferente en el incremento del mismo.

Las posibles ubicaciones de los albergues obedecen a una primera aproximación, debido a que hay incertidumbre en cuanto a los daños producidos por un evento catastrófico.

Los resultados obtenidos al utilizar el algoritmo NSGA II en el problema de localización de instalaciones fueron los esperados ya que arrojó un conjunto de soluciones factibles de buena calidad.

La API de Google fue una excelente herramienta para determinar la matriz de distancias origen-destino, sin embargo, el tiempo computacional requerido para originar las soluciones fue muy extenso..

El algoritmo NSGA II arrojó un frente de Pareto más robusto para la generación de 2000 individuos que para la generación de 1200. Se corrobora de esta manera,

que al aumentar el número de generaciones el algoritmo arroja mejores soluciones.

## **11. RECOMENDACIONES**

Enriquecer la información correspondiente a estudios de zonificación sísmo-geotécnica, mapas de riesgos por sismicidad, y demás datos que permitan tener un acercamiento real a la vulnerabilidad de la ciudad para evaluar diferentes escenarios.

Este algoritmo se puede aplicar en otro tipo de escenarios como por ejemplo inundaciones, remoción en masa y cualquier otro evento o desastre donde se necesite la rápida ubicación de personas damnificadas en alojamientos temporales.

Se recomienda abordar este problema, teniendo en cuenta la vulnerabilidad sísmica de las vías principales, el colapso de puentes y demás eventos que se puedan presentar durante y después de un sismo de gran magnitud.

Los entes gubernamentales son los encargados de adecuar las instalaciones propuestas como albergues temporales y contar con la infraestructura necesaria para garantizar el bienestar de la población y reducir el impacto de la tragedia, además se debe garantizar el apoyo para el retorno e integración de toda la comunidad.

Integrar el algoritmo a un sistema de información geográfico que permita proporcionar la información requerida en tiempo real y que a su vez muestre una interfaz gráfica de las asignaciones realizadas en el mapa.

Para futuras investigaciones se recomienda construir un modelo que divida la demanda de manera que se aumente el porcentaje de utilización de cada albergue.

## **BIBLIOGRAFÍA**

ACOSTA, L; ALMENDRAS, D. Localización de albergues para hogares afectados por un desastre natural. En: XLIII Simposio Brasileiro de PESQUISA OPERACIONAL: 15 – 18 de agosto de 2011. Ubatuba, Sao Paulo, Brasil. 10p.

ALBERTO MATURANA, P. Evaluación de riesgos y gestión en desastres. 10 preguntas para la década actual. : Risk assessment and disaster management. 10 questions for the present decade (English). Revista Médica Clínica Las Condes. 2011, vol 22, p. 545-555.

ALÇADA-ALMEIDA, L.; TRALHÃO, L.; SANTOS, L. y COUTINHO-RODRIGUES, J. A multiobjective approach to locate emergency shelters and identify evacuation routes in urban areas. Geographical Analysis. 2009, vol 41, no 1, p. 9–29.

ALTAY, N.; GREEN, W.G. OR/MS Research in disaster operations management. European Journal of Operational Research, 2006, vol 175, no 1, p. 475–493.

ANPING, P. The applications of maximal covering model in typhoon emergency shelter location problem. In Industrial engineering and engineering management (IEEM), 2010, p. 1727–1731.

BALCIK B.; BEAMON, B.M. Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics: Research And Applications*, 2008, vol 11, no 2, p. 101.

BARBAROSOĞLU, G; ÖZDAMAR, L; ÇEVİK, A. Decision Aiding: An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations. En: *European Journal of Operational Research*. 2002. Vol. 140, p. 118-133.

BEAMON, BM; BALCIK, B. Performance measurement in humanitarian relief chains. En: *International Journal of Public Sector Management*. 2008. Vol. 21, no. 1, p. 4-25.

BLUM, Christian y ROLI, Andrea. Metaheuristic in combinatorial Optimization: Overview and conceptual comparison. En: *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2008. Vol. 35, no. 3, pag. 268.

BOHORQUEZ, L. Análisis del tiempo de respuesta en la distribución de alimentos en la etapa inmediata del desastre para la zona norte establecida por la Cruz Roja Colombiana. Tesis de posgrado. Universidad de la Sabana, Chía, Cundinamarca, Colombia. 2012. 101p

BOZKURT, M; DURAN, S. Effects of Natural Disaster Trends: A Case Study for Expanding the Pre-Positioning Network of CARE International. En: *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RESEARCH AND PUBLIC HEALTH*. Vol. 9, no. 8, p. 2863-2874.

BOZORGI-AMIRI, Ali; JABALAMELI, M. S.; y MIRZAPOUR, M.J. A multi-objective robust stochastic programming model for disaster relief logistics under uncertainty. En: *OR Spectrum*. 2013. vol. 35, no. 4, p. 905-933.

BRACHO, Carlos Eduardo. Elaboración de una base de datos de las características estructurales de las edificaciones de la ciudad de Bucaramanga. Trabajo de grado. Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. 2008.

CANALES, L., VERGARA, C. (2013). Localización de albergues en logística humanitaria. En: X Congreso ÓPTIMA 2013 del Instituto Chileno de Investigación Operativa (ICHIO): 27-30 de octubre de 2013. Universidad de Concepción. Departamento de Ingeniería Industrial. Concepción, Chile. 8p.

CHÁVEZ, Marco Antonio Cruz; BERNAL, Pedro Moreno; ABARCA, Jesús del Carmen Peralta. Aplicación de la teoría de la complejidad en optimización combinatoria. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 2014, no 20, p. 39.

CHURCH, Richard y REVELLE, Charles., Op. cit., p.101

CORNEJO, C. Reducción del Riesgo de Desastres en Chile. En: Segundo encuentro de universitarios trabajando para la reducción de riesgos de desastres REDULAC-CHILE: 9 y 10 de enero de 2014. Concepción, Universidad de Concepción. ONEMI. 23p.

DALAI, J; MOHAPATRA, P.K.; y MITRA, G.C. Locating cyclone shelters: A case. *Disaster Prevention and Management*, 2007, vol 16, no 2, p. 235–244.

DOERNER, K; GUTJAHR, W; NOLZ, P. Multi-criteria location planning for public facilities in tsunami-prone coastal areas. En: *OR Spectrum*. Country of Publication: Germany. 2009. Vol.31, no. 3, p. 185-212.

DREZNER, T; DREZNER, Z; SALHI, S. A multi-objective heuristic approach for the casualty collection points location problem. En: Journal of the Operational Research Society. 2006. Vol. 57, no. 6, p. 727-734.

DUARTE MUÑOZ, Abraham; PANTRIGO FERNÁNDEZ, J. J.; GALLEGO CARRILLO, M. Metaheurísticas. Madrid: Dykinson, 2007. p 1

FOGEL, Lawrence. Autonomous Automata. En: Industrial Research. Vol.4, Ed. 2, (1962), p.14-19. 52

GLOVER, Fred. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. En: Computers & Operations Research. Vol 13 (1986); p. 533-549.

Ho, W., Dey, P. K. y Higson, H. Multiple criteria decision-making techniques in higher education, International Journal of Educational Management, 2006. vol. 20, no. 5, pp. 319-337.

HOLLAND, John. Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press. Ann arbor, 1975.

INGEOMINAS. Mapas. Disponible en: <http://www.ingeminas.gov.co>.

INIESTRA, Juan; ARROYO, Pilar; ENRIQUEZ, Ruth. Un modelo bicriterio para la ubicación de albergues, como parte de un plan de evacuación en caso de inundaciones. Revista de Ingeniería Industrial. Universidad del Bio-Bio, Chile, 2012. Vol. 11, no. 2, p. 35-36.

INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES. IFRC. : What is a Disaster?, 2012. Disponible en línea en:

<http://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/about-disasters/what-is-a-disaster/>.

JIA, Hongzhong; ORDÓÑEZ, Fernando y DESSOUKY, Maged M. Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. En: Computers and Industrial Engineering. 2007, vol. 52, no. 2, p. 257—276.

KILCI F., KARA B., BOSKAYA B., Locating temporary shelter áreas after an earthquake: A case for Turkey, European Journal of Operational Research. 2015, vol. 243, p. 323-332.

KILCI, F., KARA, B., & BOZKAYA, B. Locating temporary sehleter areas after an earthquake: a case for Turkey. European Journal Of Operational Research. 2015. Vol. 243 p. 324-326

KOVACS, Gyongyi y SPENS Karen. Humanitarian logistics in disaster relief operations, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2007. Vol. 37, p. 99-114.

KOZA, John R, Genetic programming: A Paradigm for Genetically Breeding Populations of Computer Programs to Solve Problems, En: Technical Report STAN-CS90-1314, Departament of Computer Science, Stanford University, 1990.

LI, A. C., NOZICK, L., XU, N., y DAVIDSON, R. Shelter location and transportation planning under hurricane conditions. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, vol 48, no 4, p. 715–729

LI, L., JIN, M. Sheltering Planning and Management for Natural Disasters. THC-IT-2010 Conference y Exhibition, 2010.

LIBERATORE, F; et al. A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in Humanitarian Logistics. En: Computers and Operations Research. Vol. 42, Multiple Criteria Decision Making in Emergency Management, p. 3-13. 2014.

LIU, Q.; RUAN, X. y SHI, P. Selection of emergency shelter sites for seismic disasters in mountainous regions: Lessons from the 2008 Wenchuan Ms8.0 Earthquake, China. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, vol 40, no 4, p. 926–934.

MANUAL NACIONAL PARA EL MANEJO DE ALBERGUES TEMPORALES, Sociedad Nacional de La Cruz Roja Colombiana, Dirección General del Socorro Nacional, 2008 Disponible en <<http://www.cruzrojacolombiana.org/sites/default/files/manual%20albergues%20temporales.pdf> >

NOLZ, P; DOERNER, K; HARTL, R. Water distribution in disaster relief. En: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. Country of Publication: UK. 2010. Vol. 40, no. 8, p. 693-708.

NOLZ, P; SEMET, F; DOERNER, K. Risk approaches for delivering disaster relief supplies. En: OR Spectrum. 2011. Vol. 33, no. 3, p. 543-569.

ORTIZ, Pablo. Propuesta de planificación de contingencias para la reducción del riesgo de desastres en el centro metropolitano de Concepción. Universidad del Bio-Bio, Facultad de Ingeniería Industrial. Resumen ejecutivo. 2014.

ÖZDAMAR, L; ERTEM, MA. Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics. En: European Journal of Operational Research. 2015. Vol. 244, p. 55-65

PLAN NACIONAL DE GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE DESASTRES. 2011. República Dominicana. Disponible en: < <http://faolex.fao.org/docs/pdf/dom146528.pdf>>.

PLAN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL. Instrumento Indicativo para la Gestión Integral, 2002. Gobierno de Chile. Disponible en: < [http://www.onemi.cl/wp-content/themes/onemi-bootstrap-master/library/doc/plan\\_nacional\\_0\\_0.pdf](http://www.onemi.cl/wp-content/themes/onemi-bootstrap-master/library/doc/plan_nacional_0_0.pdf) >.

PLAN SECTORIAL DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS Y DESASTRES. 2004. Peru. Disponible en: < [http://www.minsa.gob.pe/ogdn/cd1/pdf/NLS\\_04/plansectorialsalud.pdf](http://www.minsa.gob.pe/ogdn/cd1/pdf/NLS_04/plansectorialsalud.pdf)>.

RECHENBERG, Ingo. Evolutions strategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution. Frammann-Holzboog, Stuttgart, 1973.

ROSQUILLAS, Antonio; MENDOZA, Luis; ROCHA, Ernesto; GAMEZ, Ena; FRIAS, Ana; GRANADOS, Orlando. Risk mapping for strategic planning of shelter response in Tijuana, Baja California, México. Global Risk Identification Programme.

SANCHEZ, Miguel, Optimización combinatorial. En: Matemáticas del siglo XX: Una mirada en 101 artículos [En línea] Universidad de la Laguna, 2000, p. 115-120 [Consultado 11 Feb. 2013]. Disponible en: < <http://www.sinewton.org/numeros/numeros/43-44/Articulo22.pdf>>

SCHWEFEL, Hans-Paul. Evolutions strategie und numerische Optimierung, Technical University Berlin, 1975.

Secretaría del medio ambiente, sub secretaria del SIMPAD, Plan de emergencia Comuna 11, Medellín, 2012 pág. 297-299

SHEU JB. Challenges of emergency logistics management. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2007, vol 43, no 6, p. 655.

SPHERE PROJECT. Sphere Project Humanitarian Charter and Minimum Standards in Disaster Response, 2011. Disponible en: <<http://www.ifrc.org/PageFiles/95530/The-Sphere-Project-Handbook-20111.pdf>>.

THOMAS, Ansiya y MIZUSHIMA, Mitsuko. Logistics training: necessity or luxury?, Forced Migration Review. 2005. Vol. 22, p. 60-61.

TINGUARO RODRIGUEZ, J; et al. A Disaster-Severity Assessment DSS Comparative Analysis. En: OR Spectrum. 2011. Vol. 33, no. 3, p. 451-479.

TOREGAS, Constantine et al. The Location of Emergency Service Facilities. En: Operations Research, 1971, vol 19, no 6, p. 1363—1373.

VILLEGAS, Juan. Problemas de localización multiobjetivo. 2003. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Maestría Ingeniería Industrial. Tesis.

WASSENHOVE, L. N. Blackett memorial lecture. Humanitarian and logistics: supply chain management in high gear, Journal of the Operational Research Society, 2006, vol. 57, p. 475- 489.

YUAN, J; et al. Integrated network approach of evacuation simulation for large complex buildings. En: FIRE SAFETY JOURNAL. 2009. Vol. 44, no. 2, p. 266-275.