

**Un modelo estocástico de ruteo para la recolección de escombros post-desastre en la
ciudad de Bucaramanga**

Pag | 1

Jorge Luis Embus Hurtado

Jeisson Fernando Martínez Castro

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Industrial**

Directora:

Magister en Ingeniería Industrial Karin Julieth Aguilar Imitola

Codirector:

Magister en Ingeniería Industrial Daniel Orlando Martínez Quesada

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Los autores agradecemos a los profesores M.Sc. Karin Julieth Aguilar Imitola y M.Sc. Daniel Orlando Martínez Quesada por la oportunidad, la confianza, el tiempo y la paciencia que nos brindaron para llevar a cabo este proyecto. También agradecemos a los compañeros Diego Alonso Virviescas, Alexander Argüello, Édixon Sánchez y Pablo Méndez por tendernos la mano y apoyarnos en un momento de escases.

A la Universidad Industrial de Santander y Escuela de Estudios Industriales y Empresariales por la formación académica.

Dedicatoria

Agradezco a mi madre Lupe Azucena Hurtado por su guía, ejemplo, dedicación, coraje y gran apoyo en todo momento.

Jorge Luis Embus Hurtado

Dedico este proyecto a Carlos Martínez y Myriam Castro, mis padres, quienes día a día me apoyaron, me guiaron y me aconsejaron para lograr estar en este punto, a Daniel y Ginna, mis hermanos por los mejores momentos compartidos, a Daniela Ojeda quién estuvo siempre presente para lograr culminar este paso, a John Gómez y Miguel Ruiz quienes siempre tuvieron palabras de fortaleza, a Ana Edilma Bolívar y Limbania Bolívar mis ángeles.

Jeisson Fernando Martínez Castro

Contenido

Introducción.

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
1.4.1	Fase 1. Definición del problema y recolección de datos:	26
1.4.2	Fase 2. Formulación del modelo matemático:	27
1.4.3	Fase 3. Desarrollar un procedimiento en computador:	27
1.4.4	Fase 4. Probar el algoritmo.	27
1.4.5	Preparación e implementación del algoritmo.	28
2.	Revisión de la literatura.	28
2.1	Análisis preliminar de la literatura:	28
2.2	Análisis bibliométrico:.....	31
3.	Marco teórico.....	34
3.1	Logística Humanitaria.....	34
3.2	Desastre.....	36

3.3	Problema de optimización combinatoria.....	37
3.3.1	Algoritmos exactos:	38
3.3.2	Algoritmos heurísticos.	38
3.3.3.	Algoritmos metaheurísticos.	39
3.4	Problema de ruteo de vehículos.	39
3.4.1.	Definición del problema de ruteo de vehículos.	40
3.4.2.	Variantes del VRP.	41
3.4.2.1	Problemas de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW).	41
3.4.2.2	Problema de ruteo de vehículos con demandas estocásticas.	41
3.4.2.3	Problemas de múltiples depósitos.....	41
3.4.2.4	Problema de ruteo.	41
3.5	Problema de ruteo de vehículos capacitados CVRP.....	42
3.5.1	Formulación matemática del CVRP.....	42
3.6	Métodos de solución del CVRP.....	44
3.6.1	Heurísticas para el CVRP.....	44
3.6.2	Metaheurísticas para el CVRP.....	46
3.6.2.1	Recocido simulado (SA).....	46
3.6.2.2	Búsqueda Tabú.	47
3.6.2.3	Optimización por colonia de hormigas (ACO).	47
3.6.2.4	Colonia de abejas artificial (ABC).	48

3.6.3 Algoritmo enjambre de partículas (PSO).....	48
4. Diseño del modelo matemático.....	49
5. Diseño del algoritmo.....	54
6. Validación del algoritmo.	58
6.1 Resultados de la comuna 12 – Cabecera del Llano.	60
6.2 Resultados de la comuna 14 – Morrórico.	75
7. Conclusiones.....	89
8. Recomendaciones.	90
Referencias Bibliográficas.....	91

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Mapa de zonificación sismogeotécnica indicativa – Bucaramanga. adaptado de (García Rivera & Dueñas, 2012)	23
Ilustración 2. Fases metodológicas de un estudio en investigaciones de operaciones. Adaptado de (Hillier & Lieberman, 2010)	25
Ilustración 3 Publicaciones realizadas al año. Adaptado de Vantage Point	32
Ilustración 4 Campos de acción. Adaptado de Vantage Point	33
Ilustración 5 Publicaciones por país. Adaptado de Vantage Point	34
Ilustración 6 Heurística para problemas de ruteo de vehículos. Adaptado de (Sanchez F. , 2007)	45
Ilustración 7 . Nodos Comuna 12 – Cabecera del Llano. Adaptado de Google Maps	54
Ilustración 8 Nodos Comuna 14 – Morrorico. Adaptado de Google Maps	55
Ilustración 9 Esquema del PSO	57
Ilustración 10 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 10,000 kg	60
Ilustración 11 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 10,000 kg.....	61
Ilustración 12 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 10,000 kg.	61
Ilustración 13 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 10,000 kg.....	61
Ilustración 14 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 10,000 kg	62
Ilustración 15 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 12,500 kg	62
Ilustración 16 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 12,500 kg.	63
Ilustración 17 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 12,500 kg	63
Ilustración 18 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 12,500 kg	63
Ilustración 19 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 12,500 kg.....	64
Ilustración 20 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 15,000 kg	64

Ilustración 21 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 15,000 kg.....	65
Ilustración 22 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 15,000 kg	65
Ilustración 23 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 15,000 kg	65
Ilustración 24 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 15,000 kg	66
Ilustración 25 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 15,000 kg.....	66
Ilustración 26 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 15,000 kg	66
Ilustración 27 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 15,000 kg	67
Ilustración 28 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 15,000 kg	67
Ilustración 29 . Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 17,500 kg	68
Ilustración 30 . Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 17,500 kg	68
Ilustración 31 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg	68
Ilustración 32 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg	69
Ilustración 33 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg	69
Ilustración 34 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg	69
Ilustración 35 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 17,500 kg	70
Ilustración 36 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 17,500 kg	70
Ilustración 37 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 17,500 kg	70
Ilustración 38 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 17,500 kg	71
Ilustración 39 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 17,500 kg	71
Ilustración 40 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg	71
Ilustración 41 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg	72
Ilustración 42 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg	72
Ilustración 43 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 20,000 kg.....	73

Ilustración 44 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 20,000 kg	73
Ilustración 45 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 20,000 kg	73
Ilustración 46 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 20,000 kg	74
Ilustración 47 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 20,000 kg	74
Ilustración 48 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 20,000 kg	74
Ilustración 49 . Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 20,000 kg.	75
Ilustración 50 . Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 20,000 kg	75
Ilustración 51 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 20,000 kg.	75
Ilustración 52 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 10,000 kg	76
Ilustración 53 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 10,000 kg	76
Ilustración 54 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 10,000 kg	76
Ilustración 55 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 10,000 kg	77
Ilustración 56 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 10,000 kg	77
Ilustración 57 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 10,000 kg	77
Ilustración 58 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 10,000 kg	78
Ilustración 59 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 12,500 kg	78
Ilustración 60 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 12,500 kg	79
Ilustración 61 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 12,500 kg	79
Ilustración 62 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 12,500 kg	79
Ilustración 63 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 12,500 kg	80
Ilustración 64 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 12,500 kg	80
Ilustración 65 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 12,500 kg	80
Ilustración 66 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 15,000 kg	81

Ilustración 67 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 15,000 kg	81
Ilustración 68 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 15,000 kg	81
Ilustración 69 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 15,000 kg	82
Ilustración 70 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 15,000 kg	82
Ilustración 71 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 15,000 kg	82
Ilustración 72 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 15,000 kg	83
Ilustración 73 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 17,500 kg	83
Ilustración 74 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 17,500 kg	84
Ilustración 75 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg	84
Ilustración 76 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg	84
Ilustración 77 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 17,500 kg	85
Ilustración 78 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 17,500 kg	85
Ilustración 79 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 17,500 kg	85
Ilustración 80 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg	86
Ilustración 81 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg	86
Ilustración 82 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 20,000 kg	87
Ilustración 83 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 20,000 kg	87
Ilustración 84 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 20,000 kg	87
Ilustración 85 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 20,000 kg	88
Ilustración 86 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 20,000 kg	88
Ilustración 87 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 20,000 kg	88
Ilustración 88 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 20,000 kg	89
Ilustración 89 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 20,000 kg	89

Lista de tablas

Tabla 1 Cumplimiento de objetivos.....	20
Tabla 2 Capacidad de vehículos por corrida.....	59

Lista de apéndices

Ver apéndices adjuntos en el CD

Apéndice A. Programación del algoritmo enjambre de partículas en GO.

Pag | 16

Apéndice B. Artículo de carácter publicable.

Resumen

Título: UN MODELO ESTOCASTICO DE RUTEO PARA LA RECOLECCIÓN DE ESCOMBROS POST-DESASTRE EN LA CIUDAD DE BUCARMANGA*

Pag | 17

Autores:

EMBUS HURTADO, Jorge Luis.

MARTINEZ CASTRO, Jeisson Fernando. **

Palabras clave:

Desastre, emergencia, logística humanitaria, post-desastres, ruteo, escombros, algoritmo PSO, recuperación.

Descripción:

En el presente trabajo de investigación, el problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada (CVRP por sus siglas en inglés) es direccionado con el objetivo de minimizar el tiempo de recorrido de los vehículos de recolección de escombros en la ciudad de Bucaramanga en caso de un sismo.

El objetivo del CVRP es encontrar las rutas óptimas para satisfacer la demanda de los clientes teniendo una cantidad determinada de vehículos con una capacidad predeterminada, el CVRP se considera un problema de optimización combinatoria de tipo NP-Hard debido a su complejidad computacional y que actualmente ocupa un importante lugar en el secuenciamiento de operaciones en la industria para lograr la minimización de un recurso significativo como el tiempo. Existe en la literatura diversos métodos para dar respuesta a este tipo de problemas desde métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos, implementándose en esta investigación una metaheurística: El algoritmo de Enjambre de Partículas (PSO por sus siglas en ingles). Mediante este algoritmo se presenta los resultados respectivos a las rutas con menor tiempo de recorrido, de manera de ejemplo se ha tomado los sectores de Cabecera del Llano y Morrónico, para la simulación mediante el lenguaje de programación “Go” desarrollado por Google.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.
Director: M.Sc Karin Aguilar Imitola

Abstract

Title: A STOCHASTIC MODEL OF ROUTE FOR THE COLLECTION OF POST-DISASTER DEBRIS IN THE CITY OF BUCARMANGA*

Pag | 18

Authors:

EMBUS HURTADO, Jorge Luis.

MARTINEZ CASTRO, Jeisson Fernando. **

Keywords:

Disaster, emergency, humanitarian logistics, post-disaster, route, debris, PSO algorithm, recovery.

Description:

In the current investigation work, the capacitated vehicle routing problem (CVRP) is addressed to minimize the travel time of debris collection vehicles in the city of Bucaramanga in case of an earthquake.

The objective of the CVRP is to find the optimal routes to satisfy the demand of the clients that have a certain number of vehicles with a predetermined capacity, the CVRP is considered a problem of combinatorial optimization of type NP-Hard due to its computational complexity and that currently it occupies an important place in the sequencing of operations in the industry for the minimization of a significant resource such as time. There are several ways in the literature to respond to this type of problem from exact, heuristic and metaheuristic methods, implementing in this research a metaheuristic: the particle swarm algorithm (PSO).

Through this algorithm, the respective results are presented to the routes with the shortest travel time. For this case, the sectors of Cabecera del Llano and Morrорico have been taken as reference, for the simulation we used the programming language "Go" developed by Google.

* Degree Project

** Faculty of Physics Mechanics Engineering. School of Industrial and Business Studies. Director M.Sc Karin Aguilar Imitola

Introducción

Los desastres naturales son de carácter aleatorio que puede afectar cualquier zona del planeta, generando a su paso pérdidas humanas y materiales. Los sismos en particular se generan por la fricción entre las fallas, produciendo rupturas entre ellas generando ondas sísmicas que se propagan hasta llegar a la superficie, provocando los movimientos de terreno (Vidal Sánchez, 1994).

En este contexto surge el concepto de gestión del riesgo de desastres, la cual es una herramienta con la que se ejecutan los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y el manejo de los desastres (Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre, 2017), permitiendo generar una pronta respuesta frente a una eventualidad. Los manejos de los desastres implican toda actividad de respuesta y recuperación post-desastres tales como la restauración de infraestructura, restablecimiento de los servicios vitales, búsqueda – rescate y reaperturas de vías.

Actualmente en la literatura, son escasos los modelos en investigación operativa que se centren en la etapa post-desastres, por tal motivo la presente investigación pretende incursionar en esta área; con el propósito de generar una respuesta al problema de recolección de escombros mediante el diseño y construcción de un algoritmo enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés) y generar una respuesta adecuada al momento que se presente un evento sísmico en la ciudad de Bucaramanga.

Tabla 1 Cumplimiento de objetivos

Objetivo específico	Numeral relacionado
Revisar en la literatura la metodología usada en casos reales y los modelos de ruteo utilizados en la recolección de escombros post-desastre.	2
Plantear un modelo estocástico para la recolección de escombros post-desastre	4
Diseñar un algoritmo Enjambre de partículas “PSO” (por sus siglas en inglés) para la solución al problema de recolección de escombros post-desastre	5 – Anexo A (ver en CD)
Implementar y validar el modelo utilizando el algoritmo PSO mediante el lenguaje de programación “GO”.	6
Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos de la investigación realizada.	Anexo B (ver en CD)

1. Generalidades del Proyecto

1.1 Planteamiento del problema

Colombia, por ser parte del cinturón de fuego del Pacífico presentan un gran número de fallas; en particular la ciudad de Bucaramanga es considerada como una región de alta amenaza sísmica, porque en ella, en el municipio de los Santos se encuentra ubicado uno de los principales nidos sísmicos del mundo, haciendo propensa esta región a movimientos telúricos. Debido a esto, y por lo impredecible que es la ocurrencia y magnitud de un evento sísmico, es importante una adecuada gestión e implementación de la logística humanitaria, con el propósito de satisfacer a los afectados por una catástrofe.

Debido al incremento de la población en los últimos años en el área de Bucaramanga, se ha empezado una masiva urbanización sin planificación en terrenos no apropiados con viviendas mal construidas (Amorocho Becerra, 2017), exponiendo a sus habitantes a un peligro inminente por cualquier amenaza natural.

Conforme a lo anterior, se hace necesario una adecuada estrategia de gestión en logística humanitaria, ya que los daños físicos y el impacto social en la población, podrían reducirse si la ciudad está preparada. Con el propósito de apoyar la logística humanitaria, esta investigación busca definir las rutas para la recolección de escombros en arcos cargados en la ciudad de Bucaramanga, tomando como base el problema de ruteo con vehículos con capacidad limitada (CVRP por sus siglas en inglés) como una representación cercana a la realidad; con el objetivo de minimizar la distancia total recorrida y los tiempos de recolección de escombros para reactivar las vías y permitir a los habitantes y los cuerpos de socorro desplazarse por el área afectada. El CVRP es un problema complejo de optimización combinatoria, que pertenece a la categoría NP-Hard. Los métodos para dar solución al CVRP usan diferentes tipos de heurísticas

y metaheurísticas, dentro de las cuales se encuentran los algoritmos evolutivos y los algoritmos de enjambres, en esta investigación se utilizará el algoritmo Enjambre de Partículas. Así mismo, como consecuencia de la incertidumbre relacionada a los desastres, la cantidad de escombros que se puede generar al producirse un desastre se considera una variable estocástica, lo que incrementa la dificultad de abordar el tema.

1.2 Justificación del proyecto

Un desastre, se define como un evento repentino o previsible que afecta el funcionamiento de una comunidad o sociedad, causando pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales que desbordan la capacidad de la comunidad o sociedad afectada para hacer frente a la situación a través de sus propios recursos. Aunque frecuentemente están causados por la naturaleza, los desastres también pueden deberse a la actividad humana (Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, s.f.). El hombre no posee control sobre los fenómenos naturales que pueden causar los desastres, la opción práctica que puede tomar para disminuir los efectos de estos, consiste en tomar medidas de prevención y preparación que estén dentro de sus posibilidades. (Jovel, 1989).

Con el pasar del tiempo se ha identificado que es necesario desarrollar un programa para la rehabilitación de la ciudad luego de un desastre natural, de tal manera que, en el plan municipal de Gestión de Riesgo, entre sus actividades principales se encuentre la recolección de escombros, para lograr liberar lugares cerrados o de difícil acceso con el fin de distribuir la ayuda humanitaria de una forma eficiente.

En el presente trabajo, se va a tratar la Comuna 12 – Cabecera del Llano y la Comuna 14 – Morrónico de la ciudad de Bucaramanga, que pertenece a la zona Metropolitana, la cual esta clasifica como zona de riesgo alto frente a la posibilidad de un sismo. (Ferro Dávila, 2016)

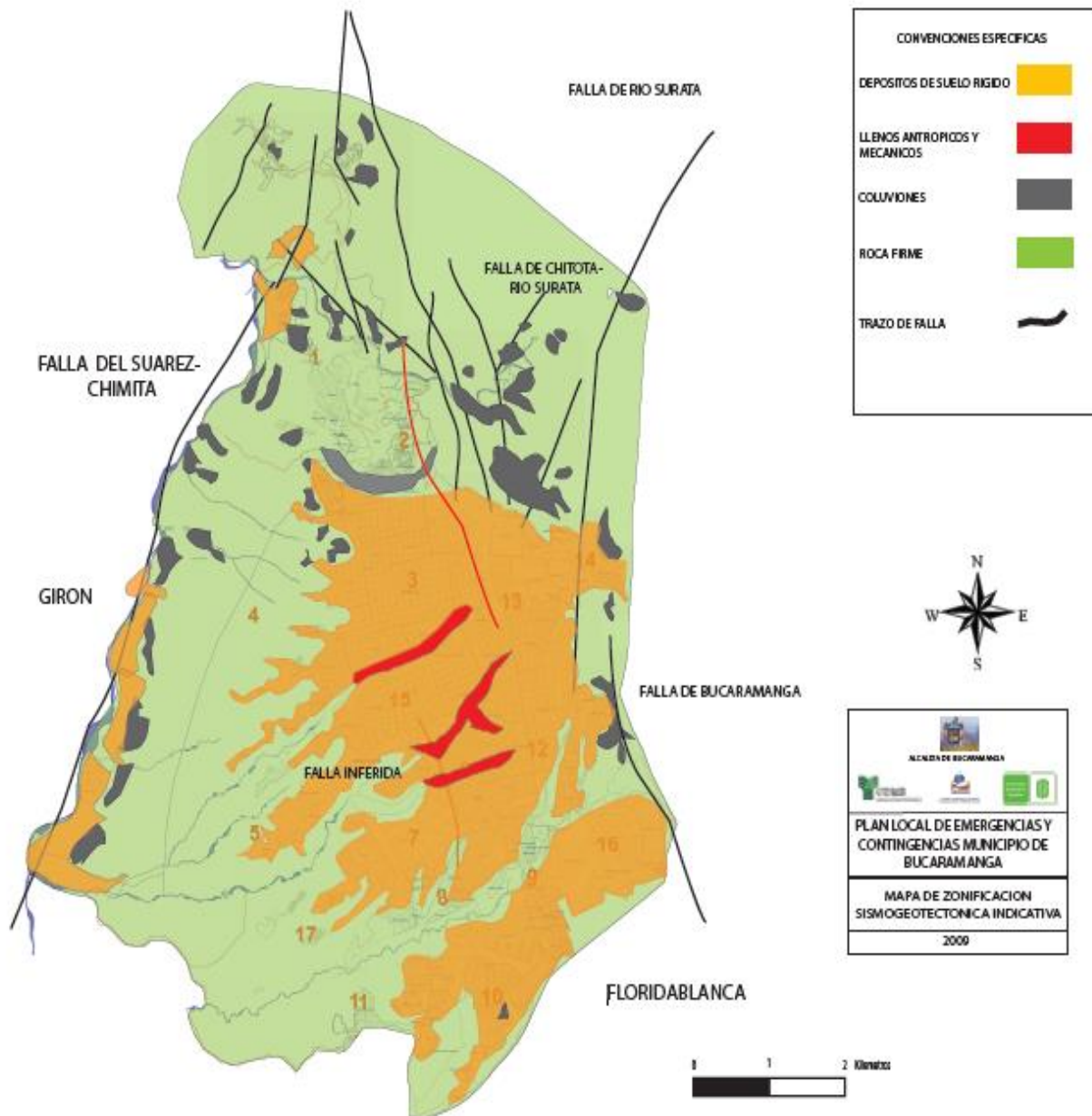


Ilustración 1 Mapa de zonificación sismogeotécnica indicativa – Bucaramanga. adaptado de (García Rivera & Dueñas, 2012)

1.3 Objetivos

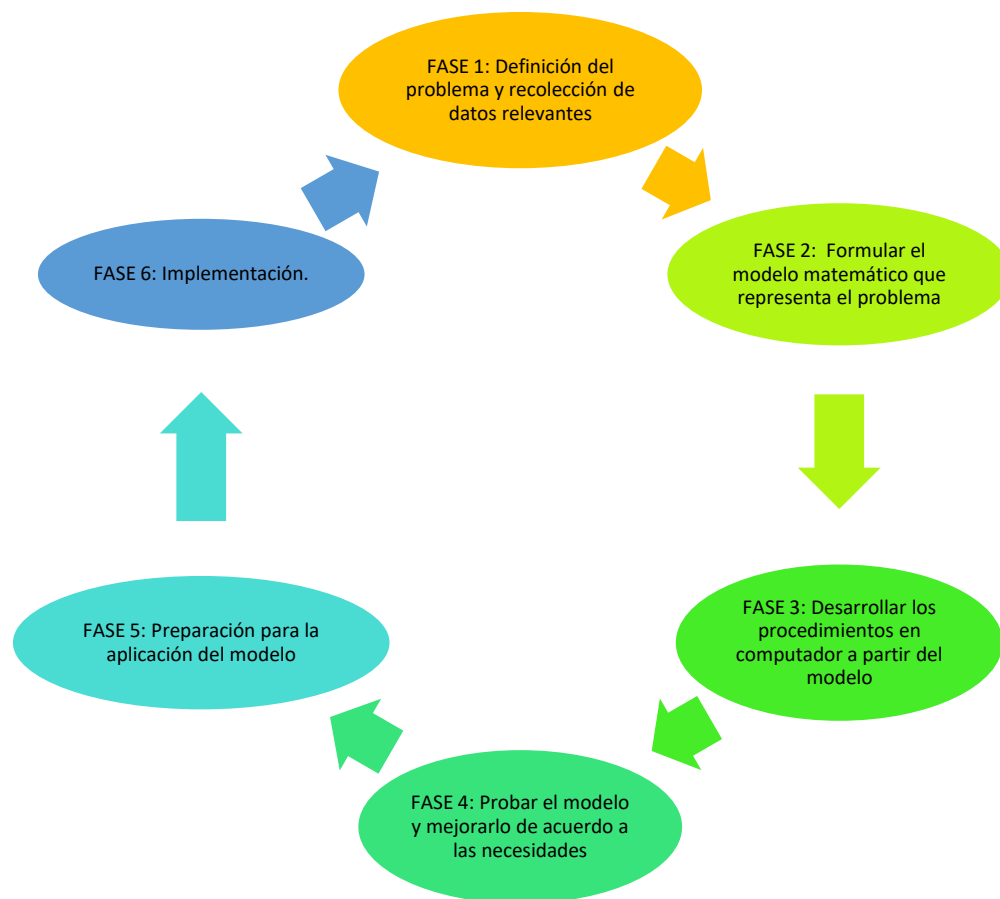
1.3.1 Objetivo General Desarrollar un modelo estocástico de ruteo para la recolección de escombros post-desastre en la ciudad de Bucaramanga.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisar en la literatura la metodología usada en casos reales y los modelos de ruteo utilizados en la recolección de escombros post-desastre.
- Plantear un modelo estocástico para la recolección de escombros post-desastre.
- Diseñar un algoritmo Enjambre de partículas “PSO” (por sus siglas en inglés) para la solución al problema de recolección de escombros post-desastre.
- Implementar y validar el modelo utilizando el algoritmo PSO mediante el lenguaje de programación “GO”.
- Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos de la investigación realizada.

1.4 Metodología

La metodología que guiará el desarrollo de este trabajo de investigación consta de 5 fases, las cuales se fundamentan en las etapas usuales-no secuenciales- de un estudio de investigación de operaciones (figura 2), que usa como base el método científico para explorar los problemas.



*Ilustración 2. Fases metodológicas de un estudio en investigaciones de operaciones.
Adaptado de (Hillier & Lieberman, 2010)*

Las etapas anteriores son adaptadas a las necesidades de esta investigación y se describen a continuación:

1.4.1 Fase 1. Definición del problema y recolección de datos Esta fase está compuesta por dos etapas, la primera etapa consiste en el estudio del problema y el método de solución, para lo cual se ejecutan las siguientes actividades:

- Identificar en la literatura los diferentes métodos utilizados actualmente para dar solución a la problemática de la recolección de escombros en la logística humanitaria.

Una vez definido el problema, se ejecuta la segunda etapa en la que se establecen los insumos necesarios para su desarrollo, uno de ellos es la red de instalaciones y transporte, por lo cual se ejecutan las siguientes actividades:

- Establecer los parámetros (puntos de acumulación de escombros, capacidad de vehículos de transporte, etc.) variables (distancia, tiempo, cantidad de escombros) y características necesarias de la zona para las rutas, identificados mediante la revisión de fuentes de información como estudios de vulnerabilidad, estudios de tráfico y transporte, plan de emergencia local de Bucaramanga, microzonificación sísmica, entre otras.
- Determinar el método más adecuado para modelar la ruta.
- Establecer los nodos de demanda y oferta, así como la confiabilidad de las instalaciones y las rutas que conectan los nodos.
- Modelar los arcos mediante un mapa de la ciudad de Bucaramanga, el cual representará la simulación de ser posible a partir de herramientas de información geográfica como “Go”.

1.4.2 Fase 2. Formulación del modelo matemático Esta fase consiste en formular el problema de manera conveniente para su análisis. La forma convencional en que la Investigación de Operaciones (OR por sus siglas en inglés) logra esto, es mediante la construcción de un modelo matemático que represente la esencia del problema, por lo cual se realizarán las siguientes actividades:

- Comprender las bases teóricas del problema de recolección de escombros aplicados en la logística humanitaria, que permitan determinar los parámetros, variables de entrada-salida y las restricciones del problema.
- Construir el modelo matemático estocástico para las rutas de los vehículos para recolección de escombros post- desastre por sismos.

1.4.3 Fase 3. Desarrollar un procedimiento en computador Una vez formulado el modelo matemático, se desarrolla un procedimiento mediante la aplicación de un algoritmo PSO, con el propósito de encontrar una solución factible al problema, ejecutando la actividad:

- Construir el algoritmo PSO para la solución del CVRP en el lenguaje de programación “GO”.

1.4.4 Fase 4. Probar el algoritmo El modelo debe ser probado con el propósito de encontrar fallas y errores, por lo cual se debe:

- Ejecutar el programa y determinar si genera resultados validos de acuerdo con las restricciones asociadas al problema, la función objetivo y demás parámetros del modelo. De acuerdo con los resultados de la prueba, el modelo es mejorado de ser necesario, posteriormente se realizan experimentos numéricos.
- En caso de ser necesario, ajustar el modelo de acuerdo con los resultados de la prueba.

1.4.5 Preparación e implementación del algoritmo

- Desarrollar instancias de prueba del algoritmo PSO para sistema post-desastre en la ciudad de Bucaramanga.
- Validar el modelo creado para corroborar la coherencia de los resultados.

2. Revisión de la literatura

2.1 Análisis preliminar de la literatura

El mundo, ha venido sufriendo cambios diversos debido a los desastres tanto naturales como los provocados por el hombre. Se define como desastre a "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" (IFRC, 2017). Después de un desastre, las sociedades afectadas deben empezar de cero para retomar su cotidianidad, para esto el gobierno debe hacer frente a las necesidades de la población mediante la implementación de las actividades que componen la logística humanitaria con el fin de disminuir el impacto causado.

La logística humanitaria se define como el proceso de planeación, implementación y control efectivo y eficiente de los flujos de productos, materiales e información desde los donadores hasta las personas afectadas con el fin de atender sus necesidades de supervivencia (Gaytán Iniestra, Arroyo López, & Enríquez, 2017). Para que la aplicación de esta sea efectiva debe enfrentar y superar varios retos (Balcik & Beamon, 2008), que son:

- 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 humanitaria, para lograr dar una atención rápida y eficaz a las zonas afectadas por los desastres, pueden dividirse en cuatro etapas, mitigación, preparación, respuesta y rehabilitación, las dos primeras etapas se clasifican como operaciones de apoyo mientras que las dos últimas se clasifican como operaciones de desarrollo o post-desastre. (Ortuño, 2013)

La fase de mitigación busca reducir el riesgo de un desastre o disminuir sus posibles consecuencias, la etapa de preparación identifica 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 con el fin de lograr una respuesta más eficiente. Mientras tanto la etapa de respuesta engloba todas las actividades que se realizan una vez que se presenta el desastre, su objetivo es el despliegue de recursos vitales para atender a la población afectada y finalmente en la recuperación se encuentran las actividades cuyo objetivo a corto y largo plazo es restituir el funcionamiento normal de la sociedad. (Galindo & Batta, 2013).

Este proyecto se enfoca en la etapa de rehabilitación, dentro de esta, se destaca la recolección de escombros, ya que al ocurrir un sismo de gran magnitud la generación de

escombros es incierta y elevada provocando obstrucciones en las principales vías y puntos de acceso de la ciudad evitando la movilidad de los afectados y las entidades de socorro.

Esta operación de recolección de escombros se puede modelar mediante un problema de ruteo, los cuales se pueden clasificar en dos categorías: ruteo de larga distancia (vehículos) y de corta distancia (equipos de rescate y población evacuada) (Zheng, Chen, & Ling, 2015).

En logística humanitaria los modelos de ruteo tienen gran importancia debido a que tienen una representación cercana a las condiciones reales. (Anaya-Arenas, Renaud, & Ruiz, 2014).

El problema de recolección de escombros se aborda de diversas maneras; podemos encontrar una heurística constructiva que genera planes de limpieza de escombros al borde de la carretera con número limitado de equipos para el problema de recuperación de caminos después de un desastre (Ozdamar, Aksu, & Ergunes, 2014). Un segundo método desarrollado es definir un problema estocástico de limpieza de escombros (SDCP) que captura las situaciones posteriores a un desastre, actualiza la información limitada sobre la cantidad de escombros y determina la secuencia de caminos a despejar para maximizar el beneficio acumulado al satisfacer la demanda de ayuda (Çelik, Ergun, & Keskinocak, 2015). Otro aporte relacionado al problema de logística humanitaria se basa en la toma de imágenes satelitales para determinar campos de escombros, edificios dañados por los vientos, depósitos de agua estancada, entre otras características luego de un huracán (Barnes, Fritz, & Yoo, 2007). También se resalta el proceso de análisis jerárquico y un algoritmo de agrupación k-medios, que determina un mapa e índice de riesgo de deslizamientos de tierra debido a precipitaciones extremas, desbordamientos de ríos, fallas y erosión de suelo (Gao & Sang, 2017). Finalmente tenemos el modelo de programación lineal multiobjetivo el cual busca minimizar los costos logísticos,

los riesgos ambientales y el trauma psicológico experimentado por las personas luego de un desastre (Hu & Sheu, 2013).

2.2 Análisis bibliométrico

Los desastres naturales, son generadores de muerte, destrucción y pérdidas económicas incalculables. Por este motivo han sido objeto de estudio para poder disminuir sus efectos en la sociedad actual mediante una adecuada gestión de desastres, permitiendo establecer rápidas respuestas en el alivio de emergencias. Para tener una idea de la importancia de este tema en la literatura, se presenta a continuación un análisis bibliométrico realizado a 44 artículos, los cuales fueron hallados mediante la búsqueda en la colección principal de la *Web of Science*, utilizando palabras clave como “*disaster*”, “*emergency*”, “*management*”, “*humanitarian logistics*”, “*post-disaster*”, “*debris*”, “*recovery*” y “*route*”, utilizando las siguientes ecuaciones de búsqueda:

- $TS = (((disaster* OR emergency*) AND (management OR recovery)) OR (humanitarian logistics) OR (post-disaster)) AND debris*$
- $TS = ((((((disaster* OR emergency*) AND (management OR recovery)) OR (humanitarian logistics) OR (post-disaster)) AND debris*) AND (route*)))$
- $TI = (((disaster* OR emergency*) AND (management OR recovery)) OR (humanitarian logistics) OR (post-disaster)) AND debris*$

El estudio arrojó una ventana de tiempo comprendida desde el año 2002 hasta el 2017 (figura 3), donde se puede observar el rápido incremento en los dos últimos años del interés de la comunidad académica en desarrollar sistemas que los preparen para los eventuales desastres que se puedan presentar. Para el periodo comprendido entre 2002- 2015 se cuenta con una publicación anual, exceptuando los años 2008, 2010, 2014 y 2015 donde tuvo un leve incremento; en este periodo de tiempo donde se incrementaron las publicaciones se registraron grandes desastres como el Ciclón Nargis, Myanmar (2008), los terremotos en Haití, China y

Chile con posterior tsunami (2010), la erupción volcánica en Japón; un nuevo terremoto en Chile (2014) y un terremoto de magnitud 7,8 en Nepal (2015) causando más de 8.800 muertes y dañando más de 900.000 edificios. Posterior a este año las publicaciones se incrementaron considerablemente registrando 6 publicaciones en el año 2016 y en lo que lleva corrido del 2017 ya se cuenta un total de 16 publicaciones, de igual manera en estos años también se registraron tragedias de grandes magnitudes como los terremotos en Taiwán, Ecuador e Italia (2016) y los terremotos en México, Italia y Costa Rica (2017) dejando más de 1.000 pérdidas humanas. De lo anterior se concluye que la gestión de desastres ha venido en auge debido al aumento en la ocurrencia de desastres en el mundo.

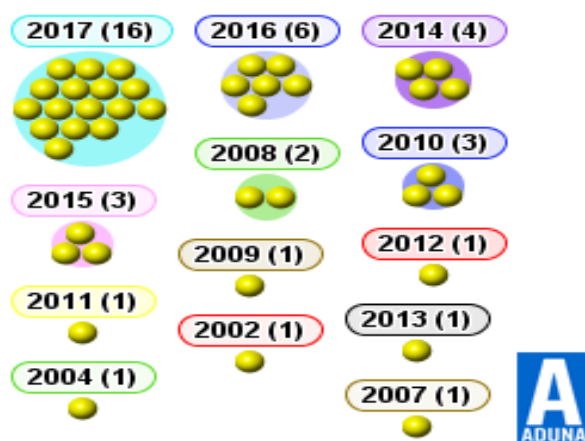


Ilustración 3 Publicaciones realizadas al año. Adaptado de Vantage Point

De igual manera, se puede observar que los campos de acción con mayor interés en tema de la logística humanitaria es la geología, la ingeniería y la investigación de operaciones (figura 4), los cuales manejan un número de métodos distintos para dar solución a las diferentes problemáticas; que van desde modelos determinísticos, análisis de redes, minería de datos basados en imágenes, modelos de cola multiservidor, metaheurísticas basadas en programación de enteros mixta, entre otros; de los cuales se pueden resaltar el trabajo realizado por Ozdamar Linet, Tuzum Dilek, Ergunes Biked en “Coordinating debris cleanup operations in post

disaster road networks” y el trabajo de Celik Melih, Ergun Ozlem, Keskinocak Pinar en el artículo titulado “*The Post-Disaster Debris Clearance Problem Under Incomplete Information*” los cuales proponen un problema estocástico y una heurística constructiva respectivamente para el problema de limpieza de escombros, tema que se tratará en la presente investigación.

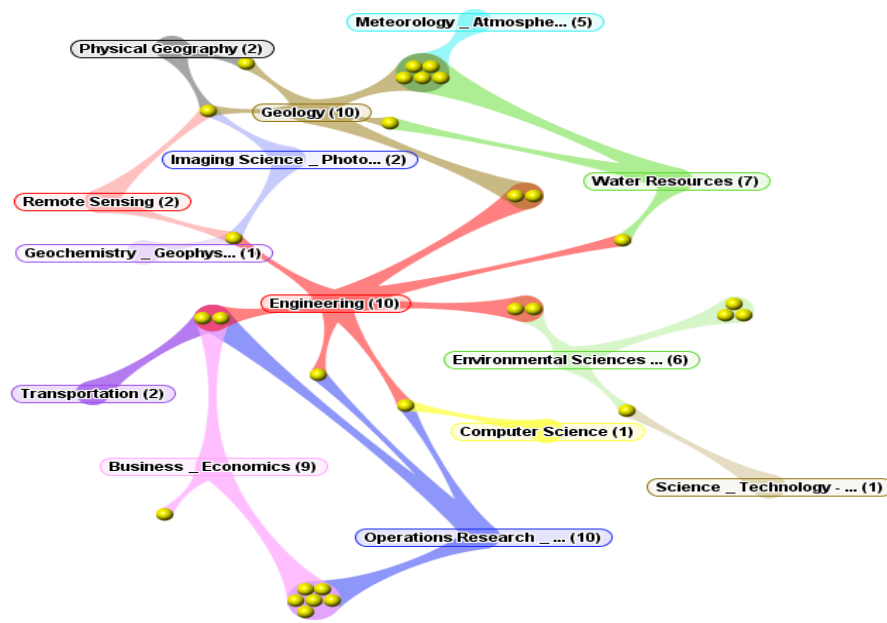


Ilustración 4 Campos de acción. Adaptado de Vantage Point

Se puede evidenciar, además, el número de publicaciones realizadas por cada país a lo largo de estos años (figura 5), dando como resultado que a nivel Latinoamérica solo se han publicado tres artículos relacionados con el tema; en Perú el trabajo llamado “*Methodology to characterize and quantify debris generation in residential buildings after seismic events*”, en Chile el artículo titulado “*An Optimization-Based Decision-Support Tool for Post-Disaster Debris Operations*”, por último, el aporte realizado en México “*A probability method of rainfall warning for sediment-related disaster in developing countries: a case study in Sierra Madre Oriental, Mexico*”; de los cuales los cuales, los dos últimos han sido en colaboración con países como Estados Unidos, Turquía, Japón e Indonesia.

Como se evidencio en este análisis, la generación de nuevo material bibliográfico en el ámbito de la gestión de desastres se ha venido desarrollando en los dos últimos años, reflejando un incremento directamente proporcional con el incremento de los desastres naturales, dejando en evidencia los pocos estudios que se han publicado de este tema en Latinoamérica, aunque hay mayor cantidad de desastres en esta, el número de publicaciones es muy reducido. Además, se puede destacar que el problema de recolección de escombros ha sido poco tratado, lo cual es motivante para el desarrollo de esta investigación.

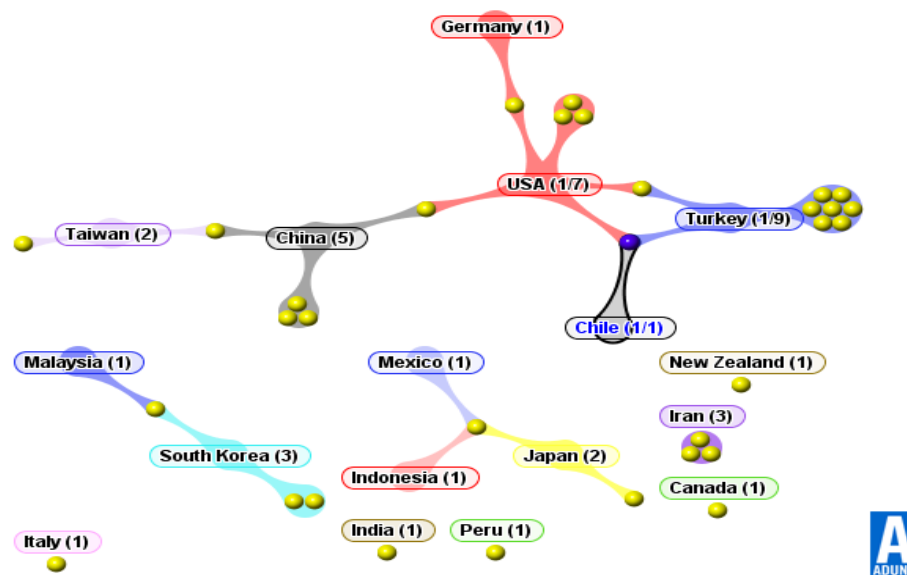


Ilustración 5 Publicaciones por país. Adaptado de Vantage Point

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 este 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.

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 estas. 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, se define 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” (Thomas & Mizushima, 2005). Asimismo, incluye la tarea de proporcionar una ayuda continua 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 (Kovacs & Spens, 2007). 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.

3.2 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 con la ley 1523 de 2012 la ocurrencia de un destare exige del Estado y del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción.

Tras la ocurrencia de un desastre, sus efectos están determinados por el grado de impacto de este 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.

3.3 Problema de optimización combinatoria

Los problemas de optimización combinatoria se caracterizan por tener una cantidad finita de soluciones factibles, que se encuentran en un espacio de búsqueda S y definida por la función objetivo $f: S \rightarrow R^+$ que asigna un costo positivo a cada objeto $s^* \in S$, cuyo objetivo es encontrar una solución que tenga el valor mínimo de la función ; es decir hallar el $s^* \in S \mid f(s^*) \leq f(s), \forall s \in S$ y $s \neq s^*$, s^* es una solución óptima global de (S, f) . Se destaca que minimizar una función objetivo f , es lo mismo que maximizar utilizando $-f$, por lo que cualquier problema de optimización combinatoria puede ser descrito como uno de minimización (Papadimitriou & Steiglitz, 2000).

Este tipo de problemas agrupa las variables en conjuntos que representan objetos que incluyen una estructura de datos compleja tales como permutaciones, grafos, árboles, etc. Las variables del problema se ubican en cierta posición generando una configuración; la combinatoria es la encargada de estudiar dichas configuraciones. Los problemas combinatorios buscan la mejor configuración y para conocer cuál es mejor se construyen uno o más funciones de valor sobre el espacio de las configuraciones; dependiendo de la cantidad de funciones de valor construidas, los problemas combinatorios pueden ser uni-objetivo (una función de valor) y multi-objetivos (más de una) (Sanchez M. , 2000).

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

3.3.1 Algoritmos exactos Garantizan encontrar la solución óptima para cualquier instancia de cualquier problema en un tiempo acotado (Chicano). Sin embargo, posee un inconveniente cuando se trata de un problema optimización combinatoria de la clase NP-Hard, el tiempo que se requiere para determinar su solución crece exponencialmente con el tamaño del problema. Entre los métodos exactos se encuentran el método de Branch and Bound y el método Simplex.

3.3.2 Algoritmos heurísticos Los métodos heurísticos son procedimientos que se usan para resolver los problemas de optimización mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza para obtener una buena solución (Diaz, Glover, & Ghaziri, 1996). Las técnicas heurísticas pueden dividirse principalmente en dos categorías: Heurísticas constructivas y métodos de búsqueda local.

3.3.2.1 Heurísticas constructivas Determinan las soluciones mediante un procedimiento que incorpora iterativamente elementos a una estructura inicialmente vacía, hasta obtener una solución completa, satisfaciendo las restricciones. Estos tipos de heurísticas se pueden utilizar siempre que el problema se pueda resolver mediante decisiones sucesivas, como rutas, líneas de montaje, entre otras (Garcia & Maheut, 2011). El algoritmo de ahorro de Clarke y Wright es un ejemplo de este tipo de método, conocido porque se ha implementado al problema de ruteo de vehículo clásico

3.3.2.2 Métodos de búsqueda local Comienza su procedimiento desde una solución inicial, y emplea un operador para construir un vecindario, y avanza buscando mejoras hasta construir una mejor solución en el vecindario, que reemplaza la actual. Dentro de estas técnicas se puede conocer un concepto de óptimo local, que puede definirse como una solución mejor o igual que cualquier otra solución del vecindario

3.3.3. Algoritmos metaheurísticos Esta metodología explora de forma eficiente y efectiva el espacio de búsqueda a través del movimiento evitando quedar atrapado en óptimos locales, es decir son una forma inteligente de explorar los espacios de búsqueda. Estos métodos utilizan dos estrategias para direccionar la búsqueda, diversificación e intensificación, la diversificación busca la exploración efectiva de todos los posibles vecindarios del espacio de solución, y la intensificación se centra en la exploración de subespacios de solución más reducidos.

Diferentes algoritmos metaheurísticos se han propuesto para resolver los problemas de optimización combinatoria, dentro de los cuales están:

- **Optimización por enjambre de partículas (PSO):** Introducido por Eberhart y Kennedy (Eberhart & Kennedy, 1995).
- **Colonia de abejas artificial (ABC):** Propuesto por Devis Karaboga (Karaboga & Basturk, 2007).
- **Recocido simulado (SA):** Introducido por Kirkpatrick et al (Kirk, Gelatt, & Vecchi, 1983).
- **Computación evolutiva:** Se encuentran tres categorías principales: algoritmos genéticos, computación evolutiva y estrategia evolutiva

3.4 Problema de ruteo de vehículos

El VRP es una generalización del problema del agente viajero (Traveling Salesman Problem, TSP), que fue introducido por Dantzig y Ramser (Cordeau, 2007) que trata el problema de despacho de camiones. Es un problema de optimización combinatoria, clasificado como un problema NP-Hard debido a su complejidad.

El problema de ruteo de vehículos consiste en el diseño de rutas óptimas, para la entrega y recolección de productos de uno o varios depósitos, a un conjunto de clientes dispersos

geográficamente, con la finalidad de cumplir un objetivo planteado y ciertas restricciones operativas, tales como: la capacidad de los vehículos, ventanas de tiempo y periodos de trabajo del conductor.

Algunos objetivos que comúnmente se plantean para resolver el problema de ruteo de vehículos son:

- Minimización del costo de transporte total, dependiendo de la distancia total del viaje y el costo fijo asociado con los vehículos usados.
- Minimización del número de vehículos requeridos para servir a todos los clientes, teniendo en cuenta el equilibrio de las rutas, para el tiempo de viaje y la carga del vehículo.
- Minimizar la penalización asociada con el servicio parcial de los clientes. Situación que se presenta cuando la capacidad del vehículo no puede suplir la demanda total del cliente.

3.4.1. Definición del problema de ruteo de vehículos En términos generales, el VRP puede ser formulado de la siguiente manera: Sea $G = (V, A)$ un sistema completo, donde $V = \{1, \dots, n + 1\}$ define un conjunto de vértices asignados a n clientes con el depósito localizado en el vértice 1, y A un conjunto de arcos (Laporte, 1992). El costo no negativo C_{ij} asociado a cada arco $(i, j) \in A$ con $i \neq j$, representa el costo de viaje entre los vértices i y j (Alabas-uslu & Dengiz, 2011). Dependiendo del contexto, este costo puede ser interpretado como distancia o tiempo de viaje. Además, en algunos casos se considera que el problema es asimétrico, es decir, $C_{ij} \neq C_{ji}$ para cada arco (i, j) . Todos los clientes i están asociados a una demanda conocida no negativa, d_i para ser entregada por una flota de m vehículos que inician y terminan sus recorridos en el depósito.

3.4.2. Variantes del VRP Dependiendo del objetivo a ser optimizado y del tipo de restricciones que deben cumplirse, se despliegan un gran número de variantes del VRP que se describen a continuación:

3.4.2.1 Problemas de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) Este problema se caracteriza por limitar el tiempo de inicio y fin del servicio, y la llegada y salida del vehículo del depósito. Se pueden presentar dos situaciones relevantes: que el vehículo llegue después del tiempo establecido para el inicio del servicio, o en caso contrario que el vehículo llegue antes. En la mayoría de los problemas de aplicaciones al VRPTW se considera una función multi-objetivo, minimizando el número de vehículos, la distancia y el tiempo de viaje.

3.4.2.2 Problema de ruteo de vehículos con demandas estocásticas Este problema se caracteriza por el comportamiento estocástico de algunos parámetros, tales como la demanda de los clientes, ubicación de los clientes y tiempo de viaje.

3.4.2.3 Problemas de múltiples depósitos Se plantea el problema de transporte de materias primas procedentes de múltiples depósitos, a un conjunto de clientes, posibilitando al vehículo finalizar su recorrido en una función diferente a la del inicio.

3.4.2.4 Problema de ruteo En el CVRP se restringe la capacidad del vehículo y así mismo la demanda total asignada a cada ruta. Las características básicas de este problema son: la demanda del cliente es determinísticas y se conocen con anticipación, una orden no puede ser servida por más de un vehículo, la flota de vehículo es homogénea y solo hay un depósito. El objetivo del CVRP es disminuir el costo total de viaje que está en función de la distancia recorrida para visitar a todos los clientes.

En este trabajo se estudia el problema de ruteo de vehículos capacitados para la distribución de recursos post-desastres sísmicos.

3.5 Problema de ruteo de vehículos capacitados CVRP

Es una representación concreta y específica de su clase, comprende todos los elementos incorporados en el problema y generalmente están ligadas a los vehículos y a los clientes. Las instancias son aquellas características o datos del problema, que se usan en un planteamiento concreto. Las variables involucradas en el planteamiento de una instancia del problema CVRP son (Olivera, 2004):

- El número de clientes
- La Localización de los clientes
- Los centros de distribución o depósitos
- La capacidad de los vehículos
- La demanda de los clientes
- Los tiempos de recorrido
- Los costos de transporte
- La descripción de las vías de transporte

3.5.1 Formulación matemática del CVRP

Variables de decisión

X_{ijk} Es una variable binaria que acumula el número de veces que el arco (0,1) es atravesado por el camión k.

Y_{ik} Variable binaria que toma el valor de 1 si el cliente i ha sido visitado por el camión k.

Parámetros

C_{ij} Costo de atravesar el arco (i, j).

C capacidad de los vehículos utilizados.

d_i Demanda del cliente i .

n número de clientes a servir.

El problema de ruteo de vehículos con capacidad consiste en minimizar cierta función objetivo (f):

$$1. \quad f = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} \sum_{k=1}^K X_{ijk} \rightarrow \min$$

La función objetivo del problema tiene como propósito disminuir los costos totales de transporte en los que se incurre al servir un número n de clientes.

Además, se deben cumplir las siguientes restricciones:

$$2. \quad \sum_{k=1}^K Y_{ik} = 1 \rightarrow \forall i \in v \setminus \{0\}$$

$$3. \quad \sum_{k=1}^K Y_{0k} = 1$$

Donde 0 indica el punto inicial del depósito.

$$4. \quad \sum_{j \in V} X_{ijk} = \sum_{j \in V} X_{jik} = Y_{ik} \rightarrow \forall i \in V, k = 1, \dots, K$$

$$5. \quad \sum_{i \in V} d_i Y_{ik} \leq C$$

La restricción (2) asegura que cada cliente sea visitado por un solo camión, la (3) garantiza que del depósito cada camión salga una sola vez, la (4) actualiza el valor de la variable cuando el arco anterior o posterior del cliente i es atravesado, la (5) limita la capacidad de los camiones para que no excedan la suma de las demandas de los clientes que visitará cada camión.

$$6. \quad \sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} X_{ijk} \geq Y_{hk} \rightarrow \forall S \subseteq v \setminus \{0\} h \in S, k = 1, \dots, K$$

$$7. \quad Y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V, k = 1, \dots, K$$

$$8. \quad X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall j \in V, k = 1, \dots, K$$

La restricción (6) es también conocida como restricción de sub-tours o de ciclos hamiltonianos evita que se generen ciclos en la solución, las restricciones (7) y (8) sirven para especificar que las variables X_{ijk} y Y_{ik} son de naturaleza binaria ya que sólo pueden tomar los valores de 0 o 1.

3.6 Métodos de solución del CVRP

Para dar solución al problema de ruteo de vehículos capacitados inicialmente los investigadores plantearon algunos métodos exactos, posteriormente se desarrollaron métodos heurísticos y finalmente los estudios se centraron en heurísticas avanzadas como los algoritmos metaheurísticos.

El método de Branch and Bound es el método exacto más eficiente para la solución del CVRP. La técnica consiste en desarrollar un árbol con las posibles soluciones, de manera que en cada rama se plantee una solución. Para el desarrollo del problema de ruteo de vehículos con capacidad, se debe iniciar con una solución factible, que tenga asociada una distancia total recorrida. Así se puede realizar el árbol eliminando las ramas que superen la distancia de la solución factible. Esta solución inicial puede ser obtenida con el uso de métodos heurísticos como Clarke and Wright o el vecino más cercano.

3.6.1 Heurísticas para el CVRP La heurística basada en ahorros propuesta por Clarke & Wright en 1964, ha sido uno de los algoritmos más implementados para resolver CVRP, el cual consiste en realizar una exploración limitada del espacio de búsqueda y dar una solución de calidad aceptable en un tiempo moderado. El algoritmo se desarrolla partiendo de una solución con dos rutas $(0, \dots, i, \dots, 0)$ y $(0, \dots, j, \dots, 0)$, las cuales pueden ser combinadas generando así una sola ruta $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ como se muestra a continuación.

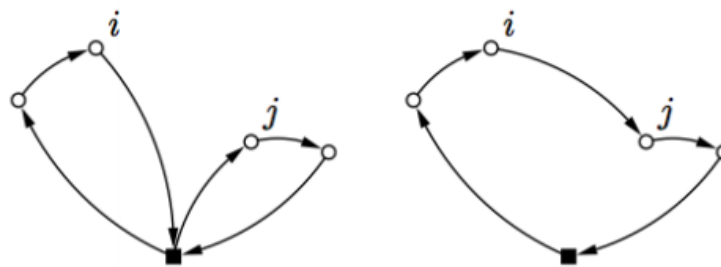


Ilustración 6 Heurística para problemas de ruteo de vehículos. Adaptado de (Sanchez F. , 2007)

Al unir las rutas, los arcos $(i,0)$ y $(0,j)$ desaparecen y se agrega el arco (i,j) . El algoritmo parte de una solución inicial y realiza las uniones que mayor ahorro generen siempre y cuando cumpla con las restricciones planteadas en el problema. Para usar este método es necesario conocer los costos o las distancias que existen entre los diferentes nodos, o sea el costo de cada trayecto.

Otra heurística utilizada para el problema del CVRP es el método de inserción que consisten en construir la solución insertando clientes que no se han incluido en ninguna de las rutas existentes, y se puede hacer de forma secuencial, o sea que los clientes se van insertando a la última ruta creada siempre y cuando no se incumpla ninguna restricción, pero esto puede generar la inserción de clientes que están muy dispersos aumentando el costo total de las últimas rutas, por lo que se ha desarrollado otra forma, la paralela que permite insertar el cliente en cualquier ruta existente en la solución (Corona). Los algoritmos de inserción comienzan seleccionando un ciclo inicial (sub-ruta) con n nodos, posteriormente los j son seleccionados e insertados en la ruta, de acuerdo con una o varias restricciones, donde la longitud del ciclo no se incrementa. Los criterios más utilizados en la solución del CVRP han sido:

✦ Inserción más cercana (El Vecino Más Cercano): Seleccionar el vértice j más cercano al ciclo.

- ✦ Inserción más lejana: Seleccionar el vértice j más lejano al ciclo.
- ✦ Inserción de menor costo: Seleccionar el vértice j que será insertado con el menor incremento del costo.

- ✦ Inserción aleatoria: Seleccionar el vértice j al azar.

3.6.2 Metaheurísticas para el CVRP Diversas técnicas metaheurísticas han sido propuestas para solucionar el CVRP, la lista de aplicaciones incluye métodos como algoritmos evolutivos, TS, SA, ABC y muchas formas de búsqueda exploratoria.

3.6.2.1 Recocido simulado (SA) La principal característica de la metaheurística de recocido simulado es proporcionar una alternativa eficiente para escapar de óptimos locales al permitir movimientos “peores” respecto a la función objetivo con el fin de encontrar un óptimo local. Este método fue introducido por Kirkpatrick et al (Kirk, Gelatt, & Vecchi, 1983), quienes fueron los primeros en utilizarlos para resolver problemas de optimización combinatoria. El SA es un algoritmo análogo al proceso de recocido (enfriamiento lento) de un sólido en metalúrgica, donde el proceso inicia a alta temperatura y hace vibrar las moléculas que se desplazan caóticamente hasta adoptar estructuras de mínima energía al disminuir la temperatura.

3.6.2.2 Búsqueda Tabú Es un enfoque iterativo definido por primera vez por Fred Glover (Glover, 1986), que trata de evitar que las soluciones caigan en óptimos locales. Para dar solución al CVRP por medio de la búsqueda tabú, es necesario generar una solución inicial mediante alguna heurística y a partir de esta se crea la lista tabú. Para llenar la lista primero se escoge el nodo inicial y se examina su vecindad, eligiendo la mejor opción dado los criterios de menor distancia entre los puntos. Este método iterativo termina cuando se llega al criterio de parada, que puede ser un cierto número de corridas definidas al inicio del problema. Un trabajo presentado por J. Brandao (Brandao, 2009), muestra una solución al CVRP con una flota de vehículos heterogénea mediante el algoritmo de búsqueda tabú.

3.6.2.3 Optimización por colonia de hormigas (ACO) Ant Colony Optimization (ACO), es una metaheurística que abarca un conjunto de técnicas de optimización inspiradas en el comportamiento colectivo de forrajeo de las hormigas, las cuales son capaces de encontrar el camino corto entre el nido y la fuente de alimento por medio de la comunicación mediante rastros de feromonas artificiales. Fue desarrollado por Dorigo en 1992 (Dorigo).

3.6.2.4 Colonia de abejas artificial (ABC) Artificial Bee Colony (ABC) es uno de los algoritmos más recientes en el dominio de la inteligencia colectiva. Creado por Dervis Karaboga en 2005 (Karaboga D. , 2005), que busca emular el comportamiento de búsqueda y explotación de fuentes de alimento de las abejas con el fin de encontrar buenas soluciones a problemas de optimización difíciles. El ABC define una colmena artificial formada por una zona de comunicación, o zona de baile, y tres tipos de abejas (obreras, observadoras y explotadoras) e implementar un proceso de recolección de polen por parte de las abejas.

3.6.3 Algoritmo enjambre de partículas (PSO) El PSO es un método de optimización, basado en la simulación del comportamiento social de las bandadas de aves y el entorno en el que se desenvuelven (Poli, Kennedy, & Blackwell, 2007). El problema PSO se compone de un número de individuos conocidos como “partículas” que se comunican entre ellas; cada partícula representa una potencial solución en el espacio de búsqueda de algún problema o función.

Cada partícula en el enjambre está compuesta por D dimensiones, donde D es la dimensión del espacio de búsqueda, compuesta por:

m: Número de partículas.

$X_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{il}, \dots, x_{iN}$ Posición de la partícula i-ésima.

$V_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{il}, \dots, v_{iN}$ Velocidad de la partícula i-ésima.

$P_i = p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{il}, \dots, p_{iN}$ Mejor solución de la partícula i-ésima (pbest).

Las partículas actualizan sus posiciones y velocidades mediante un proceso iterativo, donde la posición actual de la partícula se compara con la mejor solución de la partícula que representa la mejor solución global del enjambre; si se encuentra una mejor solución para la

partícula, el sistema se actualiza y esta se convierte en la mejor solución global, luego de esto se verifica el criterio de calidad en donde se evalúa la finalización del algoritmo.

4. Diseño del modelo matemático

Basados en el trabajo desarrollado para un caso de remoción de escombros en Turquía (Sahin, Kara, & Karasan, 2016), y teniendo en cuenta lo siguiente:

- Se establece un punto de origen del cual van a partir los vehículos.
- La ruta inicia y termina en el punto de origen
- La capacidad de todos los vehículos será la misma.
- Cada ruta será recorrida por un único vehículo.
- Cuando la capacidad del vehículo se complete, este regresa al punto de origen para liberarla y luego continua con la ruta.
- Cada nodo es servido por un solo vehículo y solo puede ser visitado una vez.
- El nivel de escombros que se genera es aleatorio debido a la falta de información histórica.

Se obtiene el siguiente modelo.

Objetivo: minimizar el tiempo de recorrido de los vehículos de recolección.

Conjuntos:

$H = (N, E)$, red donde N representa los nodos y E representa los arcos.

$A = \{(i, j) \cup (j, i) / (i, j) \in E\}$, constituye el conjunto de arcos de la red, (i, j) y (j, i) son simétricos.

$DL \subseteq N$ conjunto de nodos críticos

$SL \subseteq \frac{N}{DL}$ conjunto de nodos de suministro de los vehículos

$DL \cup SL = L$ conjunto de arcos de la red

$v = 1, 2, \dots, V$, vehículos de recolección.

Parámetros:

SL nodos de suministro de los vehículos

C_v capacidad del vehículo de recolección.

t_{kl} tiempo requerido para atravesar el arco $(k, l) \in A$.

W_{kl} tiempo requerido para remover los escombros del arco $(k, l) \in E$, si el arco está bloqueado.

Variables:

Z tiempo de recorrido

TT Tiempo total de viaje hasta que todos los nodos hayan sido visitados

B_{kl} 1 si los escombros del arco $(k, l) \in E$ son removidos
0 de lo contrario

I_{kl} 0 si el arco (k, l) está bloqueado por escombros
1 de lo contrario

N_v 1 si el vehículo v tiene la capacidad disponible para recoger escombros
0 de lo contrario

Y_{ijv} 1 si el vehículo v visita el nodo crítico $j \in L$, justo después de visitar el nodo crítico $i \in L$
0 de lo contrario

X_{ijklv} 1 si el vehículo v usa el arco $(k,l) \in A$, mientras viaja del nodo crítico $i \in L$ al nodo crítico $j \in L$
0 de lo contrario

C_{ij} tiempo de viaje de desde el nodo crítico $i \in L$ hasta el nodo crítico $j \in L$

P_i tiempo de visita del nodo crítico $i \in DL$, excluyendo el tiempo de recolección

Modelo:

$$\text{Minimizar } Z = TT + \sum_{\{k,l\} \in E} B_{kl} * W_{kl}$$

Sujeto a

1. $\sum_{j \in L} Y_{jiv} * N_v = 1, \forall i \in DL, v = 1, 2, \dots, V$
2. $\sum_{j \in L} Y_{ijv} * N_v = 1, \forall i \in DL, v = 1, 2, \dots, V$
3. $\sum_{j \in DL} Y_{ijv} * N_v = 1, \forall i \in SL, v = 1, 2, \dots, V$

4. $\sum_{l \in N} X_{ijlv} * N_v - \sum_{l \in N} X_{ijlv} * N_v = Y_{ij}, \forall i, j \in L, v = 1, 2, \dots, V$
5. $\sum_{l \in N} X_{ijlv} * N_v - \sum_{l \in N} X_{ijlv} * N_v = -Y_{ij}, \forall i, j \in L, v = 1, 2, \dots, V$
6. $\sum_{l \in N} X_{ijklv} * N_v - \sum_{l \in N} X_{ijklv} * N_v = 0, \forall i, j \in L, k \in N, k \neq i, k \neq j, v = 1, 2, \dots, V$
7. $P_j \geq P_i + C_{ij} - M(1 - Y_{ijv}), \forall i \in L, j \in DL, v = 1, 2, \dots, V$
8. $TT \geq P_i, \forall i \in DL$
9. $\sum_{k, l \in N} X_{ijklv} \leq Y_{ijv} |N| |N|, \forall i, j \in L, v = 1, 2, \dots, V$
10. $C_{ij} = \sum_{k, l \in N} X_{ijklv} * t_{kl}, \forall i, j \in L, v = 1, 2, \dots, V$
11. $\sum_{i, j \in L} X_{ijklv} + \sum_{i, j \in L} X_{ijklv} \leq (B_{kl} + I_{kl}) |L| |L|, \forall \{k, l\} \in E, v = 1, 2, \dots, V$
12. $P_i \geq 0, \forall i \in L$
13. $TT \geq 0$
14. $P_i = 0, \forall i \in SL$
15. $C_{ij} \geq 0, \forall i, j \in L$
16. $X_{ijkl} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in L; (k, l) \in A$
17. $B_{kl} \in \{0, 1\}, \forall \{k, l\} \in E$
18. $Y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in L$
19. $N_v \in \{0, 1\}, \forall v = 1, 2, \dots, V$
20. M número muy grande

Donde:

La función objetivo (Z) compuesta por el tiempo total de viaje y el tiempo que se requiere para la recolección de los escombros busca la disminución no sólo del tiempo de recorrido total sino lo que conlleva a que ese tiempo aumente, relacionado al tiempo que toma desbloquear cada uno de los nodos.

(1) y (2) forman el orden de visita de los nodos críticos, el cual empieza y termina en un nodo de suministro, asegurando la visita de cada nodo crítico.

(3) asegura que el vehículo visita exactamente un nodo crítico justo después de partir del nodo de suministro.

(4) (5) y (6) establecen un camino directo entre dos nodos críticos, se pueden incluir nodos intermedios no críticos.

(7) asigna el tiempo de visita del nodo crítico sin considerar el tiempo gastado para la remoción de escombros en los arcos bloqueados.

(8) minimiza el tiempo de visita del nodo más desfavorable.

(9) garantiza que, si no hay visita entre un par de nodos críticos, entonces no hay camino directo entre ellos.

(10) calcula el tiempo total gastado en viajes.

(11) garantiza que, si es posible viajar a lo largo de un arco, si este está libre o si los escombros en este han sido removidos.

(12) garantiza que el vehículo este posicionado en el nodo de suministro al inicio.

(13-20) restricciones dominantes.

5. Diseño del algoritmo

Para proporcionar el mejor resultado para el problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada, se presenta el algoritmo de enjambre de partículas, que toma una población inicial de partículas que se comunican directa o indirectamente entre ellas, en este caso las partículas son las rutas óptimas que toman los vehículos por los nodos en las zonas de la comuna 12 – Cabecera del Llano (figura 7) y la comuna 14 – Morrорico (figura 8) de la ciudad de Bucaramanga.

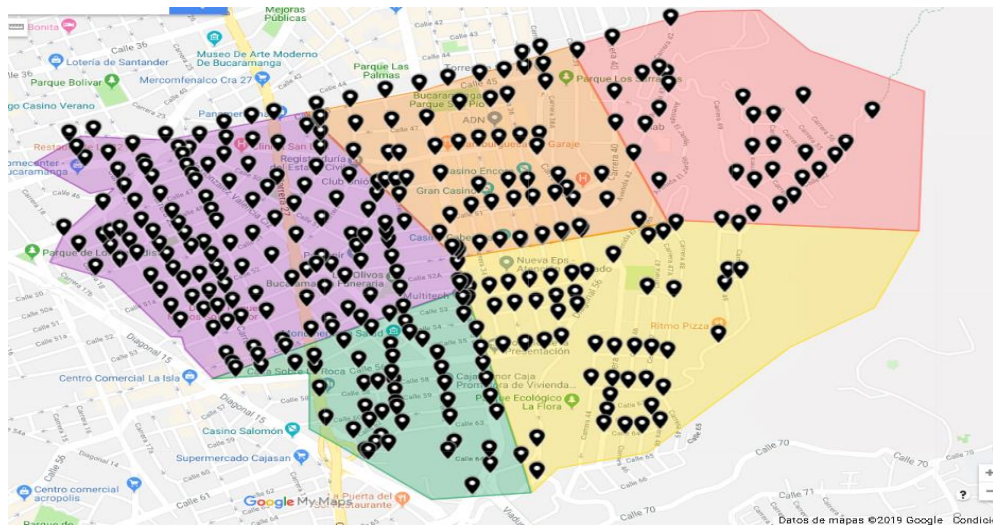


Ilustración 7 . Nodos Comuna 12 – Cabecera del Llano. Adaptado de Google Maps

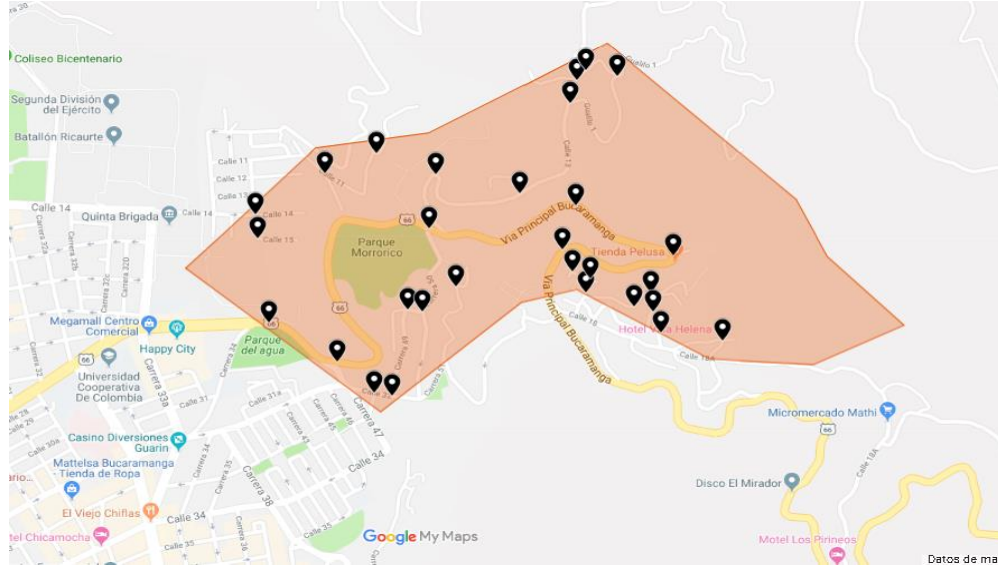


Ilustración 8 Nodos Comuna 14 – Morrorico. Adaptado de Google Maps

Donde cada ruta representa una solución potencial en el espacio de búsqueda y posee un valor fitness y una velocidad, que son los encargados de direccionar las partículas hacia la solución. El enjambre de partículas se representará de la siguiente manera (García Nieto, 2019):

N : Dimensión de la partícula.

m : Número de partículas.

$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$: Posición de la partícula i -ésima

$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})$: Velocidad de la partícula i -ésima

$P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN})$: Mejor solución global de la partícula i -ésima ($pbest$)

$P_{gi} = (p_{gi1}, p_{gi2}, \dots, p_{giN})$: Mejor solución global del enjambre ($gbest$)

En el proceso iterativo, las partículas actualizan sus posiciones y velocidades de la siguiente manera. Siendo $x_j(k)$ la posición de la partícula i en el momento k y $v_j(k)$ la

velocidad de la partícula i en el momento k , de acuerdo con esto la partícula se actualizará mediante la siguiente formula:

$$x_j(k+1) = x_j(k) + v_j(k+1)$$

A su vez, la velocidad de la partícula se actualizará mediante:

$$v_j(k+1) = v_j(k) + c_1 r_1 (p_b(k) - x_j(k)) + c_2 r_2 (g_b(k) - x_j(k))$$

Donde $p_b(k)$ es la mejor posición personal de la partícula ; $g_b(k)$ representa la mejor solución global del enjambre; r_1 y r_2 son un números aleatorios con distribución uniforme en el intervalo $[0,1]$; c_1 y c_2 son los coeficientes de aceleración que controlan la influencia estocástica de los componentes dentro de la velocidad de la partícula. El parámetro c_1 expresa la confianza que tiene la partícula en sí misma, y el parámetro c_2 representa la confianza que tiene la partícula en sus vecinos. La elección de estos valores obedece a un proceso experimental.

En la figura 9 se presenta el esquema del PSO en donde se definen sus etapas.

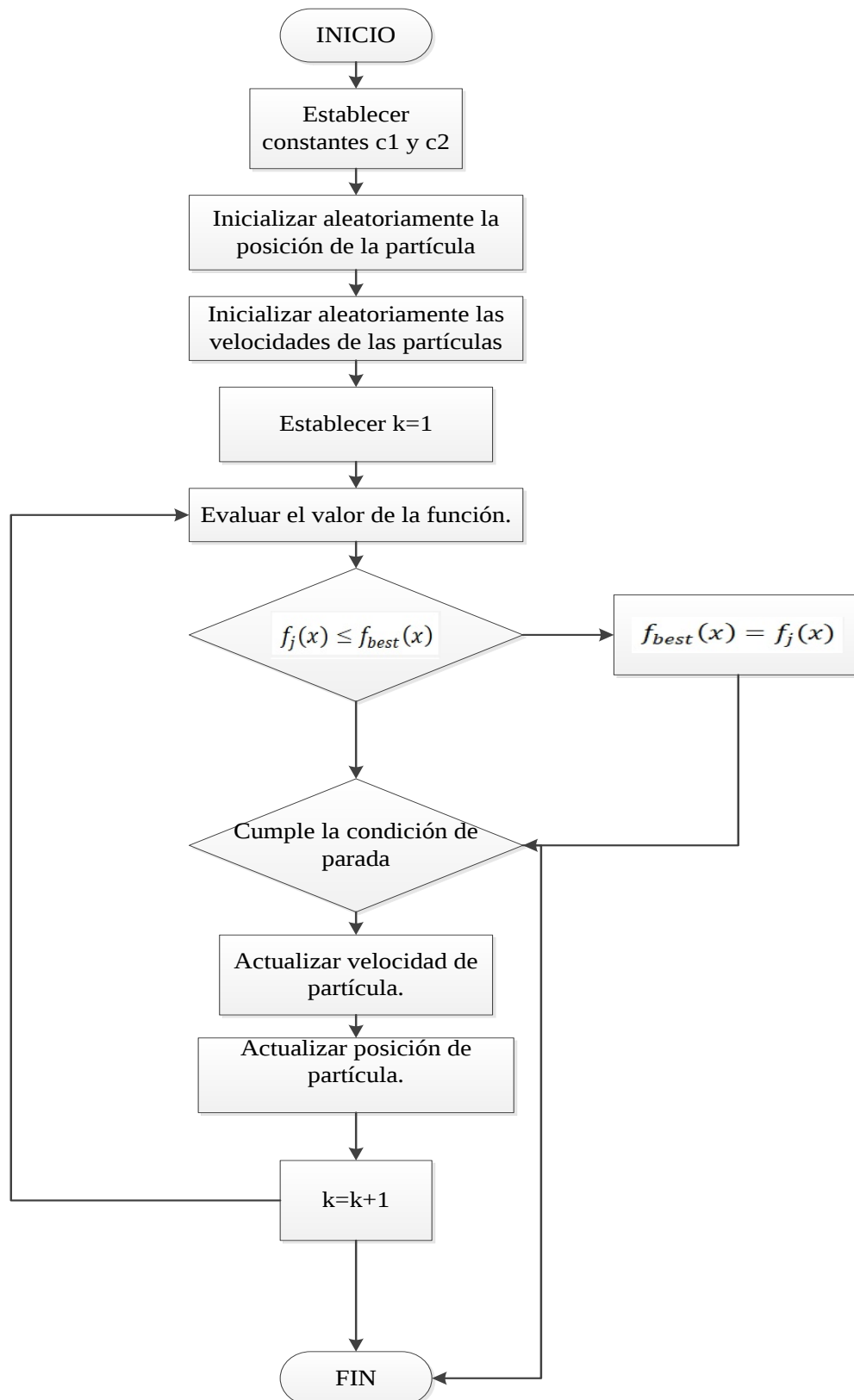


Ilustración 9 Esquema del PSO

En el esquema anterior se refleja los pasos que sigue el PSO; en la primera etapa se inicia el enjambre de manera aleatoria, luego se toma un valor aleatorio de la posición y velocidad de la partícula y se establece el tiempo del primer punto a evaluar. En la segunda etapa se evalúa la posición de la partícula comparada con la mejor posición anterior de las partículas: si la partícula evaluada toma la mejor solución encontrada, se toma la solución como referencia para otra búsqueda si la hay; de lo contrario si la partícula evaluada no es mejor solución que la partícula anterior entonces se verifica el criterio de parada del sistema, si se cumple con esta se finaliza el proceso.

En la tercera etapa se actualiza la mejor solución encontrada y se pasa al siguiente tiempo para evaluar la nueva partícula; en este punto se retome la segunda etapa para el proceso de evaluación de la partícula hasta que cumpla el criterio de parada. Al terminar se muestra la mejor posición de la partícula solución

6. Validación del algoritmo

Se propuso un algoritmo de enjambre de partículas para dar solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada, el algoritmo es ejecutado mediante datos de entrada previamente definidos arrojando una solución en un tiempo computacional corto. Además, para el desarrollo de la simulación se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Los coeficientes de aceleración que se establecieron son $c_1 = 1$ y $c_2 = 1,5$.
- Se suponen tres puntos de partida de los vehículos en la comuna 12 – Cabecera del llano: el primero se encuentra en la intercepción de la calle 45 con carrera 22, el segundo punto es la intercepción de la carrera 33 con el Viaducto la Flora y el tercer punto es la intercepción de la carrera 40 con la carrera 42. En la comuna 14 -Morrórico se establece

un único punto de partida en la calle 32 frene al Parque del agua. Estos puntos de origen pueden ser modificado para la ejecución del algoritmo.

- Debido a que no se puede especificar un número exacto de escombros que se pueden generar luego de un sismo, para el desarrollo de la simulación se va a tomar un valor aleatorio entre 100.000 y 1.000.000 de toneladas.
- Debido a la dificultad que se presenta a la hora de la recolección de escombros; como es incierta la cantidad de estos que se va a formar y en la literatura que se encuentra es escasa o nula la información acerca del tiempo que se requiere para liberar las rutas de acceso en caso de sismos; se toma un tiempo promedio de 45 minutos para la recolección de los escombros.
- La ciudad de Bucaramanga cuenta con dos volquetas (Informe de Gestión, 2017), para la simulación que se llevó a cabo se plantean cinco vehículos con distintas capacidades; cómo se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 2 Capacidad de vehículos por corrida

Comuna 12 - Cabecera		Comuna 14 - Morrórico	
Corrida	Vehículos (kg)	Corrida	Vehículos (kg)
1	10,000	1	10,000
2	12,500	2	12,500
3	15,000	3	15,000
4	17,500	4	17,500
5	20,000	5	20,000

Según la investigación realizada se llevó a cabo un escenario de prueba para la comuna 12 y un segundo escenario para la comuna 14; cada uno compuesto por 5 corridas de cinco vehículos cada una, con una capacidad diferente en cada prueba. Las rutas obtenidas que se

muestran a continuación en las diferentes figuras, en su parte lateral derecha describen la secuencia de nodos a seguir por el vehículo en los lugares donde se presentan escombros. Las siguientes figuras se adaptaron desde la plataforma de Google Maps.

6.1 Resultados de la comuna 12 – Cabecera del Llano

Para la primera corrida se plantea una capacidad de 10,000 kg para los cinco vehículos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos; como se observa en la ilustración 10 y en la ilustración 14, la capacidad de los vehículos 1 y 5 no fue suficiente para cubrir la demanda de escombros generados por lo tanto no se obtuvo ninguna ruta óptima. Mientras que en la ilustración 11, ilustración 12 e ilustración 13 se obtienen las rutas que deben tomar los vehículos 2, 3 y 4 respectivamente para ir liberando las calles de los escombros generados en caso de un sismo.

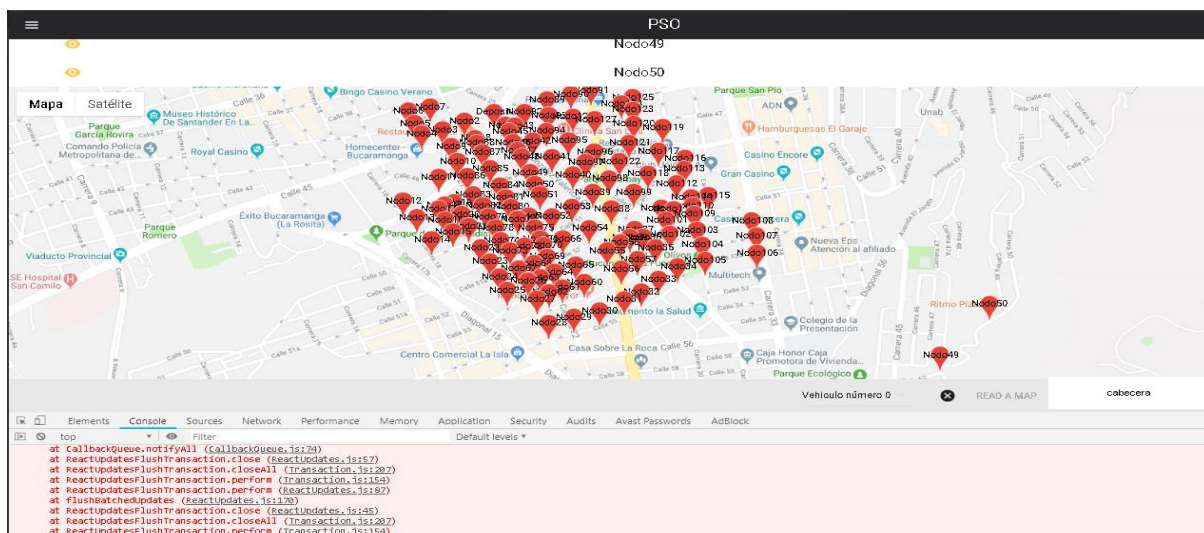


Ilustración 10 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 10,000 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Ilustración 11 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 10,000 kg



Ilustración 12 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 10,000 kg.



Ilustración 13 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 10,000 kg.

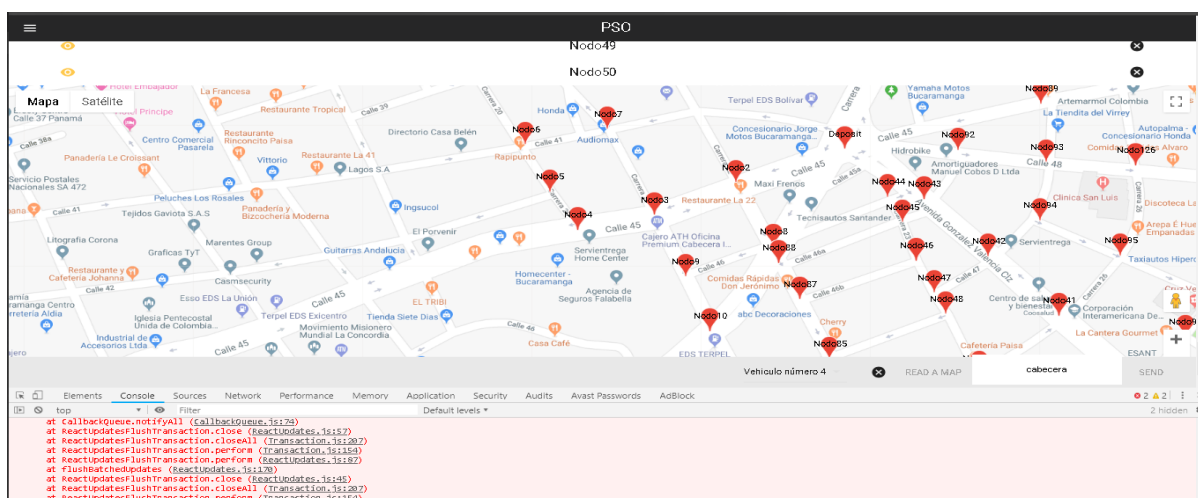


Ilustración 14 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 10,000 kg

En esta segunda corrida se plantean los cinco vehículos con una capacidad de 12,500 kg, como se observa en los resultados obtenidos en la ilustración 16, ilustración 18 e ilustración 19; la capacidad de los vehículos 2, 4 y 5; aún no es lo suficiente para cubrir la demanda de los escombros, y solo se lograron obtener dos rutas optimas que se observan en la ilustración 15 y en la ilustración 17 para el vehículo 1 y el vehículo 3 respectivamente.



Ilustración 15 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 12,500 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros

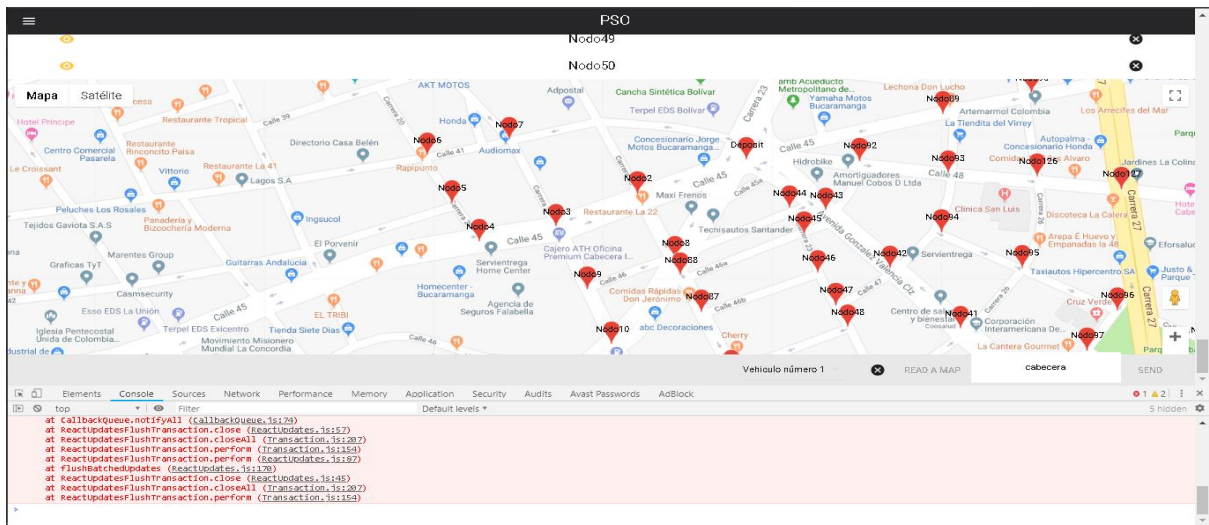


Ilustración 16 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 12,500 kg.



Ilustración 17 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 12,500 kg



Ilustración 18 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 12,500 kg

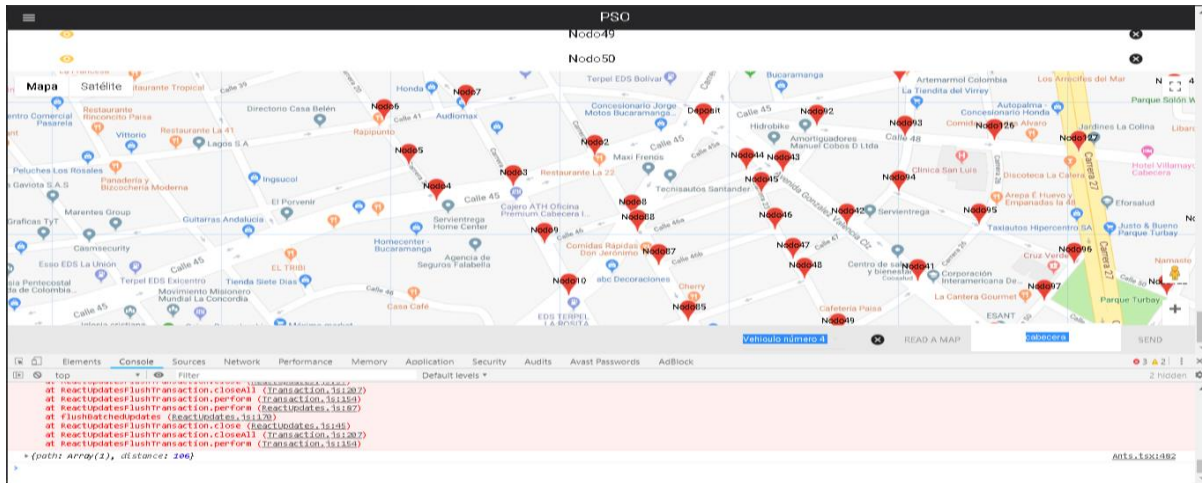


Ilustración 19 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 12,500 kg

En esta tercera corrida, se plantean cinco vehículos con una capacidad de 15,000 kg. En esta etapa los cinco vehículos cumplen con la demanda de escombros que surge en la simulación y se hallaron las rutas que debe tomar cada uno, se observa en la ilustración 20 la ruta del vehículo 1, la ruta del vehículo 2 comprende las ilustraciones 21 y 22, la ruta del vehículo 3 comprende las ilustraciones 23 y 24; la ilustración 25 y 26 describen la ruta del vehículo 4 y las ilustraciones 27 y 28 describen la quinta ruta.



Ilustración 20 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 15,000 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Ilustración 21 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 15,000 kg.



Ilustración 22 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 15,000 kg



Ilustración 23 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 15,000 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Pag | 66

Ilustración 24 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 15,000 kg



Ilustración 25 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 15,000 kg



Ilustración 26 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 15,000 kg



Ilustración 27 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 15,000 kg



Ilustración 28 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 15,000 kg

En esta cuarta corrida los cinco vehículos con una capacidad de 17,500 kg cumplen con la demanda de escombros y se obtienen las rutas a tomar en caso de un sismo, descritas de la siguiente manera: la ruta para el vehículo 1 comprende las ilustraciones 29 y 30, la ruta para el vehículo 2 comprende las ilustraciones 31, 32, 33 y 34; la tercer ruta se describe en las ilustraciones 35, 36 y 37; la ruta para el vehículo 4 comprende las ilustraciones 38 y 39; finalmente la quinta ruta se describe en las ilustraciones 40, 41 y 42.

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Ilustración 29 . Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 30 . Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 31 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Pag | 69

Ilustración 32 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 33 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 34 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Pag | 70

Ilustración 35 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 36 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 37 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 17,500 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Pag | 71

Ilustración 38 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 39 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 40 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 41 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 42 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg

Esta última corrida manejo cinco vehículos con una capacidad de 20,000 kg, dando como resultado cinco rutas a tomar por los vehículos: la ruta para el primer vehículo comprende las ilustraciones 43 y 44; la segunda ruta se encuentra descrita en las ilustraciones 45 y 46, para el vehículo 3 la ruta se describe en las ilustraciones 47 y 48, la cuarta ruta se describe en las ilustración 49 y 50, la quinta ruta se describe en la ilustración 51.

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Ilustración 43 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 44 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 45 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 20,000 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Ilustración 46 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 47 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 48 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 49 . Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 20,000 kg.



Ilustración 50 . Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 51 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 20,000 kg.

6.2 Resultados de la comuna 14 – Morrórico

En esta segunda etapa de la simulación se plante el escenario para la comuna 14 – Morrórico, compuesta por cinco corridas con variación en la capacidad de los vehículos.

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros

Para la primera corrida se planteó cinco vehículos con una capacidad de 10,000 kg, como se puede observar en las siguientes ilustraciones: el vehículo 3 (ilustración 56) y el vehículo 5 (ilustración 58) no tiene la capacidad suficiente por lo cual no se generan rutas para ellos, mientras que el vehículo 1 (ilustración 52 – 53), el vehículo 2 (ilustración 54 – 55), y el vehículo 4 (ilustración 57) pueden llevar a cabo el recorrido.



Ilustración 52 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 10,000 kg



Ilustración 53 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 10,000 kg

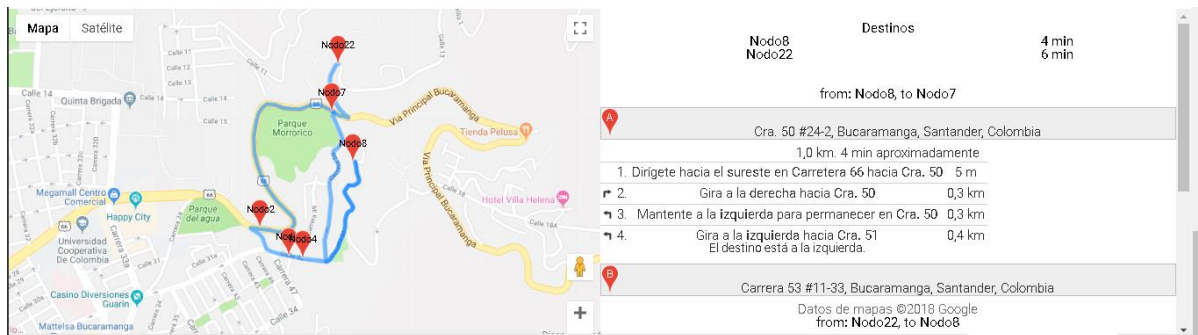


Ilustración 54 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 10,000 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros

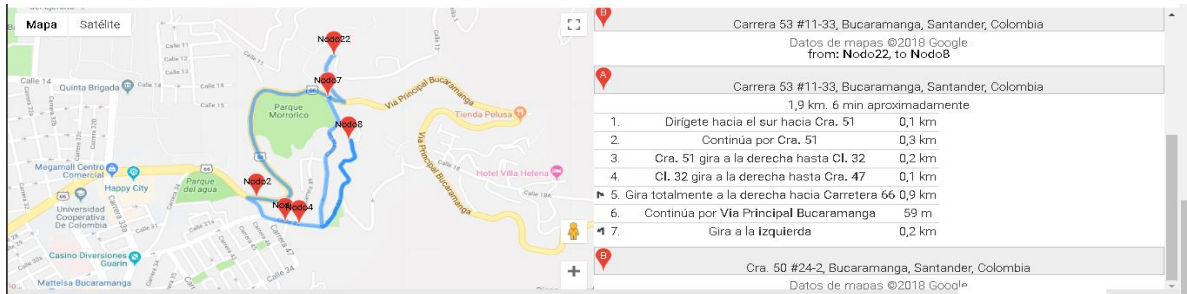


Ilustración 55 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 10,000 kg

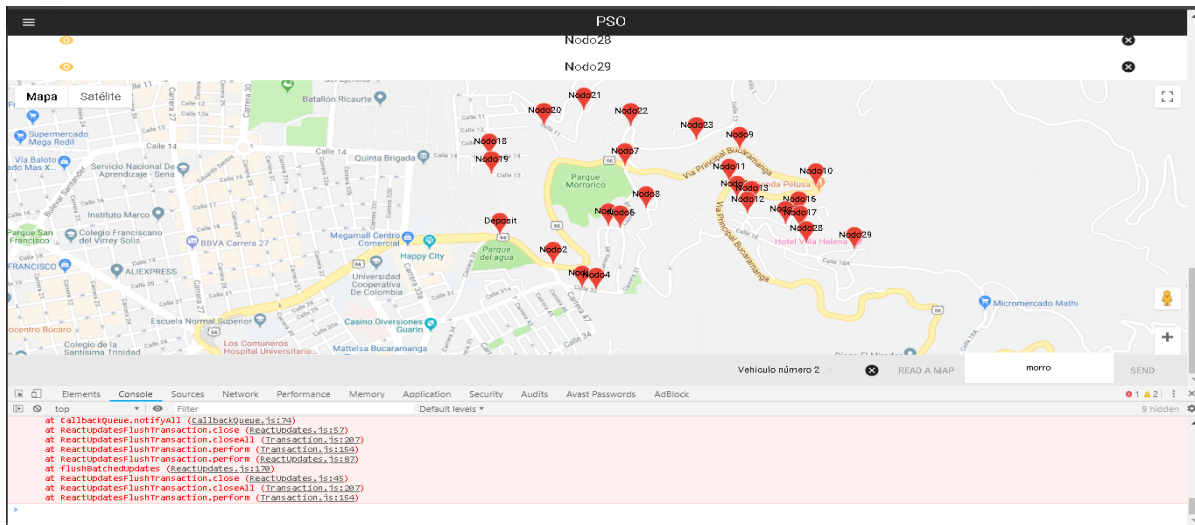


Ilustración 56 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 10,000 kg

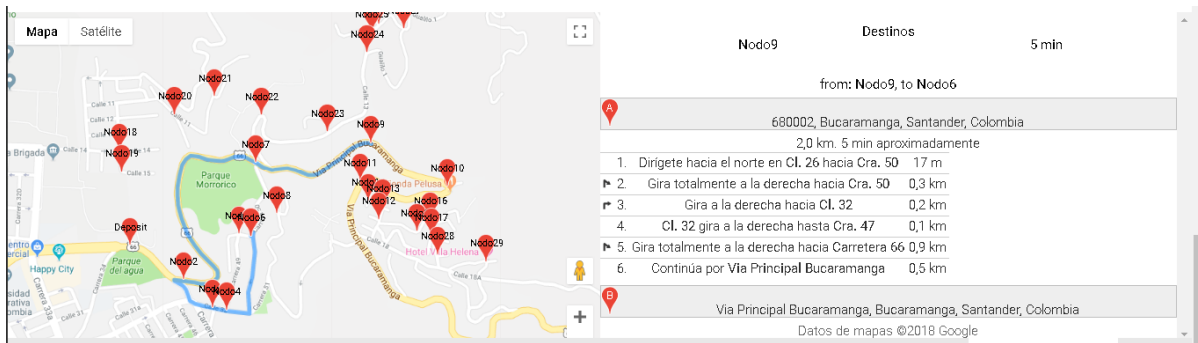


Ilustración 57 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 10,000 kg

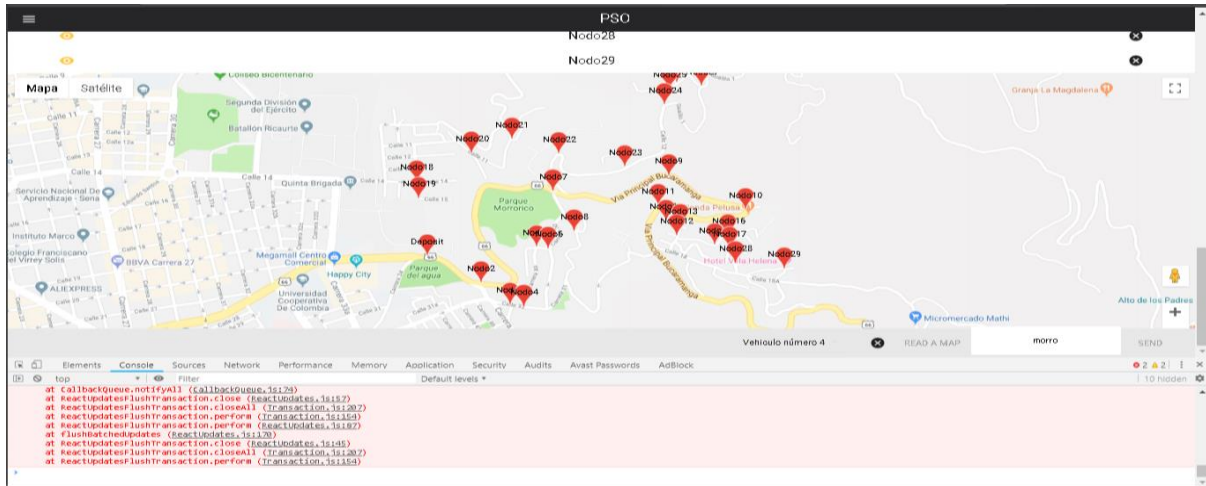


Ilustración 58 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 10,000 kg

Para esta segunda corrida, los vehículos contaron con una capacidad de 12,500 kg para llevar a cabo su ruta, dando como resultado que el vehículo 1 (ilustración 59) y el vehículo 3 (ilustración 61) no pudieron realizar ninguna ruta debido a la falta de capacidad, mientras que el vehículo 2 (ilustración 60), vehículo 4 (ilustración 62 - 63) y el vehículo 5 (ilustración 64 -65), si pudieron concluir el recorrido con las mejores rutas obtenidas por el algoritmo.

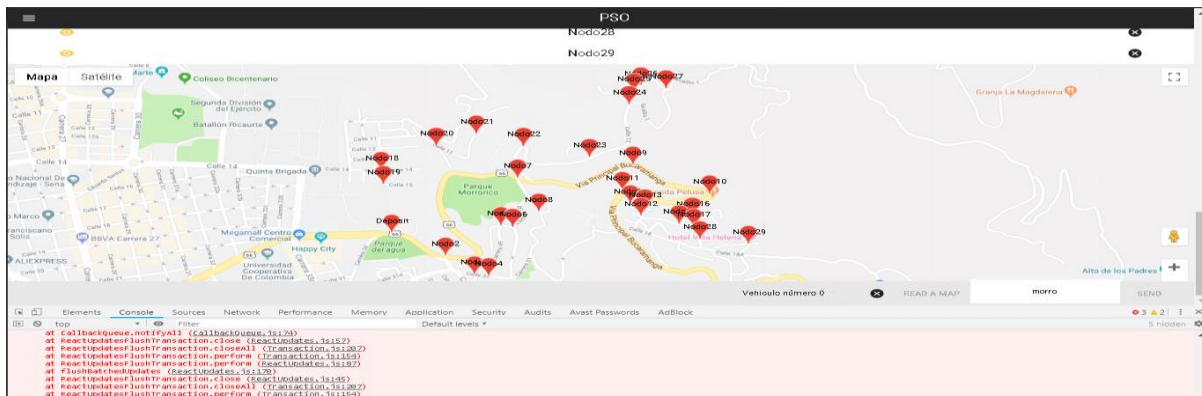


Ilustración 59 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 12,500 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Pag | 79

Ilustración 60 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 12,500 kg

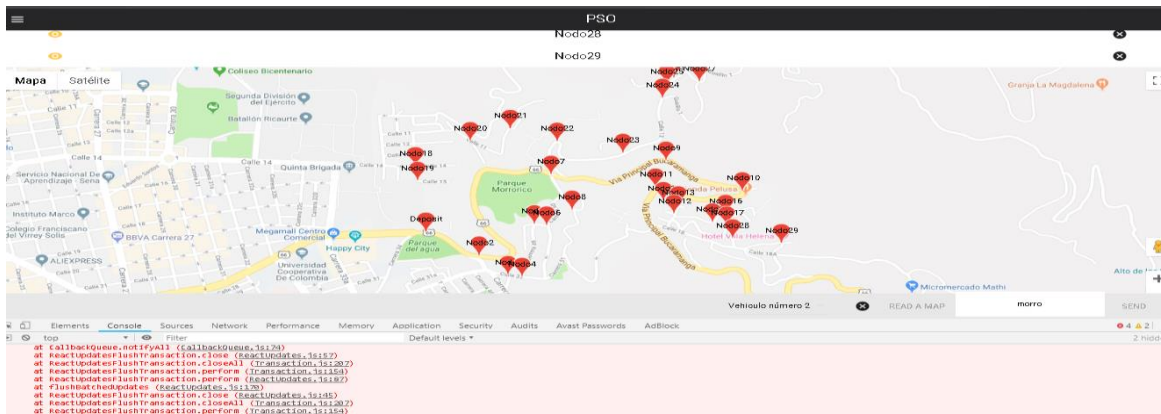


Ilustración 61 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 12,500 kg



Ilustración 62 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 12,500 kg



Ilustración 63 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 12,500 kg



Ilustración 64 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 12,500 kg



Ilustración 65 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 12,500 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros

Para esta corrida los cinco vehículos se manejaron con una capacidad de 15,000 kg, dando como resultado que solo el vehículo 4 (ilustración 70) no pudo llevar a cabo la ruta, debido a que la capacidad que se manejo fue insuficiente en esta parte de la simulación.



Ilustración 66 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 15,000 kg

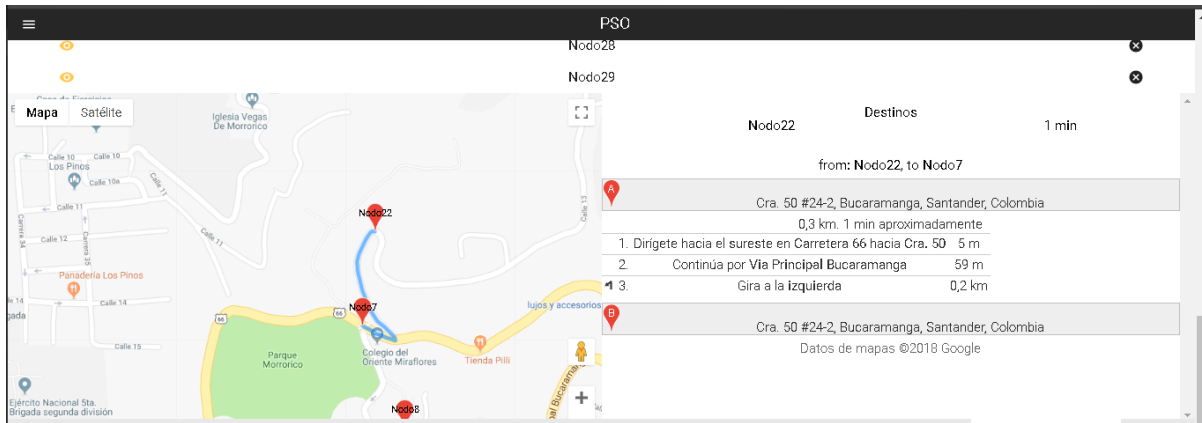


Ilustración 67 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 15,000 kg



Ilustración 68 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 15,000 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Pag | 82

Ilustración 69 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 15,000 kg

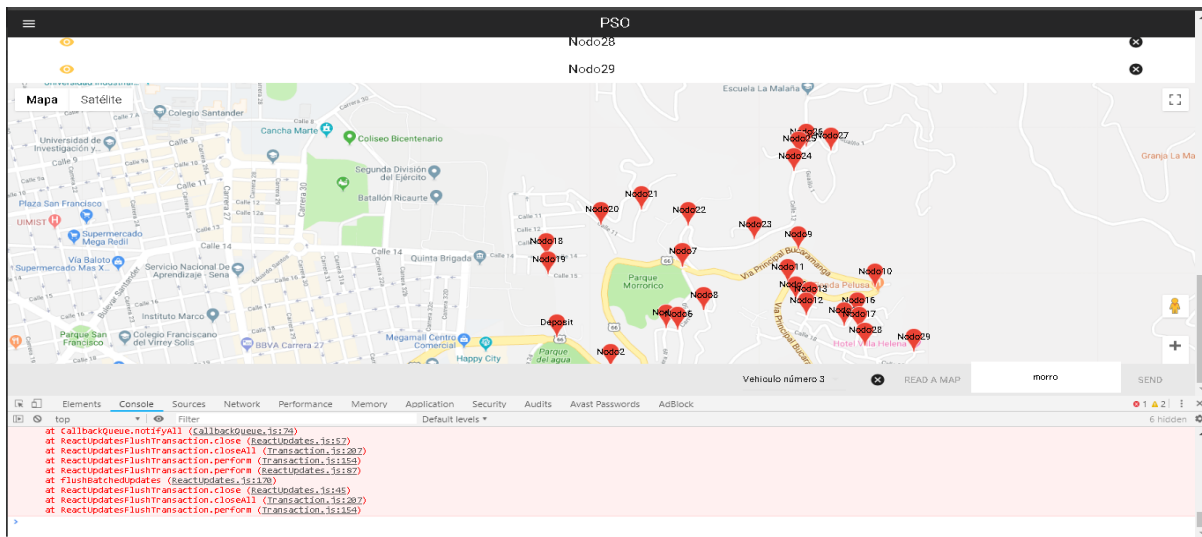


Ilustración 70 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 15,000 kg

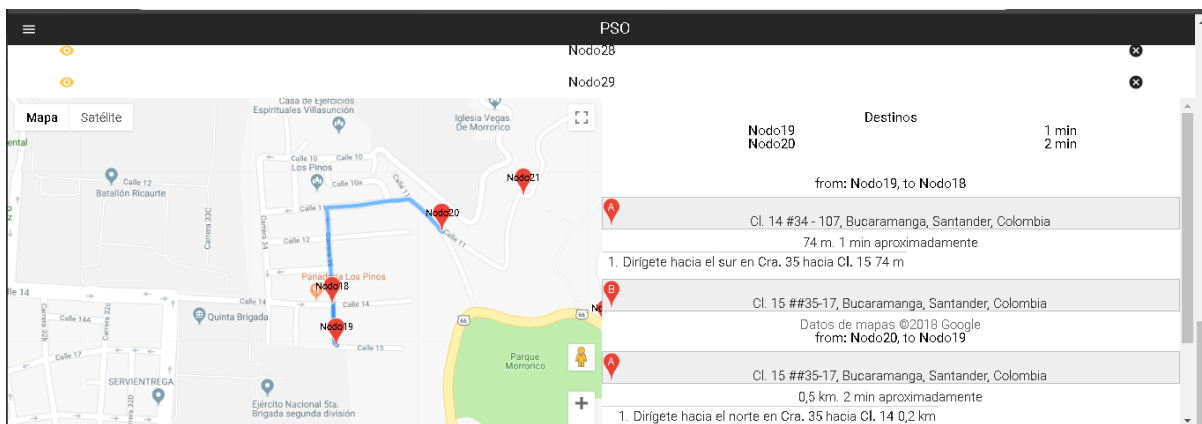


Ilustración 71 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 15,000 kg



Ilustración 72 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 15,000 kg

Esta cuarta corrida tomo cinco vehículos con una capacidad de 17,500 kg, las rutas que toman los vehículos se describen a continuación: la ruta descrita en las ilustraciones 73 - 74 corresponde al vehículo 1, la ruta del vehículo 2 se observa en las ilustraciones 75 - 76; la tercera ruta se describe en la ilustración 77; el vehículo 4 recorre la ruta descrita en las ilustraciones 78 - 79 y la ruta final se describe en las ilustraciones 80 - 81.



Ilustración 73 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 74 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 75 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg

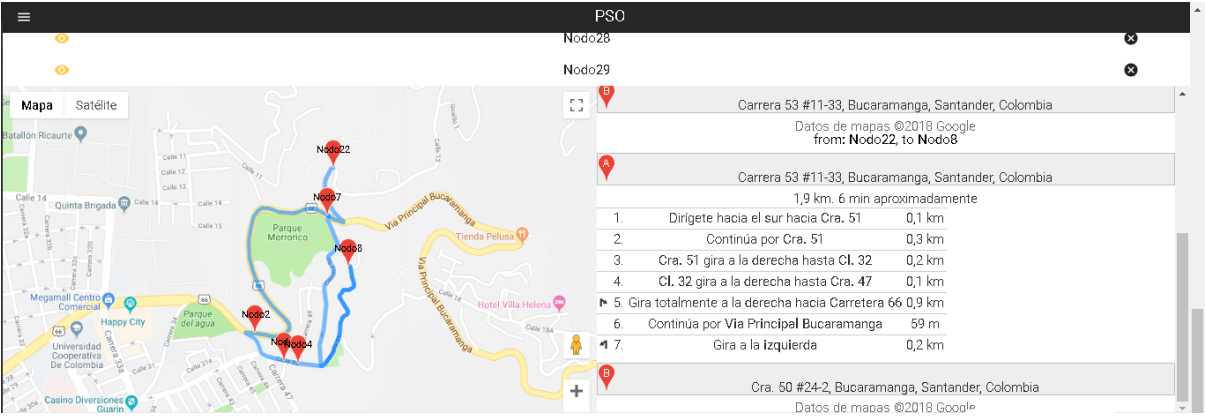


Ilustración 76 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 17,500 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Ilustración 77 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 78 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 79 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 17,500 kg

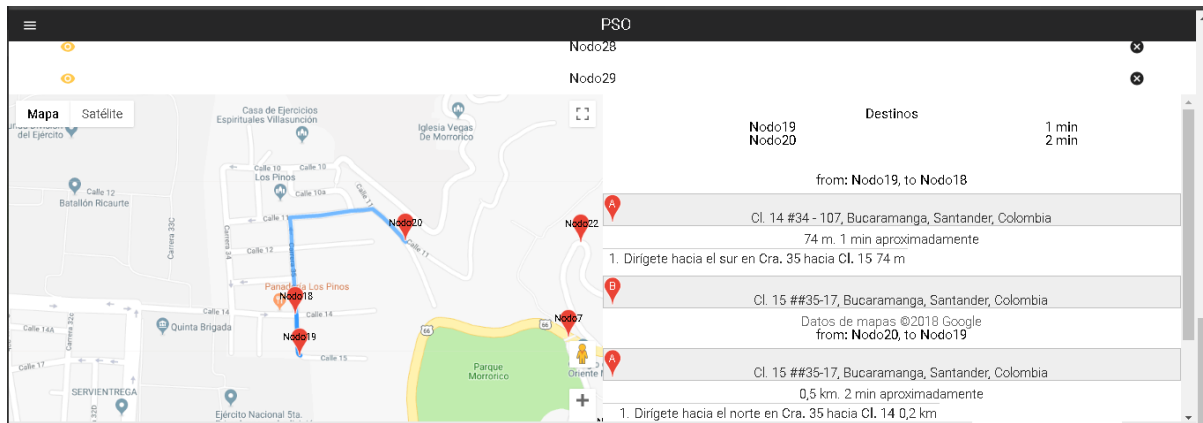


Ilustración 80 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg



Ilustración 81 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 17,500 kg

Para esta última corrida, cada vehículo se manejó con una capacidad de 20,000 kg dando como resultado las siguientes rutas que se pueden observar desde la ilustración 82 que describe la ruta del vehículo 1, hasta la ilustración 89 que representa la ruta del vehículo 5.

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Pag | 87

Ilustración 82 Ruta 1, Vehículo 1 con capacidad de 20,000 kg

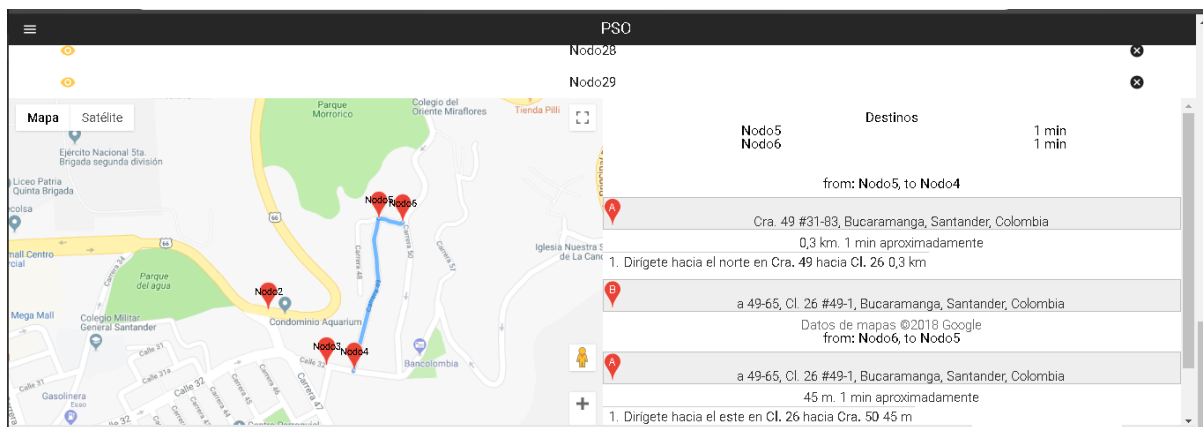


Ilustración 83 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 20,000 kg

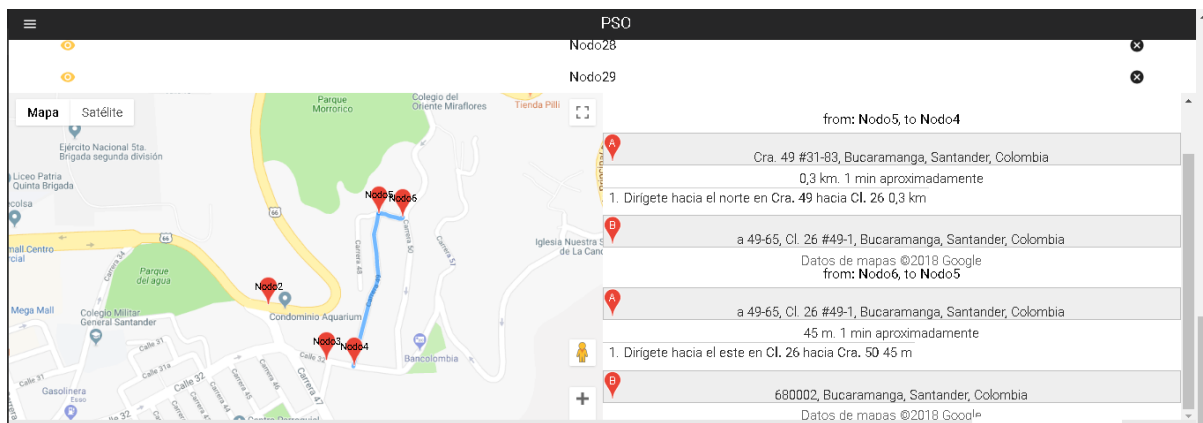


Ilustración 84 Ruta 2, Vehículo 2 con capacidad de 20,000 kg

Modelo estocástico CVRP para recoger escombros



Pag | 88

Ilustración 85 Ruta 3, Vehículo 3 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 86 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 87 Ruta 4, Vehículo 4 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 88 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 20,000 kg



Ilustración 89 Ruta 5, Vehículo 5 con capacidad de 20,000 kg

7. Conclusiones

Los objetivos que se plantearon en esta investigación se cumplieron en totalidad, el algoritmo de partículas propuesto encuentra buenas soluciones factibles para la minimización del tiempo de recorrido de los vehículos de rescate; además se cumple con los parámetros y restricciones del caso de estudio y se calcularon en tiempos de computo muy cortos.

Con base a la literatura se encontró un modelo desarrollado en Turquía el cuál se usó como referencia para la adaptación al modelo en Bucaramanga. Conforme se analizó el modelo referencia paralelamente se tomaron los requerimientos que se necesitaron para diseñar el modelo estocástico del presente trabajo de investigación.

Se identifico que los problemas CVRP son los más comunes desarrollados en la literatura, sin embargo, se evidenció que son muy poco abordados los problemas que manejan una demanda estocástica con método de solución PSO, por lo tanto, no se encuentran casos de estudio suficientes para poder adaptar a la investigación, debido a esto se hace necesario contar con la ayuda de un experto para obtener datos más confiables y adaptarlos al problema investigado.

Tomando los sectores Cabecera del Llano y Morrónico se encontró que, si la cantidad de escombros es mayor a la capacidad del vehículo, el vehículo copara su capacidad y no podrá recorrer la ruta, por esto se recomienda hacer puntos de disposición de escombros ficticios en puntos intermedios de las rutas, para que el programa pueda tomar la ruta y el vehículo pueda llevar a cabo el recorrido.

El aporte de esta investigación es el desarrollo de una herramienta computacional que permite establecer las posibles rutas a usar para la planeación del proceso de reconstrucción y recuperación de la ciudad de Bucaramanga luego de un sismo.

Se recomienda para futuras investigaciones diseñar escenarios más robustos, que incluyan parámetros más confiables, el estado de las vías y puentes, la disponibilidad real de los vehículos de recolección, permitiendo así un acercamiento más cercano a la realidad.

8. Recomendaciones

Para futuros proyectos se recomienda tomar puntos de deposición entre nodos para que los vehículos puedan cumplir con las rutas.

En el caso de la selección de vías, se pueda hacer una clasificación de prioridades de vías; debido a que las avenidas principales deben ser las primeras en ser liberadas de escombros para el acceso de los cuerpos de rescate.

Referencias Bibliográficas

(s.f.).

Alabas-uslu, C., & Dengiz, B. (2011). A self-adaptive local search algorithm for the classical vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, 8990.

Amorocho Becerra, J. (31 de 03 de 2017). *Invasiones, 'negociazo' que pone en peligro a 131 mil bumangueses*. Obtenido de Vanguardia: <http://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/352885-invasiones-negociazo-que-pone-en-peligro-a-131-mil-bumangueses>

Anaya-Arenas, A. M., Renaud, J., & Ruiz, A. (2014). Relief distribution networks: a systematic review. *Annals of Operations Research*, 53-79.

Balcik, B., & Beamon, B. (2008). Facility location in humanitarian relief. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 101-121.

Barnes, C. F., Fritz, H., & Yoo, J. (2007). Hurricane disaster assessments with image-driven, data mining in high-resolution satellite imagery. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 1631-1640.

Brandao, J. (2009). A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 716-728.

Çelik, M., Ergun, Ö., & Keskinocak, P. (2015). The Post-Disaster Debris Clearance Problem Under Incomplete Information. *Operations Research*, 65-85.

Chicano, J. (s.f.). Tesis doctoral. *Metaheurísticas e ingeniería de software*. Universidad de Málaga, Málaga.

Cordeau, J. (2007). Vehicle Routing. En: Handbooks in Operations Research & Management Science:.. *Handbooks in Operations Research & Management Science: Transportation*, 367.

Corona , J. (s.f.). Magister en ciencias en sistemas inteligentes. *Hiper-heurísticas a través de programación genética para la resolución de problemas de vehículos*. Instituto tecnologico y de estudios superiores Monterrey, Monterrey.

Diaz, A., Glover, F., & Ghaziri, H. (1996). *Optimizacion heurística y redes neuronales en direccion de operaciones e ingenieria*. Madrid: Editorial Paraninfo.

Dorigo, M. (s.f.). Tesis PhD. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. .Departamento de Electrónica. Politécnico de Milano, Milan.

Eberhart, R., & Kennedy, J. (1995). A new optimizer using particle swarm theory. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39-43.

Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja. (s.f.). *¿Qué es un desastre?* Obtenido de Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja: <https://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/sobre-desastres/que-es-un-desastre/>

Ferro Dávila, S. O. (2016). *Estrategia Departamental de Respuesta a Emergencia y Desastres de Santander*. Bucaramanga: Consejo Departamental de Gestion de Riesgo de Desastres.

Galindo, G., & Batta, R. (2013). Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 201-211.

Gao, J., & Sang, Y. (2017). Identification and estimation of landslide-debris flow disaster risk in primary and middle school campuses in a mountainous area of Southwest China. *INTERNATIONAL JOURNAL OF DISASTER RISK REDUCTION*, 60-71.

García Nieto, J. M. (23 de Enero de 2019). *Algoritmos Basados en Cúmulos de Partículas Para la Resolución de Problemas Complejos*. Obtenido de Academia: <http://uma.academia.edu/Jos%C3%A9ManuelGarc%C3%ADaNieto>

García Rivera, J. C., & Dueñas, M. A. (2012). *Respuesta a la proposición N°017 de Octubre 4/12*. Bucaramanga: Corporacion del consejo de Bucaramanga.

Garcia, J., & Maheut, J. (2011). Modelos y métodos de investigación de operaciones. En A. Cruz Brionez, *Modelos y Metodos de Investigacion de Operaciones Procedimientos para Pensar* (pág. 103). Valencia: Grupo de Investigación ROGLE.

Garcia-Torres, S., Kahhat, R., & Santa-Cruz, S. (02 de 2017). Methodology to characterize and quantify debris generation in residential buildings after seismic events. *Resources, Conservation and Recycling*, 151-159.

Gaytán Iniestra, J., Arroyo López, P. E., & Enríquez, R. (28 de 11 de 2017). *Logística humanitaria: planeación y control del producto*. Obtenido de Énfasis Logística: <http://www.logisticamx.enfasis.com/notas/17787-logistica-humanitaria-planeacion-y-control-del-producto>

Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research*, 533-549.

Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES*. México D.F.: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Hu, Z.-H., & Sheu, J.-B. (2013). Post-disaster debris reverse logistics management under psychological cost minimization. *TRANSPORTATION RESEARCH PART B-METHODOLOGICAL*, 118-141.

IFRC. (28 de 11 de 2017). *What is a disaster?* Obtenido de International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies: <http://www.ifrc.org/en/what-we-do/disaster-management/about-disasters/what-is-a-disaster/>

(2017). *Informe de Gestión*. Bucaramanga: Secretaria de Infraestructura.

Jovel, R. (1989). Los desastres naturales y su incidencia económico-social. *Revista de la CEPAL*, 133-146.

Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. *Technical Report*.

Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 459-471.

Kirk, P., Gelatt, S., & Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 671-680.

Kovacs, G., & Spens, K. (2007). Humanitarian logistics in disaster relief operations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 99-114.

- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem. An overview of exact and approximate algorithm. *European Journal of Operational Research*, 345.
- Lorca, Á., Celik, M., Ergun, O., & Keskinocak, P. (06 de 06 de 2017). *An Optimization-Based Decision-Support Tool for Post-Disaster Debris Operations*. Obtenido de Production and Operations Management: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/poms.12643/epdf?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=onlinelibrary.wiley.com&purchase_site_license=LICENSE_DENIED
- Lorca, A., Celik, M., Ergun, O., & Keskinocak, P. (2017). An Optimization-Based Decision-Support Tool for Post-Disaster Debris Operations. *PRODUCTION AND OPERATIONS MANAGEMENT*, 1076-1091.
- Olivera, A. (2004). Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos. *Universidad de la Republica, Montevideo, Uruguay*, 10-27.
- ONU. (29 de 11 de 2017). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. Obtenido de Naciones Unidas y el Estado de Derecho: <https://www.un.org/ruleoflaw/es/un-and-the-rule-of-law/united-nations-environment-programme/>
- Ortuño, M. (2013). Decision Aid Models and Systems for Humanitarian Logistics. A Survey. *Decision Aid Models for Disaster Management and Emergencies*, 17-44.
- Ozdamar, L., Aksu, D. T., & Ergunes, B. (2014). Coordinating debris cleanup operations in post disaster road networks. *Socio-Economic Planning Sciences*, 249-262.

Papadimitriou, C. H., & Steiglitz, K. (2000). *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Mineola, New York: Dover Publications Inc.

Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization An overview. *Swarm Intelligence*, 33–57.

Sahin, H., Kara, B. Y., & Karasan, O. E. (2016). Debris removal during disaster response: A case for Turkey. *Socio-Economic Planning Sciences*, 49-59.

Sanchez, F. (2007). Métodos exactos y metaheurísticos para resolver el problema del agente viajero y el problema de ruteo de vehículos. En: 2007. *Escuela superior politécnica del editorial. Ecuador*.

Sanchez, M. (2000). Optimización combinatorial. En A. Martínón Cejas, *Matemáticas del siglo XX: Una mirada en 101 artículos* (págs. 115-120). Madrid: S.L. NIVOLA LIBROS Y EDICIONES.

Sanchez-Castillo, L., Kubota, T., Cantu-Silva, I., Moriyama, T., & Hasnawir. (2017). A probability method of rainfall warning for sediment-related disaster in developing countries: a case study in Sierra Madre Oriental, Mexico. *NATURAL HAZARDS*, 1893-1906.

SCHILLING, M. (29 de 11 de 2017). *2011: a year of disaster in quotes*. Obtenido de The Japan Times: <https://www.japantimes.co.jp/community/2011/12/27/general/2011-a-year-of-disaster-in-quotes/#.Wh6FXkria01>

Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre. (02 de 11 de 2017). *Plan nacional de gestión del riesgo de desastres*. Obtenido de NGRD Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo

de Desastres - Colombia: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Plan-Nacional-de-Gestion-del-Riesgo.aspx>

Thomas, A., & Mizushima, M. (2005). Logistics training: necessity or luxury? *Forced Migration Review*, 60-61.

Vidal Sánchez, F. (1994). *Los terremotos y sus causas*. España: Instituto de Estudios Almerienses.

Zheng, Y.-J., Chen, S.-y., & Ling, H.-f. (2015). Evolutionary optimization for disaster relief operations: A survey. *Applied Soft Computing*, 553-566.