



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Estudios de Postgrado

Maestría de Tecnologías de la Información y Comunicación

**ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AL TRÁFICO VEHICULAR DE LA  
CIUDAD CAPITAL DE GUATEMALA, PARA BÚSQUEDA DE RUTAS  
ALTERNAS EFICIENTES QUE APOYEN EL REORDENAMIENTO VIAL**

**Ing. Christoper Emanuel Santisteban González**

Asesorado por el Ing. Ms. Héctor Alberto Mendía Arriola

Guatemala, octubre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AL TRÁFICO VEHICULAR DE LA  
CIUDAD CAPITAL DE GUATEMALA, PARA BÚSQUEDA DE RUTAS  
ALTERNAS EFICIENTES QUE APOYEN EL REORDENAMIENTO VIAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**CHRISTOPER EMANUEL SANTISTEBAN GONZÁLEZ**

ASESORADO POR EL ING. MS. HÉCTOR ALBERTO MENDÍA ARRIOLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y  
COMUNICACIÓN**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Ángel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Murphy Olympo Paiz
EXAMINADORA	Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADORA	Inga. María Elizabeth Aldana
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AL TRÁFICO VEHICULAR DE LA CIUDAD CAPITAL DE GUATEMALA, PARA BÚSQUEDA DE RUTAS ALTERNAS EFICIENTES QUE APOYEN EL REORDENAMIENTO VIAL**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha julio de 2016.

Christoper Emanuel Santisteban González

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Christoper Emanuel Santisteban González', written over the printed name.

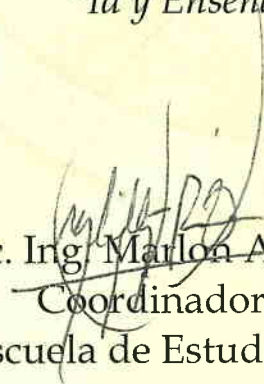


Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2016-068

Como Coordinador de la Maestría en Tecnologías de la Información y la Comunicación y revisor del Trabajo de Graduación titulado **"ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AL TRÁFICO VEHICULAR DE LA CIUDAD CAPITAL DE GUATEMALA, PARA BÚSQUEDA DE RUTAS ALTERNAS EFICIENTES QUE APOYEN EL REORDENAMIENTO VIAL"** presentado por el Ingeniero en Ciencias y Sistemas **Christoper Emanuel Santisteban González**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
MSc. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk  
Coordinador de Maestría  
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Octubre de 2016

Cc: archivo/la



Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2016-068

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AL TRÁFICO VEHICULAR DE LA CIUDAD CAPITAL DE GUATEMALA, PARA BÚSQUEDA DE RUTAS ALTERNAS EFICIENTES QUE APOYEN EL REORDENAMIENTO VIAL"** presentado por el Ingeniero en Ciencias y Sistemas **Christoper Emanuel Santisteban González**, correspondiente al programa de Maestría Tecnologías de la Información y la Comunicación; apruebo y autorizo el mismo.

*"Id y Enseñad a Todos"*

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, Octubre de 2016.

Cc: archivo/la



FACULTAD DE  
INGENIERÍA - USAC  
**EP**  
ESCUELA DE  
ESTUDIOS DE POSTGRADO


Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería  
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

Ref. APT-2016-068

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Tecnologías de la Información y la Comunicación titulado: **"ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AL TRÁFICO VEHICULAR DE LA CIUDAD CAPITAL DE GUATEMALA, PARA BÚSQUEDA DE RUTAS ALTERNAS EFICIENTES QUE APOYEN EL REORDENAMIENTO VIAL"** presentado por el Ingeniero en Ciencias y Sistemas **Christoper Emanuel Santisteban González**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
DECANO

Guatemala, Octubre de 2016.

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. Programas de Maestrías: Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. Especializaciones: Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por dame la vida y las fuerzas necesarias para lograr mis metas y ser mi apoyo en todo momento.
- Mi padre** Por estar conmigo y darme su apoyo en todo momento, ser mi inspiración y ejemplo, sus invaluable consejos y creer siempre en mí.
- Mis hermanos** Por su apoyo, cariño y paciencia, siempre estar conmigo y apoyarme en todo momento.
- Mi novia** Por su paciencia, amor, dedicación, apoyo en las noches de desvelo y ser mi motivación de seguir adelante.
- Mis amigos** Por su ayuda y amistad en el transcurso de la carrera.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

- Mi asesor** Por su apoyo y tiempo brindado en la realización de este trabajo, los cuales fueron esenciales para la culminación del presente trabajo de graduación, agradecimientos al Ing. Héctor Mendía.
- Inga. Maria Aldana** Por su tiempo y dedicación en la revisión de los trabajos de graduación, sus aportes y consejos fueron de motivación para lograr culminar con satisfacción el presente trabajo.
- Inga. Mildred Caballeros** Por su tiempo y apoyo constante en la revisión de los trabajos de graduación, su retroalimentación y ayuda fueron indispensables para la culminación del presente trabajo.
- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por permitirme la oportunidad de seguir adquiriendo nuevos conocimientos y darme oportunidades de crecer profesionalmente.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
GLOSARIO .....	VII
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS .....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO .....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXV
1. ANTECEDENTES .....	1
2. JUSTIFICACIÓN .....	5
3. ALCANCES .....	7
3.1. Alcances investigativos.....	7
3.2. Alcances técnicos .....	7
3.3. Resultados.....	8
4. MARCO TEÓRICO.....	9
4.1. Análisis de tráfico vehicular como un sistema .....	9
4.1.1. Descripción del sistema .....	10
4.1.2. Conceptualización del sistema.....	10
4.2. Algoritmos genéticos.....	12
4.2.1. Población inicial .....	14
4.2.2. Función objetivo y proceso de selección .....	15

4.2.3.	Cruce y mutación.....	16
4.2.4.	Ventajas de utilizar algoritmos genéticos como enfoque de optimización .....	17
4.2.5.	Aplicaciones prácticas de algoritmos genéticos .....	18
4.3.	Computación móvil .....	19
4.3.1.	Arquitectura de computación y aplicaciones móviles ..	19
4.3.2.	Optimización de aplicaciones móviles y <i>benchmarking</i> .....	22
5.	MARCO METODOLÓGICO .....	25
5.1.	Tipo de investigación.....	25
5.2.	Diseño de investigación.....	25
5.3.	Método de investigación.....	26
5.3.1.	Fase I: diseño de la investigación.....	26
5.3.1.1.	Análisis de variables y eventos aleatorios.....	27
5.3.1.1.1.	Análisis de resultados.....	27
5.3.2.	Fase II: experimentación .....	28
5.3.2.1.	Experimentación con algoritmo genético .....	29
5.3.2.2.	Análisis de rendimiento - <i>benchmarking</i> .....	30
5.3.2.2.1.	Pruebas de estrés .....	30
5.3.3.	Fase III: publicación de resultados.....	31
5.4.	Técnicas de recolección de información.....	31
5.5.	Variables e indicadores .....	32
6.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	33
6.1.	Análisis del tráfico vehicular como sistema de información.....	33
6.2.	Variables analizadas y su impacto en el cálculo de rutas.....	38
6.3.	Determinación de función fitness .....	43
6.4.	Experimento .....	46

6.4.1.	Arquitectura móvil utilizada para el experimento .....	46
6.4.2.	Presentación y comparación de resultados teóricos y prácticos .....	47
6.4.3.	Conclusiones y observaciones del experimento.....	54
6.5.	Resultados de pruebas de estrés .....	55
7.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	61
7.1.	Discusión del desarrollo del algoritmo genético.....	62
7.2.	Discusión de resultados del experimento .....	64
7.3.	Mejoras al algoritmo genético y prototipo .....	65
	CONCLUSIONES .....	67
	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	ANEXOS.....	75



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Comportamiento tráfico vehicular.....	XVI
2. Red VANET .....	5
3. Traslado de un punto A a un punto B.....	9
4. Variables de flujo en un sistema de tráfico vehicular.....	11
5. Cruza de cromosomas .....	13
6. Proceso de un algoritmo genético .....	14
7. Arquitectura del Sistema Operativo Android .....	20
8. Arquitectura de aplicaciones móviles cliente-servidor .....	21
9. Puntos de referencia para determinación de función Fitness sobre mapa virtual.....	36
10. Puntos de referencia con información de rutas .....	37
11. Regresión polinomial de accidentes de tránsito y proyección 2016 y 2017 .....	40
12. Arquitectura móvil utilizada para el experimento .....	46
13. Registro de inicio y fin mediante aplicación AutoBoy BlackBox .....	48
14. Cálculo de ruta mediante prototipo que utiliza el Algoritmo Genético ....	49
15. Cálculo de ruta mediante aplicación Google Maps y Waze .....	50
16. Comparación de resultados del Algoritmo Genético y Google Maps en gráfico radial.....	52
17. Comparación de resultados del Algoritmo Genético y Waze en gráfico radial .....	53

18. Aplicación móvil utilizada para medir utilización de CPU y Memoria .....	55
19. Registro de utilización de CPU y memoria del dispositivo móvil .....	56
20. Registro de utilización de CPU y memoria del servidor .....	57
21. Tiempos de respuesta del algoritmo genético y Google Maps.....	59
22. Accidentes de tránsito cubiertos en los años 2010 al 2015 .....	75

## **TABLAS**

I. Variables e indicadores de la investigación .....	32
II. Puntos de referencia para determinación de función Fitness .....	34
III. Cantidad de accidentes de tránsito atendidos por los Bomberos Municipales de Guatemala, año 2010 y 2015.....	39
IV. Cantidad de accidentes de tránsito reales entre 2010 y 2015 y proyectados a futuro para 2016 y 2017 .....	41
V. Aptitudes para puntos de ruta .....	44
VI. Resultados de experimento con algoritmo genético .....	51
VII. Requerimientos mínimos y recomendados de hardware .....	58

## GLOSARIO

<b>API</b>	Conjunto de funciones y procedimientos que cumplen una o muchas funciones que podrían ser utilizadas por otra aplicación.
<b>Algoritmo</b>	Conjunto ordenado de operaciones sistemáticas que permite encontrar la solución a un problema
<b>Android</b>	Sistema operativo basado en Linux diseñado principalmente para dispositivos móviles como teléfonos inteligentes o tablets y relojes inteligentes, entre otros.
<b>CPU</b>	Unidad Central de Procesamiento (por sus siglas en inglés - <i>Central Processing Unit</i> ), es la parte de una computadora en la que se encuentran los elementos que sirven para procesar datos.
<b>Carril</b>	Parte de una vía de circulación destinada al tránsito de una sola fila de vehículos.
<b>Congestión vehicular</b>	Es la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de circulación de los demás.



<b>Cromosoma</b>	En sistemas de información, un cromosoma representa dentro de un algoritmo genético una posible solución de un conjunto de soluciones.
<b>Cruce o cruza</b>	Procedimiento que representa la reproducción de cromosomas, opera sobre dos cromosomas a la vez para generar dos descendientes donde se combinan las características de ambos cromosomas padres.
<b>Densidad vehicular</b>	Se refiere a la relación que existe entre la cantidad de vehículos en circulación en un espacio determinado.
<b>Dispositivo móvil</b>	Es un tipo de computadora de tamaño pequeño, con capacidades de procesamiento, conexión a Internet y memoria, diseñado específicamente para ser portable con funciones y capacidades limitadas.
<b>Función Fitness</b>	También llamada función objetivo, es la que permite cuantificar que tan apto es un individuo en comparación con el resto de la población, devuelve como resultado un valor positivo.
<b>Framework</b>	Es una colección organizada de clases que constituyen un diseño reutilizable en otras aplicaciones o sistemas, contiene un conjunto de librerías y/o componentes de software.

<b>Gen</b>	Representa un procedimiento o una característica específica de una posible solución, un conjunto de genes forma un cromosoma.
<b>Hardware</b>	Conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen una computadora o un sistema.
<b>Mutación</b>	Procedimiento mediante el cual se modifica al azar una parte específica del cromosoma.
<b>Prototipo</b>	Representación básica y/o limitada de un producto, permite a los interesados explorar su uso antes de ser creado por completo, creando un ciclo iterativo de diseño y desarrollo.
<b>RAM</b>	Es donde la computadora guarda los datos que está utilizando en un momento determinado, es considerado almacenamiento temporal por que los datos y programas permanecen en ella mientras que la computadora esté encendida.
<b>Ruta</b>	Es un camino, vía o carretera que une diferentes lugares geográficos y que le permite a la personas desplazarse de un lugar a otro.

<b>Semáforo</b>	Dispositivo de señalización que regula el tráfico en las vías públicas y que consta generalmente de tres luces (roja, amarilla y verde).
<b>Software</b>	Conjunto de programas y rutinas que permiten a una computadora realizar determinadas tareas.
<b>Tráfico vehicular</b>	Circulación de vehículos por calles y caminos, movimiento de personas, mercancías, por cualquier otro medio de transporte.
<b>Vehículo</b>	Medio de transporte que facilita el traslado de un lugar a otro.
<b>Vía</b>	Espacio destinado al paso de personas o vehículos que van de un lugar a otro.

## RESUMEN

El reordenamiento vial es una tendencia que se está adoptando en la ciudad de Guatemala, para redistribuir el tráfico de una manera más ordenada y fluida, el cual incluye el análisis y construcción de mejoras, como nueva infraestructura vial, repavimentación, creación de pasos a desnivel, monitoreo constante de la red vial que permita la identificación de zonas de congestión, creación de rutas exclusivas para el transporte público, instalación de carriles reversibles, entre otros. La presente investigación busca apoyar estos esfuerzos mediante la aplicación de tecnología a problemas cotidianos como el transportarse de un lugar a otro.

Se han realizado diversas investigaciones que buscan ofrecer soluciones tecnológicas al tráfico vehicular, mediante el enfoque de algoritmos genéticos se ha buscado la optimización de rutas en términos de espacio o tiempo; sin embargo, es evidente la necesidad de incluir parámetros adicionales como el flujo vehicular, posibles accidentes y tiempos de espera en semáforos que permitan realizar simulaciones más apegadas a la realidad y obtener resultados más exactos. La importancia de encontrar rutas eficientes mediante la utilización de algoritmos genéticos reside en la capacidad de éstos de proveer soluciones de calidad a problemas de optimización, dando resultados significativamente mejores que al usar los enfoques tradicionales como el algoritmo de Dijkstra.

La presente investigación buscó apoyar el reordenamiento vial, mediante la creación de un algoritmo genético cuya función *fitness* calcule rutas óptimas en términos de la distancia, tiempo y velocidad, tomando en consideración eventos aleatorios como accidentes de tránsito, la densidad del tráfico vehicular y el

tiempo de espera en los semáforos, dicho algoritmo genético se utilizó en un prototipo el cual permite visualizar de manera gráfica la ruta calculada.

La manera como se llevó a cabo la creación del algoritmo genético fue mediante la utilización de bibliografías primarias y secundarias, las cuales sirvieron de base para la creación del algoritmo, los parámetros de estudio fueron la distancia, que sin importar las condiciones de tráfico no cambia; el tiempo se ve afectado directamente por los demás parámetros, según las pruebas realizadas y el experimento, el tiempo base (tiempo que toma recorrer una distancia en condiciones ideales) se incrementa por la densidad vehicular, por un factor del 100 %, los accidentes lo incrementan en un 25 %, mientras que los semáforos en promedio, incrementan el tiempo por un factor de 30 segundos por semáforo, y la rapidez que resultó ser subjetiva en el cálculo de rutas.

Los eventos aleatorios como accidentes de tránsito fueron estimados de acuerdo a información histórica proveída por los Bomberos Municipales de Guatemala, con la información obtenida de la regresión polinomial a manera de obtener una ecuación que describa el comportamiento y permitiera proyectar a futuro la cantidad de accidentes, tomando en consideración la estacionalidad de la ecuación. El tiempo de espera en semáforos se calculó mediante observación directa, se observó que en promedio los semáforos, tienen un tiempo de espera de 30 segundos.

Con el análisis de los parámetros de estudio fue posible elaborar la función fitness, la aptitud de cada ruta se basó en la velocidad como un parámetro de referencia para la rapidez media, lo cual es ideal debido a que como la distancia no cambia, entonces es directamente proporcional al tiempo, que se ve afectado por la densidad vehicular, accidentes, semáforos, entre otros.

Con el algoritmo desarrollado, se realizó un experimento, el cual consistió en validar qué tanto se apegaban los resultados teóricos a la realidad; además de comparar la misma ruta en GoogleMaps y validar si existía una mejora en el cálculo de las rutas, los resultados fueron que el algoritmo genético se apegaba a la realidad en un 88 %, es decir, que el margen de error promedio fue del 12 %, que muestra una mejora evidente en comparación con GoogleMaps, que presentó un margen de error promedio del 24 %.

Las pruebas de estrés realizadas con el algoritmo genético mostraban que el consumo de recursos de hardware no es considerable y el tiempo de respuesta era menor a 3 segundos, lo que permite que sea utilizado en dispositivos móviles, apoyando el reordenamiento vial y masificando su uso se puede buscar la manera de apoyar a futuro la creación de ciudad inteligentes.



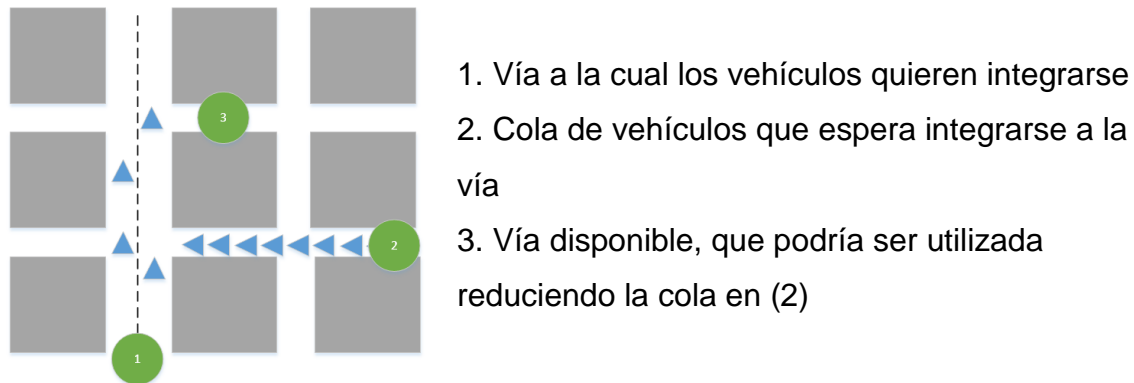
## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS**

El reordenamiento vial es una tendencia que se está adoptando en la ciudad de Guatemala, para redistribuir el tráfico de una manera más ordenada y fluida, el cual incluye el análisis y construcción de mejoras como nueva infraestructura vial, repavimentación, creación de pasos a desnivel, monitoreo constante de la red vial que permita la identificación de zonas de congestión, creación de rutas exclusivas para el transporte público, instalación de carriles reversibles, entre otros.

El tráfico vehicular acontece debido al incremento desordenado de la cantidad de vehículos que circulan en las carreteras del país, donde los vehículos demandan un área de espacio mayor al disponible, además existen situaciones que lo agravan, como accidentes, vehículos descompuestos, el hecho de no variar las vías de acceso, sino que se ha observado que las personas utilizan siempre las mismas vías, creando embotellamientos como se visualiza en la siguiente imagen:



Figura 1. **Comportamiento tráfico vehicular**



Fuente: elaboración propia.

Bastantes esfuerzos se han hecho con tecnología para apoyar a la reducción del tráfico vehicular, Pawel Gora publicó la aplicación de algoritmos genéticos a la configuración de semáforos ubicados en cruces, buscando hacerlos óptimos para darle fluidez al tráfico vehicular y peatonal (Gora, 2011); el resultado fue una mejora del 3 % respecto a la configuración convencional, uno de los mayores problemas encontrados fue el encontrar la configuración óptima para los algoritmos utilizados, no solo por la complejidad de la simulación sino también por el tiempo que toma, lo que podría mejorarse segmentando por áreas geográficas el experimento, optimización de los algoritmos y la utilización de hardware más potente. Chand, Prasad y Dehuri utilizaron algoritmos genéticos para buscar la ruta más óptima, en esta investigación se pretendía encontrar la ruta más óptima (en términos de distancia) para una flota de vehículos que debían realizar entregas en distintos puntos (Chand, Prasad, & Dehuri, 2010), el resultado fue de gran calidad, y aunque no se realizó una comparación para saber el grado de mejora contra un enfoque tradicional, el resultado fue satisfactorio, podría mejorarse incluyendo otras características de ruta óptima como tiempo y velocidad, además de mejorar el rendimiento de los algoritmos, ya que con simulaciones a gran escala el rendimiento es deficiente. Teklu, Sumalee y

Watling publicaron la optimización de las señales de tránsito, específicamente el tiempo óptimo de luz verde, con el objetivo de evitar la formación de largas colas en tiempo real, mediante la aplicación de algoritmos genéticos la función fitness se basó en el tiempo de viaje (Teklu, Sumalee, & Watling, 2007). Los resultados fueron obtenidos de simulaciones, y comparado contra un sistema de tráfico normal, mostró mejoras significativas, como puntos de mejora se tiene experimentar la integración de diversas redes de tránsito y distintas densidades de afluencia vehicular, así como encontrar los parámetros ideales para mejorar el rendimiento de los algoritmos. Fan y Machemehl experimentaron con algoritmos genéticos en el desarrollo de rutas para buses tomando en consideración tres aspectos clave, primero la ruta normal (como punto de comparación), la generación de todas las rutas posibles y un procedimiento de análisis de las rutas, en el cual se simulan los viajes, tráfico, la frecuencia de las rutas y generan estadísticas para comparación de las rutas (Fan & Machemehl, 2006), la conclusión obtenida es que los resultados mejoran de manera proporcional al tamaño de las rutas, es decir, mientras más grande sea la ruta, más óptima es en comparación con el enfoque tradicional; sin embargo, la función objetivo podría no ser la más apropiada, puesto que después de una cantidad de iteraciones el algoritmo empieza a formar rutas no óptimas, en comparativa se modificó la función objetivo a manera de hacer variable la densidad del tráfico y se observó una mejor solución, con resultados estables, a un costo mayor de procesamiento.

Si bien estas soluciones cumplen con los objetivos propuestos es necesario analizar variables como el tiempo, la velocidad, la densidad del tráfico, tiempos de semáforos y posibles accidentes en ruta (para darle un enfoque adicional al de la distancia recorrida), además se deben hacer esfuerzos por encontrar los parámetros ideales que permitan obtener el mejor rendimiento posible de los algoritmos, para permitir en un futuro que sean utilizados en dispositivos como

teléfonos inteligentes y tabletas donde la capacidad de procesamiento es limitada, para que sirvan de apoyo en el análisis y diseño del reordenamiento vial.

Por esto surge la pregunta:

¿Es posible determinar rutas óptimas analizando diversas variables y mejorando el rendimiento de los algoritmos genéticos existentes para apoyar el reordenamiento vial?

Las preguntas auxiliares a responder son:

- ¿Es funcional definir una función *fitness* en términos de distancia, tiempo y velocidad para encontrar la ruta óptima, tomando en consideración eventos aleatorios como accidentes de tránsito, la densidad del tráfico vehicular y el tiempo de espera en los semáforos?
- ¿Es posible determinar el valor óptimo de los parámetros a utilizar en la función *fitness* para encontrar la ruta más óptima?
- ¿Es posible determinar los valores mínimos e ideales de recursos de hardware (CPU, espacio de almacenamiento y memoria RAM) que necesita un dispositivo móvil para el correcto funcionamiento de los algoritmos y un tiempo de respuesta adecuado?
- ¿Es posible mejorar el rendimiento de los algoritmos genéticos aplicados al tráfico vehicular para ser utilizados en dispositivos móviles?

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Mejorar el rendimiento de los algoritmos genéticos existentes para determinar rutas óptimas que apoyen el reordenamiento vial.

### **Objetivos Específicos**

- Definir una función fitness funcional en términos de distancia, tiempo y velocidad para encontrar la ruta óptima, tomando en consideración eventos aleatorios como accidentes de tránsito, la densidad del tráfico vehicular y el tiempo de espera en los semáforos, será funcional si el resultado se apega a la realidad en al menos 75 %.
- Determinar el valor óptimo de los parámetros a utilizar en la función fitness para encontrar la ruta más óptima, mediante la variación del valor de cada parámetro, el valor óptimo será aquel que maximice la función fitness como un todo, es decir, analizando todos los parámetros como un sistema y no cada uno por separado.
- Mediante pruebas de estrés determinar los valores mínimos e ideales de recursos de hardware (CPU, espacio de almacenamiento y memoria RAM) que necesita un dispositivo móvil para el correcto funcionamiento de los algoritmos genéticos y un tiempo de respuesta promedio menor a 25 segundos.
- Mejorar el rendimiento de los algoritmos genéticos aplicados al tráfico vehicular minimizando la utilización de recursos (CPU y memoria RAM) para ser utilizados en dispositivos móviles.



## RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La investigación fue del tipo descriptiva debido a que se analizó la manera de mejorar el rendimiento de los algoritmos genéticos existentes que apoyan el reordenamiento vial, tomando en consideración las diversas variables y eventos aleatorios que lo afectan, analizando el sistema como un todo y no cada parte por separado, con el objetivo de ser utilizados en dispositivos móviles, se realizó mediante la investigación y experimentación de los algoritmos genéticos desarrollados por otros investigadores previamente, a los cuales se les agregó eventos aleatorios como accidentes, densidad del tráfico vehicular y semáforos, para determinar la función fitness que determinaría las rutas eficientes y se desarrolló en tres fases, las cuales son: diseño de la investigación, experimentación y por último, la presentación de resultados.

- Fase de diseño de la investigación

El objetivo de esta fase fue definir qué debía hacerse para lograr cada objetivo específico y cómo se llevaría a cabo la investigación, experimentación e implementación de los algoritmos genéticos, el lenguaje de programación y las librerías externas a utilizar, que permitieron la implementación de los algoritmos sin tener que escribirlo desde cero.

La tecnología a utilizar para la implementación fue la que permitió la definición de la función *fitness* en los algoritmos genéticos, tomando en consideración las variables distancia, tiempo y velocidad, y eventos aleatorios como accidentes, densidad vehicular y semáforos, inicialmente

se definió la distancia, tiempo y velocidad promedio para rutas ya conocidas (como por ejemplo: la ruta al trabajo y la ruta a la universidad), así mismo, los eventos aleatorios como accidentes y densidad vehicular se simularon con base a estadísticas de la Municipalidad de Guatemala; por último, mediante observación directa se obtuvo el promedio de tiempo de espera de los semáforos de las rutas ya conocidas, éste fue el punto de partida para definir la función *fitness* inicial e iniciar con la investigación y experimentar con un primer algoritmo para validar qué tanto se apega a la realidad.

En esta fase, la investigación se basó en las fuentes secundarias analizadas, experimentando con los algoritmos genéticos existentes, analizando las ventajas y desventajas que proveen, dando como resultado el algoritmo genético base que se utilizó en el resto de la investigación, el cual permitió evaluar si una ruta es óptima desde los enfoques de distancia y tiempo, además fue modificado de acuerdo a los resultados de la fase de experimentación.

- Fase de experimentación

Determinar el grado de afectación que tiene cada variable y evento en la función *fitness* permitió obtener resultados lo más apegados a la realidad posible, y mediante las pruebas de estrés se obtuvo el mejor rendimiento posible; de acuerdo al resultado de ambas pruebas se realizaron cambios en la función *fitness* y el algoritmo genético como tal, para cumplir con los objetivos de definir una función *fitness* funcional y que el algoritmo genético definido sirviera como herramienta para el análisis del reordenamiento vial. Se realizaron sets de pruebas después de cada

cambio en el algoritmo genético para validar que dichos cambios mejoran el rendimiento y/o minimizan el consumo de hardware, estos cambios fueron optimizar la manera como se establece la afectación que tiene cada variable y la generación de los eventos aleatorios (semáforos, accidentes y densidad del tráfico vehicular).

El objetivo de esta fase fue experimentar con el algoritmo genético definido inicialmente en la primera fase, sirvió como punto de partida y permitió tener un parámetro de comparación, a medida que se realizaban las pruebas de estrés con el algoritmo genético, éste fue modificado, ya que se buscaba no solo que fuera funcional sino también óptimo, no se agregaron o quitaron parámetros de los que fueron definidos en los objetivos, sino que se buscó ajustar la función *fitness* con base a los resultados de la experimentación que se llevó a cabo mediante pruebas de estrés.

Las pruebas de estrés permitieron determinar el grado de afectación positiva o negativa de cada variable (espacio, tiempo y velocidad) y evento (accidentes, densidad vehicular y semáforos) al resultado, a manera de encontrar el valor óptimo de cada parámetro, que generará la solución óptima para todo el sistema como tal. La manera cómo se estudió el efecto que tiene cada variable fue mediante pruebas de estrés, variando los valores de cada variable con sets de valores de prueba, dichas pruebas se realizaron utilizando la tecnología seleccionada, utilizando para todas las pruebas la misma librería para que los resultados sean uniformes. Los sets de valores de prueba se definieron a manera de realizar 50 iteraciones con el algoritmo genético, es decir, que para cada set de prueba definido se realizarán 50 iteraciones de prueba, esto permitió generar suficiente información para que sea analizada posteriormente. El resultado de las



pruebas de estrés, se analizó mediante estadística descriptiva, permitiendo visualizar gráficamente el resultado, sacar conclusiones y determinar el valor óptimo de cada parámetro.

- Fase de publicación de resultados

Esta fase consistió en publicar los resultados y las conclusiones a las que se llegaron en la investigación de acuerdo a los objetivos planteados.

## INTRODUCCIÓN

El problema del tráfico vehicular es común en las ciudades de América Latina y ha surgido debido al crecimiento desmedido y la falta de planificación de las ciudades. Se ha tratado de minimizar las repercusiones que tiene implementando diversas estrategias como mejora en infraestructura vial, pasos a desnivel, señalización, fomento del uso del transporte público y el reordenamiento vial, siendo ésta última, considerada como la más óptima, ya que no involucra grandes cantidades de inversión monetaria ni recursos humano, sino que se trabaja con los recursos que ya se disponen, apoyando las estrategias de desarrollo sostenible de los países en desarrollo.

¿Cómo puede la tecnología apoyar esta iniciativa? Mediante el análisis del tráfico vehicular como sistema de información para buscar diversas alternativas de rutas de un punto A a un punto B, y determinar cuál de éstas es la óptima mediante algoritmos programables e incluso hacer los cálculos en tiempo real, a medida que se transita por las calles. Una herramienta poderosa y ampliamente utilizada para resolver problemas de optimización son los algoritmos genéticos, que se basan en la naturaleza evolutiva para determinar para cada generación los genes más óptimos para la siguiente generación, dando como resultado el mejor resultado posible, la clave es definir los criterios que hacen a un individuo más apto que otro. Se puede determinar que un individuo es más apto que otro evaluando sus características contra las características deseadas y asignando un valor cuantitativo que permita identificar al más apto, dicha evaluación se realiza mediante la creación de una función *fitness* (o también llamada función de aptitud), en la cual se asigna un valor de acuerdo a las características del individuo, y se encarga de determinar si las condiciones se cumplen en una

generación en específico o se debe seguir evolucionando, de esta manera se puede asignar un valor cuantitativo a cada individuo (que representaría una ruta en específico) y compararlos para saber cuál es el mejor.

Actualmente existen diversas soluciones que mediante el enfoque de algoritmos genéticos buscan la optimización de rutas en términos de espacio o tiempo; sin embargo, es evidente la necesidad de incluir parámetros adicionales como el flujo vehicular, posibles accidentes y tiempos de espera en semáforos que permitan realizar simulaciones más apegadas a la realidad y obtener resultados más exactos. La importancia de encontrar rutas eficientes mediante la utilización de algoritmos genéticos reside en la capacidad de éstos de proveer soluciones de calidad a problemas de optimización, dando resultados significativamente mejores que al usar los enfoques tradicionales como el algoritmo de Dijkstra.

¿Es factible? Únicamente se necesita información del sistema de información a estudiar, no conlleva una gran inversión monetaria, puesto que se dispone de una infraestructura tecnológica apropiada y se tienen los conocimientos para llevar a cabo la investigación. La investigación se lleva a cabo recopilando información de fuentes bibliográficas primarias y secundarias (de las que se obtendrá información respecto al flujo vehicular, accidentes en ruta, algoritmos genéticos ya existentes) y además de observación directa (donde se obtendrá tiempos entre semáforos y se podrá tener un punto de comparación de la realidad), con base a esta información se define el algoritmo genético y la función *fitness* (que permitirá cuantificar la aptitud de cada individuo contra las características deseadas) mediante el apoyo de librerías de programación existentes como JGAP o JAGA específicas para el lenguaje de programación JAVA, con la definición del algoritmo se realizaron pruebas de estrés para determinar el apego de los resultados del algoritmo genético y la realidad, se

obtuvo al menos un 75 % de apego a la realidad. Con la definición del algoritmo genético funcional, se realizó el experimento que busca realizar pruebas en tráfico real, comparando los resultados teóricos contra los reales, y medir el grado de mejora obtenido.

En el capítulo uno, se estudiaron los antecedentes a esta investigación, los esfuerzos tecnológicos hechos por otros investigadores con anterioridad y que servirán de base para la presente investigación.

En el capítulo dos, se presentó la justificación de la investigación, la importancia de mejorar los resultados ya obtenidos, incorporar nuevos parámetros de estudio y obtener mejores resultados.

En el capítulo tres, se detallaron los alcances de la presente investigación.

En los capítulos cuatro y cinco se detallaron el marco teórico y el marco metodológico, donde se presentó la bibliografía relacionada con el tema de la investigación, relevante al problema que se busca resolver, y se definió el tipo de estudio, variables e indicadores, resultados esperados, entre otros.

En el capítulo seis, se presentaron los resultados de la investigación, cómo se analizó el problema como un sistema de información, cómo se elaboró el algoritmo y la función *fitness* y el resultado de las pruebas y el experimento.

En el capítulo siete, se hizo un análisis y se discutieron los resultados obtenidos.



## 1. ANTECEDENTES

En el 2006 Wei Fan y Randy Machemehl estudiaron el problema de diseñar redes de tráfico de manera óptima añadiendo afluencia vehicular variable desde el enfoque de los algoritmos genéticos, este problema se conoce como BTRNDP y está enfocado a buses de transporte público. Definieron un modelo no lineal que calcula todas las posibles rutas (cuidando respetar las directrices y leyes que rigen el transporte público), las cuales son analizadas por un proceso de análisis de red, al cual denominaron NAP, que crea una matriz de tráfico asignando los viajes, su frecuencia y por último, calcula métricas de rendimiento, de las cuales se obtiene todas las posibles soluciones (candidatas), el modelo no lineal y NAP se combinan en un algoritmo genético que permite encontrar la solución óptima del universo de rutas.

La función fitness se definió con el objetivo de minimizar la suma de todos los costos (entre los cuales se incluye el costo de la gasolina, el tiempo necesario entre cada parada, el tamaño de las rutas, la frecuencia, entre otros) (Fan & Machemehl, 2006). La investigación considera tres aspectos clave; primero, la ruta normal (como punto de comparación), la generación de todas las rutas posibles y un procedimiento de análisis de las rutas, en el cual se simulan los viajes, tráfico, la frecuencia de las rutas y generan estadísticas para comparación de las rutas, la conclusión obtenida es que los resultados mejoran de manera proporcional al tamaño de las rutas, es decir, mientras más grande sea la ruta, más óptima será en comparación con el enfoque tradicional, y a su vez el costo de procesamiento también se ve afectado de manera proporcional al tamaño de las rutas, dando como resultado que el algoritmo genético no pueda manejar grandes cantidades de información y da como resultado rutas no óptimas.

En el 2007, Teklu, Sumalee y Watling publicaron la optimización de las señales de tránsito, específicamente el tiempo óptimo de luz verde que se debe permitir con el objetivo de anticipar la formación de colas en tiempo real, mediante la aplicación de algoritmos genéticos. La función *fitness* se basó en el tiempo total de viaje a través de toda la red de tráfico simulada, la cual se basó en la ciudad de Chester en el Reino Unido. Un aspecto importante de la función objetivo es que considera la alteración de las rutas y se presenta como un valor añadido frente a otras investigaciones similares, además considera una red de tráfico vehicular extensa, y establece las bases para la integración de varias redes de tráfico vehicular, no toma en consideración la densidad del tráfico. Los resultados fueron obtenidos de simulaciones, y comparado contra un sistema de tráfico normal que no considera las modificaciones de las rutas, mostró mejoras significativas. No fue posible determinar los valores adecuados para los parámetros del algoritmo genético (Teklu, Sumalee, & Watling, 2007).

En el 2008, se fundó Linqmap en Israel, que posteriormente se llamó Waze Ltd, que finalmente en 2013 fue comprada por Google (Wikipedia, 2015), Waze es una aplicación para dispositivos móviles de navegación asistida por GPS, la cual provee la opción de navegación buscando la ruta más corta en términos de distancia o velocidad, la característica principal es que no ofrece únicamente asistencia, sino que es una red social donde se transmite y recibe información del tráfico en tiempo real, la cual es utilizada para el cálculo de rutas. Waze es una aplicación gratuita que puede descargarse para dispositivos móviles, requiere acceso a internet y utiliza el GPS interno del teléfono, los algoritmos que se utilizan para determinar la ruta más corta son propietarios de Waze, se sabe que no siempre se calcula la ruta más corta, debido a errores en el mapa o información de tráfico incorrecta, entre otros (Google, 2015).

En Corea del Sur se disponen de dispositivos inteligentes de transporte, conocidos como ITS por sus siglas en inglés Intelligent Transportation Systems (Lin, Yu, Liu, Lai, & Ho, 2009), que en su mayoría son dispositivos *handhelds* (dispositivos electrónicos parecidos a una computadora que caben en la palma de la mano), que ayudan a buscar las mejores rutas en términos de costos, los cuales en su mayoría funcionan en base a algoritmos de Dijkstra y no contienen información actualizada, su poca capacidad de procesamiento no permite tomar en consideración un buen número de variables como el tiempo, distancia, velocidad, tráfico, etc. Una mejora que se estudia para estos dispositivos es la inclusión de algoritmos genéticos y redes neuronales, que permitan, con pocos recursos calcular en tiempo real las rutas más óptimas tomando en consideración el tiempo, distancia, velocidad y tráfico.

En el 2010, Chand, Prasad y Dehuri utilizaron algoritmos genéticos para encontrar la ruta más óptima en términos de distancia y cantidad de vehículos necesarios para que una flota de vehículos realizara entregas de productos en distintos puntos. El cromosoma representa la ruta de longitud "N", donde N es la cantidad de clientes en una instancia determinada. El gen representa el número asignado a cada cliente, y también el orden de entrega. La función objetivo se ha realizado tomando en consideración parámetros de peso que se asocian al número de vehículos (calculados empíricamente) y la distancia recorrida por vehículo, el número de vehículos se calcula de acuerdo a la demanda de entregas dividido la capacidad de cada vehículo, para obtener la distancia total recorrida se suma la distancia entre cada nodo de la red (que puede estar representado por una calle o avenida). Los resultados mostraron que los algoritmos genéticos son un enfoque capaz de resolver problemas de optimización de rutas, aunque no se tiene un parámetro de comparación contra el enfoque tradicional, los resultados fueron satisfactorios, pruebas a mayor escala requieren una mayor capacidad de procesamiento (Chand, Prasad, & Dehuri, 2010).



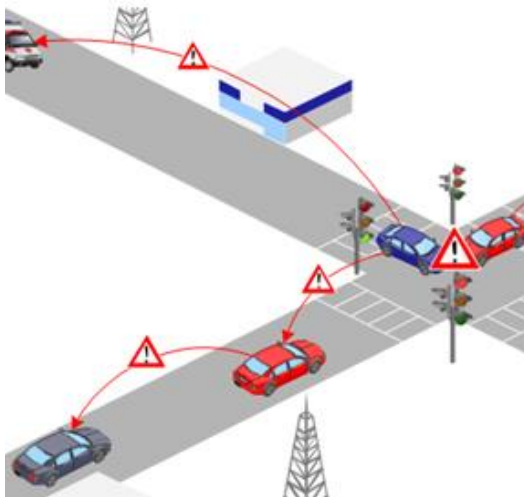
El uso de algoritmos genéticos nos ha permitido estudiar con mayor realismo los comportamientos de fenómenos en general, en la Universidad Nacional de Chiao Tung en Taiwán se estudió la factibilidad de utilizar algoritmos genéticos y redes neuronales aplicados a la inteligencia artificial en videojuegos (Wong & Fang, 2012), la motivación fue buscar maneras de darle mayor realismo al comportamiento de los objetos dentro de los videojuegos, llegando a la conclusión que se puede tener una notable mejora en comportamientos de objetos mediante la utilización de algoritmos genéticos, y de acuerdo a las experiencias presentadas en el artículo “estudio de algoritmos genéticos y redes neuronales para mini-juegos”, se debe empezar con funciones *fitness* y de mutación generales y conforme se analiza el comportamiento hacerlas cada vez más granulares, lo que aporta a la investigación es el hecho que los algoritmos genéticos y las redes neuronales tienen una gran y diversa cantidad de aplicaciones a problemas de optimización, para los cuales se enfoca definiendo las funciones de mutación y *fitness* más adecuadas al problema que se busca optimizar.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio sigue la línea de investigación “Tecnologías de la Información y la Comunicación para apoyo al desarrollo sostenible”, ya que busca proveer herramientas que apoyan el reordenamiento vial de manera eficiente, satisfaciendo dicha necesidad utilizando los recursos ya disponibles, sin comprometer los recursos o posibilidades de las generaciones futuras.

La importancia de encontrar rutas eficientes mediante la utilización de algoritmos genéticos reside en la capacidad de éstos de proveer soluciones de calidad a problemas de optimización, dando resultados significativamente mejores que al usar los enfoques tradicionales como el algoritmo de Dijkstra.

Figura 2. Red VANET



Actualmente existen diversas soluciones que mediante el enfoque de algoritmos genéticos buscan la optimización de rutas en términos de espacio o tiempo, sin embargo es evidente la necesidad de incluir parámetros adicionales como el flujo vehicular, posibles accidentes y tiempos de espera en semáforos que permitan realizar simulaciones más apegadas a la realidad y obtener resultados más exactos

Fuente: <https://conceptdraw.com/a2471c3/preview>

La optimización de los recursos de hardware (CPU, memoria RAM y espacio en disco) es importante para utilizar algoritmos genéticos en dispositivos móviles, si el algoritmo genético es capaz de funcionar en un dispositivo móvil la solución se puede masificar y ser utilizado a gran escala por miles de personas, e incluso a futuro utilizar las funcionalidades de los dispositivos móviles como el GPS y Antena para implementar redes VANET como la que se visualiza en la Figura 2, donde cada vehículo forma un nodo de la red y transmite información que alimenta los Sistemas Inteligentes de Transporte SIT, que apoyan la creación de ciudades inteligentes del futuro.

## **3. ALCANCES**

### **3.1. Alcances investigativos**

Dado que se identificó la necesidad de mejorar los algoritmos genéticos existentes tomando los distintos enfoques con el que fueron realizados y unificándolos para que funcionen como un sistema, la investigación pretendió realizar búsquedas exhaustivas de investigaciones previas, seleccionar al menos tres y utilizarlas de base para la investigación.

La investigación pretendió definir el algoritmo genético óptimo que posteriormente podrá ser utilizado en un prototipo de aplicación para dispositivos móviles, en dispositivos handhelds o servir para la implementación de ciudades inteligentes y redes VANET, dicho prototipo no fue parte del alcance de la presente investigación.

### **3.2. Alcances técnicos**

Para la investigación se utilizaron las librerías existentes (APIs) JGAP y JAGA para la codificación del algoritmo genético, se explicó el proceso y los pasos que fueron necesarios para la codificación del algoritmo genético mediante las librerías mencionadas, el lenguaje de programación utilizado fue Java, no se pretendió utilizar una metodología de desarrollo de software específica, sino que el lenguaje de programación permitió materializar el algoritmo genético, realizar pruebas de estrés y determinar su rendimiento. Se pretendió hacer uso de las herramientas existentes, que permitieron cumplir los objetivos y facilitar la

realización de la investigación. Para probar el algoritmo en un dispositivo móvil se utilizó el sistema operativo Android.

### **3.3. Resultados**

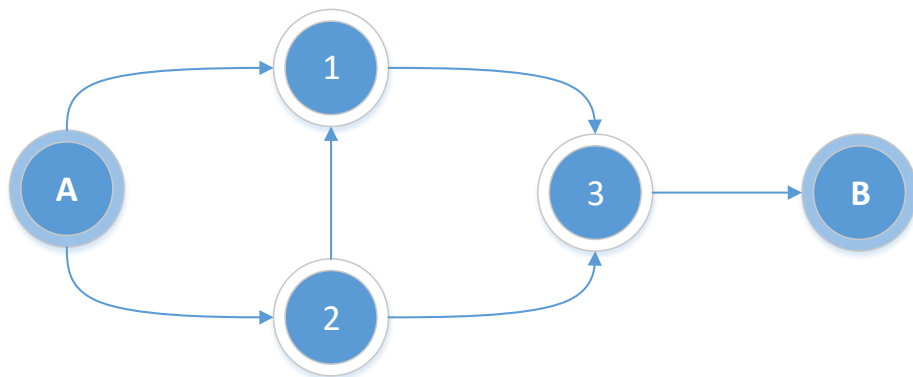
El resultado de la investigación fue un algoritmo genético eficiente que toma en consideración distintos parámetros como tiempo, velocidad, distancia recorrida, afluencia vehicular, semáforos y accidentes, cuyo rendimiento permitirá ser utilizado en dispositivos móviles, apoyando el reordenamiento vial mediante la determinación de rutas eficientes.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. Análisis de tráfico vehicular como un sistema

El tráfico vehicular se puede modelar como un sistema de objetos que tienen un comportamiento que cambia en el tiempo, donde dichos objetos se mueven de manera secuencial de una posición a otra las veces que sean necesarias hasta cumplir con el objetivo de trasladarse de un punto A a un B.

Figura 3. Traslado de un punto A a un punto B



Fuente: elaboración propia.

Un sistema de transporte vehicular genera una gran cantidad de información respecto a los usuarios y la utilización del sistema como tal, como la fluidez con la que se transportan, hacia donde se dirigen los usuarios, el tamaño del parque vehicular, cuántos vehículos circulan por hora, día, semana, etc., y en base a esto se pueden generar proyecciones de tráfico esperado para las rutas,

permitiendo estimar una utilización y en base a esto determinar cuál es la ruta más apropiada para trasladarse de un punto A a un punto B.

#### **4.1.1. Descripción del sistema**

Un sistema de transporte vehicular está compuesto por las vías donde circulan los vehículos, que a su vez pueden estar compuestos de varios carriles (permitiendo a los carros circular de manera paralela) que tienen un sentido de dirección, los vehículos que circulan por las vías (como vehículos particulares y buses de transporte público), las personas que utilizan dichos vehículos para transportarse y los elementos que regulan el tráfico como semáforos (Fernández, 2011).

Un elemento importante a tomar en cuenta son las personas que utilizan los sistemas de transporte, ya que a mayor cantidad de personas mayor es la utilización de los sistemas de transporte y mayor es la congestión vehicular que puede llegar a darse.

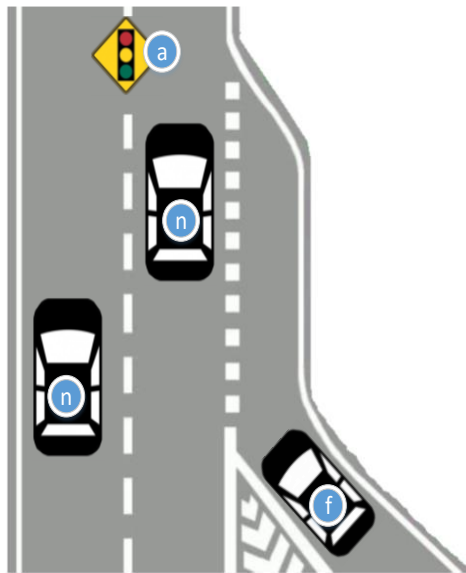
#### **4.1.2. Conceptualización del sistema**

Desde el punto de vista de sistemas de información, un sistema de tráfico vehicular está constituido por variables de flujo, nivel y auxiliares (Carre & Dueñas, 2012).

Las variables de flujo representan los elementos que se integran al sistema vehicular, las variables de nivel representan la acumulación de vehículos o

congestión vehicular, y las variables auxiliares representan la capacidad de las vías y los semáforos que regulan el tráfico.

Figura 4. **Variables de flujo en un sistema de tráfico vehicular**



(a) representa las variables auxiliares  
(n) representa las variables de nivel  
(f) representa las variables de flujo

Fuente: elaboración propia.

En un modelo de tráfico vehicular, las variables tienen el siguiente comportamiento:

- Población: a mayor población mayor crecimiento, a mayor crecimiento mayor población.
- Medios de transporte: a mayor población mayor demanda de medios de transporte.
- Rutas: A mayor cantidad de medios de transporte mayor es la necesidad de creación de rutas de transporte.
- Vehículos: A mayor cantidad de rutas y medios de transporte, mayor cantidad de vehículos particulares y públicos. A mayor cantidad de



vehículos mayor congestión. A mayor congestión menos capacidad vial. A menos capacidad vial, mayor congestión.

## **4.2. Algoritmos genéticos**

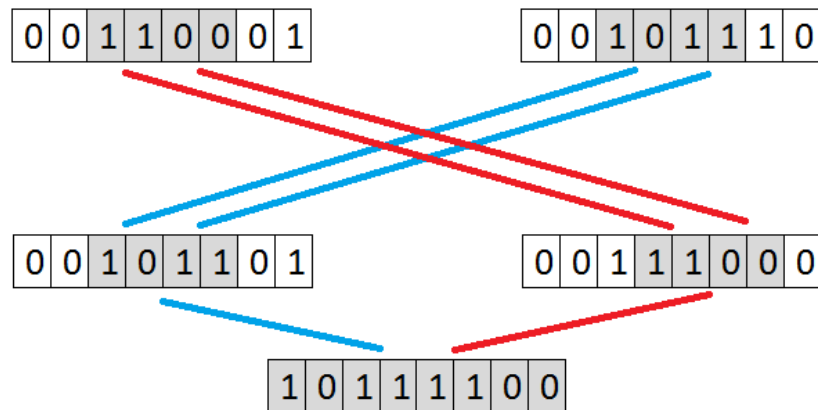
Los principios básicos de los algoritmos genéticos (AG) fueron propuestos por primera vez en Holanda, inspirados por el mecanismo de selección natural, donde el más apto será probablemente el ganador en un ambiente de competencia, por lo que tienen una analogía directa con la evolución natural (Man, Tang, & Kwong, 2001). Mediante la utilización de algoritmos genéticos se puede suponer que la solución a un problema es un individuo que puede ser representado por un conjunto de parámetros, los cuales se les conoce como los genes de un cromosoma, que pueden ser estructurados como un valor en formato binario. Se utiliza un valor positivo conocido como el valor de aptitud (fitness value) para cuantificar el grado de calidad de un cromosoma, que generalmente se correlaciona con la función objetivo del problema y de esta manera poder discriminar que individuos son los óptimos para la siguiente generación.

A medida que los genes evolucionan, los cromosomas más aptos tienden a producir descendientes de buena calidad, los cuales significan una mejor solución al problema, la evolución de los genes se hace mediante ciclos, donde se usan los cromosomas del ciclo actual (también llamados padres) para producir la siguiente generación, a los cuales también se les llama hijos (Man, Tang, & Kwong, 2001).

Los genes padres se mezclan y son combinados para producir la siguiente generación de hijos, a esta operación se le denomina cruce de cromosomas. Los hijos están sujetos a mutar como otro proceso de selección natural, y se espera

que como resultado de la evolución de los genes se produzcan los mejores cromosomas que dejarán una mejor descendencia, lo cual brinda mayores probabilidades de sobrevivir a la siguiente generación.

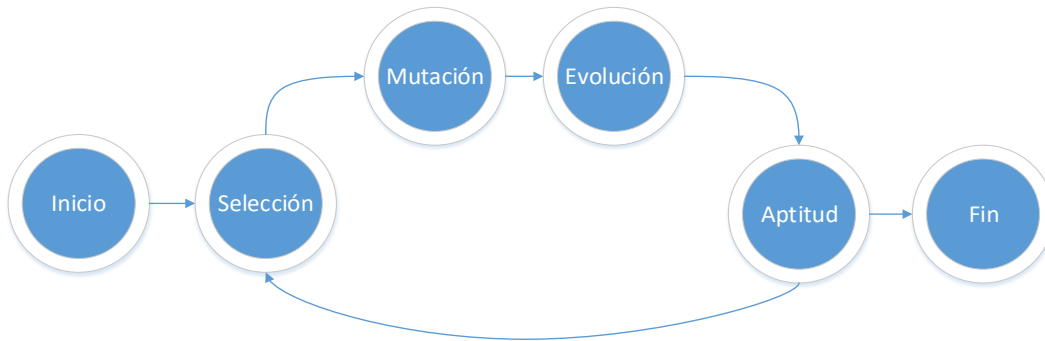
Figura 5. **Cruza de cromosomas**



Fuente: elaboración propia.

El ciclo de evolución se repite hasta que se llega a un criterio de aceptación (que se define antes de empezar el ciclo evolutivo), que puede ser un número finito de ciclos, un valor cuantitativo de variación entre generaciones o un valor de aptitud predefinido.

Figura 6. **Proceso de un algoritmo genético**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.1. Población inicial

Los algoritmos genéticos iteran a partir de una población inicial, la cual usualmente se define de manera aleatoria con un conjunto de elementos del mismo origen, características similares y probabilidad uniforme, la calidad de la población inicial influye de manera directa y positiva en la convergencia al criterio de aceptación (Moujahid, Inza, & Larrañaga, 2004).

El tamaño de la población es un factor clave en el éxito del algoritmo, una población muy pequeña implica pocas posibilidades de soluciones óptimas, mientras que una población muy grande implica que existirán muchas soluciones y encontrar la óptima puede demandar muchos recursos y volver lento el algoritmo genético (Arranz & Parra, 2007).

#### 4.2.2. Función objetivo y proceso de selección

La función fitness es una parte fundamental del algoritmo genético ya que permite hacer una selección de los individuos, dicha selección se hace usualmente en base a una combinación de objetivos definidos y parámetros numéricos mediante operaciones aritméticas, sin embargo se ha analizado que este enfoque puede no resultar muy favorable si no se tienen datos numéricos precisos, dando resultados no concluyentes lo que puede contrarrestarse si se conocen parámetros internos propios del experimento, que puedan servir como punto de comparación para los resultados obtenidos (Diaz & Hougen, 2008).

Existen diversos enfoques que se le pueden dar a proceso de selección de individuos, tales como (Arranz & Parra, 2007):

- Selección por rueda de ruleta: este método pretende darle mayor probabilidad de selección a los cromosomas que obtienen una mayor valoración en la función *fitness*.
- Selección por rango: este método asigna un rango numérico a cada cromosoma en base a su valoración obtenida de la función *fitness*, es parecido al método de selección por ruleta, pero distribuye de manera más equitativa la probabilidad de selección.
- Selección elitista: este método busca garantizar que se tiene el mejor cromosoma en la siguiente generación, es decir, puede utilizar cualquiera de los métodos descritos anteriormente pero añade el cromosoma con la mejor valoración sino hubiera sido seleccionado, con esto se busca preservar el mejor cromosoma para la siguiente generación.
- Selección por estado estacionario: este método busca reemplazar los cromosomas menos aptos de la generación anterior y reemplazarlos con los mejores de la nueva generación, a manera de preservar los mejores individuos de cada generación.

- Selección jerárquica: este método utiliza ciclos para la selección de cromosomas, donde el primer ciclo evalúa características generales, elevando los criterios en cada ciclo a una selección más detallada, haciendo la selección más rápidamente.

### **4.2.3. Cruce y mutación**

¿Es realmente necesario cruzar y mutar? El enfoque de computación inspirada en la naturaleza sugiere utilizar ambos, la cruce genera un nuevo individuo como resultado de la recombinación de cromosomas de dos padres, mientras que la mutación se refiere a la creación de un nuevo individuo modificando el individuo original resultado de la cruce (un solo padre), dicha modificación puede llevarse a cabo en diferente grado, desde mínimo o sufrir un gran cambio (Doerr, Happ, & Klein, 2008).

Los procesos de cruce y mutación son parte fundamental del algoritmo genético, existe evidencia que sugiere que asignar probabilidades de cruce y mutación son críticos para el éxito del algoritmo, determinar dicha probabilidad depende del problema mismo que se está tratando de resolver, no se tiene evidencia de que al utilizar una mayor probabilidad de cruce y baja mutación (o viceversa) obtenga un mejor resultado, más si se desea guardar la diversidad de los cromosomas se debe utilizar una probabilidad de cruce pequeña, para iniciar los experimentos se recomienda utilizar probabilidad de cruce y mutación del 50 % o bien utilizar una probabilidad de cruce alta y mutación pequeña, podría ser 80 % de cruce y 20 % de mutación (Lin, Lee, & Hong, 2003).

#### **4.2.4. Ventajas de utilizar algoritmos genéticos como enfoque de optimización**

La optimización es el proceso de hacer mejorar algo ya existente, puede ser un producto, un servicio, una idea, etc. Consiste en intentar variaciones de un concepto inicial y usar la información obtenida para mejorar una idea (Haupt & Haupt, 2004). Mediante algoritmos programables podemos utilizar computadoras para optimizar procesos e ideas haciendo uso de información digital, permitiéndonos encontrar la mejor solución a los problemas.

La mejor solución implica que hay más de una solución y la calidad del resultado se puede cuantificar, además es relativa al problema formulado, al método utilizado y las condiciones en las que se da el problema.

Respecto a los algoritmos genéticos la optimización es el proceso de ajustar los parámetros de entrada, procesos matemáticos o experimentos para encontrar el máximo o mínimo resultado esperado. Los parámetros consisten en una serie de variables de entrada, los procesos se definen como algoritmos que pueden estimar un valor o costo de aptitud. Gracias a su simplicidad, facilidad de uso, pocos requerimientos y que brinda una perspectiva global los algoritmos genéticos son ideales para el estudio de problemas de optimización.

Algunas de las ventajas de utilizar algoritmos genéticos son (Haupt & Haupt, 2004):

- Optimización con variables continuas o discretas
- No necesita información de derivación
- Búsqueda simultánea entre una amplia muestra de costos
- Maneja gran cantidad de variables
- Se puede ejecutar paralelamente en computadoras

- Optimiza variables con costos extremadamente complejos
- Provee una lista de variables de optimización y más de una solución
- Funciona con información numérica generada, información experimental o funciones analíticas

#### 4.2.5. Aplicaciones prácticas de algoritmos genéticos

Las aplicaciones de los algoritmos genéticos son extensas en diversas ramas, a continuación se presentan las más relevantes (Rodríguez):

- Aprendizaje máquina (*machine learning*): los algoritmos genéticos se utilizan para la predicción del tiempo o la estructura de una proteína, para desarrollar reglas para sistemas de clasificación de aprendizaje, entre otros.
- Economía: apoya el modelado de procesos de innovación y desarrollo de estrategias de puja y mercados financieros.
- Sistemas inmunes: permite modelar sistemas inmunes naturales, mutación somática y analizar familias de genes que evolucionan con el tiempo.
- Ecología: permite modelar fenómenos ecológicos, co-evolución de parásito y huésped, simbiosis, etc.
- Evolución y aprendizaje: se han utilizado en el estudio de la relación entre el aprendizaje y la evolución de la especie.
- Sistemas sociales: apoya el estudio del comportamiento social en colonias de insectos.

### **4.3. Computación móvil**

La computación móvil trata acerca de utilizar computadoras portables de tamaño pequeño, como *hand-helds* para ejecutar aplicaciones independientes o que acceden a otros recursos como redes inalámbricas por usuarios nómadas o móviles (Helal, s.f.).

Es el proceso de realizar cálculos computacionales en un dispositivo móvil; es la habilidad de utilizar tecnología para conectarse de manera inalámbrica, utilizar información centralizada y software de tamaño pequeño y portable para realizar cálculos computacionales (s.a., 2007).

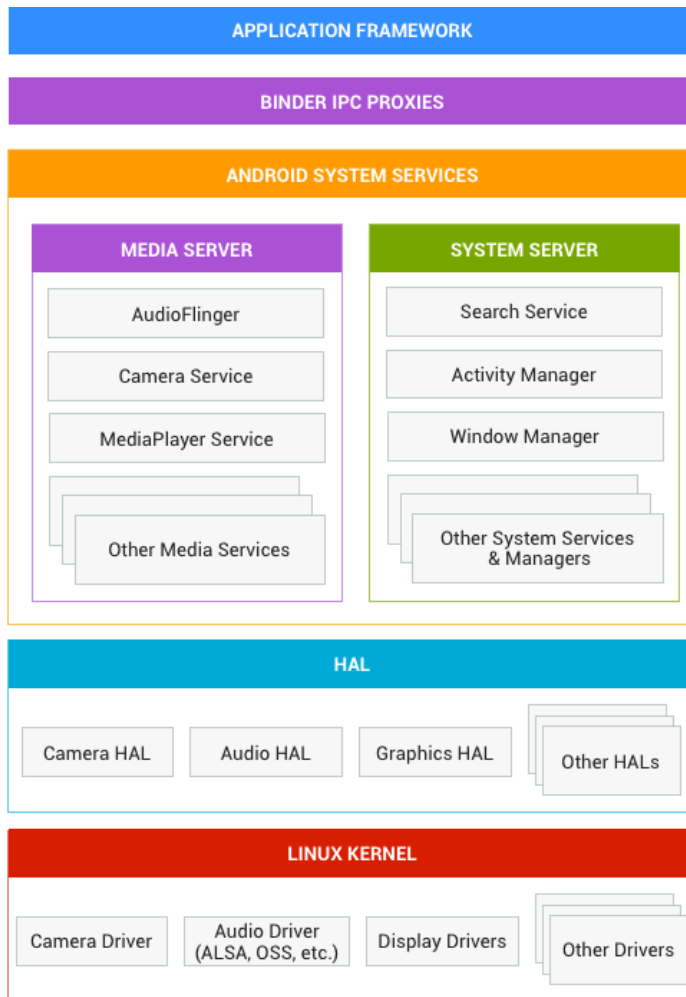
La computación móvil se refiere a trasladar la capacidad de procesamiento de información de una computadora hacia un dispositivo móvil como una Laptop, *Tablet* o *Smartphone*, a través de aplicaciones ligeras en la utilización de recursos y con una capacidad de procesamiento igual o aceptable.

#### **4.3.1. Arquitectura de computación y aplicaciones móviles**

En una arquitectura de computación móvil existen distintos elementos fundamentales separados en capas, como el sistema operativo y las librerías que utiliza para funcionar, el *framework* de aplicaciones y las aplicaciones de usuario (Sheikh, Ganai, Malik, & Dar, 2013), como se ilustra en la Figura 10 para el sistema operativo Android:



Figura 7. **Arquitectura del Sistema Operativo Android**

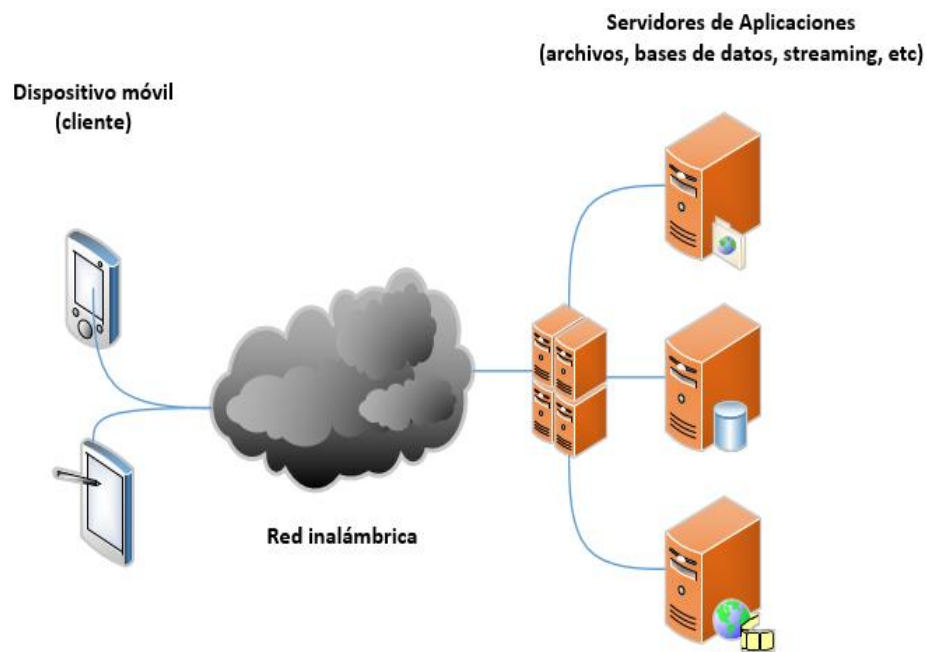


Fuente: <https://source.android.com/devices/>

Respecto a las aplicaciones móviles podemos encontrar dos arquitectura básicas (Mehta, 2012), las arquitecturas *stand-alone* o independientes (como por ejemplo la calculadora del sistema operativo, la aplicación de la cámara, contactos, etc) y las cliente-servidor (como por ejemplo Facebook, Twitter, Gmail, etc), la diferencia fundamental es que la primera no necesita comunicarse con un servidor externo u otro cliente para funcionar, la captura de información y

procesamiento de datos se hace dentro de la aplicación misma, mientras que en la arquitectura cliente-servidor el dispositivo móvil cumple la función de cliente que se conecta a través de una red inalámbrica (por ejemplo *wifi* o internet) hacia un servidor o un grupo de servidores que contiene recursos como transferencia de archivos FTP, multimedia, *streaming*, bases de datos, etc, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. **Arquitectura de aplicaciones móviles cliente-servidor**



Fuente: elaboración propia.

La arquitectura más comúnmente utilizada en la mayoría de aplicaciones es cliente-servidor, debido a que le permite a la aplicación ser dinámica, obteniendo actualizaciones para mejoras de rendimiento, corrección de errores o nuevas funcionalidades, entre otros, estas actualizaciones pueden ser estáticas o dinámicas, las estáticas reciben un contenido en un formato predeterminado,

mientras que las dinámicas son accedidas mediante APIs (como por ejemplo, la API de google charts) (Mehta, 2012).

Entre las ventajas de las arquitecturas *stand-alone* podemos mencionar que son más ligeras en el uso de recursos, usualmente son nativas al sistema operativo, no dependen conexión a internet u otra red inalámbrica para funcionar, la desventaja más evidente es que no se actualiza periódicamente quedando obsoleta en poco tiempo y no permite interacción con otros usuarios.

Entre las ventajas de las arquitecturas cliente-servidor podemos mencionar que se actualizan periódicamente, esto brinda corrección de errores y nuevas funcionalidades, permite compartir información con otros usuarios y/o redes, su desventaja más significativa es que requiere usualmente más recursos del sistema, y su desarrollo es un poco más tardado en comparación con aplicaciones *stand-alone*.

#### **4.3.2. Optimización de aplicaciones móviles y *benchmarking***

Existen soluciones como New Relic (<http://newrelic.com/>) que se encargan de analizar aplicaciones móviles mostrando el rendimiento de cada acción en tiempo real, este tipo de soluciones permiten registrar el tiempo de respuesta de cada acción y poder trabajar en mejorar su rendimiento, analiza errores y hace recomendaciones en base al análisis, lleva registro de utilización del CPU, memoria, disco duro y bases de datos a nivel del dispositivo móvil, además permite comparar el rendimiento de las aplicaciones en diferentes dispositivos y sistemas operativos, lo cual resulta muy útil cuando no se dispone de múltiples dispositivos físicamente.

Específicamente para el sistema operativo Android de Google se publican en su sitio web <http://developer.android.com/> diversas maneras para optimizar el rendimiento de las aplicaciones que corren sobre dicho sistema operativo, dichas recomendaciones se toman como buenas prácticas para desarrollar las aplicaciones basadas en este sistema operativo, entre las más importantes se puede mencionar (Android Developers, 2015):

- Para obtener el máximo rendimiento en términos de procesamiento de datos se debe priorizar el desarrollo en términos del algoritmo, estructuras de datos y el acceso a dichas estructuras, se debe evitar definir estructuras de datos y asignar memoria a menos que sea realmente necesario.
- Tomar en consideración que no siempre se tiene la misma versión del sistema operativo ni de la MV de Java corriendo, esto puede ser un factor determinante en las pruebas de rendimiento, una aplicación en particular puede mostrar un buen rendimiento sobre una versión y uno no tan bueno con otra versión. Para mitigar este riesgo se puede hacer uso de plataformas dedicadas a las pruebas de aplicaciones en distintos dispositivos físicos con distintas versiones del sistema operativo, como por ejemplo TestObject.com, que permite realizar pruebas automatizadas de aplicaciones en cientos de dispositivos reales.
- La memoria es un recurso limitado y costoso, por eso se debe guardar estrictamente su uso para situaciones que realmente lo ameriten, evitando crear objetos innecesarios o que no sean utilizados. Cuando se utilizan muchos objetos dentro de una aplicación se fuerza al recolector (*garbage collector*) del sistema operativo a ejecutarse de manera periódica, afectando la experiencia del usuario que percibe esta acción como una interrupción al flujo de la aplicación, como que ésta tuviera "hipo".
- Se mencionaba inicialmente que uno de los aspectos más importantes en la optimización del procesamiento son las estructuras de datos, la

recomendación es evitar el uso de arreglos multidimensionales, y en su lugar crear múltiples arreglos de una dimensión.

- En general evitar crear objetivos temporales de corto plazo, menos objetos creados significa evitar llamadas frecuentes al recolector de basura, que tiene un impacto directo en rendimiento y experiencia de usuario.
- Se estima que funciones estáticas tienen un rendimiento 15 % a 20 % mayor en comparación con funciones virtuales.
- Debido a que las funciones virtuales representan un grado de procesamiento mayor, se recomienda no utilizarlas y acceder a las propiedades de las clases de manera directa, por ejemplo, en lugar de definir métodos virtuales para acceder atributos como *get* y *set*, la recomendación es acceder directamente al atributo, si bien es una buena práctica en la mayoría de lenguajes orientados a objetos, se puede obtener un micro incremento en el rendimiento utilizando esta recomendación.
- Evitar el uso de variables numéricas con puntos flotantes (*float* o *double*) si se pueden utilizar enteros numéricos (*int*), el acceso a tipos de datos "*float*" o "*double*" es dos veces más lenta que el acceso a los tipos "*int*".
- Por último, se recomienda la medición del rendimiento de cada acción de la aplicación, monitorear tiempos de respuesta, consumo de recursos y experiencia de usuario para identificar cuellos de botella y métodos o algoritmos que requieran optimización.

Si bien las recomendaciones expuestas se consideran "micro optimizaciones" en conjunto pueden ayudar a incrementar de manera notable el rendimiento de las aplicaciones.

## **5. MARCO METODOLÓGICO**

### **5.1. Tipo de investigación**

La presente investigación es del tipo descriptiva debido a que se analizó la manera de mejorar el rendimiento de los algoritmos genéticos existentes que apoyan el reordenamiento vial, tomando en consideración las diversas variables y eventos aleatorios que lo afectan, analizando el sistema como un todo y no cada parte por separado, con el objetivo de ser utilizados en dispositivos móviles.

### **5.2. Diseño de investigación**

La investigación propuesta se realizó mediante la investigación y experimentación de los algoritmos genéticos actuales, a los cuales se les agregó eventos aleatorios como accidentes, densidad del tráfico vehicular y semáforos para determinar de una manera óptima la función fitness que determinaría las rutas eficientes, en la fase de experimentación se varió el valor de cada parámetro de la función fitness con el objetivo de encontrar el valor óptimo para cada uno, éste fue el que dio como resultado el valor óptimo para todo el sistema, permitiendo evaluar la ruta óptima desde los enfoques de distancia y tiempo, sirviendo como herramienta para analizar el reordenamiento vial, además se hicieron pruebas de estrés para determinar los valores mínimos e ideales de hardware que serán necesarios para la correcta ejecución de los algoritmos genéticos en dispositivos móviles, estas pruebas también sirvieron para determinar si las mejoras hechas en el rendimiento de los algoritmos genéticos permitiría su uso en dispositivos móviles.

### **5.3. Método de investigación**

La investigación se desarrolló en tres fases, las cuales son: diseño de la investigación, experimentación y por último la presentación de resultados.

#### **5.3.1. Fase I: diseño de la investigación**

El objetivo de esta fase fue definir qué debía hacerse para lograr cada objetivo específico y cómo se llevaría a cabo la investigación, experimentación e implementación de los algoritmos genéticos, el lenguaje de programación y las librerías externas a utilizar, que permitieron la implementación de los algoritmos sin tener que escribirlo desde cero.

La tecnología a utilizar para la implementación fue la que permitió la definición de la función *fitness* en los algoritmos genéticos, tomando en consideración las variables distancia, tiempo y velocidad, y eventos aleatorios como accidentes, densidad vehicular y semáforos, inicialmente se definió la distancia, tiempo y velocidad promedio para rutas ya conocidas (como por ejemplo: la ruta al trabajo y la ruta a la universidad), así mismo, los eventos aleatorios como accidentes y densidad vehicular se simularon en base a estadísticas de la Municipalidad de Guatemala, por último, mediante observación directa se obtuvo el promedio de tiempo de espera de los semáforos de las rutas ya conocidas, éste fue el punto de partida para definir la función *fitness* inicial e iniciar con la investigación y experimentar con un primer algoritmo para validar que tanto se apega a la realidad.

### **5.3.1.1. Análisis de variables y eventos aleatorios**

Para determinar los valores óptimos de cada parámetro se definieron sets de valores de prueba para cada parámetro y corrieron iteraciones para cada valor, se evaluó que el sistema como un todo se apegue a la realidad en al menos 75 %, se escogió como óptimo el valor de cada parámetro que maximizaba este resultado, para dichas pruebas se utilizaron bases de datos de tráfico vehicular existentes. Debido a que al aplicar algoritmos genéticos no se obtiene siempre el mismo resultado necesariamente, los sets de pruebas estuvieron orientados a poder obtener un conjunto de resultados.

#### **5.3.1.1.1. Análisis de resultados**

El conjunto de resultados obtenidos a partir de los sets de prueba fueron analizados mediante estadística descriptiva para sacar conclusiones específicas para cada parámetro y hacer la comparación de los datos obtenidos contra la realidad para saber qué tanto se apegaban.

Con el objetivo de determinar los valores mínimos e ideales de consumo de recursos de hardware que el algoritmo genético necesita se realizaron pruebas de estrés con herramientas externas específicas para el lenguaje de programación seleccionado, la herramienta a seleccionada fue la que permitió medir el tiempo de respuesta del algoritmo genético, así como su consumo de CPU y memoria RAM, el espacio de almacenamiento se obtuvo viendo las propiedades del archivo utilizando el explorador de archivos de



Windows. Estas pruebas permitieron establecer los valores mínimos e ideales de recursos de hardware necesarios para el correcto funcionamiento del algoritmo genético y un tiempo de respuesta menor a 25 segundos, el cual se ha estimado, y además, mejorar su rendimiento para que pueda ser utilizado en dispositivos móviles. Las pruebas de estrés ayudaron a identificar oportunidades de mejora en el rendimiento del algoritmo, se utilizó una metodología iterativa, en la cual, se realizaron pruebas de estrés después de una serie de cambios realizados en el algoritmo genético para determinar si su rendimiento mejoraba o empeoraba, en caso que empeorara se regresaba a la iteración anterior para empezar una nueva.

En esta fase la investigación se basó en las fuentes secundarias analizadas, experimentando con los algoritmos genéticos existentes, analizando las ventajas y desventajas que proveen, dando como resultado el algoritmo genético base que se utilizó en el resto de la investigación, el cual permitió evaluar si una ruta es óptima desde los enfoques de distancia y tiempo, además fue modificado de acuerdo a los resultados de la fase de experimentación.

### **5.3.2. Fase II: experimentación**

Determinar el grado de afectación que tiene cada variable y evento en la función *fitness* permitió obtener resultados lo más apegados a la realidad posible, y mediante las pruebas de estrés se obtuvo el mejor rendimiento posible, y de acuerdo al resultado de ambas pruebas se realizaron cambios en la función *fitness* y el algoritmo genético como tal, para cumplir con los objetivos de definir

una función *fitness* funcional y que el algoritmo genético definido sirviera como herramienta para el análisis del reordenamiento vial. Se realizaron sets de pruebas después de cada cambio en el algoritmo genético para validar que dichos cambios mejoran el rendimiento y/o minimizan el consumo de hardware, estos cambios fueron optimizar la manera como se establece la afectación que tiene cada variable y la generación de los eventos aleatorios (semáforos, accidentes y densidad del tráfico vehicular).

#### **5.3.2.1. Experimentación con algoritmo genético**

El objetivo de esta fase fue experimentar con el algoritmo genético definido inicialmente en la primera fase, sirvió como punto de partida y permitió tener un parámetro de comparación, a medida que se realizaban las pruebas de estrés con el algoritmo genético, éste fue modificado ya que se buscaba no solo que fuera funcional sino también óptimo, no se agregaron o quitaron parámetros de los que fueron definidos en los objetivos, sino que se buscó ajustar la función *fitness* en base a los resultados de la experimentación que se llevó a cabo mediante pruebas de estrés.

Las pruebas de estrés permitieron determinar el grado de afectación positiva o negativa de cada variable (espacio, tiempo y velocidad) y evento (accidentes, densidad vehicular y semáforos) al resultado, a manera de encontrar el valor óptimo de cada parámetro, que generara la solución óptima para todo el sistema como tal. La manera cómo se estudió el efecto que tiene cada variable fue mediante pruebas de estrés, variando los valores de cada variable con sets de valores de prueba, dichas pruebas se realizaron utilizando la tecnología seleccionada, utilizando para todas

las pruebas la misma librería para que los resultados sean uniformes. Los sets de valores de prueba se definieron a manera de realizar 50 iteraciones con el algoritmo genético, es decir que para cada set de prueba definido se realizarán 50 iteraciones de prueba, esto permitió generar suficiente información para que sea analizada posteriormente. El resultado de las pruebas de estrés se analizó mediante estadística descriptiva, permitiendo visualizar gráficamente el resultado, sacar conclusiones y determinar el valor óptimo de cada parámetro.

#### **5.3.2.2. Análisis de rendimiento - *benchmarking***

El análisis de rendimiento se realizó a través de pruebas de *benchmarking*, las cuales consistieron en utilizar herramientas que sirven específicamente para medir parámetros de utilización de hardware.

##### **5.3.2.2.1. Pruebas de estrés**

Mediante pruebas de estrés se determinó cuáles son los valores óptimos de recursos de hardware necesarios para que los algoritmos puedan funcionar correctamente y ser utilizados a futuro en dispositivos móviles, estas pruebas de estrés se realizaron mediante la herramienta seleccionada en la fase de diseño, para determinar los valores mínimos e ideales se corrieron 25 iteraciones de pruebas, los valores de hardware mínimos se tomaron de los resultados más bajos de las pruebas, mientras que los valores de hardware ideales se tomaron del promedio de los resultados de las pruebas, se estableció que el rendimiento del algoritmo genético es

adecuado para ser utilizado en dispositivos móviles si el tiempo de respuesta promedio no sobrepasaba los 25 segundos, si el algoritmo genético no cumple esta condición se optimizaba de manera que no se modificaba el resultado del algoritmo genético calculando rutas, sino únicamente el resultado de las pruebas de estrés que miden el rendimiento, después de cada modificación se realizarán nuevamente 25 iteraciones de prueba para comprobar su rendimiento, las modificaciones al algoritmo genético finalizaron cuando se obtuvo un tiempo de respuesta promedio menor a 25 segundos.

En esta fase se hizo uso de fuentes primarias y secundarias tales como artículos de investigación, trabajos de graduación de maestría o doctorado, entre otros. El objetivo fue determinar posibles soluciones y establecer la solución más óptima.

### **5.3.3. Fase III: publicación de resultados**

Esta fase consistió en publicar los resultados y las conclusiones a las que se llegaron en la investigación de acuerdo a los objetivos planteados.

## **5.4. Técnicas de recolección de información**

Debido a que ya existían diversos enfoques en la resolución del problema planteado, se hizo uso de revisión documental como primer paso para recolectar información, se estudiaron las fuentes bibliográficas en las cuales se utilizaron

los algoritmos genéticos como método de optimización, además, se utilizaron bases de datos de tráfico vehicular ya existentes, y se apoyó el diseño de la investigación con estadísticas de tráfico vehicular en la ciudad capital obtenidas de la Policía Municipal de Tránsito (PMT) de la ciudad de Guatemala. Entre las fuentes bibliográficas utilizadas se puede mencionar artículos de investigación científica, trabajos de graduación de maestría o doctorado y libros publicados en el año 2010 o más recientes.

## 5.5. Variables e indicadores

Tabla I. **Variables e indicadores de la investigación**

Variable	Sub-variable	Indicador	Tipo
<b>Cálculo de rutas óptimas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distancia</li> <li>• Tiempo</li> <li>• Velocidad</li> <li>• Accidentes</li> <li>• Densidad del tráfico vehicular</li> <li>• Semáforos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo</li> <li>• Distancia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuantitativo</li> </ul>
<b>Rendimiento de algoritmos genéticos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CPU</li> <li>• Memoria</li> <li>• Disco</li> <li>• Tiempo de respuesta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CPU</li> <li>• Memoria</li> <li>• Disco</li> <li>• Tiempo de respuesta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuantitativo</li> </ul>
<b>Utilización de recursos de hardware</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CPU</li> <li>• Memoria</li> <li>• Disco</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CPU</li> <li>• Memoria</li> <li>• Disco</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cuantitativo</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

## 6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Análisis del tráfico vehicular como sistema de información

Se analizó el tráfico vehicular como un sistema de información, donde los datos que se generaron a partir de los vehículos y el entorno se procesaron para identificar rutas óptimas que permitieran una mejor locomoción. El sistema tiene el objetivo de encontrar rutas óptimas mediante la gestión de la información siguiente:

- ID origen: es un valor numérico que representa un punto correspondiente a una coordenada geométrica, el cual puede alcanzar un punto destino.
- ID destino: es un valor número que representa un punto correspondiente a una coordenada geométrica, al cual solo se puede llegar mediante puntos específicos.
- Distancia: se representó como un valor numérico que define la distancia en metros entre dos puntos.
- Tiempo: se representó como un valor número que define el tiempo en minutos entre dos puntos.
- Rapidez: se representó como un valor numérico resultado de la división de la distancia y el tiempo, se calcula en metros por minuto y se presenta en kilómetros por hora.
- Densidad del tráfico vehicular: se definió como un valor numérico cuyo valor identifica tres tipos de densidad vehicular entre dos puntos, 1 representa una densidad vehicular baja, 2 una densidad vehicular media y 3 una densidad vehicular alta.

- Probabilidad de accidentes: se definió como un valor numérico cuyo valor identifica tres probabilidades de accidentes entre dos puntos, 1 representa una probabilidad baja, 2 una probabilidad media y 3 una probabilidad alta.
- Tiempo de espera en semáforos: se representó como un valor numérico que define la cantidad de semáforos que existen entre dos puntos.
- Coordenada geométrica: representa la coordenada geométrica dada por la latitud y longitud de un punto en específico.

La Tabla II muestra 17 puntos que se tomaron de referencia para determinar el impacto de cada parámetro de estudio y como resultado la determinación de la función fitness y elaboración algoritmo genético, estos puntos corresponden a diversas rutas entre la 18 calle y 34 avenida zona 5 y el edificio Torre, en la zona 8.

La Figura 9 muestra la representación gráfica y distribución de cada punto sobre un mapa virtual.

**Tabla II. Puntos de referencia para determinación de función Fitness**

ID Origen	ID Destino	Distancia	Tiempo	Velocidad	Tráfico	Accidentes	Semáforos
1	2	120	1	7.2	1	1	0
1	3	250	1	15	1	1	0
2	4	300	1	18	1	1	0
2	5	220	1	13.2	1	1	0
2	6	450	2	13.5	1	1	0
3	4	180	1	10.8	1	1	0
4	5	500	1	30	1	1	0
4	7	900	3	18	2	1	0
5	7	850	3	17	2	1	0
5	8	450	1	27	1	1	0
6	8	230	1	13.8	1	1	0

Continúa Tabla II.

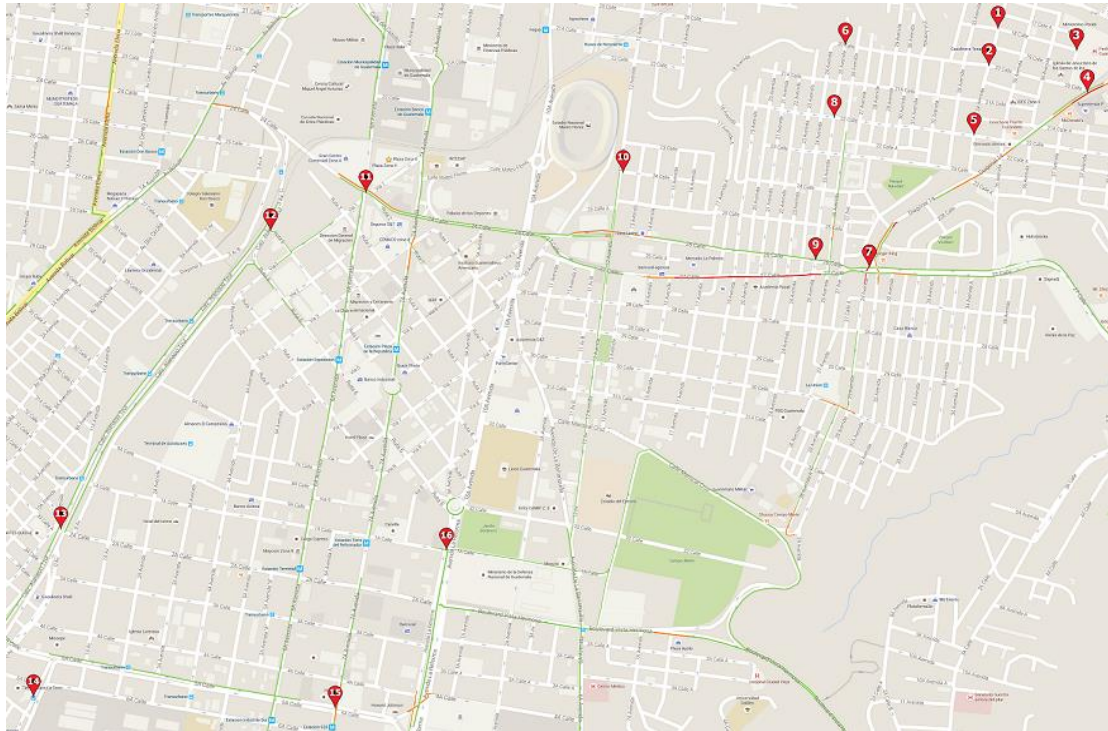
7	9	170	1	10.2	2	1	3
7	16	2300	6	23	2	2	5
8	9	450	1	27	2	1	0
8	10	1000	4	15	1	1	0
9	10	800	3	16	2	1	0
9	11	1400	4	21	2	1	0
10	11	1000	3	20	2	1	1
10	16	1600	6	16	2	1	3
11	12	400	1	24	1	1	1
11	99	2500	6	25	2	2	11
11	15	1900	6	19	2	1	9
12	13	1100	2	33	2	1	3
13	99	950	3	19	2	1	2
15	99	1000	3	20	1	1	4
16	99	1800	6	18	2	2	7
16	15	750	2	22.5	2	2	2
17	17						

Fuente: elaboración propia.

Matriz de tráfico, que contiene 17 puntos identificados para el cálculo de rutas a utilizar en el experimento, se indican puntos origen y destino mediante coordenadas geográficas y los parámetros de estudio: distancia, tiempo, velocidad, accidentes, semáforos y densidad vehicular.



Figura 9. **Puntos de referencia para determinación de función *fitness* sobre mapa virtual**



Fuente: Elaboración propia.

Representación gráfica de los 17 puntos registrados en la matriz de tráfico. Unificando los puntos de referencia con la información de distancia, tiempo, densidad vehicular, accidentes y semáforos se completa el sistema de información, cuya representación gráfica se muestra en la Figura 10, que es la base para la función *fitness*.



## **6.2. Variables analizadas y su impacto en el cálculo de rutas**

Las variables analizadas y su impacto en el cálculo de rutas se describen a continuación:

La distancia representa el espacio entre cada punto de estudio presentado en la sección anterior, es un valor numérico finito que no cambia con el tiempo, el momento o escenario, además no se ve afectada por ningún otro parámetro de estudio, siempre será el mismo.

El tiempo representa el período en minutos que se necesita para recorrer una distancia específica, este tiempo representa un escenario ideal donde no se toma en consideración la afectación por la densidad del tráfico, accidentes y los semáforos y se toma en consideración como un valor entero. En su manera más simple el cálculo de una ruta se hace en base a la sumatoria de los tiempos que toma transitar cada punto establecido.

La velocidad representa la rapidez promedio como el resultado de la división entre la distancia y el tiempo, para objetivos del estudio, se toma como la aptitud de cada ruta, asumiendo que no es un valor subjetivo al conductor. Se ve afectado por el tiempo, mas no por la distancia.

La densidad del tráfico vehicular se analizó a manera de obtener el grado de afectación que tiene en el cálculo de rutas, para ello se identificó de acuerdo a tres tipos que son bajo, medio y alto, bajo representa una densidad que se podría comparar a conducir en un fin de semana, donde la cantidad de vehículos en circulación no es tan significativa como para causar un embotellamiento, medio representa una densidad que se podría comparar con conducir en un día entre semana fuera de hora pico, por último, alto representa una densidad que

se podría comparar con conducir en un día entre semana en hora pico. La densidad del tráfico vehicular impacta de manera directa en el cálculo de rutas, afectando el tiempo necesario para trasladarse de un punto a otro, en las pruebas realizadas se pudo determinar que la relación entre la densidad vehicular y el tiempo es del 25 %, es decir, para una densidad vehicular baja el tiempo “base” se incrementa en un 25 %, para una media un 50 % y para una alta 75 %.

Para el análisis de la probabilidad de un accidente se obtuvieron los siguientes datos suministrados por los Bomberos Municipales de Guatemala:

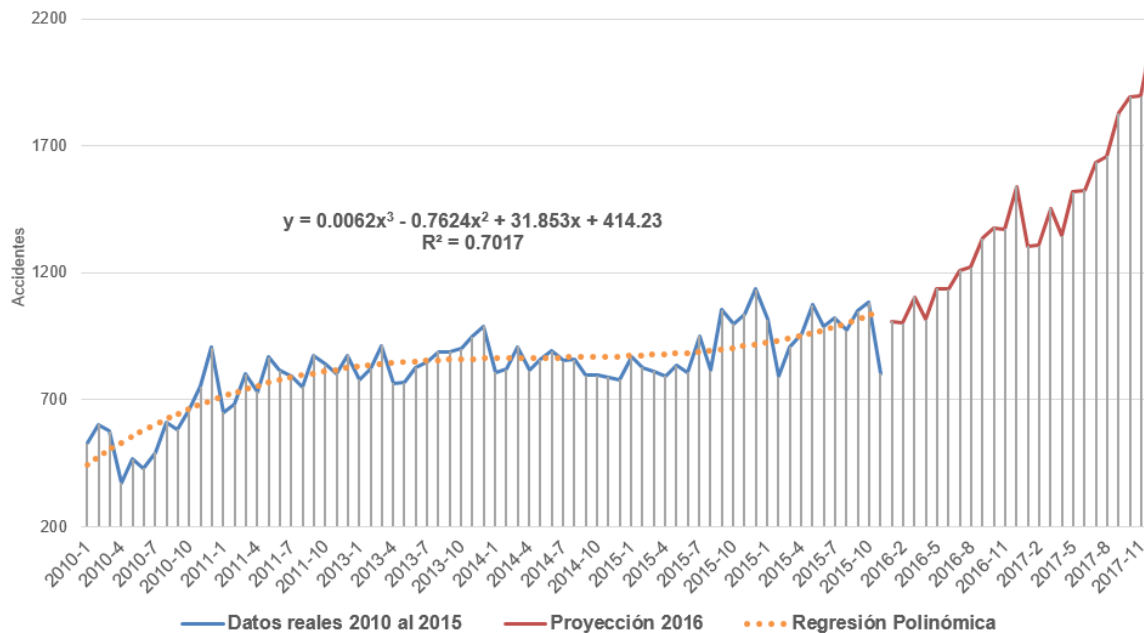
**Tabla III. Cantidad de accidentes de tránsito atendidos por los Bomberos Municipales de Guatemala, año 2010 a 2015**

MES	2010	2011	2012	2013	2014	2015
ENERO	528	651	779	809	868	1016
FEBRERO	602	680	823	820	827	791
MARZO	575	800	912	908	812	909
ABRIL	373	731	765	814	793	961
MAYO	466	868	767	857	835	1074
JUNIO	430	816	826	891	809	987
JULIO	492	792	850	853	951	1022
AGOSTO	611	751	890	858	814	973
SEPTIEMBRE	583	876	888	795	1053	1050
OCTUBRE	662	839	902	796	999	1082
NOVIEMBRE	752	802	950	789	1038	802
DICIEMBRE	906	875	989	780	1136	0

Fuente: Bomberos Municipales de Guatemala.

Con base a esta información, se realizó una regresión polinomial, con el objetivo de encontrar la ecuación matemática que describiera el comportamiento de los datos obtenidos; además, se realizó un análisis de estacionalidad sobre los datos, para que el resultado sea lo más apegado a la realidad posible, la ecuación se obtuvo mediante la utilización de Microsoft Excel, y se muestra a continuación:

**Figura 11. Regresión polinomial de accidentes de tránsito y proyección 2016 y 2017**



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 11 se muestran gráficamente con una línea color azul los datos de accidentes de tránsito proveídos por los Bomberos Municipales de Guatemala, a los cuales se les aplicó una regresión polinomial de grado 3 para obtener la ecuación que describa su comportamiento (denotado en la gráfica por la línea punteada color naranja); por último, se utilizó dicha ecuación para

proyectar la cantidad de accidentes que ocurrirían en los años 2016 y 2017 aplicando el cálculo de la estacionalidad por mes, los datos obtenidos se muestra a continuación:

**Tabla IV. Cantidad de accidentes de tránsito reales entre 2010 y 2015 y proyectados a futuro para 2016 y 2017**

Mes	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Enero</b>	528	651	779	809	868	1016	1008	1306
<b>Febrero</b>	602	680	823	820	827	791	1003	1309
<b>Marzo</b>	575	800	912	908	812	909	1105	1453
<b>Abril</b>	373	731	765	814	793	961	1017	1347
<b>Mayo</b>	466	868	767	857	835	1074	1138	1518
<b>Junio</b>	430	816	826	891	809	987	1136	1525
<b>Julio</b>	492	792	850	853	951	1022	1209	1634
<b>Agosto</b>	611	751	890	858	814	973	1220	1659
<b>Septiembre</b>	583	876	888	795	1053	1050	1337	1828
<b>Octubre</b>	662	839	902	796	999	1082	1378	1894
<b>Noviembre</b>	752	802	950	789	1038	802	1372	1895
<b>Diciembre</b>	906	875	989	780	1136		1540	2138

Fuente: elaboración propia.

Con base a esta información, se obtiene un estimado de accidentes de tránsito que ocurrirán en un mes en particular, promediando 30 días del mes se puede obtener un promedio de accidentes por día, ejemplo:

Para febrero 2016, se estiman 1003 accidentes de tránsito, lo cual es en promedio 34 accidentes por día, si consideramos que la gran mayoría de vehículos circulan entre las 5AM y las 8PM (15 horas), se puede asumir que ocurren 2.26 accidentes cada hora.

La probabilidad de un accidente viene dada por los accidentes que podrían suceder entre las calles y avenidas más concurridas (es decir, que tienen una densidad vehicular alta), multiplicado por la cantidad de accidentes por hora y un valor aleatorio que representa el azar que ocurra el evento nos permite estimar la cantidad de accidentes que existirán en la ruta:

$$\text{Cantidad de accidentes por hora} * \frac{\text{Puntos con densidad alta en ruta posible}}{\text{Total de puntos en ruta posible}}$$

Ejemplo, para una ruta de 10 puntos, 3 son de alta densidad vehicular, los accidentes en la ruta vendrán dados por:

$$\text{Accidentes} = 2.26 * \frac{3}{10} * (\text{valor aleatorio } 2) = 1.345 = 1 \text{ accidente}$$

El valor aleatorio permite representar la probabilidad de ocurrencia del accidente como al azar, su valor oscila entre 0 y el valor entero de la cantidad de accidentes por hora, en este ejemplo 0 a 2.

En base a las pruebas realizadas se estima que por cada accidente el tiempo “base” se incrementa en un 100 %, es decir, que si existe un accidente el tiempo base se duplica, si existen dos accidentes, el tiempo base se triplica.

El tiempo de espera en semáforos se calculó en base a la cantidad de semáforos que existen en la ruta calculada, de acuerdo a las pruebas realizadas se estima que por cada semáforo se incrementa el tiempo base en un 50 %.

### 6.3. Determinación de función *fitness*

Habiendo realizado el análisis de los parámetros que afectan el tráfico vehicular en la sección anterior la determinación de la función *fitness* se centró en unificar todos los parámetros de estudio como un solo sistema, incorporándolos de manera que permitiera calcular un valor de aptitud a cada ruta posible, para ello se definieron tres parámetros:

- Distancia aptitud: la distancia es un valor numérico que no cambia, siempre será el mismo sin importar la cantidad de vehículos que circulan, el día o la hora:

$$\textit{Distancia aptitud} = \textit{Distancia}$$

- Tiempo aptitud: el tiempo es el parámetro que más sufre variación, ya que de acuerdo al análisis realizado, el tráfico vehicular aumenta el tiempo en un 25 % por cada nivel, un accidente lo duplica y por último también se ve afectado directamente por la cantidad de semáforos, por lo que el tiempo final se puede calcular de la siguiente manera:

$$\textit{Tiempo aptitud} = \textit{Tiempo} * (\textit{Tráfico} + 0.25 * \textit{Accidentes}) + 0.5 * \textit{Semáforos}$$

- Rapidez aptitud: la rapidez es un parámetro que sufre variación de manera indirecta, ya que es resultado de la variación del tiempo, se multiplica por 0.06 para convertirlo a km/hora:

$$\textit{Rapidez aptitud} = \left( \frac{\textit{Distancia}}{\textit{Tiempo}} \right) * 0.06$$



- Aptitud final: los parámetros anteriores se unifican en un solo valor, el cual está representado por la rapidez aptitud, este valor se multiplica por 10 para darle una mayor diferenciación a la aptitud de las posibles rutas:

$$\text{Aptitud Final} = \text{Velocidad} * 10$$

Como resultado se presenta la Tabla V con el cálculo de las aptitudes para cada punto de estudio.

Tabla V. **Aptitudes para puntos de ruta**

ID Origen	ID Destino	Distancia Aptitud	Tiempo Aptitud	Rapidez Aptitud	Aptitud final
1	2	120	1.25	5.76	57.60
1	3	250	1.25	12.00	120.00
2	4	300	1.25	14.40	144.00
2	5	220	1.25	10.56	105.60
2	6	450	2.50	10.80	108.00
3	4	180	1.25	8.64	86.40
4	5	500	1.25	24.00	240.00
4	7	900	6.75	8.00	80.00
5	7	850	6.75	7.56	75.56
5	8	450	1.25	21.60	216.00
6	8	230	1.25	11.04	110.40
7	9	170	3.75	2.72	27.20
7	16	2300	17.50	7.89	78.86
8	9	450	2.25	12.00	120.00
8	10	1000	5.00	12.00	120.00
9	10	800	6.75	7.11	71.11
9	11	1400	9.00	9.33	93.33
10	11	1000	7.25	8.28	82.76
10	16	1600	15.00	6.40	64.00

Continúa Tabla V.

11	12	400	1.75	13.71	137.14
11	99	2500	20.50	7.32	73.17
11	15	1900	18.00	6.33	63.33
12	13	1100	6.00	11.00	110.00
13	99	950	7.75	7.35	73.55
15	99	1000	5.75	10.43	104.35
16	99	1800	18.50	5.84	58.38
16	15	750	6.00	7.50	75.00
17	17	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

La fórmula utilizada para el cálculo de la aptitud final es:

***Aptitud Final***

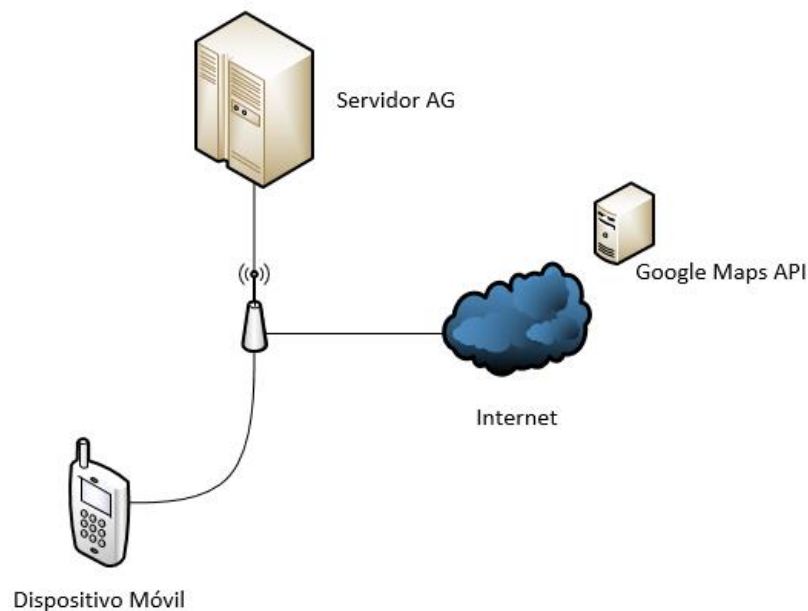
$$= \left( \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo} * (\text{Tráfico} + 0.25 * \text{Accidentes}) + 0.5 * \text{Semáforos}} \right) * 0.06 * 10$$

## 6.4. Experimento

### 6.4.1. Arquitectura móvil utilizada para el experimento

La arquitectura utilizada para el experimento es cliente-servidor, donde el cliente es representado por el dispositivo móvil (Samsung Galaxy S6), y como servidor se utilizó una máquina virtual con Ubuntu Server, como se ilustra en la imagen siguiente:

Figura 12. **Arquitectura móvil utilizada para el experimento**



Fuente: elaboración propia.

En la ilustración anterior se muestra al dispositivo móvil y el servidor conectados mediante un punto de acceso, el cual también brinda salida a internet, necesaria para la utilización del API de Google Maps.

#### **6.4.2. Presentación y comparación de resultados teóricos y prácticos**

El experimento tuvo como objetivo tomar los resultados teóricos obtenidos con el algoritmo genético y compararlos con los resultados reales, a manera de validar que se apeguen en al menos 75%, para ello se pensó un rutas que fuera posible transitar de manera frecuente, entre las cuales se seleccionó la ruta entre el domicilio del investigador ubicado en la zona 5 y su lugar de trabajo ubicado en la zona 8.

El experimento consistió en calcular la ruta mencionada anteriormente utilizando el algoritmo genético desarrollado y posteriormente recorrer la ruta trazada tomando nota del tiempo total transcurrido, como dato adicional, en cada prueba se calculó el estimado de tiempo utilizando Google Maps y Waze para comparar los resultados, el experimento se repitió diez veces, los resultados obtenidos se presentan en la siguiente sección.

Los datos se recopilaron con la ayuda de una aplicación de *dash cam* para Android llamada AutoBoy BlackBox, mediante la cual se pudo registrar el momento exacto de inicio y fin de ruta como se ilustra en la Figura 13. Para la realización del experimento se desarrolló un prototipo que permite mostrar de manera gráfica la ruta calculada mediante el algoritmo genético, como se ilustra en la Figura 14. La ruta de referencia obtenida de Google Maps y Waze se calculó justo antes de iniciar a recorrer la ruta como se ilustra en la Figura 15.

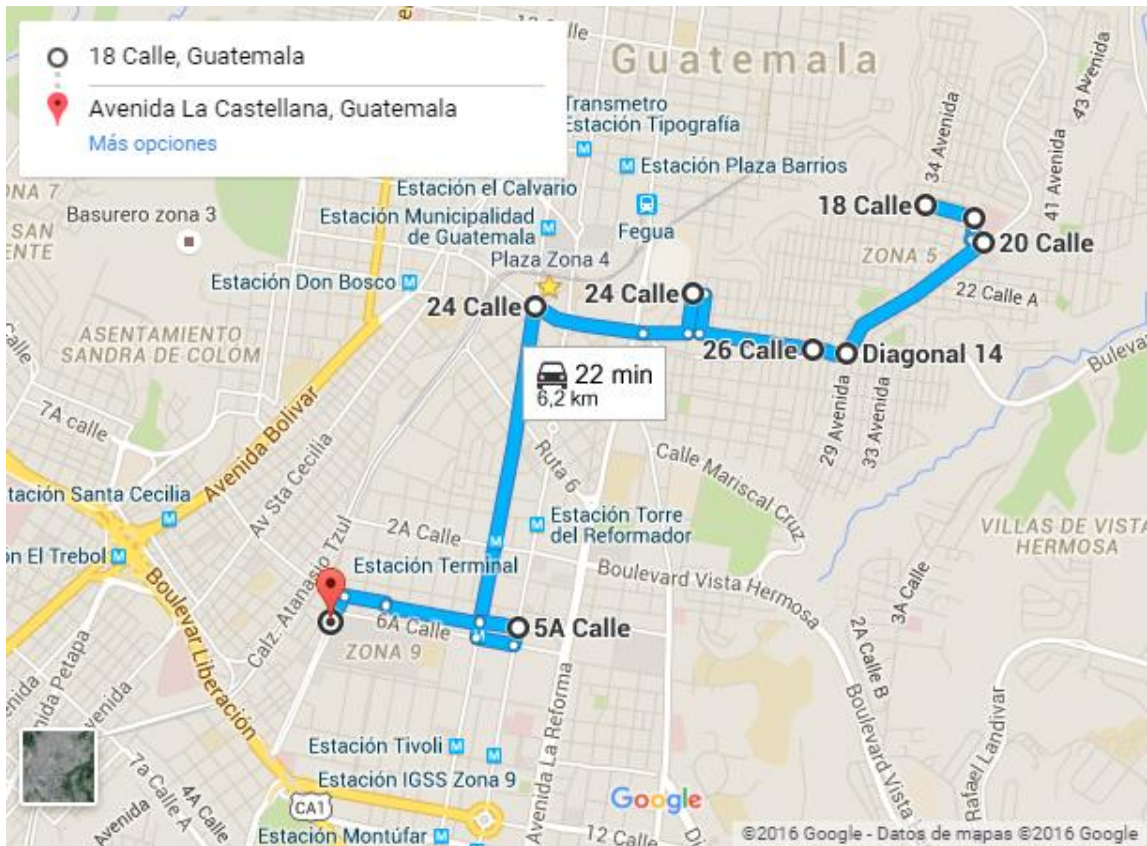
Figura 13. Registro de inicio y fin mediante aplicación AutoBoy BlackBox



En las imágenes se muestra la fecha, hora y coordenada geométrica del lugar.

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Cálculo de ruta mediante prototipo que utiliza el Algoritmo Genético

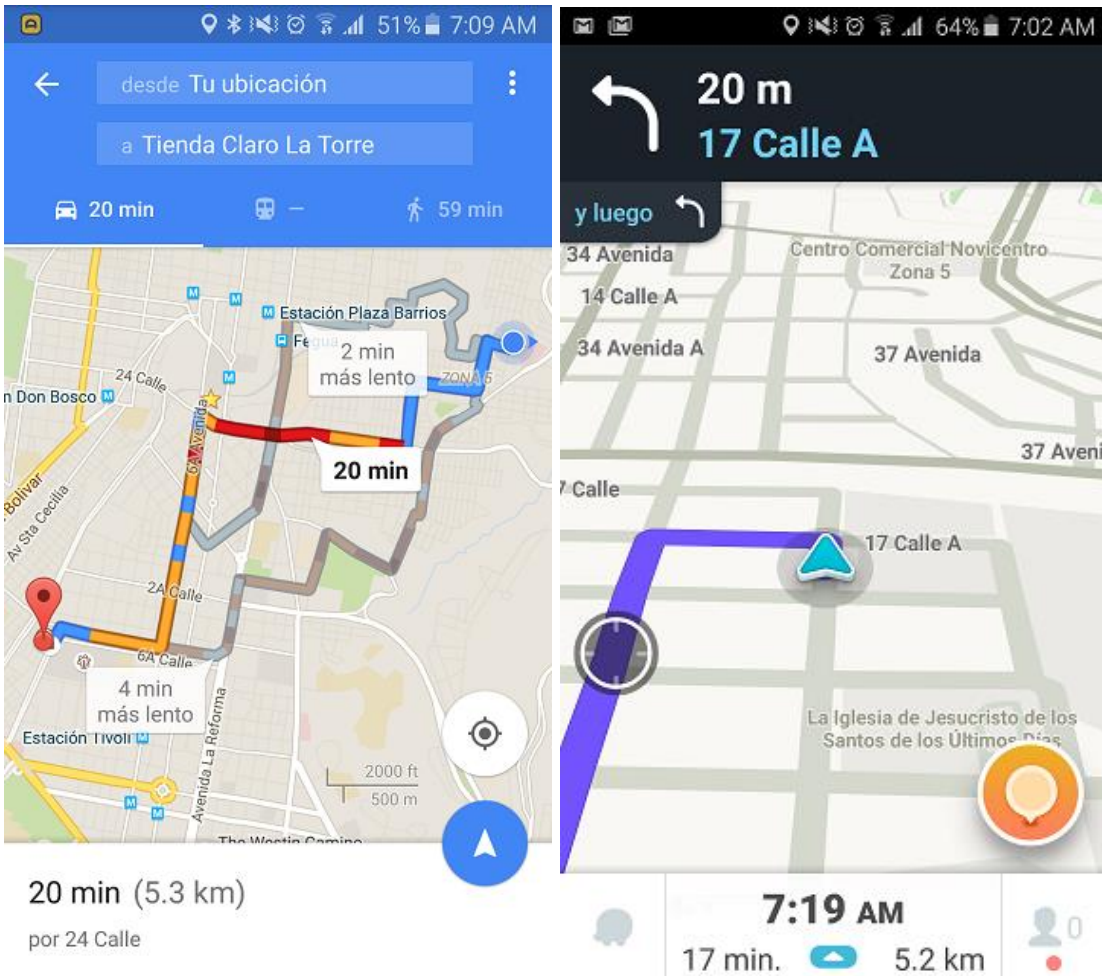


Fuente: elaboración propia.

El prototipo desarrollado calcula la ruta más óptima mediante el algoritmo genético desarrollado y utiliza el API de Google Maps para mostrar de manera gráfica la ruta, cada punto blanco representa un Punto Origen de los mostrados en la Tabla 5, que es la matriz de tráfico.



Figura 15. Cálculo de ruta mediante aplicación Google Maps y Waze



Fuente: elaboración propia.

A continuación se comparan los resultados teóricos y prácticos obtenidos en el experimento:

**Tabla VI. Resultados del experimento de cálculo de ruta utilizando el Algoritmo Genético, Google Maps y Waze**

Prueba	Fecha	Hora Inicio	Hora Fin	Tiempo Real	Tiempo AG	% Error AG	Tiempo Maps	% Error Maps
1	2016-03-02	7:05	7:35	30	32	7%	22	27%
2	2016-03-03	7:09	7:34	25	30	20%	20	20%
3	2016-03-04	7:07	7:37	30	27	10%	20	33%
4	2016-03-05	7:09	7:34	25	28	12%	20	20%
5	2016-03-06	7:04	7:33	29	30	3%	20	31%
6	2016-03-07	7:04	7:28	24	27	13%	22	8%
7	2016-03-08	7:05	7:35	30	32	7%	22	27%
8	2016-03-09	7:08	7:33	25	30	20%	20	20%
9	2016-03-10	7:04	7:35	31	27	13%	20	35%
10	2016-03-11	7:04	7:28	24	27	13%	20	17%
					<b>Promedio</b>	<b>12%</b>	<b>Promedio</b>	<b>24%</b>

Prueba	Fecha	Hora Inicio	Hora Fin	Tiempo Real	Tiempo AG	% Error AG	Tiempo Waze	% Error Waze
1	2016-06-22	6:57	7:17	20	23	15%	18	10%
2	2016-06-27	7:03	7:23	20	24	20%	17	15%
3	2016-07-05	7:00	7:18	18	20	11%	17	6%
4	2016-07-06	6:44	7:00	16	18	13%	14	13%
5	2016-07-07	6:48	7:05	17	19	12%	17	0%
6	2016-07-08	6:45	7:03	18	21	17%	15	17%
7	2016-07-11	7:05	7:24	19	21	11%	17	11%
					<b>Promedio</b>	<b>14%</b>	<b>Promedio</b>	<b>10%</b>

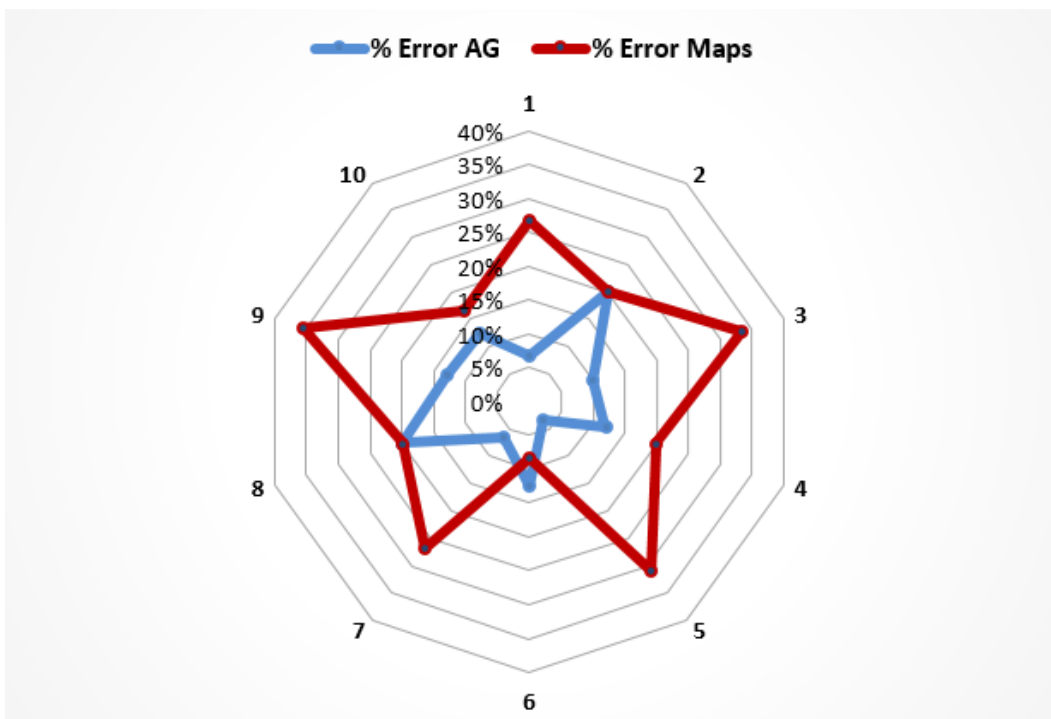
Fuente: elaboración propia.



De los datos recopilados se observa que las rutas calculadas con el algoritmo genético tienen un porcentaje de error de entre 12 % y 14 %, mientras que el porcentaje de error es 24 % cuando se calcula la ruta utilizando Google Maps y 10% cuando se calcula con Waze.

Los resultados entre el algoritmo genético y Google Maps fueron similares en algunas ocasiones, pero no en la mayoría, en 7 de 10 ocasiones el algoritmo genético fue más exacto como se aprecia en la Figura 16, en promedio el algoritmo genético tiene un porcentaje de error menor que la aplicación Google Maps.

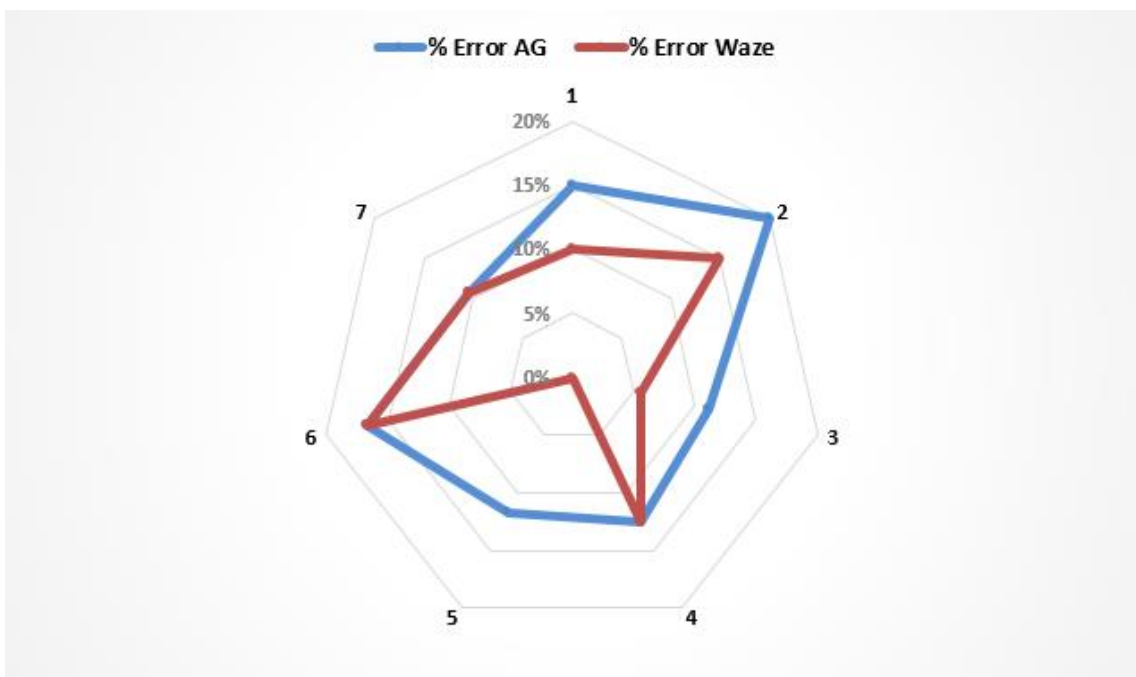
Figura 16. **Comparación de resultados del Algoritmo Genético y Google Maps en gráfico radial**



Fuente: elaboración propia.

Los resultados entre el algoritmo genético y Waze fueron bastante similares, en 3 ocasiones se tuvo el mismo resultado, en las demás el algoritmo de Waze fue más apegado a la realidad que el algoritmo genético como se aprecia en la Figura 17, en promedio el algoritmo genético tiene un porcentaje de error del 14 % mientras que Waze un 10 %.

Figura 17. **Comparación de resultados del Algoritmo Genético y Waze en gráfico radial**



Fuente: elaboración propia.

### **6.4.3. Conclusiones y observaciones del experimento**

De los datos obtenidos del experimento se puede observar que el cálculo de la ruta mediante el algoritmo genético es aceptable y cumple el objetivo, ya que se apega a la realidad en aproximadamente 86 % al 88 %.

La rapidez es un parámetro subjetivo, depende de la situación que atraviesa una persona, si está en una emergencia, si esta alterada o calmada.

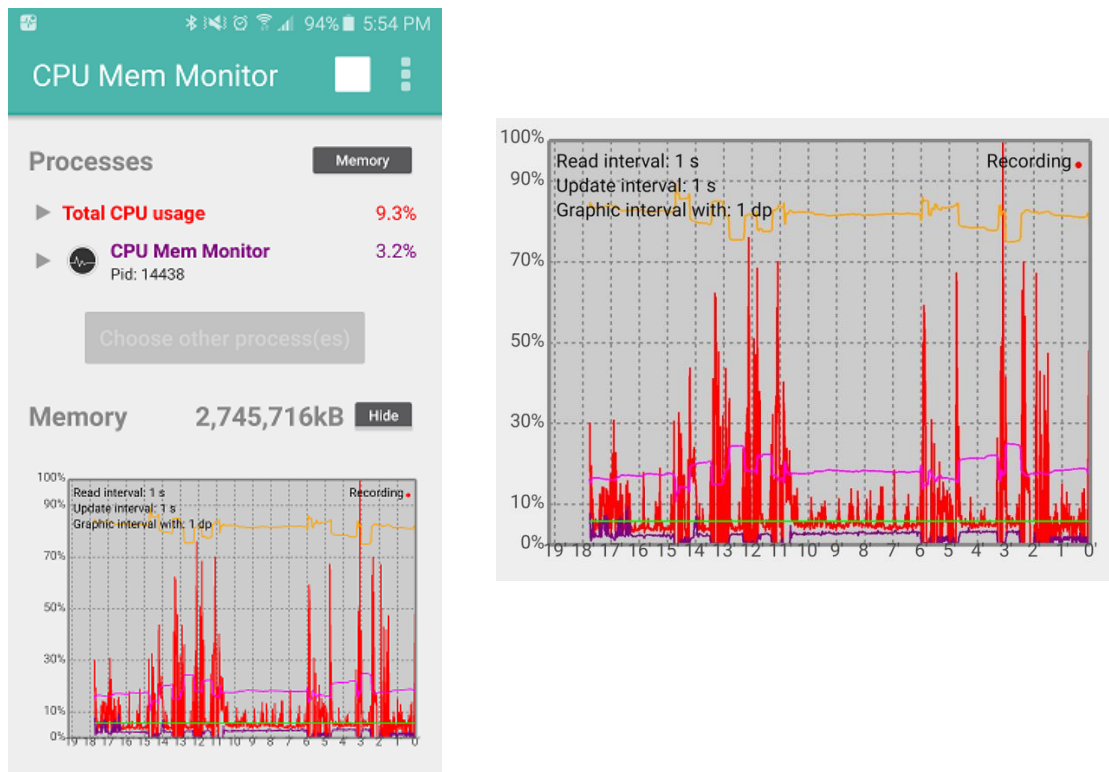
El algoritmo genético es notablemente mejor que Google Maps, en comparación con Waze los resultados son similares pero no mejores, se debe tomar en consideración que la presente investigación presenta un prototipo que se ha realizado en 1 año de investigación, mientras que Waze es un producto que se desarrolló en 2008 y desde entonces ha sido mejorado constantemente.

El tiempo estimado de recorrido se incrementa en fechas importantes como pago de salarios, asuetos, y días cercanos al fin de semana. Se observó que en los días de lluvia la densidad del tráfico vehicular se aumenta y la rapidez promedio disminuye, este escenario no fue posible estudiarlo a detalle, debido a que la época de estudio es verano, y únicamente ocurrió dos veces en el período en que las pruebas se realizaron.

## 6.5. Resultados de pruebas de estrés

Para las pruebas de estrés se utilizó la aplicación “CPU Mem Monitor” que permite medir continuamente la utilización de CPU y Memoria en el dispositivo móvil como se observa en la Figura 17 y Figura 18, para medir la utilización del CPU y Memoria del servidor se utilizó un script que recopilaba los datos cada 5 minutos de las estadísticas del sistema como se presenta en la Figura 19, los resultados se muestran a continuación:

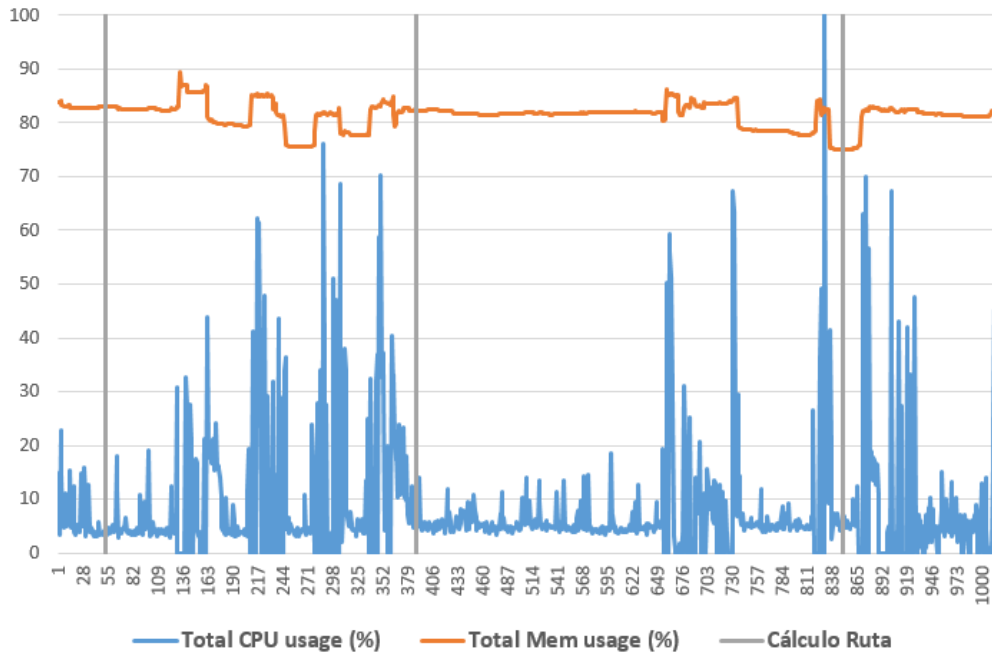
Figura 18. Aplicación móvil utilizada para medir utilización de CPU y Memoria



Fuente: elaboración propia.

La aplicación “CPU Mem Monitor” es una aplicación desarrollada para Android, que se encuentra en el *PlayStore* de Google.

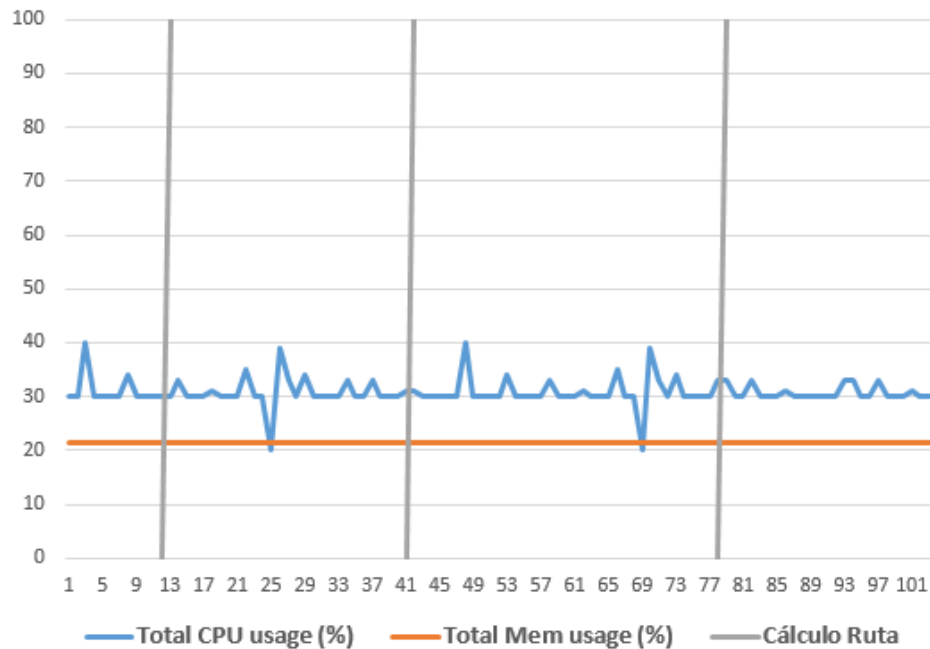
Figura 19. Registro de utilización de CPU y memoria del dispositivo móvil



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos del monitoreo del dispositivo móvil muestran que la utilización del CPU y Memoria siguen la tendencia después de un cálculo de una ruta (las cuales se representan en la gráfica por las líneas grises), la variación es de aproximadamente 5 %, lo cual está dentro de los parámetros aceptables de utilización. Se muestran algunos picos de utilización que se registraron al iniciar otras aplicación o recibir notificaciones.

Figura 20. Registro de utilización de CPU y memoria del servidor



Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos del monitoreo del servidor muestran que la utilización del CPU se mantiene estable, en un promedio del 30 % y memoria no se incrementan de manera considerable, la utilización se mantiene a lo largo de las pruebas, dentro de los parámetros aceptables, con lo cual fue posible determinar los requerimientos de *hardware* mínimos y recomendados que se presentan en la Tabla VII.

Tabla VII. **Requerimientos mínimos y recomendados de hardware**

Requerimientos	Mínimos	Recomendados
CPU	Qualcomm Dual Core	Qualcomm QuadCore
Memoria	512 MB	1 GB
Disco	10 MB	15 MB
Teléfono equivalente	Huawei Y300	Motorola MotoG

Fuente: elaboración propia.

Se realizaron mediciones del tiempo de respuesta del cálculo de ruta con el algoritmo genético y con Google Maps, en términos generales el algoritmo genético cuyo (de tiempo de respuesta promedio son dos segundos), resulta ser más rápido que Google Maps (con un tiempo de respuesta promedio de 3.3 segundos). El tiempo de respuesta en segundos fue tomado en el algoritmo genético imprimiendo en consola la fecha y hora de inicio y la fecha y hora de finalización, además del cálculo de ruta, como se muestra a continuación:

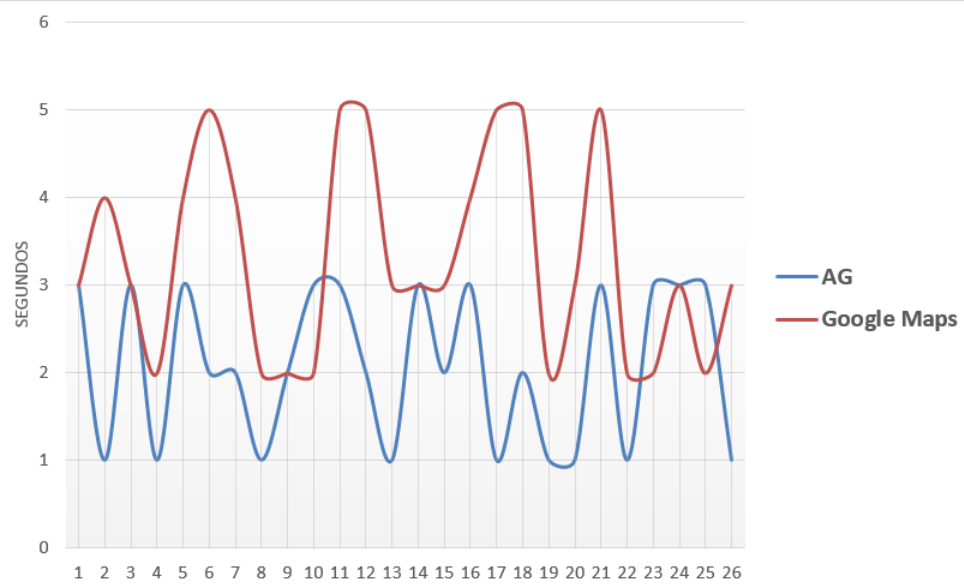
```

Inicio: Sat Mar 12 12:00:45 CST 2016
--->14.628463, -90.498555
--->14.627435, -90.498795
--->14.625512, -90.499238
--->14.627860, -90.496340
--->14.626791, -90.495954
--->14.625512, -90.499238
Fin: Sat Mar 12 12:00:46 CST 2016

```

El tiempo de respuesta de Google Maps fue tomado mediante la utilización de un cronómetro, los resultados en detalle se presentan en la Figura 20:

Figura 21. Tiempos de respuesta del algoritmo genético y Google Maps



Fuente: elaboración propia.





## 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la creación del algoritmo genético se utilizaron los siguientes algoritmos genéticos existentes:

- Wei Fan y Randy Machemehl desarrollaron un algoritmo genético en el que se definió un modelo no lineal que calcula todas las posibles rutas creando una matriz de tráfico asignando los viajes, su frecuencia y por último calcula métricas de rendimiento, de las cuales se obtiene todas las posibles soluciones, en base a esta investigación se creó la matriz de tráfico, en la cual se analizaron los parámetros de estudio (tiempo, distancia, velocidad, tiempo de espera en semáforos, accidentes y densidad de tráfico vehicular) y ayudó a crear la función *fitness*, necesaria para el cálculo de rutas óptimas. El algoritmo genético de Fan y Machemehl se veía afectado de manera proporcional al tamaño de las rutas, en el algoritmo genético desarrollado este problema se mitigó evaluando distintos números de evoluciones, permitiendo identificar un número de evoluciones aceptable (500 evoluciones con una población inicial de 100 individuos) que permitía obtener la ruta óptima, además se definió en la matriz de tráfico únicamente los puntos más importantes como cruces de avenidas más transitadas.
- El algoritmo genético publicado por Teklu, Sumalee y Watling pretendía determinar el tiempo óptimo de luz verde en semáforos con el objetivo de anticipar la formación de colas en tiempo real, esto suponía que el tiempo de luz verde debe cambiar de manera constante a medida que se forman las colas, el problema encontrado con este algoritmo genético es que no toma en consideración variables externas como la densidad del tráfico vehicular, esta investigación no considera los semáforos como parte de un

sistema, en base a los resultados de los investigadores se determinó que definir un tiempo de fijo de semáforo es suficientemente aceptable, por lo cual mediante observación directa se definió que en promedio cada semáforo repercute en una espera de 30 segundos.

- El algoritmo genético desarrollado por Chand, Prasad y Dehuri que permite encontrar la ruta óptima en términos de distancia y cantidad de vehículos necesarios para realizar entregas permitió establecer la base de la función fitness mediante el análisis de cada cromosoma como una ruta posible que cumple el objetivo de ir de un punto A hacia un punto B, y cada gen de dicho cromosoma, como cada punto que compone la ruta.

A continuación se realiza el análisis de los resultados presentados en la sección anterior, se discuten las posibles causas que dieron lugar a dichos resultados y se proponen mejoras para continuar la investigación a futuro.

### **7.1. Discusión del desarrollo del algoritmo genético**

La velocidad es un parámetro subjetivo, no se debe analizar como parámetro fundamental en el cálculo de rutas, sino como un indicador que sirve de referencia para la rapidez promedio que se estima el usuario llevará.

La densidad del tráfico vehicular parece tener un comportamiento exponencial, que entre menos fluido es el tránsito mayor es el quebrantamiento de leyes, el estrés, las molestias, los enojos, lo cual produce más tráfico y más accidentes.

Los accidentes se pueden estudiar con mayor detalle, pero depende de la cantidad y calidad de la información que se pueda obtener.

En cuanto al cálculo de la regresión polinomial y la proyección de accidentes, se puede mejorar el coeficiente de correlación si se aplica al inicio de la regresión un paso para suavizar los datos, de manera que no existan cambios tan abruptos, en la presente investigación no se realizó debido a que los datos son reales y tienen mayor relevancia utilizarlos sin modificación alguna, el ajuste de los datos reales a una ecuación polinomial es muy buena y se puede mejorar.

Para la espera en semáforos se podría obtener una mejora en el algoritmo genético cambiando el tiempo promedio de espera en un semáforo (30 segundos) por un valor aleatorio, que podría tener tres posibles valores, el mínimo, el promedio o el máximo de todos los semáforos observados.

Un parámetro que no fue tomado en consideración que podría mejorar la investigación es el estudio de los carriles reversibles que son implementados por la PMT. También se podría incluir entre los parámetros las fechas festivas y asuetos.

La determinación de la función *fitness* es el centro de la investigación, el algoritmo genético es funcional, práctico y óptimo, su investigación puede continuar mediante la identificación dinámica y constante de distintos puntos en un mapa virtual, a mayor detalle y cantidad de puntos mejor será el cálculo de la ruta.

En la función *fitness* es necesario asignar un valor positivo mayor a cero, aun cuando la ruta posible no sea correcta u óptima, debido a que si se trata de desechar asignando un valor de cero o muy bajo, la combinación y mutación entre las posibles rutas no tendrá un buen resultado y el algoritmo no distinguirá que ruta es mejor que otra, mientras que, asignando un valor de aptitud conforme a

la cantidad de pasos correctos, se obtienen en cada generación mejores rutas, lo que se transforma en una mejor ruta en menos iteraciones.

## **7.2. Discusión de resultados del experimento**

Para la realización del experimento se debe tomar en consideración que la arquitectura utilizada para el cálculo de la ruta es un cliente y servidor local, se utiliza internet para mostrar gráficamente la ruta, mientras que Google Maps y Waze calculan y muestran la ruta mediante la conexión a internet. Esto no influyó en el experimento considerando que las pruebas realizadas se hicieron con una a internet *wifi* estable de 5mbps.

Se podría obtener mayor detalle de información en el experimento utilizando un dispositivo ODBII *bluetooth*, que permitiera conectar la computadora del vehículo con el teléfono, a manera de registrar tiempo, distancia, velocidad, consumo de gasolina, etc. para cada recorrido de las pruebas.

El algoritmo genético presenta la desventaja que no recalcula una ruta una vez fue calculada, en comparación con Google Maps y Waze, que recalcularán la ruta si existe demasiado tráfico, proveyendo rutas alternas.

En general el tiempo estimado resultado del cálculo de ruta mediante el algoritmo genético es mayor al tiempo resultado de la utilización de Google Maps, una de las razones es debido a que el algoritmo genético toma en consideración la densidad del tráfico vehicular y la espera en semáforo, que son los parámetros que afectan de manera directa la ruta, haciendo que el resultado sea más apegado a la realidad.

El prototipo se puede mejorar mostrando indicaciones que faciliten transitar la ruta obtenida como resultado del algoritmo genético, las cuales se pueden incluir utilizando el API de Google Directions.

No se identifica una manera de mejorar los resultados de la herramienta Google Maps, sin embargo, se observa que desde el inicio de la investigación hasta la finalización del experimento, han habido varios cambios en el cálculo de ruta con esta herramienta, el más reciente incluye mostrar de manera gráfica la densidad del tráfico en la ruta que se está recorriendo, mostrando en color verde una densidad baja, naranja una densidad media y rojo una densidad alta, no se observa que este parámetro se esté incluyendo en el cálculo de la ruta, pero si se agregara podría mejorar la exactitud de la herramienta.

No se realizó alguna modificación para optimizar la utilización de recursos de hardware del algoritmo genético inicial debido a que el rendimiento mostrado cumplía con los objetivos de la investigación siendo eficiente y permitiendo ser utilizado en dispositivos móviles.

### **7.3. Mejoras al algoritmo genético y prototipo**

Se han identificado las siguientes mejoras para el algoritmo genético:

- La proyección de accidentes mediante la obtención de mayor cantidad de registros, y suavizado de la información, esto permitirá tener un mayor coeficiente de correlación.
- Inclusión de nuevos parámetros en la investigación como carriles reversibles y fechas festivas y asuetos, pronósticos del clima y fechas de pago.

- Ajuste para el tiempo de semáforos, seleccionando de manera aleatorio un valor (mínimo, promedio o máximo de una muestra de semáforos) en vez de tener un valor fijo (30 segundos) por semáforo.
- Mayor cantidad de puntos en el mapa, esto permitirá tener una mayor exactitud en cuanto al cálculo de rutas y estimaciones de tiempo.

Se han identificado las siguientes mejoras al prototipo:

- Permitir el nuevo cálculo de una ruta, en base a la posición actual del usuario.
- Utilizar *API Google Directions* para brindar direcciones en la ruta calculada.
- Realizar análisis de sentimientos y aceptación de tecnología –TAM- para evaluar la aceptación del usuario final e identificar posibles mejoras.

En cuanto al experimento, se podría obtener mayor detalle de información y realizar un mejor análisis de ésta utilizando un conector ODBII *bluetooth*, de manera que se registren diversos indicadores (como tiempo, velocidad, distancia, consumo de gasolina, etc) en el recorrido de cada ruta.

Se pretende que la presente investigación continúe por lo que los resultados y algoritmo genético desarrollado en esta investigación se pueden encontrar de manera pública en los siguientes enlaces:

- OneDrive: [https://1drv.ms/u/s!AseThwoJ110\\_gyxNAS3Ip0MNQfP6](https://1drv.ms/u/s!AseThwoJ110_gyxNAS3Ip0MNQfP6)
- Dropbox: <https://www.dropbox.com/s/lmmcg0omevohefy/TraficoJGAP.zip>

Se incluye dentro del archivo los créditos al estudiante y la Escuela de Postgrado.

## CONCLUSIONES

1. El algoritmo genético desarrollado que calcula rutas óptimas con base a la distancia, tiempo y velocidad, tomando en consideración eventos aleatorios como accidentes de tránsito, la densidad del tráfico vehicular y el tiempo de espera en los semáforos, tiene un promedio de error del 12 %, mientras que el algoritmo de GoogleMaps tiene un promedio de error del 24 %, por lo cual, con el algoritmo genético propuesto se mejora en un 12 % la exactitud en el cálculo de rutas en comparación con GoogleMaps, además, el tiempo de respuesta de GoogleMaps se mejora en promedio en 2000 milisegundos con el algoritmo genético propuesto.
2. Se definió una función *fitness* funcional en términos de distancia, tiempo y velocidad, tomando en consideración eventos aleatorios como accidentes de tránsito, la densidad del tráfico vehicular y el tiempo de espera en los semáforos, la cual es funcional porque se apega a la realidad en un 88 %. Se encontró que la rapidez es un parámetro subjetivo que puede servir de referencia pero no afecta directamente el resultado, podría afectar en lugares donde hay autopistas.
3. Los valores óptimos para los parámetros de la función *fitness*, se determinaron mediante pruebas de estrés y comparación de resultados teóricos y reales. El tiempo base (tiempo que toma recorrer una distancia en condiciones ideales) se relaciona con la densidad vehicular por un factor del 100 %, los accidentes lo incrementan en un 25 %, mientras que los semáforos en promedio, incrementan el tiempo por un factor de 30



segundos por semáforo, con estos valores se analiza el tráfico como un sistema, obteniendo un tiempo teórico estimado para la función *fitness*.

4. Los requerimientos de hardware mínimos necesarios para el correcto funcionamiento del algoritmo genético son un procesador Qualcomm Dual Core, 512MB de memoria RAM y 10MB de espacio en disco, esta configuración equivale a un teléfono Huawei Y300 de gama baja, con estos recursos se determinó que el algoritmo genético se puede utilizar en dispositivos móviles de gama baja, media y alta, y su tiempo de respuesta es menor a 25 segundos.
  
5. La utilización de CPU y memoria RAM no se ve afectada por la cantidad de evoluciones que haga el algoritmo genético, en las pruebas realizadas se observa que la utilización de CPU se incrementa en no más del 5 % y la memoria RAM no se incrementa de manera considerable, su incremento fue menor a 25MB, el espacio de almacenamiento necesario es de 10MB, lo que le permite al algoritmo genético ser utilizado en dispositivos móviles.

## RECOMENDACIONES

1. Para darle continuidad a la investigación, se puede incluir nuevos parámetros como el clima y días festivos.
2. Investigar sobre redes VANET, con el objetivo de que los resultados y conclusiones de la presente investigación puedan ayudar a crear dichas redes y a futuro apoyar la creación y mantenimiento de ciudades inteligentes.
3. Se pueden incluir las redes neuronales en la investigación, a manera de crear no solo un algoritmo genético que calcule rutas óptimas, sino que aprenda de ellas automáticamente, y pueda ser lo suficientemente inteligente para predecir el tráfico o recalcular rutas.
4. Investigar la manera de integrar el algoritmo genético en microcontroladores como RaspberryPi o Arduino, a manera de construir un dispositivo que pueda venderse y permita obtener un beneficio económico.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Android Developers. (28 de 09 de 2015). Android Performance Tips. Obtenido de <http://developer.android.com/training/articles/perf-tips.html>
2. Arranz, J., & Parra, A. (2007). Algoritmos Genéticos. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
3. Carre, D., & Dueñas, D. (2012). Análisis del tráfico vehicular mediante dinámica de sistemas. Duitama Boayaca, Colombia: Editorial académica española.
4. Chand, P., Prasad, B., & Dehuri, S. (2010). A multi objective genetic algorithm for solving vehicle routing problem. International Journal of Information Technology and Knowledge Management.
5. Diaz, P., & Hougen, D. (2008). Internal vs. External Parameters in Fitness Functions. Oklahoma, Estados Unidos.
6. Doerr, B., Happ, E., & Klein, C. (2008). Crossover Can Probably be Useful in Evolutionary Computation. Sarrebruck, Alemania.
7. Fan, W., & Machemehl, R. (2006). Optimal Transit Route Network Design Problem with Variable Transit Demand: Genetic Algorithm Approach. Journal of transportation engineering.


8. Fernández, R. (2011). Elementos de la teoría del tráfico vehicular. Fondo Editorial.
9. Ghiani, G., Guerriero, F., Laporte, G., & Musmanno, R. (2003). Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. *European Journal of Operational Research*.
10. Google. (04 de Febrero de 2015). How does Waze work? Obtenido de How does Waze work?: <https://support.google.com/waze/answer/6078702?hl=en>
11. Gora, P. (08 de 2011). A Genetic Algorithm approach to optimization of vehicular traffic in cities by means of configuring traffic lights. Universidad de Varsovia. Obtenido de A Genetic Algorithm approach to optimization of vehicular traffic in cities by means of configuring traffic lights.
12. Haupt, R., & Haupt, S. (2004). *Practical genetic algorithms*. New Jersey, Estados Unidos: Editorial John Wiley & Sons.
13. Helal, S. (s.f.). *Introduction to Mobile Computing*. En *Introduction to Mobile Computing*. Florida: Universidad de Florida.
14. Lin, C.-H., Yu, J.-L., Liu, J.-C., Lai, W.-S., & Ho, C.-H. (2009). *Genetic Algorithm for Shortest Driving Time in Intelligent Transportation Systems*. Taiwan, China: Tunghai University.

15. Lin, W.-Y., Lee, W.-Y., & Hong, T.-P. (2003). Adapting Crossover and Mutation Rates in Genetic Algorithms. Taiwan: I-Shou University.
16. Man, F., Tang, K., & Kwong, S. (2001). Genetic algorithms. Reino Unido: Editorial Springer.
17. Mehta, N. (2012). Mobile Client Architecture. TATA Consultancy.
18. Moujahid, A., Inza, I., & Larrañaga, P. (2004). Algoritmos genéticos. Bilbao, España: Universidad del País Vasco–Euskal Herriko Unibertsitatea.
19. Rodriguez, P. (s.f.). Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones. Madrid, España: Universidad Rey Juan Carlos.
20. s.a. (2007). Introduction to Mobile Computing. En Introduction to Mobile Computing. Universidad de Oxford.
21. Sheikh, A., Ganai, P., Malik, N., & Dar, K. (2013). Smartphone: Android vs iOS. Tamil Nadu, India: Universidad Manonmaniam Sundaranar.
22. Shyr, W.-J. (2010). Parameters Determination for Optimum Design by Evolutionary Algorithm. Parameters Determination for Optimum Design by Evolutionary Algorithm. Changhua, Taiwan: National Changhua University of Education.
23. Teklu, F., Sumalee, A., & Watling, D. (2007). A Genetic Algorithm Approach for Optimizing Traffic Control Signals Considering Routing. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering.


24. Wong, S.-K., & Fang, S.-W. (2012). Estudio de algoritmos genéticos y redes neuronales para mini-juegos. Taiwan, China: National Chaio Tung University.

## ANEXOS

Figura 22. Accidentes de tránsito cubiertos en los años 2010 al 2015




**BENEMERITO CUERPO DE BOMBEROS MUNICIPALES  
ACCIDENTES DE TRANSITO SERVICIOS CUBIERTOS  
AÑO 2,010 AL AÑO 2,015**



Causa	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Personas heridas	528	602	575	373	466	430	492	611	583	662	752	906	6980
Accidentes de Tránsito 2,010	651	680	800	731	868	816	792	751	876	839	802	875	9481
Accidentes de Tránsito 2,011	779	823	912	765	767	826	850	890	888	902	950	989	10341
Accidentes de Tránsito 2,012	809	820	908	814	857	891	853	858	795	796	789	780	9970
Accidentes de Tránsito 2,013	868	827	812	793	835	809	951	814	1053	999	1038	1136	10935
Accidentes de Tránsito 2,014	1016	791	909	961	1074	987	1022	973	1050	1082	802	0	10667
Accidentes de Tránsito 2,015	4651	4543	4916	4437	4867	4759	4960	4897	5245	5280	5133	4686	58374
<b>Total</b>													



**CUERPO BOMBEROS  
MUNICIPALES  
SECRETARIO EJECUTIVO**

Fuente: Bomberos Municipales de Guatemala.