

IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTRATEGIA ALGORÍTMICA PARA LA MINIMIZACIÓN DEL TIEMPO DE TRASLADO INTERHOSPITALARIO TERRESTRE EN BOGOTÁ D.C.

Jair Eduardo Rocha Gonzalez, MSc. Ingeniero Industrial¹, Ernesto Stiven Roa Patiño, Ingeniero Industrial²,

¹Universidad de La Salle, Colombia, jerocha@unisalle.edu.co, ²Universidad de La Salle, Colombia, Rernesto21@unisalle.edu.co

Resumen– Esta investigación presenta una propuesta de modelamiento matemático para la planificación de rutas de recorrido en ambulancias terrestres que transportan interhospitalariamente un paciente estabilizado dentro de la red hospitalaria de Bogotá D.C. Este modelo pretende disminuir los tiempos de recorrido de las ambulancias a través de la asignación de rutas a recorrer bajo el concepto de ruta más corta y carga nocturna.

Para ello el artículo presenta los resultados de la investigación realizada en la cual se obtiene el desarrollo de un algoritmo a medida para la solución del problema de ruta más corta a través de la estrategia de Dijkstra y combinándola con el concepto de carga nocturna para el traslado de pacientes interhospitalarios. De igual manera se presenta un análisis estadístico para determinar mejoras en el método propuesto frente a un método empleado para estas labores en la actualidad.

Palabras claves-- Ruteo, Algoritmo Dijkstra, Red Hospitalaria Problema de la ruta más corta, Carga nocturna.

Abstract- This research presents a proposal of mathematical modeling for the planning of travel routes in terrestrial ambulances that transports a stabilized patient inside the network hospital of Bogotá D.C. This model seeks to reduce the travel times of the ambulances through the allocation of routes under the concept of shortest path problem and night load.

For this reason, the article presents the results of the research carried out, also, it is obtained the development of an algorithm for the solution of the shortest path problem through the strategy of Dijkstra and combined with the concept of night load for the transfer of Inter-hospital patients. In the same way, the statistical analysis is presented to determine improvements in the proposed method compared to a method used for these public organizations and corporations.

Keywords- Routes, Dijkstra Algorithm, Network Hospital, Shortest Path Problem, Night Load

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación se centra en la necesidad de formular estrategias que contribuyan a la disminución del tiempo interhospitalario en la ciudad de Bogotá D.C. en Colombia,

desde una perspectiva logística a través del uso de técnicas cuantitativas.

De acuerdo al enfoque logístico del proyecto y tomando como referencia las fases de un transporte interhospitalario [1], este documento muestra como los autores establecen la implementación de un algoritmo de Dijkstra [2], en una red vial bajo el modelo de ruta más corta [3, 4] combinado con el concepto de carga nocturna [5] para minimizar los tiempos de la fase de traslado en este tipo de transporte hospitalario.

De esta manera, se consideró la red estatal de hospitales como los nodos de origen y destino del sistema, para la cual es posible determinar unas rutas de movilización de pacientes con el objetivo de realizar este proceso lo más rápido posible [6, 7], para garantizar las condiciones de sobrevivencia de los usuarios hospitalarios que requieren de este servicio.

Las tres etapas realizadas por la investigación realizada en primera instancia realiza una caracterización de la problemática presente en la ciudad de Bogotá D.C., en la cual se establece los protocolos de atención y traslados hospitalarios [8, 9, 10, 11, 12, 13], la cual recopila estadísticas acerca de la cantidad de servicios realizados, el nivel de prioridad en atención de los pacientes y el tiempo promedio de duración de las fases de transporte interhospitalario, de la cual destaca los 33,54 minutos que se empujan en el proceso en análisis [8].

Luego de la caracterización, se realiza la implementación de un algoritmo de Dijkstra [2], el cual emplea un compilador C++, con el cual se trata la información que asciende a 22 nodos o instalaciones hospitalarias y 93514 nodos correspondientes a las esquinas de las vías seleccionadas con carácter primario y secundario de acuerdo a la clasificación de los entes estatales coordinadoras del tráfico en Bogotá D.C. [14].

Finalmente, la investigación presenta un contraste estadístico entre los resultados obtenidos por la implementación del algoritmo de Dijkstra y los resultados obtenidos en un mismo horario por Google Maps®, en el cual es posible identificar una mejora en los tiempos de recorrido al usar el algoritmo diseñado junto a una política de carga nocturna [15].

II. MARCO TEÓRICO

A. Transporte Interhospitalario

Se considera al transporte interhospitalario o secundario, como la forma de transporte en la cual un paciente estabilizado es trasladado desde una institución hospitalaria a otra, con el fin de proporcionar un nivel mayor de atención al usuario en términos de capacidad instalada en unidades de cuidados intensivos, disponibilidad de e medio terapéuticos, diagnósticos o de cobertura [1].

En relación a este aspecto el transporte interhospitalario comprende cinco fases, las cuales se describen como activación, estabilización, traslado, transferencia y reactivación del paciente desde una instalación sanitaria de origen a otra de destino [13].

En los propósitos de la investigación descrita, esta se centra en el desarrollo de una estrategia para mejorar la fase de traslado en relación al tiempo empleado en esta, el cual se define como el tiempo de traslado neto desde el centro médico de origen y su recorrido por la ciudad hasta el centro de atención hospitalaria de destino, a través de las diferentes vías de la ciudad [13].

En otro aspecto, la duración de arribo se define como la duración promedio de la solicitud y llegada de una ambulancia al centro médico de despacho del paciente, incluye los tiempos de llamada y espera del vehículo desde el centro de despacho de las ambulancias, el recorrido hacia y hasta el hospital, los formalismos de entrega del paciente a la ambulancia y su carga en la camilla de la ambulancia en la puerta del hospital para su traslado [13].

Ahora bien, el tiempo de despacho, incluye las actividades relacionadas con la descarga del paciente en la institución de destino, los formalismos documentales de aceptación del hospital de destino, su recepción en este último y su descarga de la camilla asignada a la ambulancia que realizó el traslado [13].

B. Problema de ruta más corta

Este problema consiste en una situación donde es necesario enviar un material, vehículo, señal, etc., entre dos puntos de una red lo más rápido, económico o rentable de ser posible [16], donde el objetivo del problema es identificar una ruta con mínimo recorrido, costo o flujo desde un nodo de inicio hasta un nodo de finalización pasando por nodos intermedios conectados por arcos de comunicación en un diseño de red de flujo [6].

Aunque el problema de la ruta más corta se incluye en los problemas denominados NP completos, caracterizados por ser problemas para los cuales no se conocen algoritmos eficientes (ejecución en tiempo polinomial) [17, 18], es uno de los pocos problemas de optimización de flujo de redes para el cual existen algoritmos eficientes con tiempo de solución polinómico [18,

19, 20], como el algoritmo de Dijkstra, la programación dinámica [21], entre otros.

El modelo de programación entera, que representa el problema de ruta más corta e implementado en el programa GAMS® para optimizar y obtener una solución presentado por autores con una situación similar en el espacio geográfico y propósitos es definido de la siguiente manera [7]:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n TR_{i,j} \quad (1)$$

$$R_{i,j} = 1, \Lambda i, j \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m R_{i,j} = 1 \Lambda j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n R_{i,j} = 1 \Lambda i \quad (4)$$

$$P_i = \sum_{i=1}^m R_{i,j} - \sum_{j=1}^n R_{i,j} \quad (5)$$

$$TR_{i,j} = T_{i,j} * R_{i,j} \quad (6)$$

Donde:

TR_{ij} : Tiempo de la Ruta. $i=1,2, 3, \dots, m; j=1,2, 3, \dots, n;$

R_{ij} : Ruta binaria.

T_{ij} : Magnitud o tiempo de cada arco.

C. Algoritmo de Dijkstra

Este algoritmo es un método de tipo heurístico para la solución del problema de ruta más corta, que consiste en la realización de un numero de iteraciones inferior al número total de nodos, donde en cada iteración, se selecciona la mejor conexión desde un nodo a otro de acuerdo a un objetivo de minimizar costo o distancia de todas las posibles conexiones del nodo en análisis hasta encontrar la mejor solución global [2].

Una característica de este algoritmo es la utilización de etiquetas en cada nodo, cuya función es indicar en cada iteración del algoritmo la distancia del origen a diferentes nodos de destino, asignando el estado de permanente a la mejor elección posible indicando la distancia mínima seleccionada [2].

III. ESTADO ACTUAL DE TRANSPORTE INTERHOSPITALARIO EN BOGOTÁ D.C.

Los protocolos de atención hospitalaria en la ciudad de Bogotá D.C. describen que ante la aparición de algún incidente

que compromete la salud o la vida de los ciudadanos que habitan esta urbe se realiza un transporte sanitario primario que consiste en el proceso de atención y movilización de los involucrados desde el sitio de origen de la emergencia hasta la atención en un centro médico catalogado por niveles de acuerdo al grado de complejidad del servicio que puede atender [1].

Una vez los usuarios han llegado a un centro médico recibe atención primaria (APH) la cual se ejerce para garantizar su supervivencia, pero ante la especialización de los servicios y la ausencia de recursos en las instalaciones médicas de recepción, es necesario en muchas ocasiones el traslado a otras instalaciones de servicio médico (IPS) en la Ciudad, a través del uso del denominado transporte sanitario secundario en el que los pacientes que requieren son enviados a otras instalaciones médicas donde se garantice un tratamiento adecuado a sus dolencias [8, 9].

Este transporte secundario para pacientes entre entidades de servicio médico en la Ciudad de Bogotá se realiza a través del centro regulador de urgencias y emergencias (CRUE), en la cual en promedio se atiende doscientos cuarenta mil (240.000) servicios asistenciales en salud cada año según cifras de la secretaria distrital de salud [8].

Bajo este contexto, la ciudad a través del CRUE realiza en promedio unos diecisiete mil quinientos (17.500) traslados interhospitalarios mensuales, lo que indica que a diario se realizan en promedio quinientos ochenta (580) traslados entre la red hospitalaria, utilizando para ello una flota de ciento treinta y seis (136) ambulancias dotadas con equipos médicos básicos y su respectivo personal, para el traslado de pacientes dentro de la red pública hospitalaria [11].

Así mismo, atendiendo a la clasificación establecida por tipo de *triage* se observa que alrededor de la mitad del total de pacientes ubicados corresponden a pacientes de prioridad media con un 45.9%, seguidos por los catalogados como pacientes de prioridad alta con un 44,3% del total, y un 6.25% correspondiente a maternas con prioridad alta [12].

De igual manera, es posible afirmar con base en otros estudios que el transporte interhospitalario realizado por las diferentes ambulancias tienen los siguientes indicadores promedio de prestación de servicio, clasificados en las cinco etapas señaladas en la literatura del tema, tal como se indica en la tabla I [8].

TABLA I.
TIEMPOS DE PROCESOS DE TRANSPORTE INTERHOSPITALARIO EN MINUTOS [8]

Variable	Media	D. Estándar	Percentil 90
Duración Arribo	14,5	16,99	26,65
Pre Hospitalaria	24,1	16,42	44,23
Duración Traslado	18,67	15,45	33,54
Despacho Paciente	78	81,82	171,11
Tiempo Total	135,27	130,68	275,53

De acuerdo a este proceso, es posible afirmar que los tiempos del proceso interhospitalario están cercanos a las cuatro

horas bajo el percentil 90, lo cual implica un riesgo para la vida de los pacientes debido a que en muchas ocasiones estos requieren de atención y supervisión médica en cortos periodos de tiempo o de forma continua para garantizar una evolución adecuada de sus patologías.

Por tanto, esta investigación se centra en la necesidad de disminuir los tiempos de traslado interhospitalario entre la red adscrita a la secretaria distrital de salud, el cual es el tercer proceso señalado estimado en 33 minutos en promedio o 14% del tiempo total, con el propósito de aumentar las garantías de vida de los pacientes críticos que necesitan ser transportados en ambulancias terrestres dentro de la red hospitalaria pública de Bogotá.

IV. REPRESENTACIÓN DE ESQUEMAS VIALES PARA EL SERVICIO DE TRASLADO INTERHOSPITALARIO EN BOGOTÁ D.C.

En esta investigación, se utilizó las vías denominadas como malla vial arterial, complementaria e intermedia de acuerdo a las normas y registros existentes por el ente gubernamental dedicado a la gestión de la movilidad en la ciudad.

Estas calles se caracterizan por ser vías amplias, con características que permiten el tráfico de ambulancias y poca interferencia por parte de peatones, además de garantizar el flujo vehicular en términos de velocidad y movilidad esperada [14].

Para lograr este aspecto se realizó un filtrado de la información disponible sobre el inventario vial disponible en el ente gubernamental de planeación vial, seleccionando aquellas vías que cumplían el criterio de clasificación respecto a la malla vial arterial, complementaria e intermedia.

Posteriormente, se realizó un mapa de la ciudad de Bogotá D.C., mediante una interfaz entre un archivo de datos Excel ® con la herramienta tecnológica ARCMAP ®, el cual estableció la localización de los hospitales y de las intersecciones viales en unidades de posicionamiento global o GPS, desde un sistema de coordenadas geográficas disponible en la base de datos gubernamental.

Este proceso realizado obtuvo como resultado la digitalización de cada intersección de la malla vial arterial principal, complementaria e intermedia en un número de 547.828 nodos, mediante una aplicación computacional con un tiempo de procesamiento computacional de aproximadamente 25 minutos, previa depuración de la información disponible para impedir la congestión de las operaciones computacionales y por ende el tiempo de resolución.

V. FORMULACIÓN DEL ALGORITMO DE SOLUCIÓN DEL MODELO

Ante la imposibilidad algorítmica de realizar el proceso de optimización del problema de transporte interhospitalario a través de un método de programación matemática clásica, debido al tamaño del problema, los autores realizan una formulación del modelo matemático para su adaptación al algoritmo de Dijkstra en lenguaje C++, opción que ofreció

ventajas como el manejo de gran cantidad de datos, flexibilidad de programación y no tener restricción de licencia, reducción del tiempo de proceso computacional, adaptación de la base de datos al algoritmo y realización de un aplicativo interactivo.

Esta implementación se realiza a través de la interfaz de usuario Dev C++ @, en el cual el pseudocódigo del algoritmo de Dijkstra para el tratamiento de la información propuesta queda como se muestra a continuación:

1. Algoritmo de Dijkstra (Grafo, origen)
2. {
3. Se llama las condiciones iniciales del sistema
4. Se crea una cola de prioridad Q
5. Se incorpora el nodo a la cola de prioridad
6. Mientras Q no este vacío se hace:
7. {
8. Actualiza la cola de prioridad con el menor tiempo
9. Si el nodo ya fue visitado entonces sigue buscando hasta entrar uno no visitado
10. Se marca este nodo como visitado con valor igual a 1
11. Para todo adyacente del nodo actual sumando de 1 en 1
12. {
13. Se mira el tiempo del arco actual de acuerdo a sus adyacentes
14. Si este adyacente no ha sido visitado se vuelve a actualizar el sistema
15. }
16. }
17. }

1. Proceso de actualización (actual, adyacente, tiempo)
2. {
3. Si el tiempo del nodo actual + el tiempo es menor que el tiempo hasta el adyacente entonces:
4. {
5. Tiempo adyacente = Tiempo actual + tiempo
6. Se actualiza el nodo previo por el actual
7. Este se agrega a la cola de prioridad
8. }
9. }

IV. RESULTADOS Y CONTRASTE OBTENIDOS

A. Resultados del proceso computacional obtenido con el algoritmo propuesto

Al iniciar el programa se observara un mensaje de bienvenida y la formalidad del proyecto, posteriormente el programa realizado a través de su interfaz de usuario, solicita el ingreso un código ID del hospital de inicio del recorrido para el usuario que requiere el transporte interhospitalario, para un caso de contraste se ingresa el hospital con ID 46372, que representa

al hospital Santa Clara E.S.E ubicado en la dirección Carrera 14 B # 1 45 sur.

Posterior a ello en la misma interfaz el programa solicita un código ID del hospital de destino, el cual para el caso es el ID 16854, que representa el hospital El Tunal III Nivel E.S.E. ubicado en la dirección Carrera 20 # 47 B 35 sur, tal como se presenta en la figura 1.

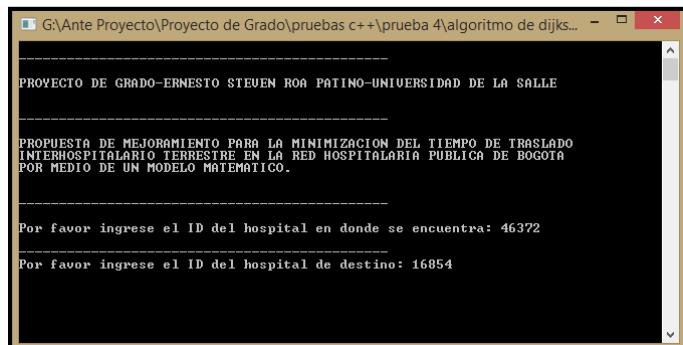


Fig. 1 Visualización interfaz de usuario.

Una vez el programa compila estos dos datos de arranque, el programa ejecuta la rutina diseñada del algoritmo de Dijkstra, presentando al finalizar este proceso, un mensaje que incluye el tiempo mínimo en minutos a recorrer por la ambulancia, junto a la identificación de códigos ID correspondientes a cada intersección vial en la ruta sugerida a recorrer entre los hospitales de inicio y destino ingresados para luego ser decodificados en coordenadas de posición global, tal como se presenta en la tabla II.

TABLA II. DECODIFICACIÓN DE RUTA A COORDENADAS GLOBALES.

Código	Posición Global
3459	74° 6' 24,670" W 4° 41' 29,280" N
4377	74° 1' 55,043" W 4° 41' 45,390" N
2495	74° 7' 3,456" W 4° 45' 25,115" N
2965	74° 3' 29,241" W 4° 41' 41,476" N
1480	74° 8' 54,574" W 4° 36' 1,777" N
453	74° 7' 26,387" W 4° 36' 22,942" N
4447	74° 5' 15,110" W 4° 29' 52,351" N
2780	74° 2' 51,423" W 4° 44' 58,361" N
1189	74° 5' 59,823" W 4° 30' 5,530" N
3703	74° 8' 52,296" W 4° 32' 8,394" N
1127	74° 10' 56,952" W 4° 37' 49,159" N
4056	74° 5' 33,546" W 4° 39' 55,660" N
4307	74° 5' 18,258" W 4° 39' 35,778" N
3237	74° 8' 51,305" W 4° 35' 27,155" N
921	74° 1' 41,605" W 4° 44' 1,290" N
2813	74° 8' 5,056" W 4° 35' 48,114" N

1587	74° 7' 49,443" W 4° 35' 34,126" N
4053	74° 8' 50,291" W 4° 37' 53,898" N
4733	74° 8' 34,195" W 4° 42' 58,990" N

Posterior a este proceso, estas coordenadas globales se insertan en el Google Earth®, las cuales las convierte en un grafo coloreado con la ruta sugerida, en la cual es posible apreciar si existen diferencias en las rutas sugeridas por el aplicativo diseñado y el aplicativo Google Earth®, en términos de distancia y tiempo, el cual para el caso señalado y aplicando el concepto de carga nocturna, en el cual las pruebas se realizan después de las 9:00 pm y hasta las 6 pm, presentando los resultados de la tabla III.

TABLA III.
MUESTRA DE RESULTADOS PARA UNA RUTA SELECCIONADA.

	Google Earth®	Modelo propuesto
Distancia a recorrer (metros)	5500	4852,44
Tiempo en ruta (minutos)	12	9,8

En este punto hay que resaltar que para realizar la transformación de distancia a recorrer en tiempo estimado de recorrido, se realiza la estimación con la ecuación 7:

$$(t_{ij} = \frac{d_{ij} * C_1}{v_{ij} * C_2}) \quad (7)$$

Donde:

t_{ij} está dada en (min).

d_{ij} : Distancia del nodo i al nodo j, dada en (metros).

v_{ij} : Velocidad generada para cada categoría de la malla vial desde el nodo i hasta el nodo j, dada en (km/hr).

C_1 : Constante de conversión de unidades que es igual a 60 en unidades de (min).

C_2 : Constante de conversión de unidades que es igual a 1000 en unidades de (Mtr/Km).

En este aspecto las malla viales en Colombia tienen las restricciones de 80, 60 y 20 kilómetros por hora, factores que se incluyen en su totalidad en cada uno de los tramos viales seleccionados por la ruta sugerida por el algoritmo de Dijkstra propuesto.

B. Contraste del modelo

Una vez realizada la verificación de varios resultados se realiza un análisis estadístico para establecer la confiabilidad del modelo, para ello se estima una muestra con un nivel de significancia del 95 %, bajo los siguientes valores

$N = 441$, el cual es el tamaño total de la población.

$Z = 1,96$; con un nivel de significancia del 95%,

$p = 5\% = 0,05$ proporción esperada,

$q = 1 - p = 0,95$,

$e = 5\% = 0,05$ error,

$n = 63$ la cual es el tamaño de muestra o rutas.

Y utilizándolos en la siguiente ecuación de tamaño de muestra:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} \quad (8)$$

De este modo, remplazando los valores en la ecuación se obtiene el siguiente resultado.

$$n = \frac{441 * 1,96^2 * 0,05 * 0,95}{0,05^2 * (441 - 1) + 1,96^2 * 0,05 * 0,95} \quad (9)$$

$$= \frac{80,47}{1,282} = 62,75 \approx 63$$

Por lo tanto, se realizará una muestra aleatoria de 63 rutas y distancias para poder aceptar o rechazar la hipótesis de que los métodos empleados de Google Earth® y Algoritmo propuesto poseen valores iguales en su media.

Posterior a la determinación del tamaño de muestra, se realiza un diseño experimental, basado en la comparación de dos tratamientos con muestras pareadas puesto que se están cotejando los resultados de tiempo obtenidos en minutos de el mismo hospital de inicio y el mismo hospital de destino desde dos modelos distintos, los cuales son: Google Earth® vs Algoritmo propuesto.

Los resultados de una selección de 85 muestras aleatorias, que contemplan los hospitales de inicio y destino, en términos del tiempo a recorrer por ruta proporcionada, la diferencia entre los valores en minutos proporcionados por Google Earth® y por el algoritmo propuesto, se presentan en la tabla IV.

TABLA IV
CONTRASTE Y RESULTADOS DE LA MUESTRA DE DATOS.

Hospital		Tiempo (min)		Dif
Inicio	Final	Google Earth®	Propuesto	
Hospital Santa Clara ESE	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	35	38,83	-3,83
Hospital Santa Clara ESE	Hospital El Tunal III Nivel E.S.E.	12	9,84	2,16
Hospital Santa Clara ESE	Hospital Simón Bolívar III Nivel E.S.E.	30	36,42	-6,42
Hospital Santa Clara ESE	Fundación Cardio Infantil Instituto de Cardiología	26	35,1	-9,1

Hospital Santa Clara ESE	Fundación Santa Fe de Bogotá	22	27,08	-5,08
Hospital Santa Clara ESE	Fundación Abood Shaio	23	26,85	-3,85
Hospital Santa Clara ESE	Hospital Infantil Universitario San José	16	17,829	-1,829
Hospital Santa Clara ESE	Hospital Universitario Mayor MEDERI	8	8,669	-0,669
Hospital Santa Clara ESE	Clínica Colsubsidio Roma	24	18,449	5,551
Hospital Santa Clara ESE	Compensar Cl 94	18	22,32	-4,32
Clínica Country	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	26	21,17	4,83
Clínica Country	Hospital Simón Bolívar III Nivel E.S.E.	22	16,16	5,84
Clínica Country	Fundación Cardio Infantil Instituto de Cardiología	16	14,89	1,11
Clínica Country	Fundación Santa Fe de Bogotá	12	6,82	5,18
Clínica Country	Fundación Abood Shaio	14	11,1	2,9
Clínica Country	Compensar Cl 94	5	3,43	1,57
Hospital Militar Central	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	28	26,389	1,611
Hospital Militar Central	Hospital Simón Bolívar III Nivel E.S.E.	24	21,939	2,061
Hospital Militar Central	Clínica Country	10	7,19	2,81
Hospital Militar Central	Fundación Cardio Infantil Instituto de Cardiología	24	21,56	2,44
Hospital Militar Central	Fundación Santa Fe de Bogotá	16	13,239	2,761
Hospital Militar Central	Fundación Abood Shaio	20	15,29	4,71
Hospital Militar Central	Hospital Infantil Universitario San José	14	10,38	3,62
Hospital Militar Central	Compensar Cl 94	12	10,36	1,64
Fundación Santa Fe de Bogotá	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	26	25,08	0,92
Fundación Santa Fe de Bogotá	Fundación Cardio Infantil Instituto de Cardiología	10	8,32	1,68
Fundación Abood Shaio	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	20	14,17	5,83

Clínica de Marly S. A	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	20	18	2
Clínica de Marly S. A	Hospital Simón Bolívar III Nivel E.S.E.	24	23,119	0,881
Clínica de Marly S. A	Clínica Country	12	6,96	5,04
Clínica de Marly S. A	Fundación Cardio Infantil Instituto de Cardiología	22	21,85	0,15
Clínica de Marly S. A	Fundación Santa Fe de Bogotá	16	13,78	2,22
Clínica de Marly S. A	Fundación Abood Shaio	18	15,05	2,95
Clínica de Marly S. A	Hospital Infantil Universitario San José	12	10,14	1,86
Clínica de Marly S. A	Compensar Cl 94	12	10,12	1,88
Fundación Hospital San Carlos	Hospital El Tunal III Nivel E.S.E.	10	7,4	2,6
Fundación Hospital San Carlos	Hospital Meissen II Nivel ESE	14	11,229	2,771
Fundación Hospital San Carlos	Clínica Colsubsidio Roma	26	21,309	4,691
Hospital Universitario Clínica San Rafael	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	40	50,48	-10,48
Hospital Universitario Clínica San Rafael	Hospital El Tunal III Nivel E.S.E.	14	9,86	4,14
Hospital Universitario Clínica San Rafael	Hospital Meissen II Nivel ESE	16	14,069	1,931
Hospital Universitario Clínica San Rafael	Fundación Hospital San Carlos	7	4,509	2,491
Hospital Universitario Clínica San Rafael	Clínica Colsubsidio Roma	26	19,9	6,1
Hospital Infantil Universitario San José	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	26	22,789	3,211
Hospital Infantil Universitario San José	Fundación Abood Shaio	14	9,71	4,29
Hospital Universitario Mayor MEDERI	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	28	31,069	-3,069
Hospital Universitario Mayor MEDERI	Hospital Simón Bolívar III Nivel E.S.E.	26	27,74	-1,74
Hospital Universitario	Fundación Cardio Infantil	20	26,42	-6,42

Mayor MEDERI	Instituto de Cardiología			
Hospital Universitario Mayor MEDERI	Fundación Santa Fe de Bogotá	14	18,409	-4,409
Hospital Universitario Mayor MEDERI	Fundación Abood Shaio	16	19,12	-3,12
Hospital Universitario Mayor MEDERI	Hospital Infantil Universitario San José	8	10,07	-2,07
Hospital Universitario Mayor MEDERI	Compensar Cl 94	10	13,649	-3,649
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital Santa Clara ESE	5	2,44	2,56
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	40	36,369	3,631
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital El Tunal III Nivel E.S.E.	16	11,6	4,4
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital Meissen II Nivel ESE	18	15,82	2,18
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital Simón Bolívar III Nivel E.S.E.	35	32,279	2,721
Hospital Universitario La Samaritana	Clínica Country	22	17,19	4,81
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital Militar Central	14	10,34	3,66
Hospital Universitario La Samaritana	Fundación Cardio Infantil Instituto de Cardiología	28	31,9	-3,9
Hospital Universitario La Samaritana	Fundación Santa Fe de Bogotá	22	23,58	-1,58
Hospital Universitario La Samaritana	Fundación Abood Shaio	26	25,27	0,73
Hospital Universitario La Samaritana	Clínica de Marly S. A	14	10,79	3,21
Hospital Universitario La Samaritana	Fundación Hospital San Carlos	10	6,99	3,01
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital Universitario Clínica San Rafael	4	3,27	0,73
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital Infantil Universitario San José	18	17,07	0,93
Hospital Universitario La Samaritana	Hospital Universitario Mayor MEDERI	9	8,75	0,25

Hospital Universitario La Samaritana	Fundación Hospital de La Misericordia	5	1,95	3,05
Hospital Universitario La Samaritana	Clínica Colsubsidio Roma	26	19,92	6,08
Hospital Universitario La Samaritana	Compensar Cl 94	20	20,34	-0,34
Hospital de La Misericordia	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	40	34,91	5,09
Fundación Hospital de La Misericordia	Hospital Simón Bolívar III Nivel E.S.E.	35	31,91	3,09
Fundación Hospital de La Misericordia	Clínica Country	22	15,75	6,25
Fundación Hospital de La Misericordia	Fundación Cardio Infantil Instituto de Cardiología	28	30,64	-2,64
Fundación Hospital de La Misericordia	Fundación Santa Fe de Bogotá	22	22,57	-0,57
Fundación Hospital de La Misericordia	Fundación Abood Shaio	26	23,81	2,19
Fundación Hospital de La Misericordia	Hospital Infantil Universitario San José	18	15,68	2,32
Fundación Hospital de La Misericordia	Hospital Universitario Mayor MEDERI	9	7,03	1,97
Fundación Hospital de La Misericordia	Clínica Colsubsidio Roma	24	23,569	0,431
Fundación Hospital de La Misericordia	Compensar Cl 94	18	18,89	-0,89
Compensar Cl 94	Hospital de Suba II Nivel E.S.E.	22	18,46	3,54
Compensar Cl 95	Hospital Simón Bolívar III Nivel E.S.E.	18	14,7	3,3
Compensar Cl 96	Fundación Cardio Infantil Instituto de Cardiología	14	13,2	0,8
Compensar Cl 97	Fundación Santa Fe de Bogotá	9	5,36	3,64
Compensar Cl 98	Fundación Abood Shaio	10	8,39	1,61

De esta forma se realiza la prueba estadística, en la cual se pretende determinar si existe diferencia significativa en los tiempos esperados de recorrido de ruta entre el algoritmo desarrollado y Google Maps®, para comprobar esta conjetura se formula las siguientes hipótesis estadísticas:

$$H_0: U_1 - U_2 = 0 \quad (10)$$

$$H_1: U_1 - U_2 \neq 0 \quad (11)$$

H_0 : No existe diferencia significativa estadística entre los tiempos de esperados de recorrido entre las rutas encontradas con los dos métodos.

H_1 : Existe diferencia significativa estadística entre los tiempos de esperados de recorrido entre las rutas encontradas con los dos métodos.

Y el estadístico de prueba que se utilizará será el siguiente:

$$t_o = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \quad (12)$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (13)$$

Si $t_o \geq t_{\alpha/2, v}$ Existen suficientes pruebas estadísticas para rechazar la hipótesis nula de igualdad en los métodos, lo cual indicaría que uno de los dos métodos es mejor que el otro.

Por lo tanto:

$$S_d = \sqrt{\frac{1009,2929}{84}} = 3,4663 \quad (14)$$

$$t_o = \frac{1,2310}{3,1466/\sqrt{84}} = 3,2742 \quad (15)$$

Con el cual se realiza la prueba estadística con el estadístico de comparación T-Student con un nivel de significancia $\alpha/2 = 0,025$ y un numero de grados de libertad $n - 1 = 84$, que corresponde a 2,2822.

Con lo que es posible afirmar que de acuerdo al valor de t_o y $t_{0,025,84}$ existen suficientes pruebas estadísticas para rechazar la hipótesis nula, lo que implica que existe un método mejor que el otro en la estimación de la media del tiempo promedio esperado de recorrido para las rutas sugeridas, pudiendo afirmar que el algoritmo sugerido presenta de alguna manera una mejora sobre el algoritmo de Google Maps ® al aplicarse bajo el concepto de carga nocturna desde las 9:00 pm hasta las 6:00 de un día cualquiera.

V. CONCLUSIONES

La investigación en su fase de recolección de información utilizo bases de datos que conformaron un total de 2'602,183 de datos en total, lo cual ocasiono un problema de eficiencia algorítmica que permitió el desarrollo de un algoritmo propio en lenguaje C++, el cual se pretende utilizar en otras prácticas de investigación en los temas de movilidad.

Al realizar el diseño experimental de muestras pareadas para las 85 muestras del tiempo esperado de recorrido generado por google Maps en contraste con el algoritmo desarrollado fue posible determinar una mejora del 5% en promedio de los tiempos obtenidos por el primer método.

La estrategia utilizada de realizar un diseño a medida junto a una política de carga nocturna muestra una mejora en la selección de rutas para el transporte interhospitalario, con el cual es posible salvar muchas vidas por el tipo de servicio que este proceso presta a la ciudadanía con problemas de salud de complejidad alta y media que puede esperar a las horas nocturnas para su traslado.

Como aspecto complementario es necesario en un desarrollo futuro incluir las denominadas vías locales, con las cuales las posibilidades de establecer rutas se incrementarían, pero con algunos problemas como la interferencia de peatones.

Aunque el diseño propuesto como solución a la problemática de movilidad interhospitalario propone la aplicación de una política y un algoritmo, es necesario considerar factores como el tráfico y la congestión para la implementación de una estrategia de este tipo para pacientes con urgencia manifiesta de traslado durante las 24 horas del día, características que para un futuro pueden ser incorporadas en este diseño.

Así mismo, para poder generar una respuesta contemplando todas las opciones posibles también es necesario incorporar en la localización de cada nodo (Esquina o punto de intersección entre las vías) el eje Z, para que la malla vial de Bogotá no sea plana en el eje (x, y), sino tenga altura por medio del sistema de coordenadas (X, Y, Z), permitiendo de esta forma la estimación de otros parámetros como consumos de combustible y tiempos en condiciones montañosas.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Barranco y J. Gil, Principios de urgencias emergencias y cuidados críticos, Ilustrada, 1999.
- [2] E. Dijkstra, «A note on two problems in connection with graphs,» *Numerische Mathematik*, pp. 269-271, 1959.
- [3] G. Dantzig, «On the shortest route through a network,» *Management Science*, pp. 187-190, 1960.
- [4] R. Floyd, «Algorithm 97: Shortest Path,» *Communications of the ACM*, p. 345, 1962.
- [5] J. Veras H., «Apuesta nocturna,» de *Las lecciones de Nueva York en el transporte de carga*, Bogota, 22 y 23 de julio de 2013.
- [6] L. Santos, J. Coutinho-Rodrigues y J. Current, «An improved solution algorithm for the constrained shortest path problem,» *Transportation Research Part B*, pp. 756-771, 2007.
- [7] J. Rocha Gonzalez, P. Sanchez Caiman y C. Gomez Triana, «Ruta más corta: soluciones Algorítmicas para movilidad eficiente,» *Epsilon*, vol. 24, nº 1, 2015.
- [8] J. Huertas, O. Barrera, N. Velasco y C. Amaya, «Evaluación del despacho de ambulancias del Centro Regulador de Urgencias y Emergencias de Bogotá

(C.R.U.E.),» Los cuadernos de PYLO, Bogotá D.C, 2008.

- [9] Ministerio de salud y proteccion social, «Ministerio de salud,» 2012. [En línea]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/Documentos%20y%20Publicaciones/Guias%20Medicas%20de%20Atencion%20Prehospitalaria.pdf>. [Último acceso: 06 06 2016].
- [10] Secretaria distrital de salud, «Salud Capital,» 2015. [En línea]. Available: http://www.saludcapital.gov.co/DCRUE/Paginas/Atencion_Prehospitalaria.aspx. [Último acceso: 08 06 2016].
- [11] G. D. Paredes Zapata, «Datos estadísticos del traslado inter-hospitalario de la ciudad de bogota para el año 2014,» de 2015, Bogotá, 2015.
- [12] A. Cadena Rojas, W. Aguirre Ramirez, Y. Saker Garcia y A. Paz Velilla, «Boletín epidemiológico 37,» SECRETARÍA DISTRITAL DE SALUD DE BOGOTÁ, D.C., Bogotá D.C, 2013.
- [13] J. I. López Jaramillo, «Transporte de pacientes en ambulancia terrestre,» Miniterio de Salud y Proteccion Social, Bogota D.C, 2012.
- [14] Alcaldía Mayor de Bogotá, «Informe gestion sector vial,» 04 2014. [En línea]. Available: http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/i_deofolio/final---informe-de-balance-de-gestin-sector-movilidad_3403.pdf. [Último acceso: 23 08 2016].
- [15] J. Holguín Veras, «Seminario de Carga Urbana,» de *Apuesta nocturna*, Bogotá, 2013.
- [16] A. Cervantes Castaños, «Elaboración de un Algoritmo Evolutivo para resolver el problema de Ruta más Corta incluyendo funciones de distribución probabilística,» Universidad de Las Americas, Puebla, Mexico, 2004.
- [17] R. Hassin, «Approximation Schemes for the restricted Shortest Path Problem.,» *Mathematics of Operations Research*, vol. 17, n° 1, pp. 36-42, 1992.
- [18] G. Yu y J. Yang, «On the robust Shortest path problem,» *Computers & Operations Research*, pp. 457-468, 1998.
- [19] T. Magnanti y R. Wong, «Network design and transportation planning: models and algorithms.,» *Transportation Science*, n° 18, pp. 1-55, 1984.
- [20] M. Daskin, *Network and discrete location*, New York, USA: John Wilwy and Sons, 1995.
- [21] R. Bellman, «Dynamic Programing,» *Science*, vol. 153, n° 3731, pp. 34-37, 1966.