matemática: Una publicación del ICM – ESPOL
2008, Vol. 6, No. 1

El Problema de la Recolección de Desechos Hospitalarios en la Ciudad de Guayaquil: Modelación y Resolución por medio de una Heurística Basada en la Búsqueda Tabú

Delgado Erwin[1], Sandoya Fernando[2]

Resumen. En el presente trabajo se desarrolla una heurística basada en la búsqueda tabú, para resolver el problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo, aplicado a la recolección de desechos hospitalarios en la ciudad de Guayaquil. Para efecto de determinar la eficiencia del algoritmo propuesto, se lo ha aplicado en la resolución de algunas instancias planteadas por Solomón, obteniendo resultados aceptables, en comparación con otras heurísticas desarrolladas. Uno de los aspectos considerado en la aplicación del algoritmo, son las condiciones geográficas de la ciudad; por ello, para la determinación de las distancias entre clientes y entre clientes y depósito, se utiliza la métrica de Manhattan. Además, se ha considerado la velocidad de los vehículos constante en todo el recorrido. Adicionalmente, debido a la variabilidad en el desplazamiento de los vehículos, se realiza una simulación de la solución planteada, modelando la velocidad de los vehículos por medio de una distribución de probabilidad PERT con parámetros propios en cada tramo de las rutas, con el fin de determinar el nivel de servicio ofrecido por la empresa hacia sus clientes.

Palabras Claves: Problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempos, Metaheurísticas, Búsqueda tabú.

1. INTRODUCCIÓN

El VRPTW (Vehicle Routing Problem Time Windows), puede ser formulado de la siguiente manera: sea $G = (V; E)$ un grafo no dirigido donde $V = \{v_0, v_1, v_2, ..., v_n\}$ es un conjunto de vértices, en el que $v_1, v_2, ..., v_n$ representan a los clientes y v_0 al depósito; y $E = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V, i \neq j\}$ es un conjunto de arcos, los cuales representan las interconexiones posibles entre clientes; y entre clientes y depósito. A cada par ordenado $(v_i, v_j) \in E$ se asocia un costo c_{ij} y un tiempo de viaje t_{ij}. Por lo general estos costos y tiempos son simétricos es decir, $c_{ij} = c_{ji}$ y $t_{ij} = t_{ji}$. Cada cliente $v_i \in V \backslash v_0$ tiene una demanda no negativa d_i, un tiempo de servicio s_i y un intervalo de tiempo $[e_i, l_i]$ en el que se debe satisfacer su demanda. Una flota de M vehículos idénticos de capacidad máxima Q se encuentra disponible en el depósito. El número de vehículos es conocido de antemano o considerado como una variable de decisión. Asimismo, sea r la máxima longitud que un vehículo puede recorrer.

El VRPTW consiste en la construcción de un conjunto de a lo sumo, M rutas que satisfagan cada una de las siguientes restricciones:

- Cada ruta comienza y termina en el depósito.
- Cada cliente es visitado una y sólo una vez por un sólo vehículo.
- La demanda de cada cliente es satisfecha en cada visita vehicular.
- Los clientes son atendidos dentro de las ventanas de tiempos previamente establecidos.
- La demanda acumulada en cada ruta no excede la capacidad Q de cada vehículo.
- La longitud total recorrida por cada vehículo, no excede el valor límite r.
- El costo total de las rutas es mínimo.

Debido a la naturaleza del VRPTW, este es un problema NP-duro, por lo que su resolución de manera exacta sólo puede obtenerse para instancias pequeñas. Por ello, y debido a que la planificación de las rutas es una decisión operativa y se requiere solucionarlo en un tiempo prudencial, se han desarrollado diversas heurísticas basadas en métodos genéricos, que proveen buenas soluciones pero a un costo computacional razonable. Uno de estos métodos genéricos es el denominado Búsqueda Tabú (TS por sus siglas en inglés), el cual es un procedimiento meta heurístico que se utiliza para guiar un algoritmo heurístico de búsqueda local, explorando el conjunto de soluciones factibles más allá de una optimalidad local. A continuación se detalla cada una de las componentes del algoritmo propuesto para la resolución del VRPTW, el mismo que está basado en la filosofía de la búsqueda tabú e implementada en la plataforma de cálculo simbólico Mathematica 5.1*.

[1] *Delgado Erwin, Master, Profesor de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL); (e_mail: edelgado@espol.edu.ec).*
[2] *Sandoya Fernando, M.Sc, Profesor de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL); (e_mail: fsandoya@espol.edu.ec).*

* *MATHEMATICA es una marca registrada de Wolfram Research.*

2. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

Como se explicó anteriormente, el problema de la recolección de desechos hospitalarios se puede modelar por medio de un VRPTW, por lo que para su resolución se ha elegido implementar un algoritmo basado en la búsqueda tabú.

A continuación se detalla cada una de las componentes del algoritmo propuesto.

Solución inicial

En la determinación de la solución inicial, se ha considerado la versión generalizada del algoritmo basado en ahorros de Clark &Wright [1] en la que se penalizan las uniones de rutas que pueden producir rutas circulares. La penalización antes mencionada es función del parámetro λ, el mismo que depende de la naturaleza de la instancia. A continuación se procede a detallar este algoritmo.

Paso 1: Construcción de rutas y cálculos de los ahorros. Crear N rutas de la forma $(0,i,0)$ para $i=1,2,...,N$. Calcule los ahorros $s_{ij}=c_{i0}+c_{0j}-\lambda c_{ij}$ para toda $i,j=1,2,...,N$ siendo $i\neq j$ e insértelo en la lista AH. Ordene AH.

Paso 2: Mejor solución al unir.

Sea $s_{ij}=Max[AH]$. Dadas las rutas R_i y R_j en las cuales se produce el máximo ahorro, determine si las siguientes situaciones ocurren: una ruta que empiece con el arco $(0,j)$, la otra ruta que termine con el arco $(i,0)$, y que sea factible realizar su unión. Si esto ocurre, combine estas rutas eliminado los arcos $(i,0)$ y $(0,j)$, inserte el arco (i,j) y elimine el valor s_{ij} de AH. Ir al paso 3

Paso 3: Si $AH\neq\phi$, ir al Paso 2, sino parar.

Estructura del vecindario

Dada una solución inicial del VRPTW, se procede a la definición de la estructura del vecindario en el que se realizará la búsqueda local.

Sea $X=\{R_1,R_2,....,R_p,...,R_q,....,R_k\}$ la solución actual en la cual R_p es un conjunto de clientes atendidos por el vehículo $p\in M$. Sea β un parámetro positivo definido de antemano. Se define la operación β-intercambio al movimiento (β_1,β_2) realizado al intercambiar β_1 clientes de la ruta R_p hacia la ruta R_q y β_2 clientes de la ruta R_q hacia la ruta R_p, siendo $\beta_1\leq\beta$ y $\beta_2\leq\beta$ La implementación de este movimiento fue desarrollada inicialmente por Osman [2].

El vecindario que se ha definido en el presente trabajo está conformado por todas las soluciones factibles que se pueden obtener a partir del intercambio de máximo 2 clientes entre dos rutas $\beta=2$ que pertenecen a una solución dada.

Evaluación del ahorro en la aplicación de un movimiento.

Un aspecto fundamental en la búsqueda local, es el establecimiento de una estrategia de evaluación de los elementos que pertenecen al vecindario de la solución actual, que permita escoger el mejor $X'\in N(X)$.

Sean $X=\{R_1,R_2,....,R_p,...,R_q,....,R_k\}$ la solución actual, R_p y R_q dos conjuntos disjuntos de clientes que son visitados por los vehículos p y q respectivamente, $x_p\subseteq R_p$ y $x_q\subseteq R_q$ dos conjuntos de clientes de cardinalidad β_1 y β_2 respectivamente, los mismos que serán intercambiados de rutas e insertados en un orden de visita definido por una variable aleatoria uniforme. Sean $C(X)$ el costo de la solución actual y $C(X')$ el costo de una solución factible tal que $X'\in N(X)$. El ahorro al realizar el movimiento (β_1,β_2) entre las rutas R_p y R_q viene dado por la expresión:

$$\Delta(\beta_1,\beta_2)=C(X)-C(X') \quad (1)$$

Sin embargo, debido a las ventanas de tiempo de cada cliente y partiendo del supuesto de que un aumento de los tiempos de espera de los vehículos puede causar infactibilidad en una nueva búsqueda local, se penaliza a la función definida en (1) con un valor proporcional al aumento en los tiempos de espera de los vehículos. Así, sean $T(X)$ y $T(X')$, los tiempos totales de espera de los vehículos en la solución $X,X'\in N(X)$ respectivamente, se procede a la penalización de la función de ahorro indicada en (1) con un valor proporcional a la diferencia de los tiempos totales de espera, por lo que la nueva función de ahorros queda:

$$\Delta(\beta_1,\beta_2)=C(X)-C(X')-\eta\left(T(X)-T(X')\right) \quad (2)$$

Siendo η un parámetro que depende de la instancia a analizar. Considerando la función de ahorros definida en (2), la mejor solución $X'\in N(X)$ será aquella que produzca un ahorro positivo. En el proceso de escogimiento de

la mejor solución factible $X' \in N(X)$ existen dos formas de determinarla. La primera es considerando todo el conjunto de soluciones factibles y seleccionando la que produzca el mayor ahorro.

Una de las principales desventajas de esta estrategia es que computacionalmente es costoso por cuanto, en cada iteración analiza todo el vecindario $N(X)$ La otra forma consiste en el escogimiento de la primera solución factible $X' \in N(X)$ que produzca un ahorro positivo. En el presente trabajo se procede a la aplicación de esta última estrategia.

Sin embargo, en el proceso de búsqueda local, se puede dar la posibilidad de que ninguna solución factible $X' \in N(X)$ produzca un ahorro positivo, por lo que en ese caso se escoge aquella que produzca el mayor ahorro (el mismo que obviamente será negativo) en todo el proceso de búsqueda.

Lista tabú y criterio de aspiración

Debido a que en la selección de la mejor solución obtenida en la búsqueda profunda se puede dar la posibilidad de que la misma desmejore la función objetivo, se hace preciso establecer un mecanismo que evite ciclar la búsqueda. Por ello se utiliza un esquema de memoria basada en hechos recientes, que se denomina Lista Tabú. Esta lista guarda los últimos movimientos realizados en el proceso de la búsqueda local durante un número L limitado de iteraciones, de tal manera que en el nuevo proceso de búsqueda los movimientos que pertenecen a esta lista están prohibidos de ser realizados y por consiguiente, disminuirá la cardinalidad del vecindario de la solución actual.

En el presente trabajo, se ha establecido como estructura de un elemento de la lista tabú, a un vector de la forma (x_p, x_q), siendo x_p y x_q dos conjuntos de clientes a ser intercambiados de ruta. Asimismo, basado en pruebas computacionales, la longitud L de la lista tabú se la ha considerado fija con un valor de $L = 7$.

Sin embargo, el estado tabú de un movimiento puede ser cambiado si éste produce una solución con el menor costo de la función objetivo en comparación con todos los valores obtenidos previamente.

Fase de Intensificación y Diversificación

El proceso de intensificación comienza explorando el vecindario $N(X)$ de la solución inicial X obtenida a partir del algoritmo de Clark & Wrigth. Como se explicó anteriormente, se ha establecido escoger la primera solución $X' \in N(X)$ que produzca un ahorro positivo, o aquella que produzca el mayor ahorro negativo sólo en el caso de que no se haya encontrado ahorros positivos. Posteriormente, se actualiza la solución actual, se almacena la solución en una lista de candidatos, $List_{cand}$ y se reinicia el proceso de búsqueda local considerando ahora, el vecindario $N(X')$.

Este proceso de intensificación termina cuando se ha llegado a un máximo número de iteraciones, $Int_{\max}$ sin encontrar ahorros positivos.

Cuando el proceso de intensificación termina, se procede al escogimiento de una solución factible de la lista de candidatos, $List_{cand}$ con el menor tiempo total de espera de los vehículos, iniciando así un nuevo proceso de intensificación. Estos nuevos procesos de intensificación terminan cuando el número de intensificaciones ha llegado al valor de $Div_{\max}$.

Debido a que en el proceso de intensificación se escogen soluciones encontradas en el proceso de búsqueda local, y también para permitir la exploración de otras regiones que son imposibles de considerar, se penaliza a la función de ahorros definida en (2) con un valor proporcional a la frecuencia relativa de un movimiento. Para la determinación de ésta frecuencia se hace preciso almacenar todos los movimientos generados en el proceso de búsqueda local, utilizando para ello una memoria basada en la frecuencia, cuya estructura es la de un vector de la forma $(x_p, x_q, freq)$ donde x_p y x_q son dos conjuntos de clientes a ser intercambiados y $freq$ es la frecuencia relativa de este movimiento medido como la razón de la frecuencia de ocurrencia del movimiento y el máximo número de ocurrencia de un movimiento cualquiera. Así, la función de ahorros generalizada a considerar en este estudio, es de la forma:

$$\Delta(\beta_1, \beta_2) = C(X) - C(X') - \eta\left(T(X) - T(X')\right) - \kappa\, freq$$

Siendo κ un parámetro que depende de la instancia a analizar.

A continuación se procede a detallar el algoritmo propuesto para la resolución del VRPTW fundamentado en la búsqueda tabú:

Paso 1: Determinación de una solución inicial.

Construir una solución inicial X_0.

Hacer $X = X_0$; $\cos t \min = C(X)$

Inicializar Int=1, Div=1.

Paso 2: Intensificación y Diversificación.

Seleccione una solución factible $X' \in N(X)$ que se obtiene al aplicar el movimiento (β_1, β_2) a la solución actual.

Paso 3: Evaluación del ahorro.

Si $\Delta(\beta_1, \beta_2) > 0$ o $C(X') < \cos t \min$,
entonces aplique a X' una post optimización utilizando el algoritmo 2-*Opt*;
hacer $X = X'$, $\cos t \min = C(X')$, Int=1;
$List_{cand} = List_{cand} \cup X'$; ir al Paso 2.
Si no, ir al Paso 4.
Paso 4: Exploración del vecindario.
Si $N(X)$ fue completamente explorado, escoger $X'' \in N(X)$ tal que $\Delta(X'') > \Delta(X')$; $\forall X' \in N(X)$; aplique a X'' una post optimización utilizando el algoritmo 2-*Opt*;
Hacer $X = X''$. $Int = Int + 1$. Si $Int > Int_{\max}$, ir al Paso 5, si no ir al paso 2.
Paso 5: Escogimiento de nueva solución inicial.
$Div = Div + 1$. Si $Div \leq Div_{\max}$; hacer $X = X'''$; $X''' \in List_{cand}$ tal que $\sum_{v_i \in V \setminus v_0} Max[e_i - t_i, 0]$ sea mínimo; ir al Paso 2.
Si no ir al Paso 6.
Paso 6: Post-Optimización.
Aplique a la solución final una post optimización utilizando el algoritmo 2-*Opt* [4].

Resultados computacionales

Para comprobar la efectividad del algoritmo desarrollado en el presente trabajo, se lo empleó en la resolución de algunas instancias planteadas por M. Solomon en 1983, las mismas que conforman un banco de 56 ejemplos, de 100 clientes cada uno, divididos en 3 grupos con distinta distribución y ubicación geográfica de los clientes en un cuadrado de 100X100. Así, este conjunto de instancias se pueden dividir en: uniformemente distribuidos (R), Agrupados (C) o una combinación de ambos (RC). Asimismo, cada uno de estos grupos se subdividen en instancias con baja capacidad vehicular (tipo 1) y alta capacidad vehicular (tipo 2). Por lo tanto, se puede considerar una clasificación general de las instancias propuestas por Solomon como R1, R2, C1, C2, RC1, RC2 dependiendo de las características antes mencionadas. Asimismo, es importante indicar, que los elementos que pertenecen a cada grupo varían en la distribución de las ventanas de tiempo y la demanda.

El algoritmo propuesto se ha implementado en Mathemática 5.1 en una Laptop HP Intel Pentium M, 1.50Ghz, 512MB de RAM. En la tabla 1 se presentan las mejores soluciones encontradas hasta el momento de una instancia que pertenece a cada grupo, junto a las obtenidas al aplicar el algoritmo propuesto. En esta tabla C_t representa el mínimo valor de la función objetivo. Esta función objetivo indica la distancia total recorrida por los vehículos, considerando N_r rutas para satisfacer a un conjunto de 100 clientes.

El valor GAP en esta tabla se define como la diferencia porcentual del valor obtenido al aplicar el algoritmo propuesto con respecto al valor óptimo. Es importante indicar que los tiempos de ejecución con los cuales se obtuvieron estos resultados son significativamente pequeños.

TABLA I

El Problema de la Recolección de Desechos Hospitalarios en la Ciudad de Guayaquil: Modelación y Resolución por medio de una Heurística Basada en la Búsqueda Tabú

Comparación de la heurística con las mejores soluciones obtenidas

	Óptimo		Algoritmo Propuesto		
Instancia	Nr	Ct	Nr	Ct	GAP
C102	10	827,3	10	828,9	0,00
R102	18	1434,0	19	1498,5	4,5
RC102	14	1457,4	16	1527,9	4,9

3. RECOLECCIÓN DE DESECHOS HOSPITALARIOS EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL: CASO DE ESTUDIO

Descripción del problema

Una de las principales responsabilidades de RDHG es la recolección de los desechos generados por los centros hospitalarios en la ciudad de Guayaquil, hasta la disposición final de los mismos. Actualmente la empresa posee una flota homogénea de vehículos estacionados en sus instalaciones ubicadas en el Km. 30,5 de la vía a Daule, los cuales se encargan de visitar a cada cliente (centros hospitalarios) y recoger los desechos generados por estos para su tratamiento final, que por lo general es la incineración y/o tratamiento químico de los desechos, actividad que se realiza en las mismas instalaciones de la empresa. Además, la empresa posee una cartera de clientes distribuidos en toda la ciudad, cantidad que tiende a aumentar debido a las regulaciones municipales y a los clientes potenciales en el medio.

En la actualidad, la planificación diaria de visitas se la realiza de manera empírica, dada por la experiencia de la persona que establece el contrato con el cliente y la del conductor del vehículo. En un día de trabajo cualquiera, el conductor recibe la programación de visitas a los clientes, procediendo a recoger los desperdicios de cada centro hospitalario, iniciando el recorrido por el centro más cercano desde el punto de partida, siguiendo hacia el próximo centro más

cercano y así sucesivamente. Sin embargo, esta forma de secuenciación de las visitas no es precisamente la que produce un mínimo costo (medido como distancia total recorrida, tiempo total de espera o tiempo total de viaje)

Y se ha determinado que en general esta práctica da malos resultados, muy por debajo de la solución óptima.

Según Vigo y Toth [6], la diferencia porcentual entre el costo total de las rutas por esta práctica y el costo total de la solución óptima puede oscilar entre el 10% y el 20 %.

Este problema aumenta considerablemente si tenemos en cuenta que se encuentran registradas en la Dirección de Salud Pública del Guayas aproximadamente 650 personas naturales o jurídicas con sede en Guayaquil, que ofertan servicios de salud por lo que son clientes potenciales de RDHG.

Debido a la naturaleza de esta problemática, éste se lo puede modelar como un problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo. El objetivo que se persigue en la aplicación de este modelo es la confección de un conjunto de rutas que, cumpliendo las restricciones del problema, permitan aumentar el nivel de satisfacción de los clientes a un mínimo costo para un día determinado de recolección.

Obtención de datos

Para la determinación de las rutas que debe seguir un conjunto de vehículos, es necesario obtener la ubicación geográfica de los clientes a fin de calcular las distancias entre ellos y calibrar los parámetros propios del algoritmo propuesto. En la Tabla II, se muestra las coordenadas geográficas expresadas en UTM (Universal Transversal de Mercator) de los clientes y de las instalaciones de la empresa.

Esta información permite calcular las distancias entre clientes y depósito. Para este propósito no es conveniente utilizar la métrica euclidiana, ya que la distancia más corta entre dos puntos en una ciudad no necesariamente es la longitud del segmento de recta que une los puntos. En efecto, partiendo del supuesto de que las manzanas de la ciudad son rectángulos en la que uno de sus lados es paralelo al eje magnético Norte-Sur, la menor distancia entre dos puntos se la obtiene por medio de la métrica de Manhattan. Es decir, sean $P(x_p, y_p)$ y $Q(x_q, y_q)$ las coordenadas de dos puntos expresadas en UTM, la distancia $d(P,Q)$ entre los puntos P y Q está dada por la ecuación:

$$d(P,Q) = |x_p - x_q| + |y_p - y_q|$$

TABLA II

El Problema de la Recolección de Desechos Hospitalarios en la Ciudad de Guayaquil: Modelación y Resolución por medio de una Heurística Basada en la Búsqueda Tabú

Coordenadas UTM de los clientes y el depósito

Depósito	609622	9788382
Cliente	CoordX	CoordY
1	623549	9755129
2	624602	9759691
3	624652	9758038
4	620990	9755890
5	621634	9756024
6	622130	9755486
7	624619	9758440
8	623135	9756466
9	622969	9765311
10	624470	9758406
11	617021	9767969
12	622669	9760192
13	623578	9762190
14	623964	9757645
15	623560	9755063
16	618652	9764479
17	624327	9751734
18	623284	9759062
19	623398	9755162
20	622634	9759003
21	623233	9761831
22	623130	9757382

Para efecto de determinar los tiempos de desplazamiento de los vehículos, y ya que existen clientes que poseen intervalos de tiempo en los que se debe realizar la recolección de los desechos, se requiere determinar la velocidad en la que los vehículos se desplazan por la ciudad. Por ello, se ha considerado que en promedio un vehículo de la compañía se desplaza a una velocidad de 30 Km/h, lo que nos da la posibilidad de determinar el tiempo empleado al desplazarse desde el punto P al punto Q. Así, se considera que por cada 500 metros recorridos por el vehículo, el tiempo empleado por el mismo es de 1 minuto.

En la Tabla III se muestran las ventanas de tiempo, así como las demandas y tiempos de servicios promedio para cada cliente en base al histórico de recolección. Esta información es de vital importancia para la determinación del número de rutas y el orden de visita a cada cliente.

TABLA III

El Problema de la Recolección de Desechos Hospitalarios en la Ciudad de Guayaquil: Modelación y Resolución por medio de una Heurística Basada en la Búsqueda Tabú

Ventanas de tiempo, demanda y tiempos de servicio por cliente

Cliente	e_i	l_i	d_i	s_i
1	0	540	14	13
2	0	540	172	39
3	0	540	0,1	4
4	0	540	0,1	5
5	0	540	4	10
6	0	540	2	8
7	0	540	237	17
8	0	540	12	6
9	0	540	4	7
10	0	540	3	10
11	0	120	80	16
12	60	120	136	18
13	0	540	14	11
14	0	540	7	6
15	0	240	1	7
16	0	540	2	5
17	0	540	19	11
18	0	540	24	6
19	0	540	6	8
20	120	240	74	19
21	0	120	0,1	5
22	0	540	0,1	4

Mejora de la situación actual

Con base en la información mostrada anteriormente, se procede a la determinación de la(s) ruta(s) que permita(n) satisfacer a un conjunto de clientes, a los que se debe visitar en un día de la semana previamente planificado a un costo mínimo que en este caso es la distancia total recorrida por los vehículos. En la tabla 4 se muestran los valores de los parámetros propios del algoritmo propuesto, los mismos que han sido obtenidos en base a pruebas computacionales.

TABLA IV

El Problema de la Recolección de Desechos Hospitalarios en la Ciudad de Guayaquil: Modelación y Resolución por medio de una Heurística Basada en la Búsqueda Tabú

Calibración de parámetros

Parámetro	Valor
$Int_{\max}$	5
$Div_{\max}$	20
λ	1,2
β	2
κ	10
η	0,005
L	20

Los resultados obtenidos luego de aplicar el algoritmo propuesto en este caso de estudio, se encuentran resumidos en la tabla 5. En ella se establece la comparación entre la situación actual y la solución propuesta con el algoritmo de búsqueda tabú.

TABLA V

El Problema de la Recolección de Desechos Hospitalarios en la Ciudad de Guayaquil: Modelación y Resolución por medio de una Heurística Basada en la Búsqueda Tabú

Análisis comparativo entre la solución actual y la propuesta

	Actual	Propuesta
Distancia (Km.)	136	110,3
Tiempo de viaje (horas)	8,75	7,59

Como se puede observar, existe una clara disminución de la distancia total recorrida por el vehículo. Esta disminución es del 18,90% del valor inicial. De igual manera, la disminución del tiempo total de desplazamiento es del 13,26 %. Es importante indicar que, como se dijo anteriormente, la distancia más corta entre dos puntos se la determinó mediante la métrica de Manhattan. Esta aproximación fue realmente satisfactoria, ya que la distancia total real fue de 103,42 km, lo que difiere en un 6% del valor calculado utilizando la métrica antes mencionada; por lo que, se puede decir que la disminución real fue del 23,96% de la distancia total recorrida por el vehículo antes de la aplicación del algoritmo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se ha modelado el problema de recolección de desechos hospitalarios como un VRPTW y su resolución se ha realizado mediante la implementación de una heurística basada en la búsqueda tabú. A pesar de que el objetivo principal al resolver la problemática planteada es la disminución de la distancia total recorrida por los vehículos al realizar la recolección de desechos generados por centros de servicios médicos, es importante considerar los beneficios indirectos obtenidos por la planificación óptima de las rutas de los vehículos, ya que al disminuir el consumo de combustible en su operación, se produce una disminución de los gases emanados por éstos y un ahorro de energía. Esto puede resultar en una ventaja competitiva para la empresa, debido a que los clientes percibirán que esta contribuye de manera significativa al desarrollo sostenible de la comunidad.

Por ello, es necesario desarrollar una cultura logística que permita tomar decisiones de forma técnica y no empírica, por lo que se hace necesario involucrar a las empresas, tanto públicas como privadas, y a los centros de educación superior en la generación de conocimientos. Esto último podría surgir con la creación de centros logísticos, financiados por las empresas involucradas en este tema. En lo que respecta al algoritmo implementado, es importante mencionar que el mismo es genérico, por lo que depende de parámetros propios de la instancia a analizar. Además, se debería incluir restricciones dadas por su aplicación, ya que por ejemplo, en nuestra ciudad, existen ciertos sectores en los que no se puede circular por ciertas zonas o en determinadas horas. Para futuras investigaciones, se recomienda considerar en la función objetivo, el riesgo asociado en la circulación de los vehículos por determinadas zonas de la ciudad con desperdicios biológicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y ELECTRÓNICAS

[1]. **YELLOW, P.A** (1970) *"Computational modication to the saving method of vehicle scheduling"*, Operational Research Quarterly 21, 281-283.

[2]. **OSMAN I.** (1993), *Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithm for the vehicle routing problem*, Annals of Operations Research 41, 421-451.

[3]. **GENDREAU M., HERT A. LAPORTE G.** (1992), New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem, Operations Research, 40, 1086-1094.

[4]. **LIN S.** (1965), Computer solutions of the travelling salesman problem, Bell System Techinal Journal, 44, 2245-2269.

[5]. **LIN S., KERNIGHAN B.** (1973), A effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem, Operations Research, 498-516.

[6]. **D. VIGO P. TOTH** 2002, The vehicle routing problem, Society for Industrial and Applied Mathematic, Bologna.

[7]. **M. LAGUNA P., MOSCATO F., TSENG F., GLOVER H., GHAZIRI A., DIAZ, J., GONZALEZ.** (1996). Optimización heurística y redes neuronales, Editorial Paraninfo, New York.

[8]. **RONALD H. BALLOU** (2004), *"Logística. Administración de la cadena de suministro"*, Pearson Educación, México.