

# Recolección de materiales peligrosos

Alexander Ruz Rojas  
Departamento de Informática  
Universidad Técnica Federico Santa María  
Santiago, Chile  
alexander.ruz@sansano.usm.cl

**Abstract**—En el presente artículo se presentará el problema: 'Recolección de materiales peligrosos', donde se busca que estos materiales sean recogidos y transportados por un conjunto de camiones con un límite de carga cada uno. Dado que los materiales que se transportan están ubicados en lugares distintos y además tienen un costo de riesgo por ser peligrosos, lo que se busca es minimizar la distancia recorrida por cada camión y además en caso de accidente o situación similar, reducir la población afectada por dicha situación.

**Index Terms**—Recolección, costo, minimizar, distancia recorrida, población afectada,

## I. INTRODUCCIÓN

Muchas empresas requieren o trabajan con carga que desean transportar y contiene materiales que son nocivos, es decir, son perjudiciales para la sociedad y para el medio ambiente, si bien las empresas toman los resguardos necesarios para que el transporte de estos materiales sea lo más seguro posible, siempre existe la posibilidad [1] de que ocurra un accidente durante el transporte de la carga, lo que provocaría un gran impacto en la población expuesta a riesgos [2] como: incendio, explosión, fuga química o radiación de los materiales que estaban siendo transportados. A pesar de que el número de accidentes es muy bajo en relación a la cantidad de viajes que se realizan transportando estos materiales. Por esta misma razón, muchos investigadores comenzaron a desarrollar modelos matemáticos para poder identificar rutas que le permitan a cada vehículo transportar dichos materiales con el objetivo de que estas rutas sean de bajo riesgo, pero para una empresa el costo de transporte en rutas de bajo riesgo resulta elevado, por lo cual este problema se vuelve multi-objetivo en donde se busca minimizar el costo asociado al transporte y reducir la población en riesgo, dando pesos distintos a cada objetivo dependiendo de la situación. Para darle aún más importancia al problema, estudios desde 1980 afirman [3] que en Estados Unidos la situación respecto al transporte de estos materiales se esta agravando, desde ese año más de 55.000 sustancias tóxicas fueron fabricados y procesados y al menos 250.000 envíos de materiales peligrosos se hacen diariamente y se espera que esto se duplique en al menos 10 años.

El resto del presente artículo, está organizado de la siguiente manera: la sección 2 contempla el estado del arte en donde se detallarán las técnicas que se han utilizado para resolver este problema, la sección 3 se determinará la técnica que se utilizó para resolver el problema (tanto el algoritmo como sus

componentes), en la sección 4 se dan las características de las instancias utilizadas, como por ejemplo, cantidad de vehículos, cantidad de materiales peligrosos, etc, en la sección 5 se mostrarán los resultados obtenidos para las distintas instancias y en la última sección se dará a conocer la conclusión del artículo.

## II. ESTADO DEL ARTE

Los primeros estudios relacionados a recolección de materiales peligrosos datan a principios de la década del 80 [4], en una extensa investigación hecha por Gary L. Urbanek y Edward J. Barber, quienes desarrollan un criterio con el fin de designar rutas para el transporte de materiales peligrosos basado en la probabilidad de que ocurra un accidente en una ruta cualquiera, al año 1985, en el artículo [3] designan rutas para cada camión en base a 4 variables, las cuales son: el número de eventos peligrosos que ha ocurrido en una ruta, probabilidad de que el material provoque un accidente, población en el radio de riesgo y la cantidad de materiales peligrosos por cada tipo. Al año 1997 [5] se utilizó un algoritmo llamado optimización por colonia de hormigas que fue diseñado por Marco Dorigo en el año 1992, quienes utilizaron este algoritmo fueron Richard F. Hartl y Christine Strauss para resolver el problema de enrutamiento de vehículos, este problema es muy similar al visto en este artículo, en una breve descripción trata de que una flota de vehículos con capacidades iguales deben realizar viajes desde una fabrica o lugar similar hacia distintos clientes recolectando distintos materiales, teniendo como objetivo solo reducir el costo de los viajes, ya sea el tiempo o el costo económico involucrado, el poder resolver el VRP (problema de enrutamiento de vehículos) con el algoritmo optimización por colonia de hormigas fue un gran avance ya que los resultados obtenidos eran mucho mejor que utilizar búsqueda local y obtenían una diferencia de al menos entre 0-10% respecto a la mejor solución. Para el año 2003 [6] se revisaron distintos modelos presentados para la resolución del problema de recolección de materiales peligrosos, los cuales representaban el valor esperado de la consecuencia de que un camión cargado con materiales peligrosos escoja una ruta.

En el año 2010, los autores Rojee Pradhananga, Eiichi Taniguchia y Tadashi Yamada del artículo [1] "Ant colony system based routing and scheduling for hazardous material transportation", su enfoque es bastante similar al artículo "Applying the ANT System to the Vehicle Routing Problem"

[5], en donde utilizan el algoritmo basado en un sistema de colonia de hormigas para un problema multi-objetivo, a diferencia de VRP que solo era un problema de un único objetivo.

El algoritmo basado en un sistema de colonia de hormigas, es llamado así por el comportamiento de las éstas en busca de su comida, al observarlas siempre están en una especie de hilera siguiendo un camino, esto se debe a que van dejando feromonas, que son sustancias químicas que simulan una firma para no perder el rastro por el que han pasado. Contextualizando el algoritmo para el problema de recolección de materiales, que es de tipo VRPTW multi-objetivo, es decir, problema de enrutamiento de vehículos con ventana de tiempo con más de un objetivo. La técnica que emplea es construir una solución utilizando una población de hormigas y sus respectivas feromonas, donde estas últimas simulan el objetivo del problema que es reducir costos (ya sean económicos o de tiempo, etc.) y la población en riesgo. Cada hormiga realiza lo siguiente:

- Colocar la hormiga en el depósito, lugar de partida de los vehículos.
- Crear todas las rutas posibles desde el lugar actual (ya sea donde un cliente o nodo depósito).
- Seleccionar la ruta con el mayor valor de feromonas, las cuales fueron definidas en el paso anterior.
- Actualizar el valor de la feromona de la ruta actual.
- Actualizar el lugar en que se encuentra la hormiga (ya sea donde un cliente o nodo depósito).
- Repetir desde el segundo paso si es que se pueden atender a mas clientes.
- Actualizar la cantidad de vehículos disponibles.
- Terminar cuando se haya hecho lo mismo con todas las hormigas de la colonia.

Los pasos anteriores se deben repetir si es que aún no se alcanza el criterio de término, que puede ser un número de veces que se realizan estos pasos y cada vez que se terminen, se debe actualizar la solución general aplicando una búsqueda local de inserción a cada solución generada en los pasos anteriores y se actualiza el valor del rastro de feromona global (de la solución general).

Este algoritmo da muy buenos resultados muy cercanos a los óptimos globales, como se había mencionado el sistema de colonia de hormigas en un VRP presentaba soluciones entre un 0-10% de discrepancia respecto a las soluciones óptimas globales, para este caso que se trataba de un VRP con ventanas de tiempo multi-objetivo, presentaba soluciones entre un 0-10% de discrepancia respecto a los óptimos globales, pero la mayoría de los resultados tenía una diferencia entre 0-7%. Convergía a buenas soluciones en aproximadamente 1000 iteraciones, para una instancia de 50 clientes y utilizando 6 vehículos. Cabe destacar que en ninguna instancia utilizada se llegó al óptimo global.

En el año 2016 [2] Germán Paredes-Belmar, Andrés Bronfman, Vladimir Marianov, Guillermo Latorre-Núñez, propusieron una solución para este problema, en donde los camiones podían llevar distintos materiales siempre y cuando

estos fueran compatibles entre sí, es decir, no había peligro alguno si se llevaban combinaciones de éstos en un mismo vehículo. Para resolver el problema lo que hacían era modelar el problema en un grafo, donde los nodos representan los clientes que buscan que su material sea recogido y transportado sumado al nodo depósito (punto de partida de los vehículos) y los arcos representan las rutas entre los nodos. Si un vehículo transportaba más de un material peligroso, consideraban solo el que tuviera mayor riesgo sobre la población.

El método que consideran es asumir un grafo auxiliar en donde todos los nodos estuvieran conectados entre sí, incluyendo al nodo depósito y consideran que cada arco tiene distintos pesos asociados a los distintos materiales, es decir, dependiendo del material que transporte el vehículo, se asocia el peso del arco, por lo tanto existen tantos grafos como tipos de materiales para el problema. Como consideran que minimizan la población en riesgo y el costo, el peso de los arcos ya no solo sería el que tan expuesta esta la población sino que se le agrega el costo, que correspondería al costo de viajar de un nodo  $i$  (un cliente cualquiera) a un nodo  $j$  (cliente cualquiera) utilizando ese arco. De la forma en que en este artículo relacionan ambos parámetros es la siguiente:

$$Z = \alpha \cdot EP + (1 - \alpha) \cdot C$$

Donde EP, corresponde a la población expuesta y C al costo,  $\alpha \in [0,1]$  y corresponde al peso que se le asigna a la población expuesta, es decir, si se considera más o menos su valor frente al costo.

Por lo tanto para cada arco se obtiene un peso que relaciona la población expuesta y el costo de viajar de un cliente a otro, o del nodo depósito a un cliente (es importante destacar que en este caso no hay población en riesgo, porque no hay material cargado en el vehículo) o de un cliente al nodo depósito. Hecho lo anterior se resuelve el problema minimizando el valor de Z y cumpliendo restricciones, entre las que se destacan:

- No sobrepasar la capacidad de cada vehículo.
- Cada cliente es atendido por un solo vehículo.
- Evitar materiales incompatibles en el mismo vehículo.
- Evitar hacer ciclos entre los viajes del vehículo.

La métrica que utilizan para decidir que arco agregar a la ruta de cada vehículo es añadir el arco que menos contribuya al valor de Z, ya que se quiere minimizar, una vez resuelta la ruta para un vehículo, se actualizan los viajes ya que en la ruta se pudo haber agregado un arco que no existiera en el grafo original y dicho arco se actualiza con los arcos disponibles del grafo original.

### III. TÉCNICA PROPUESTA

Antes de detallar la resolución del problema, se definirán algunos parámetros y variables:

$K$ : Conjunto de vehículos.

$N$ : Conjunto de clientes incluyendo el nodo depósito.

$N_c$ : Conjunto de clientes sin el nodo depósito.

$M$ : Conjunto con los tipos de materiales peligrosos.

$MC$ : Conjunto de cantidad de materiales peligrosos, donde el  $i$ -ésimo elemento corresponde a la cantidad que generó el cliente  $n_i \in N$ .

$T$ : Conjunto del par: (nodo cliente, tipo de material peligroso), donde el nodo cliente genera un tipo de material.

$A$ : Conjunto de arcos (rutas entre los nodos).

$COM$ : Conjunto de pares de materiales peligrosos del tipo  $(m,r)$  que son compatibles entre sí, es decir, un vehículo puede transportar en la misma carga dichos materiales.

$D_0$ : Lista de distancia desde el nodo depósito hacia los clientes.

$D_m$ : Matriz de distancia entre los distintos nodos (clientes), si el vehículo transporta el material  $m \in M$ .

$R_m$ : Matriz de riesgo entre los distintos nodos (clientes), si el vehículo transporta el material  $m \in M$ .

$Q$ : Capacidad del vehículo.

Para la resolución de este problema se se utilizará el algoritmo Greedy, el cual se caracteriza por ser una estrategia de búsqueda local en donde en cada paso escoge la opción de óptimo local, es decir, busca el beneficio del momento, sin importar lo que ocurrió o lo que puede ocurrir. Los componentes necesarios de Greedy para la resolución de este problema son:

- Representación de la solución: Matriz  $W$  de 4 dimensiones, que almacena el vehículo utilizado, material que carga, y los arcos utilizados, es decir:

$$w_{ij}^{km} = \begin{cases} 1, & \text{Si el vehículo } k \in K \text{ transporta el} \\ & \text{material } m \in M \text{ entre los nodos } i, j \in N \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

- Función Miope: Para cada vehículo escoger el nodo que menos contribuye a la función evaluación y que los materiales que carga sean compatibles entre si.
- Punto de partida: Todos los vehículos parten del nodo depósito.
- Función de evaluación: Minimizar la relación entre costo y población expuesta mediante la siguiente expresión.

$$\text{Min } Z = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \sum_{i,j \in A} a_{ij}^{mk} \cdot w_{ij}^{mk} \quad (1)$$

Donde  $a_{ij}^{mk} = \alpha \cdot EP_{ij}^m + (1 - \alpha) \cdot c_{ij}$

Con:

$EP_{ij}^m$ : Cantidad de población en riesgo expuesta al material  $m$  entre los nodos  $i, j$ .

$c_{ij}$ : Costo de transporte desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ .

$\alpha \in [0, 1]$

Además de la variable  $w_{ij}^{km}$ , se definen dos variables más las cuales son:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{Si el vehículo } k \in K \text{ viaja desde el nodo} \\ & i \text{ al nodo } j; i, j \in N \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$y_i^k = \begin{cases} 1, & \text{Si el vehículo } k \in K \text{ carga el producto del} \\ & \text{cliente } i \in N_c \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$C_i^k$  = Cantidad de material peligroso que lleva el vehículo  $k \in K$  antes de visitar al nodo  $i \in N$ . Si se está en el nodo depósito,  $C_i^k = 0$ .

### Restricciones del problema:

**Restricción 1:** No se puede superar la capacidad de carga de los vehículos.

$$\sum_{i \in N_c} y_i^k \cdot MC_i \leq Q \quad \forall k \in K \quad (2)$$

**Restricción 2:** Cada cliente que generó un material debe ser atendido por solo un vehículo, es decir, toda la carga se la lleva un solo vehículo.

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

**Restricción 3:** El vehículo puede ser o no ser utilizado.

$$\sum_{j \in N_c} x_{0j}^k \leq 1 \quad \forall k \in K, 0 \text{ representa el nodo depósito.} \quad (4)$$

**Restricción 4:** Todos los vehículos que entren a un nodo cliente, deben salir de éste.

$$\sum_{i \in N_c} x_{ij}^k = \sum_{h \in N_c} x_{jh}^k \quad \forall k \in K, \forall j \in N_c \quad (5)$$

**Restricción 5:** Un vehículo con carga de un material tipo  $r$ , no puede salir del nodo  $i$  (nodo actual) con un riesgo menor a  $r$ .

$$\sum_{j \in N} w_{ij}^{km} \leq 1 - y_i^k \quad \forall k \in K, \forall i \in N_c, m, r \in M, (i,r) \in T \quad (6)$$

**Restricción 6:** Se evita la combinación de materiales incompatibles en el mismo vehículo.

$$y_i^k + y_j^k \leq 1 \quad \forall k \in K, \forall i \in N_c, (i,m), (j,r) \in T, (m,r) \in COM \quad (7)$$

**Restricción 7:** Se registra el volumen de materiales después de que el vehículo haya pasado y recolectado los materiales de un nodo cliente y además se evita que el vehículo quede atrapado en un sub-tour (ciclos del grafo).

$$C_j^k \geq C_i^k + MC_i - Q \cdot (1 - x_{ij}^k) \quad \forall k \in K, i \in N, j \in N_c \quad (8)$$

**Naturaleza de las variables:**

$$x_{ij}^k, y_i^k, w_{ij}^{km} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, i, j \in N, m \in M \quad (9)$$

Ya teniendo definido los parámetros, variables, restricciones y componentes para el algoritmo Greedy, se detallará el cómo se utiliza el algoritmo en el siguiente pseudo-código:

---

**Algorithm 1** Algoritmo Greedy

---

```

1: while (Clientes con carga) do
2:   for ( $k \in K$ ) do
3:      $\min \leftarrow \min(A)$ 
4:      $i, j \leftarrow \min$ 
5:     if (cliente  $j$  no descargado) then
6:       if (COMP(Materiales  $k$ , material  $j$ )) then
7:         Visitar y descargar cliente  $j$ .
8:         Actualizar función objetivo
9:       end if
10:    end if
11:  end for
12: end while=0

```

---

El algoritmo anterior lo que realiza es que por cada vehículo recorre todos los nodos (clientes) posibles, siempre verificando las restricciones y sobre todo si es que el material a cargar es compatible con los materiales que ha cargado el vehículo, en caso de que cumpla las restricciones, es posible cargar dicho material en el vehículo hasta que regresa al nodo depósito y se realiza lo mismo con el siguiente vehículo.

#### IV. ESCENARIO EXPERIMENTAL

La ejecución del algoritmo fue realizada en un computador con un procesador AMD Ryzen 52500U (8 CPUs) 2 GHZ, Memoria Ram 16 GB y Sistema Operativo Windows 10, el algoritmo fue programado en C++. Lo primero que se realizó es leer el archivo para obtener los datos necesarios para la resolución del problema. Se utilizan estructuras para los nodos y los vehículos, por cada nodo (cliente), se almacenaban los datos de su id, tipo de material que producen y la carga que producen del material. Para el vehículo en su estructura se almacena la capacidad actual, el nodo actual en que se encuentra y la ruta que ha hecho. En matrices se va almacenando la distancia entre todos los nodos y el riesgo de transitar entre todos los nodos para cada material. Se define la matriz  $W$ , que es la representación de la solución del problema, la cual se va construyendo utilizando el algoritmo Greedy con la técnica descrita en Algorithm 1.

Las instancias que se utilizaron para obtener resultados del algoritmo implementado son las mismas que se utilizaron en el artículo "Hazardous materials collection with multiple-product loading" [2]. Todas las instancias tienen 5 tipos de materiales, distinta cantidad de vehículos pero todos con la misma capacidad. Las características de estos son las siguientes:

TABLE I  
DATOS DE CANTIDAD DE MATERIALES POR TIPO EN CADA ZONA.

| Instancias | # $MC_A$ | # $MC_B$ | # $MC_C$ | # $MC_D$ | # $MC_E$ |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Zona 1     | 7.640    | 6.680    | 3.040    | 4.260    | 5.720    |
| Zona 2     | 5.440    | 10.890   | 14.420   | 20.540   | 11.740   |
| Zona 3     | 8.040    | 2.170    | 4.170    | 4.120    | 1.970    |
| Zona 4     | 12.440   | 1.840    | 3.560    | 5.940    | 3.390    |
| Zona 5     | 1.560    | 4.370    | 1.820    | 2.760    | 2.810    |
| Zona 6     | 5.600    | 3.270    | 6.060    | 2.310    | 3.770    |
| Zona 7     | 3.840    | 2.490    | 2.170    | 4.980    | 2.230    |

TABLE II  
DATOS DE CANTIDAD DE CLIENTES Y VEHÍCULOS DISPONIBLES.

| Instancias | # clientes <sup>a</sup> | # vehículos disponibles |
|------------|-------------------------|-------------------------|
| Zona 1     | 32                      | 3                       |
| Zona 2     | 36                      | 3                       |
| Zona 3     | 15                      | 3                       |
| Zona 4     | 30                      | 5                       |
| Zona 5     | 21                      | 2                       |
| Zona 6     | 22                      | 5                       |
| Zona 7     | 11                      | 4                       |

<sup>a</sup>No se considera el nodo depósito.

TABLE III  
MATRIZ COM: COMPATIBILIDAD ENTRE LOS MATERIALES Y TIPO DOMINANTE.

| Tipo | A | B | C | D | E |
|------|---|---|---|---|---|
| A    | A | - | C | D | - |
| B    | - | B | C | D | E |
| C    | C | C | C | - | E |
| D    | D | D | - | D | E |
| E    | - | E | E | E | E |

Las tablas I y II muestran las características de cada instancia, donde cada zona representa una instancia, es decir, un archivo distinto. Las características a destacar son la cantidad de material peligroso de cada tipo, cantidad de clientes y vehículos disponibles de cada instancia, notar que todos los vehículos tienen la misma capacidad que es de 40.000. La instancia también considera las distancias desde el nodo depósito hacia todos los otros nodos (clientes) y matrices de distancia entre los nodos y riesgos entre estos mismos, dependiendo del material que se transporta. Cabe destacar que por cada tipo de material existe una matriz de distancia, ya que el vehículo debe tomar rutas distintas dependiendo del material cargado.

La tabla III muestra la compatibilidad entre los tipos de materiales, es decir, cada tipo de material puede ser o no compatible respecto a los otros. En el caso de que un vehículo cargue más de un tipo de material que sean compatibles entre sí, se considera un solo riesgo para efectos de la resolución.

## V. RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

TABLE IV  
RESULTADOS ZONA 1

| Valor de<br>$\alpha$ | Zona 1    |              |              |
|----------------------|-----------|--------------|--------------|
|                      | <i>EP</i> | <i>Costo</i> | <i>Total</i> |
| 0                    | 720758    | 251070       | 251070       |
| 0.1                  | 774124    | 230909       | 285230       |
| 0.2                  | 779856    | 265883       | 368678       |
| 0.3                  | 743176    | 244543       | 394133       |
| 0.4                  | 743176    | 244543       | 443996       |
| 0.5                  | 714655    | 243756       | 479206       |
| 0.6                  | 669255    | 246992       | 500350       |
| 0.7                  | 669255    | 246992       | 542576       |
| 0.8                  | 649695    | 269899       | 573736       |
| 0.9                  | 692518    | 270909       | 650357       |
| 1                    | 693136    | 296740       | 693136       |

TABLE V  
RESULTADOS ZONA 2

| Valor de<br>$\alpha$ | Zona 2            |              |                   |
|----------------------|-------------------|--------------|-------------------|
|                      | <i>EP</i>         | <i>Costo</i> | <i>Total</i>      |
| 0                    | $1,32 \cdot 10^6$ | 180709       | 180709            |
| 0.1                  | $1,38 \cdot 10^6$ | 148268       | 271499            |
| 0.2                  | $1,37 \cdot 10^6$ | 155890       | 399744            |
| 0.3                  | $1,2 \cdot 10^6$  | 177531       | 508436            |
| 0.4                  | $1,28 \cdot 10^6$ | 177531       | 618737            |
| 0.5                  | $1,27 \cdot 10^6$ | 177358       | 727356            |
| 0.6                  | $1,27 \cdot 10^6$ | 177358       | 837356            |
| 0.7                  | $1,27 \cdot 10^6$ | 181362       | 943700            |
| 0.8                  | $1,27 \cdot 10^6$ | 181362       | $1 \cdot 10^6$    |
| 0.9                  | $1,28 \cdot 10^6$ | 181267       | $1,1 \cdot 10^6$  |
| 1                    | $1,28 \cdot 10^6$ | 181267       | $1,28 \cdot 10^6$ |

TABLE VI  
RESULTADOS ZONA 3

| Valor de<br>$\alpha$ | Zona 3    |              |              |
|----------------------|-----------|--------------|--------------|
|                      | <i>EP</i> | <i>Costo</i> | <i>Total</i> |
| 0                    | 529093    | 101398       | 101398       |
| 0.1                  | 541412    | 103814       | 147574       |
| 0.2                  | 541412    | 103814       | 191334       |
| 0.3                  | 610098    | 108108       | 258705       |
| 0.4                  | 610098    | 108108       | 308904       |
| 0.5                  | 610098    | 108108       | 359103       |
| 0.6                  | 540566    | 102644       | 365397       |
| 0.7                  | 540566    | 102644       | 409189       |
| 0.8                  | 540566    | 102644       | 452982       |
| 0.9                  | 540566    | 102644       | 496774       |
| 1                    | 540566    | 102644       | 540566       |

TABLE VII  
RESULTADOS ZONA 4

| Valor de<br>$\alpha$ | Zona 4           |              |                |
|----------------------|------------------|--------------|----------------|
|                      | <i>EP</i>        | <i>Costo</i> | <i>Total</i>   |
| 0                    | $1,3 \cdot 10^6$ | 116003       | 116003         |
| 0.1                  | $1,2 \cdot 10^6$ | 116988       | 232407         |
| 0.2                  | $1,2 \cdot 10^6$ | 116988       | 347826         |
| 0.3                  | $1,2 \cdot 10^6$ | 116988       | 463244         |
| 0.4                  | $1,2 \cdot 10^6$ | 116988       | 578663         |
| 0.5                  | $1,2 \cdot 10^6$ | 116988       | 694082         |
| 0.6                  | $1,2 \cdot 10^6$ | 116988       | 809501         |
| 0.7                  | $1 \cdot 10^6$   | 121867       | 755369         |
| 0.8                  | $1 \cdot 10^6$   | 121867       | 845869         |
| 0.9                  | $1 \cdot 10^6$   | 121867       | 936370         |
| 1                    | $1 \cdot 10^6$   | 121867       | $1 \cdot 10^6$ |

TABLE VIII  
RESULTADOS ZONA 5

| Valor de<br>$\alpha$ | Zona 5    |              |              |
|----------------------|-----------|--------------|--------------|
|                      | <i>EP</i> | <i>Costo</i> | <i>Total</i> |
| 0                    | 743405    | 95376        | 95376        |
| 0.1                  | 744408    | 96714        | 161483       |
| 0.2                  | 744408    | 96714        | 226253       |
| 0.3                  | 744408    | 96714        | 291022       |
| 0.4                  | 744408    | 96714        | 355792       |
| 0.5                  | 744408    | 96714        | 420561       |
| 0.6                  | 744408    | 96714        | 485330       |
| 0.7                  | 744408    | 96714        | 550100       |
| 0.8                  | 744408    | 96714        | 614869       |
| 0.9                  | 744408    | 96714        | 679639       |
| 1                    | 744408    | 96714        | 744408       |

TABLE IX  
RESULTADOS ZONA 6

| Valor de<br>$\alpha$ | Zona 6    |              |              |
|----------------------|-----------|--------------|--------------|
|                      | <i>EP</i> | <i>Costo</i> | <i>Total</i> |
| 0                    | 572766    | 100148       | 100148       |
| 0.1                  | 572766    | 100148       | 147410       |
| 0.2                  | 572766    | 100148       | 194672       |
| 0.3                  | 572766    | 100148       | 241933       |
| 0.4                  | 572766    | 100148       | 289195       |
| 0.5                  | 572766    | 100148       | 336457       |
| 0.6                  | 572766    | 100148       | 383719       |
| 0.7                  | 572766    | 100148       | 430981       |
| 0.8                  | 570503    | 100878       | 476578       |
| 0.9                  | 577863    | 103864       | 530463       |
| 1                    | 577863    | 103864       | 577863       |

TABLE X  
RESULTADOS ZONA 7

| Valor de $\alpha$ | Zona 7    |              |              |
|-------------------|-----------|--------------|--------------|
|                   | <i>EP</i> | <i>Costo</i> | <i>Total</i> |
| 0                 | 367366    | 114720       | 114720       |
| 0.1               | 367366    | 114720       | 139985       |
| 0.2               | 367366    | 114720       | 165249       |
| 0.3               | 367366    | 114720       | 190514       |
| 0.4               | 367366    | 114720       | 215778       |
| 0.5               | 367366    | 114720       | 241043       |
| 0.6               | 367366    | 114720       | 266308       |
| 0.7               | 367366    | 114720       | 291572       |
| 0.8               | 367366    | 114720       | 316837       |
| 0.9               | 367366    | 114720       | 342101       |
| 1                 | 367366    | 114720       | 367366       |

Las tablas IV a X, representan los resultados obtenidos a partir de la ejecución del algoritmo Greedy implementado en este problema. Por cada tabla que representa una zona distinta, se muestran los valores de población expuesta, costo de viaje y el total, en donde solo en la columna del total se realiza la ecuación que considera alfa (1).

## VI. CONCLUSIONES

La propuesta del algoritmo que se refleja en los resultados resultó ser positiva, si se comparan los resultados con los obtenidos en el artículo [2], las diferencias no son muy grandes, si bien en todas las variaciones de  $\alpha$  en las distintas zonas, el artículo citado obtuvo mejores resultados, hay que tener en cuenta que el algoritmo utilizado en este ocasión construye la solución buscando el beneficio en el momento, por lo que estas decisiones pueden acotar una decisión en el futuro, teniendo valores muy altos para la función objetivo y perjudicarla. En cuanto a tiempo de ejecución, no fue considerado, ya que en la totalidad de ejecuciones demoraba mucho menos de un segundo, casi instantáneo. Este problema puede ser abordado por otro algoritmo y es muy probable que los resultados sean mejores a los obtenidos y además es posible cambiar el modelo del problema, en específico la función objetivo, tal como lo realizan en [1], donde además de tener un parámetro más en la función objetivo, buscan distintas formas de relacionarlas y buscar la más óptima.

## REFERENCES

- [1] Rojee Pradhananga, Eiichi Taniguchia, Tadashi Yamada, "Ant colony system based routing and scheduling for hazardous material transportation". Department of Urban Management, Kyoto University, Katsura campus C-1, Kyoto 615-8540, Japan, pp. 1-8, 2010.
- [2] Germán Paredes-Belmar, Andrés Bronfman, Vladimir Marianov, Guillermo Latorre-Núñez, "Hazardous materials collection with multiple-product loading", Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Andres Bello, Chile, pp 1-7, 2016.
- [3] K. David Pijawka, Steve Foote, and Andy Soesilo, "Improving Transportation of Hazardous Materials Through Risk Assessment and Routing", WASHINGTON, D. C., EE.UU, pp 1-10, 1985.
- [4] Gary L. Urbanek and Edward J. Barber, "Development of criteria to designate routes for transporting hazardous materials", Washington, D.C., EE UU, pp 1-3, 1980.
- [5] Richard F. Hartl, Christine Strauss, "Applying the ANT System to the Vehicle Routing Problem", University of Vienna, France, pp 1-3 1997.
- [6] Erhan Erkut, Armann Ingolfsson "Transport Risk Models for Hazardous Materials: Revisited", University of Alberta, pp 1-3, 2003.

- [7] M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.