

**Propuesta para la implementación de un modelo de ruteo de buses escolares para la comunidad agustiniana de la jornada nocturna de la Uniagustiniana**

Andrés Felipe Lagos Puertas

Universitaria Agustiniana

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Industrial

Bogotá

2020

**Propuesta para la implementación de un modelo de ruteo de buses escolares para la  
comunidad agustiniana de la jornada nocturna de la Uniagustiniana**

Andrés Felipe Lagos Puertas

Director

William Camilo Rodríguez Vázquez

Trabajo de grado para optar al título en Ingeniería Industrial

Universitaria Agustiniana

Facultad de Ingenierías

Ingeniería Industrial

Bogotá

2020

## Resumen

La movilidad de los estudiantes de la jornada nocturna desde la Uniagustiniana hacia sus hogares se ve afectada debido a la baja frecuencia del sistema de transporte público lo que ocasiona tiempos prolongados en la espera de un bus que efectúe el servicio de movilización, generando a su vez exposición a riesgos externos como intentos de hurto o exposición a climas extremos como frío o lluvia. Debido a este problema se pretende elaborar una propuesta de implementación de rutas escolares que movilice a la comunidad agustiniana desde la Uniagustiniana hasta la cercanía de sus hogares, determinando la viabilidad del respectivo servicio por medio de encuestas que serán realizadas a una muestra poblacional. Adicionalmente permite estimar la dispersión geográfica de los miembros de la comunidad agustiniana que estén interesados en adquirir este servicio. Se pretende diseñar rutas a través de los datos obtenidos de las encuestas por medio de un modelo matemático de ruteo de vehículos aplicado a buses escolares, conocido como OCVRP (Open Capacitated Vehicle Routing Problem) utilizando dos Heurísticas como métodos de solución, uno es el algoritmo de barrido y el otro es el algoritmo del vecino más cercano. Con la aplicación de estas Heurísticas se pretende encontrar una ruta factible, buscando un menor costo y ahorro de distancias en la movilización, cumpliendo con parámetros establecidos como la capacidad del vehículo y el no retorno al centro de distribución.

*Palabras clave:* Heurística, algoritmo del vecino más cercano, algoritmo de barrido, School Bus Routing Problem, Open Capacitated Vehicle Routing Problem.

## **Abstract**

The mobility of the students of the night shift from the Uniagustiniana to their homes is affected due to the low frequency of the public transport system, which causes prolonged times in waiting for a bus that carried out the mobilization service, generating in turn exposure to external risks such as attempted theft or exposure to extreme climates such as cold or rain. Due to this problem, it is intended to prepare a proposal for the implementation of school routes that mobilize the Augustinian community from Uniagustiniana to the vicinity of their homes, determining the reliability of the respective service through surveys that will be carried out on a population sample, additionally allowing establish the points of the homes of those who are interested in acquiring this service and where the school route must pass. It is intended to design routes through the data obtained from the surveys by means of a mathematical model of vehicle routing applied to school buses, known as OCVRP (Open Capacitated Vehicle Routing Problem) using two Heuristics as solution methods, one is the algorithm sweep and the other is the closest neighbor algorithm. With the application of these Heuristics, it is intended to find a feasible route, seeking a lower cost and saving distances in the mobilization, complying with established parameters such as vehicle capacity and non-return to the distribution center.

*Keywords:* Heuristics, Nearest Neighbor Algorithm, Sweep Algorithm, School Bus Routing Problem, Open Capacitated Vehicle Routing Problem.

## Tabla de contenidos

Introducción .....	10
1 Identificación del problema .....	11
1.1 Antecedentes del problema .....	11
1.1.1 Movilidad y sistema de transporte colectivo .....	11
1.1.2 Orígenes de las rutas escolares .....	12
1.2 Piloto de la encuesta.....	13
1.3 Descripción del problema .....	18
1.3.1 Efectos.....	28
1.3.2 Causas. ....	28
1.3.3 Pregunta de investigación. ....	29
1.3.4 Variables del problema. ....	30
2 Objetivos.....	31
2.1 Objetivo general.....	31
2.2 Objetivos específicos .....	31
3 Justificación .....	32
4 Marco referencial.....	34
4.1 Antecedentes de la investigación.....	34
4.2 Marco teórico .....	37
4.2.1 Modelos matemáticos para la solución del problema de ruteo .....	37
4.3 Marco conceptual.....	43
4.4 Marco Legal .....	44
5 Marco metodológico .....	47
5.1 Tipo de investigación.....	47
5.2 Variables de investigación .....	48
5.3 Hipótesis de la investigación .....	48
5.3.1 Hipótesis general.....	48
5.3.2 Hipótesis específica .....	48
5.4 Tamaño poblacional y muestra .....	48
5.5 Proceso metodológico .....	50
5.6 Análisis de los resultados obtenidos .....	53
6 Presupuesto .....	54
6.1 Presupuesto por hora de la mano de obra .....	54
6.2 Presupuesto por mes de la mano de obra .....	54

6.3	Presupuesto de las encuestas.....	55
6.4	Presupuesto total .....	56
7	Caracterización de la demanda de la comunidad agustiniana de la jornada nocturna de la Uniagustiniana .....	57
7.1	Diseño encuesta .....	57
7.2	Resultados de la encuesta.....	59
7.3	Estimación de los clientes potenciales .....	60
7.3.1	Distribución de los datos de los clientes potenciales .....	60
7.3.2	Tratamiento de los datos para las estimaciones .....	64
8	Formulación del modelo matemático OCVRP .....	67
8.1	Open Capacitated Vehicle Routing Problem (OCVRP) .....	67
8.2	School Bus Routing Problem (SBRP) .....	69
9	Algoritmo de Barrido y el Vecino Más Cercano para solución del OCVRP.....	72
9.1	Heurística de Barrido .....	72
9.2	Vecino más cercano .....	74
10	Rutas estimadas para la comunidad agustiniana de la sede Tagaste.....	77
10.1	Coordenadas y dispersión geográfica de los encuestados.....	77
10.2	Coordenadas estimadas y dispersión geográfica de datos aleatorios.....	79
10.3	Implementación del algoritmo híbrido de barrido con el vecino más cercano .....	81
10.3.1	Algoritmo de barrido.....	81
10.3.2	Algoritmo del Vecino Mas Cercano (VMC) .....	83
10.3.3	Algoritmo de barrido con coordenadas aleatorias .....	86
10.3.4	Algoritmo del vecino más cercano con coordenadas aleatorias .....	87
11	Validación del modelo matemático OCVRP .....	90
12	Conclusiones .....	92
13	Recomendaciones .....	94
14	Anexos .....	98
14.1	Resultados de la encuesta piloto .....	98
15	Referencias.....	95

## Lista de figuras

Figura 1. Pregunta N° 1..	14
Figura 2. Pregunta N° 2.	14
Figura 3. Pregunta N° 3..	15
Figura 4. Pregunta N° 5.	15
Figura 5. Pregunta N° 7.	16
Figura 6. Pregunta N° 9	16
Figura 7. Pregunta N° 11.	17
Figura 8. Pregunta N° 12	17
Figura 9. Pregunta N° 13.	18
Figura 10. Integrantes de la U.A finalización del año 2018.	19
Figura 11. Participación de personas en Bogotá en la movilidad.	20
Figura 12. Cuantía de personas VS motivo de viaje	20
Figura 13. Número de estudiantes VS modo de movilización	21
Figura 14. Paradas más cercanas de la U.A.	22
Figura 15. Rutas en las paradas de la U.A.	23
Figura 16. Problema de ruteo del autobús escolar (SBRP).	25
Figura 17. Árbol de problemas de proceso de ruteo en la U.A.	27
Figura 18. Variables del problema de ruteo en la U.A.	30
Figura 19. Métodos exactos.	37
Figura 20. Métodos heurísticos.	39
Figura 21. Métodos metaheurísticos.	41
Figura 22. Marco conceptual.	43
Figura 23. Variables de la investigación.	48
Figura 24. Resultado del Alfa de Cronbach.	59
Figura 25. Distribución de los encuestados según tipo de transporte.	61
Figura 26. Distribución según el transporte colectivo.	61
Figura 27. Distribución según el transporte individual.	62
Figura 28. Distribución según la movilización en bicicleta.	63
Figura 29. Aprobación de los encuestados para la propuesta.	64
Figura 30. Ejemplo de Barrido.	72
Figura 31. Secuencia lógica del Algoritmo de Barrido.	73
Figura 32. VRP y OVRP.	75
Figura 33. Secuencia lógica del Vecino Más Cercano.	76

Figura 34. Ubicación geográfica de la Uniagustiniana. ....	78
Figura 35. Ubicación geográfica de los 152 estudiantes.....	79
Figura 36. Coordenadas aleatorias. ....	80
Figura 37. Interface de coordenadas del algoritmo de barrido.. ....	81
Figura 38. Interface para la asignación de clústeres. ....	82
Figura 39. Resultados del algoritmo de barrido.....	82
Figura 40. Interface de coordenadas del algoritmo VMC.....	83
Figura 41. Interface de parámetros del algoritmo VMC.....	84
Figura 42. Resultados del algoritmo VMC.....	84
Figura 43. Asignación de puntos y tiempo de movilización 1° .....	85
Figura 44. Asignación de puntos y tiempo de movilización 2° .....	85
Figura 45. Distribución de las 1358 coordenadas.....	86
Figura 46. Algoritmo de barrido 1358 puntos. ....	87
Figura 47. Algoritmo del VMC 1358 puntos.....	87
Figura 48. Pregunta N° 1. ....	98
Figura 49. Pregunta N° 2.. ....	98
Figura 50. Pregunta N° 3.. ....	99
Figura 51. Pregunta N° 4.. ....	99
Figura 52. Pregunta N° 5. ....	100
Figura 53. Pregunta N° 6.. ....	100
Figura 54. Pregunta N° 7. ....	101
Figura 55. Pregunta N° 8.. ....	101
Figura 56. Pregunta N° 9. ....	102
Figura 57. Pregunta N° 10. ....	102
Figura 58. Pregunta N° 11.. ....	103
Figura 59. Pregunta N° 12. ....	103
Figura 60. Pregunta N° 13.. ....	104

## Lista de tablas

Tabla 1 .....	26
Tabla 2. ....	44
Tabla 3. ....	45
Tabla 4. ....	46
Tabla 5. ....	49
Tabla 6. ....	50
Tabla 7. ....	51
Tabla 8. ....	54
Tabla 9. ....	55
Tabla 10. ....	55
Tabla 11. ....	56
Tabla 12. ....	57
Tabla 13. ....	60
Tabla 14. ....	65
Tabla 15. ....	65
Tabla 16. ....	66
Tabla 17 .....	77
Tabla 18. ....	80
Tabla 19. ....	88
Tabla 20. ....	88
Tabla 21. ....	89
Tabla 22. ....	90

## Introducción

La Uniagustiniana es una institución de educación superior de Bogotá D.C. Ubicada al sur-occidente, donde cuenta con su campus Tagaste. La comunidad agustiniana de la jornada nocturna presenta problemas de movilización al momento de culminar sus clases. Los estudiantes de esta jornada, han estado expuestos a riesgos y climas extremos durante la espera de un bus que los movilice a sus destinos. Algunos estudiantes al momento de adquirir el servicio de movilización deben realizar transbordos en algún momento del trayecto debido a que la ruta que realiza el bus no cubre totalmente la que el estudiante necesita.

Los modelos matemáticos forman parte de los conocimientos de la ingeniería industrial, en específico la investigación de operaciones y logística donde han sido de gran utilidad para problemas de ruteo empleados de manera continua en casos particulares como empresas de mensajería, logística o desarrollo de operaciones. El objetivo general del proyecto es proponer y desarrollar un modelo de ruteo de buses escolares para facilitar el transporte de la comunidad agustiniana de la jornada nocturna desde la Uniagustiniana hacia sus hogares, diseñando por medio de un modelo de ruteo de vehículos aplicado a buses escolares. Diseñando y asignando rutas teniendo como base la demanda de los estudiantes y docentes que estén interesados en adquirir el servicio de movilización utilizando dos heurísticas llamadas algoritmo de barrido y algoritmo del vecino más cercano.

Para la recolección de datos y el desarrollo del modelo matemático se obtuvieron los datos por medio de una encuesta que fue realizada a una muestra poblacional finita, al obtener los resultados se determinaron los puntos por donde debían pasar los buses o rutas, donde están establecidas según la demanda, cumpliendo con una capacidad del vehículo y cubriendo gran parte del trayecto requerido por el estudiante. Los estudiantes al responder la encuesta describen la ubicación del lugar hacia donde se dirigen al momento de finalizar clases. Se desarrolló por medio de Visual Basic de Excel la Heurística del algoritmo de barrido y el vecino más cercano para determinar la cantidad de rutas necesarias por agrupamiento y el orden de ruta que debe seguir el bus escolar.

## 1 Identificación del problema

### 1.1 Antecedentes del problema

#### 1.1.1 Movilidad y sistema de transporte colectivo.

Las personas necesitan un medio de transporte para poder movilizarse en su entorno y diario vivir. Esto ha generado ideas y modificaciones en los medios de transporte para poder movilizar a las personas que no dispongan de un medio de transporte propio. El transporte tiene una similitud con la movilidad; como afirma García, (2014): el transporte depende de manera conjunta de la movilidad y viceversa. Sin embargo, la movilidad es un factor más amplio que el transporte y transporte publico colectivo, donde el transporte público facilita el traslado masivo de personas desde un origen hasta un destino y donde está regulado por un organismo estatal. (p. 2).

Como dice Tejada (2002): “El objetivo fundamental de un sistema de transporte colectivo urbano es el traslado eficiente, cómodo y seguro de personas entre los distintos lugares donde se emplazan y desarrollan las actividades urbanas, facilitando la integración entre ellos” (p. 7).

Siendo una manera de inclusión social donde las personas pueden desplazarse de una manera cotidiana desde un punto en específico hasta un punto destino o deseado, dice García, (2014):

La movilidad y el transporte colectivo de pasajeros son elementos facilitadores de este proceso de expansión de oportunidades de desarrollo local, ya que permiten acceder, desde un punto de vista espacial, a un puesto de trabajo, un lugar de educación, unas instalaciones sanitarias y a todo tipo de servicios. (p. 13)

En la totalidad de este servicio se ha podido tener presente varios factores importantes que evalúan las personas antes de adquirir el servicio, como ha podido ser el tiempo de viaje, tarifa y cobertura. Donde el primer factor evaluado en los clientes (personas) es el tiempo de viaje donde no solo interviene el tiempo del trayecto desde donde se coge el servicio de transporte hasta su punto de arribo o llegada, sino también los tiempos referentes a espera de llegada del medio de transporte colectivo (MTC), tiempo de caminata desde un origen (sea el hogar u otro lugar donde se encontraba) hasta el punto de partida del viaje (donde pasa el MTC). El siguiente facto que se debe tener en cuenta es la tarifa, pues dependiendo del medio de transporte que se elija o asigne al cliente, este debe estar relacionado con un sistema de costos durante el viaje donde es evaluado ya sea por tiempo, distancia recorrida o valor estandarizado por una entidad reguladora pública. Tomando por ultimo referente la cobertura dado que los clientes no solo evalúan un tiempo de viaje o trayecto, costo del servicio sino que también la cobertura del medio de transporte, donde el cliente evalúa el

punto de inicio desde su origen (casa o lugar de estadía) al punto de partida del MTC (cercanía para adquisición del servicio) y desde el punto del destino que cubre el MTC (cobertura máxima del viaje) hasta el punto de destino del cliente (García, 2014, pp. 5-7), estos casos se ajustan a un modelo matemático llamado CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem), donde se evalúa la movilización de los clientes partiendo desde un punto de acopio, considerando tiempos de movilización y teniendo una capacidad máxima en el vehículo como se expone a continuación.

Un ejemplo tomando como referente una ruta escolar puede explicar de manera precisa el contexto, donde recoge a los estudiantes en la puerta de la casa y/o conjunto (en la mayoría de los casos) y los traslada o moviliza hasta la entrada de la entidad de aprendizaje; este cubre una satisfacción de demanda del cliente por tiempo, dado que la ruta estará programada para pasar por cada cliente dentro de una hora estimada (ventana de tiempo) para no llegar tarde a la entidad de estudio o aprendizaje, teniendo en cuenta una tarifa accesible al cliente y a su vez una cobertura del viaje casi en su totalidad, tomando como referente Arias (2010): “Análogamente, la planeación de rutas escolares asigna una flota de buses para recoger un número de alumnos en diferentes paradas distribuidas en la ciudad y llevarlos al colegio y, de la misma forma, llevarlos de vuelta a sus casas una vez terminan las clases” (p. 6).

Los modelos matemáticos han podido ofrecer un acercamiento a soluciones óptimas de ruteo donde se pueden solucionar problemas pequeños con la ayuda de la programación lineal, programación entera mixta o programación dinámica. Sin embargo, para problemas de mayor complejidad o amplitud de variables y restricciones se han podido solucionar por medio de heurísticas y meta-heurísticas como búsqueda tabú, colonia de hormigas, algoritmo de ahorros, vecino más cercano... y poder resolver problemas NP-Hard (Nondeterministic polynomial time hard) como lo puede ser el modelo CVRP, dado que maneja variables y parámetros específicos como distancia entre los puntos a visitar, capacidad máxima del vehículo, tiempos de movilización y costos de la misma (Arias, 2010, pp. 6-10).

### **1.1.2 Orígenes de las rutas escolares.**

Se puede tener como referente la capital de Francia, París, como punto de partida en la implementación de este medio de transporte en los años 1662, sin embargo, se tenía claro que este medio era bastante incómodo, debido a la fabricación del medio de transporte o movilización con el que se disponía para la respectiva época. Se le conocía como vagones de sangre debido que se necesitaba fuerza o impulso de un caballo empujando una carroza, que dentro de ella se encontraban

las personas que requerían desplazarse de un lugar a otro. Este método fue empleado hasta la época de 1775 donde apareció el tranvía. (Amaya, 2018, párr. 1-3).

Se pudo presenciar cambios en el transcurso del tiempo, como se pudo reemplazar el tranvía por el autobús, sin embargo, este fue reemplazado por el sistema metropolitano o metro en 1863. El “ómnibus del coronel Stanislas Baudry” fue el primer aporte de mayor reconocimiento en Nantes, dado que este lograba transportar con una capacidad limitada de 15 personas, muchas personas lo utilizaban para poder desplazarse hasta la cercanía de lugares por los que pasara este medio de transporte, hasta que se creó la Enterprise Générale des Ómnibus ubicada en los almacenes más populares y reconocidos de Nantes. Este evento fue de gran reconocimiento que llegó en poco tiempo a New York y Londres, donde se inauguró la primera línea de ómnibus en 1829, hasta que Walter Hancock en 1931 logró proporcionar al mundo el primer autobús impulsado con un motor a vapor. (Amaya, 2018, párr. 4-8).

Transcurrieron seis décadas para reemplazar el motor de vapor por uno de gasolina por Karl Benz, donde podían transportar entre seis y ocho pasajeros, un cobrador y dos conductores. Teniendo presente las necesidades de desplazamiento empezó a crecer la producción de estos autobuses, sin embargo, dadas las condiciones de las calles estos vehículos no podían soportar trayectos largos. Luego de esto se incorporaron nuevas modificaciones en el transcurso del tiempo como puede destacarse un porta equipaje en la parte superior del autobús, desplazar el motor a la parte trasera generando un mayor impulso, alargar y anchar la capacidad del mismo para poder movilizar más usuarios tomando como proyecto final la incorporación de una batería que permita la alimentación interna del autobús para optimizar sus funcionalidades (Amaya, 2018, párr. 9-19).

En relación con lo expuesto anteriormente, se establece que el problema de ruteo del autobús escolar (SBRP) se puede ajustar al modelo CVRP, debido que maneja gran parte de las variables y parámetros en estudio. Teniendo como principio la movilización de personas hacia sus destinos obedeciendo la capacidad máxima del vehículo.

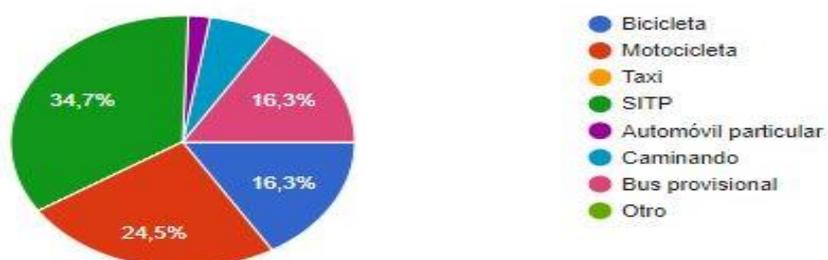
## **1.2 Piloto de la encuesta**

Para el diseño de la encuesta se realizó un piloto de la misma, permitiendo identificar el nivel de satisfacción de los estudiantes de la jornada nocturna de la Uniagustiniana con relación a su movilización. De igual manera se identificaron diferentes problemas durante la espera para obtener un sistema de transporte que los ayude en la movilización y durante la misma hacia sus hogares.

En la Figura 1, se pueden contemplar el tipo de movilización de los encuestados, dando una relatividad del 37,2% en SITP, 24,5% en motocicleta, 16,3% en bicicleta, 16,3% en bus provisional, 6,1% caminando, 2% en automóvil particular.

### 1. ¿Cuál es el medio de movilización o de transporte que más utiliza para llegar a la universidad?

49 respuestas



**Figura 1.** Pregunta N° 1. Elaboración propia.

En la Figura 2, se pueden contemplar la frecuencia de movilización en el STC de los encuestados, dando una relatividad del 46,9% diario, 36,7% casi nunca, 10,2% tres o cuatro veces a la semana, 6,1% una o dos veces a la semana.

### 2. ¿Qué tan frecuente usa el transporte público hacia y desde la Universidad?

49 respuestas

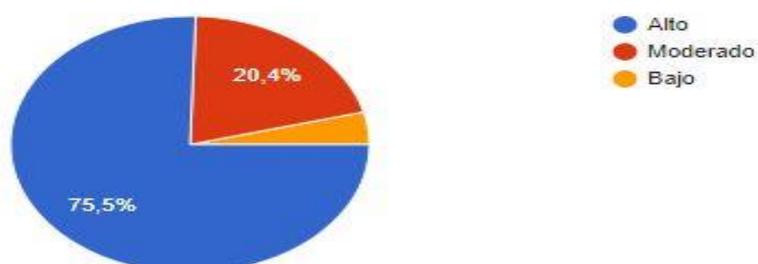


**Figura 2.** Pregunta N° 2. Elaboración propia.

En la Figura 3, se pueden contemplar el costo de la tarifa del medio de transporte con relación al servicio que le brindan a los encuestados, dando una relatividad del 75,5% alto, 20,4% moderado y 4,1% bajo.

### 3. ¿Cómo le parece la tarifa del medio de transporte que utiliza con relación al servicio que le brindan?

49 respuestas

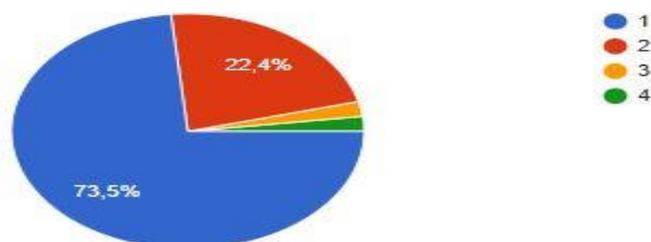


**Figura 3.** Pregunta N° 3. Elaboración propia.

En la Figura 4, se pueden contemplar el número de pasajes que pagan los encuestados desde la Uniagustiniana hasta el origen, dando una relatividad del 73,5% un pasaje, 22,4% dos pasajes, 2% tres pasajes y 2% cuatro pasajes.

### 5. ¿Cuántos pasajes paga desde la Universidad hasta su casa al finalizar clases?

49 respuestas

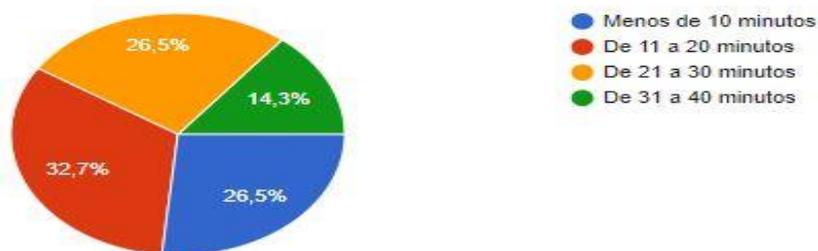


**Figura 4.** Pregunta N° 5. Elaboración propia.

En la Figura 5, se pueden contemplar el tiempo de espera para la obtención del medio de transporte desde la Uniagustiniana hasta el origen, dando una relatividad del 32,7% de once a veinte minutos, 26,5% menos de diez minutos, 26,5% de veintiuno a treinta minutos y 14,3% treinta y uno a cuarenta minutos.

7. ¿Cuánto tiempo debe esperar para obtener el servicio de transporte que lo movilice desde la universidad hasta su casa?

49 respuestas



**Figura 5.** Pregunta N° 7. Elaboración propia.

En la Figura 6, se pueden contemplar el tiempo que invierte un usuario en el medio de transporte desde la Uniagustiniana hasta el origen, dando una relatividad del 34,7% de treinta y un minutos a una hora, 22,4% menos de quince minutos, 20,4% de diez y seis a treinta minutos, 18,4% de una hora a hora y media y 4,1% de hora y media a dos horas.

9. En un día normal ¿Cuánto tiempo invierte para transporte desde la Universidad hasta su casa al finalizar clases?

49 respuestas



**Figura 6.** Pregunta N° 9. Elaboración propia.

En la Figura 7 se pueden contemplar la vulnerabilidad de los usuarios al momento de adquirir el medio de movilización, dando una relatividad del 55,1% siendo negativa y 44,9% siendo afirmativa.

11. ¿Alguna vez lo han robado o ha sufrido un intento de robo en la espera del bus para llegar a la Universidad o después de finalización de clases para llegar a su casa?

49 respuestas



**Figura 7.** Pregunta N° 11. Elaboración propia.

En la Figura 8, se pueden contemplar las posibles causas en la demora de la movilización del STC desde un origen hasta la Uniagustiniana, dando una relatividad del 46,9% como todas las anteriores, 24,5% como tráfico en la hora pico y paradas del transporte público para recoger (y dejar) usuarios, 10,2% como tráfico en la hora pico y tiempos de espera prolongados entre un medio de transporte y otro que cubran la ruta que se necesita, 8,2% como paradas del transporte público para recoger (y dejar) usuarios y tiempos de espera prolongados entre un medio de transporte y otro que cubran la ruta que se necesita, 4,1% como tiempos de espera prolongados entre un medio de transporte y otro que cubran la ruta que se necesita, 4,1% como tráfico en la hora pico y 2% como paradas del transporte público para recoger (y dejar) usuarios.

12. Usted en lo personal, ¿Cuál considera que origina la demora en la movilización en el medio de transporte público desde su casa o trabajo hasta la Universidad?

49 respuestas



**Figura 8.** Pregunta N° 12. Elaboración propia.

En la Figura 9, se pueden contemplar la l decisión de los encuestados entre adquirir un medio de transporte de la Uniagustiniana que lo ayude en la movilización, dando una relatividad del 98% siendo afirmativa y 2% siendo negativa.

13. Si la Universidad ofreciera un servicio de transporte que lo ayudará a movilizarse desde su casa o trabajo hasta la Universidad y de regreso, ¿Usted lo consideraría como opción al transporte?

49 respuestas

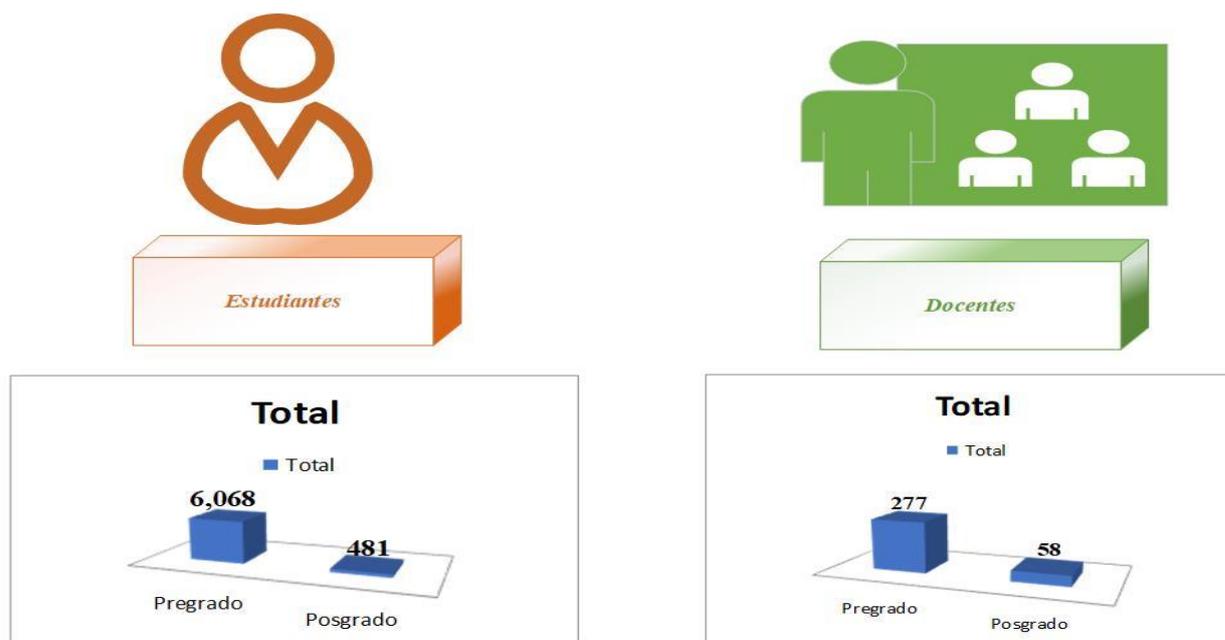


**Figura 9.** Pregunta N° 13. Elaboración propia.

### 1.3 Descripción del problema

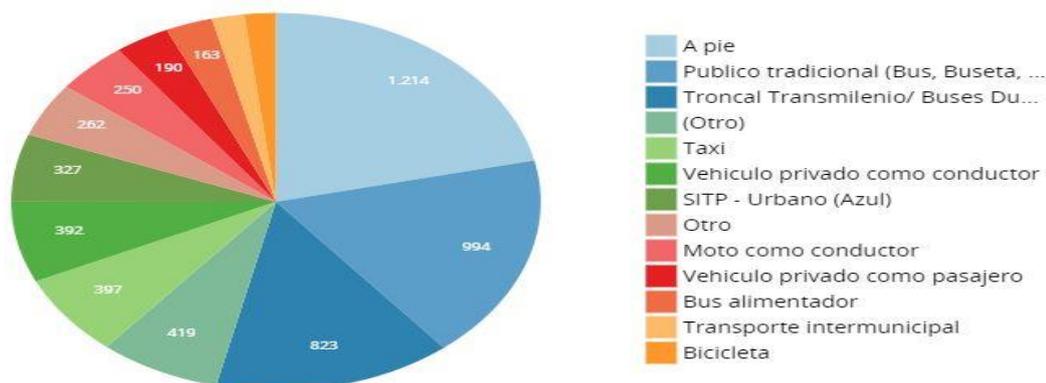
La Uniagustiniana es una institución de educación superior de Bogotá D.C. Ubicada al suroccidente, en la ciudad cuenta con su campus Tagaste, el cual está ubicado en la Avenida ciudad de Cali No. 11b-95. La universidad tiene una jornada diurna y una jornada nocturna. Los estudiantes de la jornada nocturna han presentado problemas en su movilización al momento de finalizar sus deberes en la Universidad como se pudo apreciar en la encuesta piloto presentada anteriormente, algunos de estos problemas son la inseguridad durante la espera para la obtención del bus que los ayude en su movilización y exposición a climas extremos como fuertes vientos y lluvias.

La Universidad cuenta con 6.068 estudiantes de pregrado y 277 profesores de pregrado como se observa en la Figura 10, donde los datos fueron obtenidos de la revista Uniagustiniana al cierre del año 2018, por lo tanto, se tendrá un estimado de 6.345 usuarios que puedan llegar a tomar este servicio. Sin embargo, por cuestiones de tiempo y cuantía de datos se llegará a una aproximación de la demanda, vehículos requeridos y solución al presente caso.



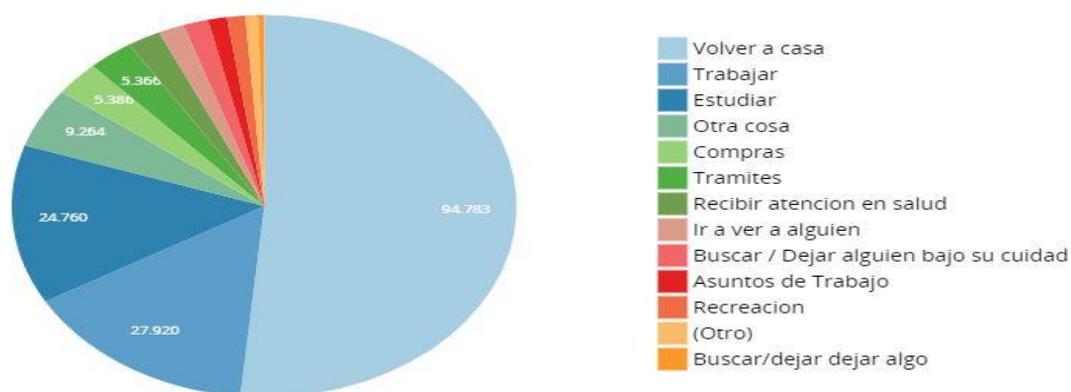
**Figura 10.** Integrantes de la U.A finalización del año 2018. Tomada y modificada de Universitaria Agustiniiana. (2019)

Se puede visualizar en la Figura 11, estadísticas de la secretaria de movilidad donde los datos presentados pertenecen al año 2015 de la ciudad de Bogotá D.C. A continuación se describe el comportamiento de los habitantes de la ciudad de Bogotá D.C, filtrando el departamento y medio de transporte y expresando el número de personas que se desplazan en diversos medios y formas de movilización, se puede interpretar que el 21% de personas se movilizan a pie, el 18% en transporte público o tradicional (bus, buseta), el 15% en Transmilenio, el 7% otro, 7% en taxi, 7% en vehículo, 6% en SITP azul, 5% en otro, 4% en moto como conductor, 3% vehículo privado como pasajero, 3% bus alimentador, 2% transporte intermunicipal y 2% en bicicleta, donde principalmente se puede tener en cuenta los ciudadanos que se movilizan en transporte público, a pie, bicicleta, SITP y taxi. Al contrastar los resultados de la encuesta de la secretaria de movilidad con los de la encuesta piloto expuesta en el numera 1.2, para los estudiantes de la Uniagustiniana se encuentra que el transporte colectivo es el transporte que más utilizan los estudiantes, sin embargo, esto debe ser confirmado mediante una encuesta más amplia.



**Figura 11.** Participación de personas en Bogotá en la movilidad, (2015). Tomada de la secretaria distrital de movilidad. (2019)

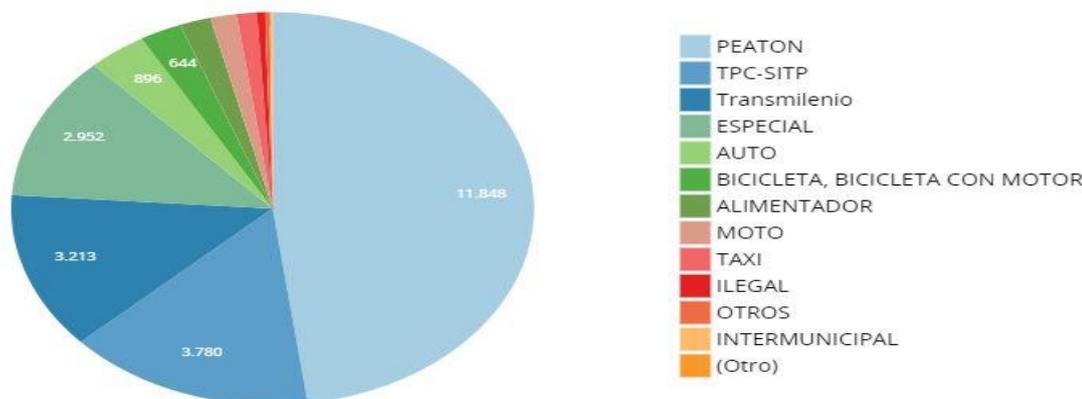
Como razón de la movilización de la sociedad se puede contemplar diversos motivos, donde se enfatiza en solo un ítem, el cual evalúa la cantidad de personas que se movilizan por estudio. La Figura 12 ilustra la cantidad de personas que se movilizan por motivos de estudios lo cual ocupa un valor de 24.760 personas donde la gráfica expresa los diferentes motivos de viaje de las personas en Bogotá, distribuida en valores absolutos donde tienen una participación con los siguientes valores: 52% volver a casa donde se enfoca principalmente la presente investigación, 15% trabajar, 13% estudiar, 5% otra cosa, 3% compras, 3% tramites, 2% recibir atención en salud, 2% ir a ver a alguien, 2% buscar o dejar a alguien, 1% asuntos de trabajo, 1% recreación, 1% otro, 0% buscar o dejar algo.



**Figura 12.** Cuantía de personas VS motivo de viaje, (2015). Tomada de la secretaria distrital de movilidad. (2019)

En la Figura 13 ilustra los medios que los estudiantes usan para poder desplazarse, la figura expresa el número de personas por medio de movilización sin embargo se tiene una participación

absoluta de: 48% peatón, 15% SITP, 13% Transmilenio, 12% especial, 4% auto, 3% bicicleta-bicicleta con motor, 2% alimentador, 2% moto, 1% taxi, 0% ilegal, 0% otros, 0% intermunicipal y 0% otro.



**Figura 13.** Número de estudiantes VS modo de movilización. Tomada de la secretaria distrital de movilidad. (2019)

Los datos obtenidos anteriormente hacen referencia únicamente al tipo de transporte de los estudiantes de Bogotá D.C. en general, donde se puede interpretar con relación al tipo de movilización de la comunidad agustiniana que el Sistema Integrado de Transporte Publico (SITP) es el principal medio de movilización. Teniendo como referente el tipo de movilización de la comunidad agustiniana se estableció los puntos más cercanos para la obtención del respectivo servicio de movilización. En este sentido en la Uniagustiniana sede Tagaste, se determinó los paraderos únicamente del SITP más cercanos respecto a salida de la misma, la ubicación de estos paraderos se representa en la Figura 14, dos en dirección a la universidad (A, B) y los otros en dirección opuesta (C, D). Los dos primeros paraderos se ubican en sentido Sur-occidente (A, B) y los dos últimos paraderos en sentido Nororiente (C, D), estos paraderos son los principales alimentadores en la llegada y partida de los estudiantes, por lo tanto, se evaluarán las rutas que traigan o lleven estudiantes desde estos puntos de referencia:



**Figura 14.** Paradas más cercanas de la U.A. Tomada y modificada de moovit. (2019)

La comunidad académica de la Uniagustiniana en la jornada nocturna de la sede Tagaste utiliza diferentes medios de transporte para movilizarse desde la Universidad hasta sus hogares al momento de finalizar sus actividades, teniendo presente que los hogares de dicha comunidad se encuentran distribuidos de manera dispersa, por ejemplo, hay personas residentes en Fontibón, Kennedy, Bosa, Soacha e inclusive fuera de la ciudad como Mosquera, Funza y Madrid, estos son algunos de los lugares donde se encuentran distribuidas las viviendas de la comunidad agustiniana y donde han presentado varios tipos de dificultades en la movilización como se expuso anteriormente. La comunidad de la jornada nocturna de la Uniagustiniana se puede clasificar en dos grupos, uno son los estudiantes que es el más grande, el segundo son los docentes. Para el presente caso, estos dos grupos se pueden categorizar en un solo criterio que es Usuarios. Sin embargo, la cantidad de usuarios dependerá de los horarios de salida ya que son variables, debido que no todos salen a la misma hora.

En la Figura 15, se puede contemplar las rutas de SITP que pasan por los respectivos paraderos que se encuentran en la cercanía de la Uniagustiniana y por los cuales se pueden movilizar los usuarios. Teniendo presente que son dos paraderos en sentido Sur-occidente (A, B) y dos puntos en sentido Nororiente (C, D). En cada paradero se pueden contemplar determinado número de rutas que sirven para la movilización de los usuarios como también algunas que se encuentran inactivas, por ejemplo, en la parada “A” se pueden contemplar nueve rutas, en la parada “B” se pueden contemplar once activas y tres inactivas, en la parada “C” se puede contemplar seis rutas activas y en la parada “D” se puede contemplar trece rutas activas y cuatro inactivas.

Paradas del SITP cerca a la Uniagustiniana	
Parada A	Parada en dirección Sur-occidente: 105, 111, 132, 148, 787-A, 927, 94, C-135 y T38 como rutas activas
Parada B	Parada en dirección Sur-occidente: 265, 266, 270, 291, 577, 7, 722, 740, 921, C-77, T50 como rutas activas. 702, ZP-05, ZP-238 como rutas inactivas.
Parada C	Parada en dirección Nororiente: 266, 270, 291, 722, 94, T-38 como rutas activas
Parada D	Parada en dirección Nororiente: 105, 111, 132, 148, 265, 577, 7, 740, 787-A, 921, 927, C-135, C-77 como rutas activas. 702, T-50 ZP-05 y ZP-238 como rutas inactivas.

**Figura 15.** Rutas en las paradas de la U.A. Elaboración propia.

Considerando lo anterior, el problema de la movilización de los usuarios de la jornada nocturna al momento de finalizar sus deberes, tiene variables como lo son la salida en diferentes horarios de los respectivos usuarios, que parten desde la Universidad y se dirigen a diferentes destinos (lugares de la ciudad) donde son residentes. Requiriendo un medio de transporte que los ayude en su movilización, sin embargo, este medio de transporte tiene una capacidad máxima para movilizar a dichos usuarios. Tomando como presente la difícil movilización y cantidad de demanda, se han usado varios métodos para poder brindar soluciones a casos de logística como lo es el transporte, abastecimiento y trazabilidad de rutas. Se puede contemplar uno en particular como dice Pérez (2017):

Aun cuando el School Bus Routing Problem (SBRP) fue formulado décadas antes, este es aún un tema de investigación significativa debido a su importante impacto en logística. Diversos estudios contienen una gran variedad de estrategias para resolver el SBRP. Una revisión de literatura reciente puede encontrarse en Park and Kim (2010). [...] Los autores consideran atributos tales como los tipos de pasajeros, las distancias, los impedimentos en ciertos lugares, y la importancia de los sitios visitados para encontrar mejores rutas. (p. 289).

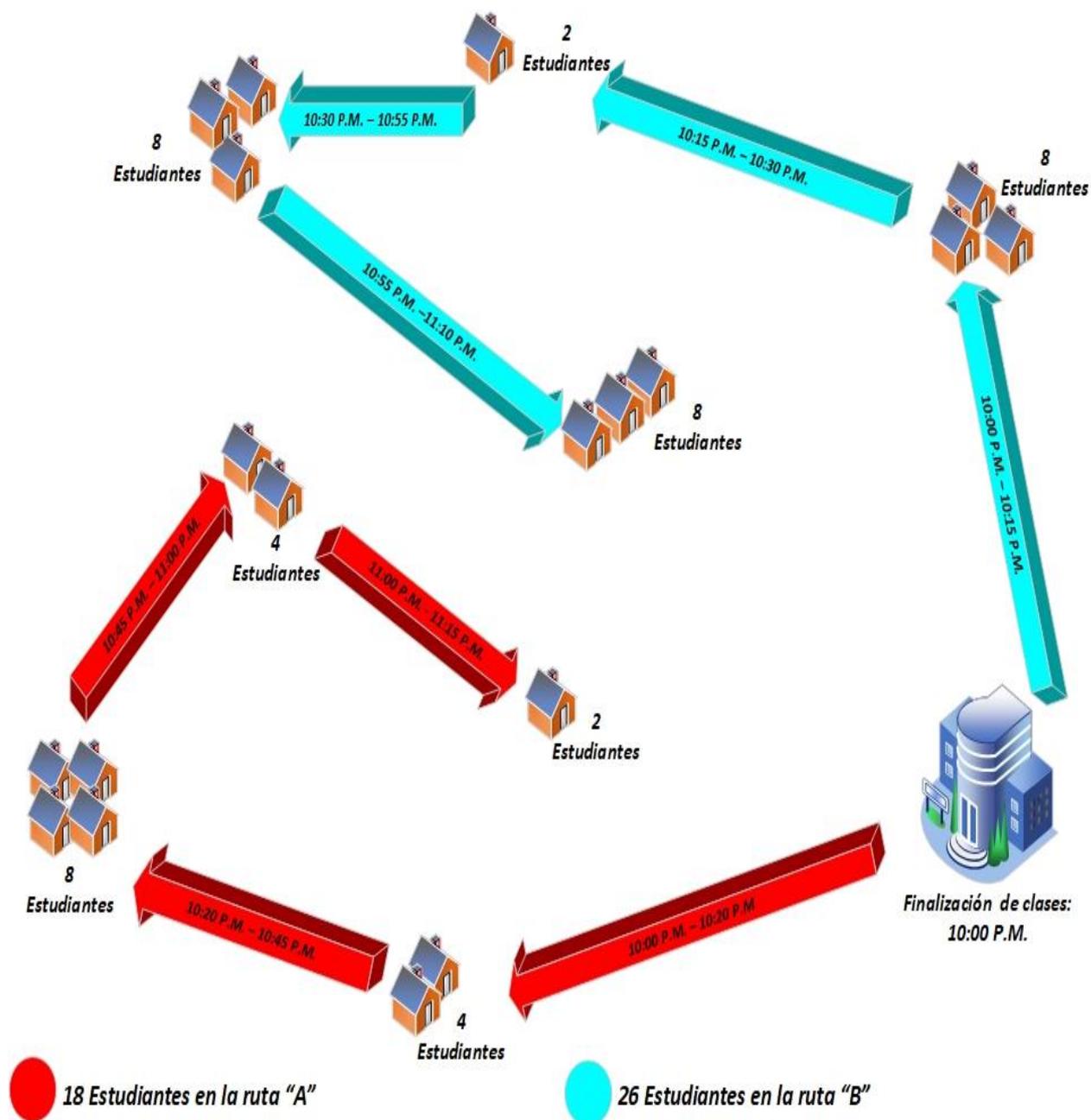
A partir de lo anterior y con relación a lo expuesto, se puede relacionar el respectivo caso y modelar con el problema llamado School Bus Routing Problem (SBRP), este caso obedece a las restricciones y comportamiento del problema como lo son: capacidad máxima del bus para poder movilizar los usuarios, distancia establecida entre paradas del autobús para movilizar a los usuarios y, por último, número y tipo de rutas a requerir para cubrir la demanda establecida.

Siendo este un referente para el manejo de la movilización y control de rutas, cumpliendo con las demandas ofreciendo una opción de desplazamiento controlado por medio de métodos objetivos

tales como los modelos matemáticos que brindan respuesta a problemas de movilidad como pueden ser lo puntos de acopio (destino del usuario), cumpliendo con una capacidad máxima del medio de transporte. Sin embargo, el presente caso tiene un factor diferenciado y es la empleabilidad de buses escolares únicamente para la movilización de la comunidad agustiniana al momento de culminar sus deberes en la misma. Esto hace que el problema de ruteo SBRP ajustado al modelo CVRP se deba modificar, debido que los buses no deben retornar al depósito (Uniagustiniana).

Existen modelos específicos que se pueden ajustar a problemas como el expuesto anteriormente, uno de estos es el OVRP (Open Vehicle Routing Problem) combinado con el modelo CVRP, es decir, OCVRP (Open Capacitated Vehicle Routing Problem). El modelo CVRP ya se ha expuesto con anterioridad, sin embargo, el modelo OVRP se enfoca en problemas de ruteo donde la trayectoria del vehículo tiene un punto de origen, pero finaliza al momento de visitar el último cliente, a diferencia de otros modelos donde el vehículo debe regresar al punto de origen inmediatamente después de visitar el último cliente (Pulpita, 2011, pp. 9-10). El modelo OCVRP aplicado al problema SBRP tiene como principio entonces, movilizar una determinada cantidad de estudiantes (comunidad agustiniana) sin exceder la capacidad máxima del vehículo, visitando cada punto enrutado perteneciente a la ubicación geográfica de cada estudiante, teniendo como inicio de la ruta un depósito (que en este caso es la Uniagustiniana) y como finalización de la ruta el último punto del cliente enrutado.

Una representación gráfica de este problema se puede apreciar en la Figura 16, adaptando el problema del SBRP mediante la solución del OCVRP. Teniendo la ubicación de cada vivienda de los estudiantes, docentes y/o administrativos que están siendo movilizados por una ruta específica al momento de culminar sus deberes en la Uniagustiniana. El bus debe pasar por cada una de estas viviendas teniendo presente la capacidad del mismo. Por lo mismo se debe tener un análisis del tipo de vehículo que se requiere para la movilización de los estudiantes cumpliendo con la capacidad necesaria.



**Figura 16.** Problema de ruteo del autobús escolar (SBRP). Elaboración propia.

Para poder medir la insatisfacción que tienen los Usuarios con el manejo de su sistema de transporte actual como también los problemas y riesgos a los que están expuestos se realizó a través un sondeo la realización de encuestas. Se realizó una encuesta piloto a 49 estudiantes de la Universitaria Agustiniiana (U.A) donde respondieron de manera voluntaria y expusieron los problemas que han tenido en su movilización. La encuesta tenía, 12 preguntas para determinar diversos factores que están afectando a los estudiantes para la movilización hacia la U.A y desde la U.A hacia sus hogares. Como se detalla en la Tabla 1, las preguntas se enfocaron en diversos eventos que puedan causar la dificultad en la movilización, sin embargo, al final se contemplaron

únicamente las preguntas que hacían referencia a la salida de los estudiantes con el fin de disminuir el alcance del proyecto. La encuesta se enfoca principalmente en las preguntas 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11, 12, 13:

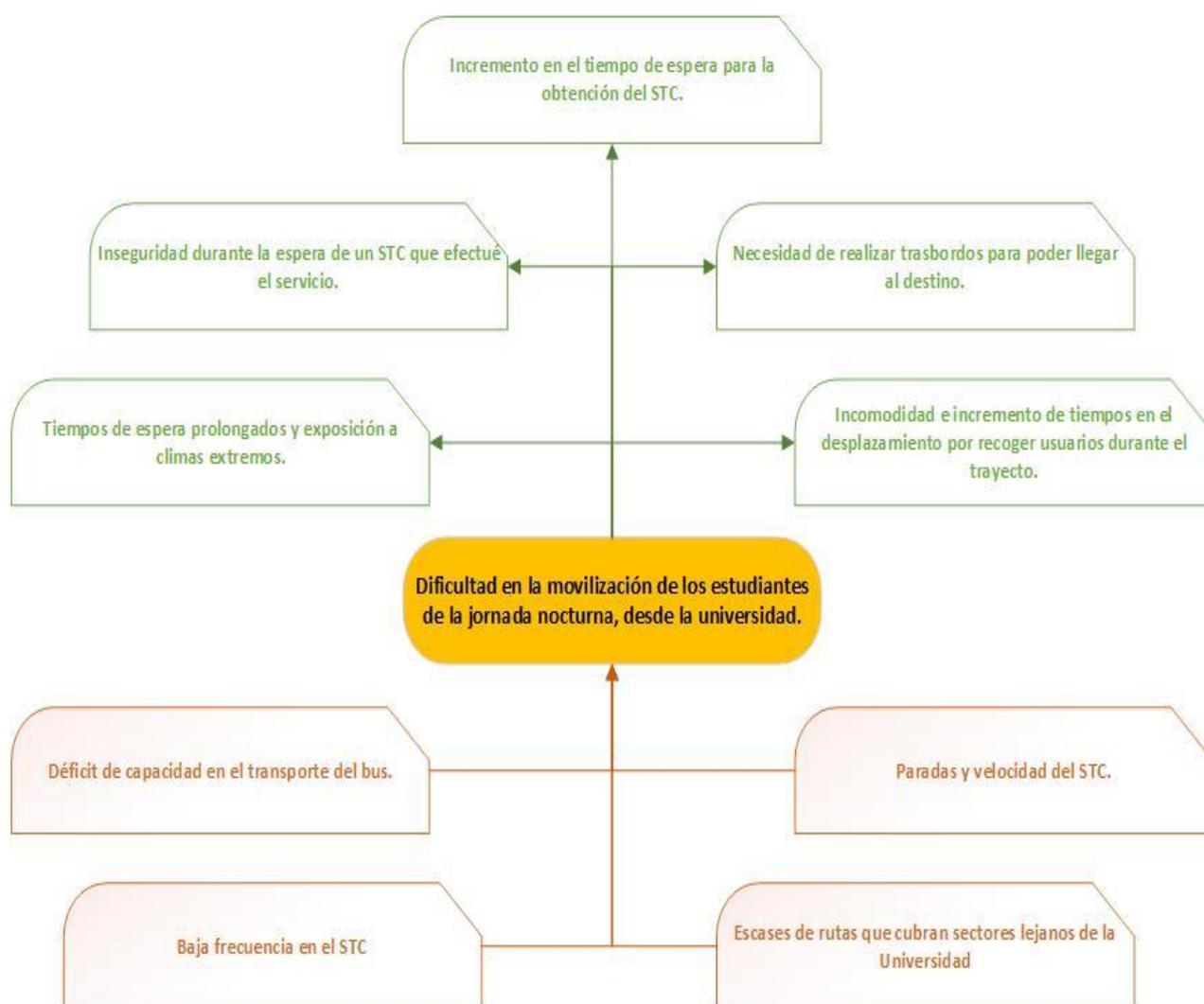
Tabla 1

*Preguntas, encuesta piloto.*

<b>Numero</b>	<b>Pregunta</b>
1	¿Cuál es el medio de movilización o de transporte que más utiliza para llegar a la universidad?
2	¿Qué tan frecuente usa el transporte público hacia y desde la Universidad?
3	¿Cómo le parece la tarifa del medio de transporte que utiliza con relación al servicio que le brindan?
4	¿Cuántos pasajes paga para llegar desde su casa o trabajo hasta la universidad?
5	¿Cuántos pasajes paga desde la Universidad hasta su casa al finalizar clases?
6	¿Cuánto tiempo debe esperar para obtener el servicio de transporte que lo movilice desde su casa o trabajo hasta la universidad?
7	¿Cuánto tiempo debe esperar para obtener el servicio de transporte que lo movilice desde la universidad hasta su casa?
8	En un día normal ¿Cuánto tiempo invierte para transporte desde su casa o trabajo hasta la Universidad?
9	En un día normal ¿Cuánto tiempo invierte para transporte desde la Universidad hasta su casa al finalizar clases?
10	Para poder desplazarse desde la casa o trabajo a la Universidad ¿Cuántos transbordos (cambio de vehículo) debe realizar para poder movilizarse?
11	¿Alguna vez lo han robado o ha sufrido un intento de robo en la espera del bus para llegar a la Universidad o después de finalización de clases para llegar a su casa?
12	Usted en lo personal, ¿Cuál considera que origina la demora en la movilización en el medio de transporte público desde su casa o trabajo hasta la Universidad?
13	Si la Universidad ofreciera un servicio de transporte que lo ayudará a movilizarse desde su casa o trabajo hasta la Universidad y de regreso, ¿Usted lo consideraría como opción al transporte?

*Nota:* Autoría propia.

Con base en los resultados de la encuesta se propuso un árbol de problemas para relacionar las causas y los efectos del problema de movilización de los estudiantes de la jornada nocturna, en la Figura 17, dentro de los efectos se pueden analizar 5, los cuales son: incremento en el tiempo de espera para la obtención del STC, inseguridad durante la espera de un STC que efectúe el servicio, necesidad de realizar trasbordos para poder llegar al destino, tiempos de espera prolongados y exposición a climas extremos, e incomodidad y tiempos prolongados en el desplazamiento por recoger usuarios durante el trayecto. Los cuales son causados por 5 factores principales como: déficit de capacidad en el transporte del bus, paradas y velocidad del STC, carencia del STC dada la hora de salida de la universidad, escasas de rutas que cubran sectores lejanos de la universidad y baja frecuencia en el STC.



**Figura 17.** Árbol de problemas de proceso de ruteo en la U.A. Elaboración propia.

### **1.3.1 Efectos.**

**1.3.1.1 Incremento en el tiempo de espera para la obtención del STC.** En la Figura 5, encuesta piloto, se obtuvo que en un 32,7% las personas deben esperar de 11 a 20 minutos, tomando como segundo valor relevante un 26,5% donde deben esperar de 21 a 30 minutos por la baja frecuencia del STC.

**1.3.1.2 Inseguridad durante la espera de un STC que efectuó el servicio.** En el transcurso de la espera para obtener un STC las personas están expuestas a intentos de hurto o robo de sus pertenencias en los paraderos como se ilustra en la Figura 7, donde el 44,9% ha sido participe de estos eventos.

**1.3.1.3 Necesidad de realizar trasbordos para poder llegar al destino.** En algunos casos el STC no cubre la totalidad de la ruta o movilización desde el punto que se obtiene el servicio del STC hasta el destino de la persona, por ende, es necesario tomar más de un STC donde el primero aproxime al usuario lo mayor posible y luego obtener otro STC que culmine la totalidad de la ruta o movilización como se ilustra en anexos en la Figura 57, como le ocurre al 49% de los encuestados, que deben recurrir a dos o más medios de transporte.

**1.3.1.4 Tiempos de espera prolongados y exposición a climas extremos.** Debido al déficit de capacidad del STC, en el momento que llega al paradero no frena para recoger más usuarios, esto provoca que la persona deba esperar otro STC estando expuesta a climas extremos como frio y lluvia como se ilustra en la Figura 5, el 40.8% de los encuestados deben esperar entre 20 y 40 minutos para la obtención de este servicio.

**1.3.1.5 Incomodidad e incremento de tiempo en el desplazamiento por recoger usuarios durante el trayecto.** En la Figura 8, se puede contemplar que el 46% de los encuestados afirma que el incremento de tiempo en la movilización del STC se debe por recoger personas en el trayecto de la ruta (lo cual provoca congestión dentro del mismo generando incomodidad), tráfico y tiempos de espera prolongados. Como segundo valor relevante es del 24% donde afirman que se origina por el tráfico y paradas para recoger usuarios en el trayecto, por ende, los tiempos de movilización y hora de llegada al destino incrementan.

### **1.3.2 Causas.**

**1.3.2.1 Déficit de capacidad en el transporte del bus.** El STC tiene una capacidad máxima (dependiendo del vehículo) para poder transportar usuarios dentro del mismo. En varios casos, esta capacidad no es suficiente para poder movilizar todos los usuarios que lo requieren.

**1.3.2.2 Paradas y velocidad del STC.** El STC debe movilizarse por el carril lento por cuestiones de seguridad para poder recoger y dejar usuarios en determinadas ubicaciones obedeciendo a una velocidad límite dentro de la ciudad.

**1.3.2.3 Escases de rutas que cubran sectores lejanos de la universidad.** El STC tiene rutas específicas que en algunos casos no cubren desde el punto de partida hasta el punto de llegada del usuario que necesita el servicio de movilización, donde el 48% de los encuestados deben tomar más de un medio de transporte para movilizarse en su totalidad.

**1.3.2.4 Baja frecuencia en el STC.** Se puede interpretar como las veces que pasa un STC en determinado tiempo. Entre mayor sea transcurso del tiempo en pasar un STC menor será la frecuencia del mismo. Al momento de haber baja frecuencia el bus se llenará y no podrá movilizar a la totalidad de los usuarios.

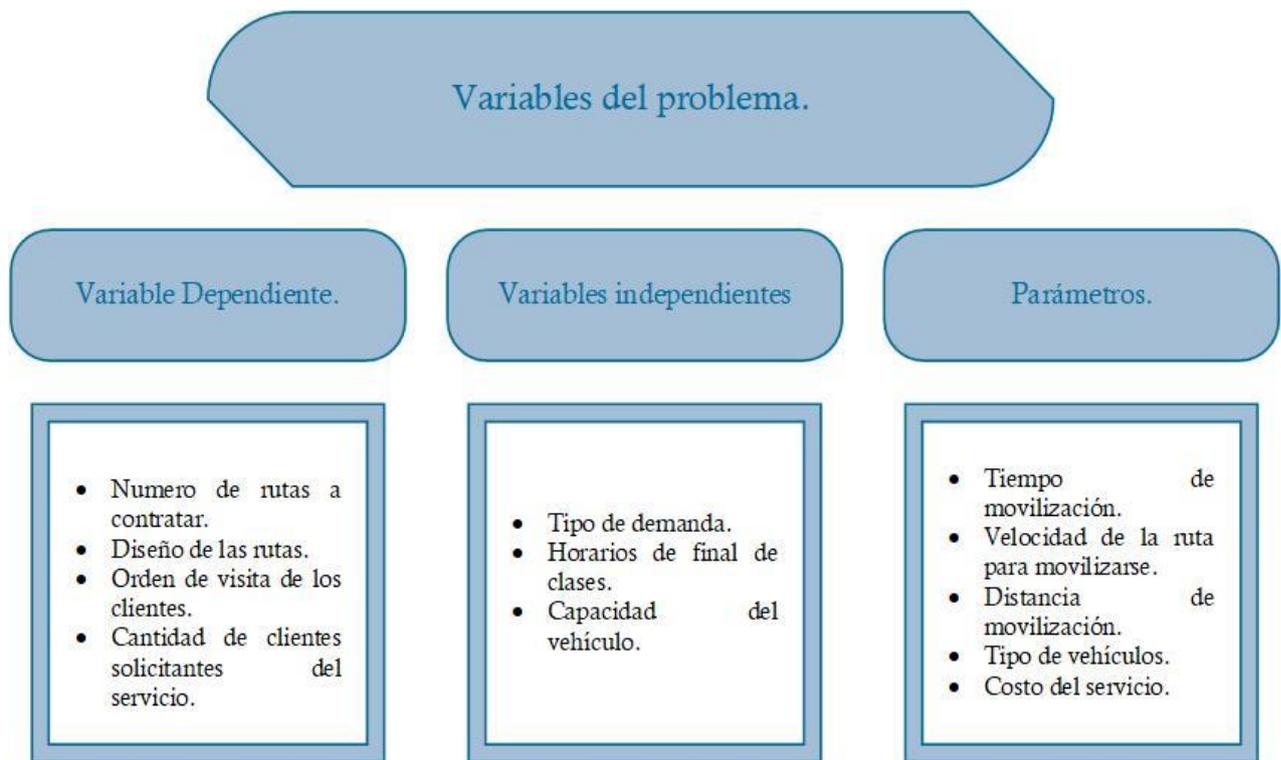
### **1.3.3 Pregunta de investigación.**

¿Cómo solucionar el modelo de ruteo de buses escolares para facilitar el transporte de la comunidad agustiniana de la jornada nocturna desde la sede Tagaste hacia sus casas?

#### **1.3.3.1 Sistematización del problema.**

- ¿Cómo diseñar el modelo matemático para el servicio de ruta en la universitaria agustiniana?
- ¿Cómo determinar el tipo de demanda que requerirá el servicio de ruta en la universitaria agustiniana?
- ¿Cómo demostrar la validación de los datos recogidos con base a las necesidades presentadas por los estudiantes y/o profesores que opten por tomar este servicio?
- ¿Cómo evaluar si las modificaciones e implementaciones de un servicio de ruta de la universitaria agustiniana optimizaría el proceso?

### 1.3.4 Variables del problema.



**Figura 18.** Variables del problema de ruteo en la U.A. Elaboración propia

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Proponer un modelo de ruteo de buses escolares para facilitar el transporte de la comunidad agustiniana de la jornada nocturna desde la sede Tagaste hacia sus hogares.

### 2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la demanda en la jornada nocturna de la comunidad Agustiniana que requieran y estén interesados en un sistema de ruta privado para llegar a sus hogares.
- Seleccionar el modelo matemático de programación lineal que represente el problema de ruteo de buses escolares para la comunidad agustiniana de la jornada nocturna.
- Implementar los algoritmos de barrido y vecino más cercano para la solución del problema de ruteo de buses escolares en Visual Basic de Excel.
- Determinar la cantidad de rutas necesarias para la jornada nocturna de la comunidad Agustiniana, mediante la solución del problema de rutas escolares.
- Realizar una validación del modelo por medio de análisis de sensibilidad.

### 3 Justificación

Se pretende desarrollar una propuesta para implementar un sistema de rutas escolares, porque se presenta inseguridad o riesgos durante la espera de un medio de transporte que los ayude en su movilización. Teniendo presente los tiempos de espera prolongados, exposición a climas extremos y riesgos.

El desarrollo de esta propuesta busca mejorar la calidad de vida de la comunidad agustiniana, ofreciendo una mayor calidad en el servicio de movilización. Con el desarrollo de esta propuesta se espera disminuir inconvenientes en la movilización desde el punto de partida que es la Uniagustiniana hasta sus hogares, dichos inconvenientes pueden ser transbordos por la lejanía, tiempos de espera prolongados, dado que un bus que sea apto para la movilización puede tardar demasiado tiempo en llegar a la parada donde se puede obtener el servicio de movilización.

Al evaluar los parámetros obtenidos por medio de encuestas se podrá determinar la cantidad de buses que se requieran, horario de movilización y puntos de acopio, asegurando una movilización con comodidad y calidad, teniendo en cuenta que bajará el nivel de riesgo a la hora de salida de la universidad.

Actualmente las empresas distribuidoras o transportistas necesitan un proceso de ruteo para optimizar tiempos, distancias y capacidad de los vehículos, un caso de estudio se puede remontar a New York donde 83.000 estudiantes deben ser recogidos y a su vez trasladados a 19.000 paradas de autobús escolares, donde se tiene presente un costo de 100 millones de dólares. Por ende, este caso ha sido base de motivación para estudio donde se siguen buscando nuevas soluciones que puedan aportar resultados óptimos. Este problema se remonta a un modelo matemático conocido como School Bus Routing Problem (SBRP) que a su vez contiene variables que se ajustan a casos de la vida real, no obstante, se limita a abarcar las primordiales variables o unas cuantas que se puedan ajustar a la gran parte del problema, debido que al tratar de aplicar las variables exactas que demandan los clientes se puede llegar a convertir en modelos difíciles de cuantificar y tardaría demasiado tiempo en solucionar (Arias, 2010, pp. 8 -8).

Con el desarrollo y evaluación del proyecto se puede representar la necesidad tanto de los estudiantes como de los docentes que puedan llegar a requerir de este servicio de rutas, teniendo en cuenta que varios de estos usuarios pueden tener inconvenientes desde el punto de partida del viaje que es la Universidad hasta sus hogares. Dichos inconvenientes pueden ser lejanía, dado que deberán tomar un transporte que puede no cubrir la totalidad del trayecto, la frecuencia de adquisición del sistema de transporte colectivo (STC) dado que un bus que sea apto para la movilización puede

llegar a tardar demasiado tiempo y ello representaría retraso o incremento de tiempo para la llegada a sus hogares, como también se puede presenciar por medio de una encuesta piloto que aproximadamente la mitad de los estudiantes han sufrido intentos de robo y demoran más de una hora en llegar a sus hogares con el STC.

Al evaluar las necesidades de los usuarios que opten por este servicio se pretende mejorar la movilización ofreciendo un costo ajustado al servicio que sea representativo con las necesidades presentes, teniendo en cuenta que bajara el nivel de riesgo a la hora de salida de la universidad. Al evaluar los parámetros obtenidos por medio de encuestas se podrá determinar la cantidad de buses que se requieran, horario de movilización y puntos de acopio, tomando la cantidad de vehículos como una variable de decisión.

Un aporte sustancial en el desarrollo del proyecto se puede tomar como la movilización de los estudiantes y docentes que lo necesiten. De igual manera tener una aplicación teórico- práctica del estudio de los datos arrojados de las encuestas que están basadas en las necesidades de los clientes para poder evaluar la situación por medio de un modelo matemático de ruteo de buses escolares llamado Open Capacitated Vehicle Routing Problem (OCVRP) aplicado para buses escolares, teniendo como resultado una aproximación y estimación de la demanda, rutas factibles y costos de implementación del respectivo proyecto.

Como fin se pretende la aprobación y obtención del título de Ingeniero Industrial presentando el respectivo proyecto de investigación como requisito de grado. El contenido del trabajo tendrá una relación directa de estadísticas, análisis de las mismas, desarrollo de modelos matemáticos evaluando variables y parámetros obtenidos por los usuarios y generando rutas factibles a partir de las heurísticas de “Barrido” y el “vecino más cercano”.

## 4 Marco referencial

### 4.1 Antecedentes de la investigación

El estudio de casos de ruteo ha sido un tema muy relevante en aspectos empresariales debido que tratan de desempeñar por medio de modelos matemáticos soluciones aproximadas a casos de la vida real, ofreciendo un panorama cercano a posibles eventos de ocurrencia. Por ello se puede presenciar gran cantidad de investigaciones que tratan de proponer soluciones a casos específicos que se pueden presentar ya sea en una empresa o en lo personal, algunos de estos son:

El libro “The vehicle routing problem” (Toth, Vigo, 2002). Plantea diversos modelos matemáticos para ruteo, un referente es la inicialización del caso VRP del cual se desglosa a variables como ventanas de tiempo, restricción de distancias, capacidad del vehículo, Backhauls (trata de una división de rutas donde un vehículo debe recorrer ciertas rutas entregando productos y otro vehículo debe recoger una cantidad dada de productos a entregar), como modelo principal se puede apreciar la funcionalidad del algoritmo de barrido. Al aplicar el algoritmo de barrido en FleetManager, se pueden modificar los turnos múltiples dado que eran una limitación como también la visita de los proveedores con menor frecuencia, es decir, aquellos que se visitan menos veces en un periodo a comparación de otros y cumplir con la capacidad máxima de los vehículos. Se detalla que el respectivo algoritmo genera grupos de proveedores (Clústeres), teniendo presente que se pueden asignar restricciones, seleccionando con mayor precisión dichos clústeres. La restricción que se tendrá en cuenta particularmente es la de capacidad del vehículo (Toth, Vigo, p. 263).

La tesis titulada “Aplicación de un modelo de optimización en la planeación de rutas de los buses escolares del colegio liceo de cervantes norte” (Arias, 2010) presenta una solución del caso SBRP por medio de una heurística llamada Colonia de hormigas (ACO) tomando un caso del colegio Liceo de Cervantes Norte, resolviendo un caso de problema de ruteo de buses escolares.

En un artículo publicado por la revista Socio-Economic Planning Sciences se estudia un caso en Williamsville Central School District de New York, presenta un caso similar al SBRP, donde se pretende desplazar o movilizar a estudiantes de discapacidad o condiciones especiales desde la casa hasta la cercanía de la escuela. Dado que estos estudiantes tienen diversas condiciones que no pueden ser pasadas por alto se decide tomar un método llamado “generación de columnas”. Teniendo en cuenta que debe haber ventanas de tiempo en las variables, tamaño de los buses, demora al momento de iniciar el servicio de movilización al igual que al momento de finalizar y por último teniendo en cuenta que se debe utilizar el servicio de ruta escolar en horarios A.M. y P.M. como requisito de movilización. (Cáceres, 2019, p. 2)

Como método de solución implementaron 4 pasos donde el inicial fue usar una heurística de guardado para la generación de columnas, continuando con la relajación lineal del problema con las columnas obtenidas anteriormente, continuando con la implementación de una segunda heurística de ahorro para finalmente resolver el problema como programa entero usando regular rama y atado. (Cáceres, 2019, p. 5) obteniendo como resultado una disminución de tiempos según la cantidad de estudiantes movilizados, tomando como éxito la implementación del modelo dado que el modelo propuesto y desarrollado se ajusta a la dispersión de los estudiantes en la ubicación y el requerimiento de horarios tanto A.M. como P.M. para e desplazamiento mixto de estudiantes ahorrando hasta un 20% de utilización de flotas para estudiantes especiales (Cáceres, 2019, p. 10).

Como siguiente caso de estudio se puede encontrar un artículo publicado por la revista Plos One 13 que estudia una escuela de China con el problema de ruteo de buses escolares. Este caso detalla que la flota de buses puede ser mixta (atendiendo más de una escuela en el trayecto de la ruta) pero se enfoca en el servicio de bus escolar de una única escuela, resolviendo el caso por medio de optimización robusta con el objetivo de minimizar el costo total. Evalúan el problema contemplando los siguientes pasos, empezando por selección de las paradas del bus, generación de rutas, ajuste del horario de los estudiantes para llegar a la escuela y programación de la ruta (Sun, 2018, pp. 1-2).

El presente problema contiene variables estocásticas donde el tiempo es determinístico debido que se sabe la hora de llegada a la escuela y la hora de salida, sin embargo, hay variables que son estocásticas como el tráfico, accidentes y eventos que pueden ocurrir de manera inesperada. Se tuvo inconvenientes en la determinación y cumplimiento del horario debido a los eventos que se pueden presentar en el momento de la ruta, pero se solucionó con una aplicación de modelo robusto de horario optimo (Sun, 2018, pp. 1-2).

Un caso actual de estudio se presenta un artículo de Tanzania Journal of Science publicado en la universidad de Dar es-Salam en Tanzania, donde se evalúan algoritmos meta- heurísticos para la solución del caso SBRP teniendo como comparación la Búsqueda Tabú, Colonia de hormigas, y Recocido simulado. Demostrando una mayor eficiencia la búsqueda tabú siempre y cuando no se tengan restricciones de tiempo al momento de evaluarlo, en caso contrario la colonia de hormigas es la que demuestra mejor desempeño. Se tiene presente que los métodos exactos no pueden ser empleados para la solución de problemas NP-Hard debido que necesitan un tiempo de solución exponencial que para este medio se emplean algoritmos de aproximación que arrojan una solución aproximada a la óptima llamados heurísticas, que estos se desprenden los meta- heurísticos los cuales serán empleados para dar solución al caso SBRP (Semba, 2019, p. 1)

Se expone la procedencia de las heurísticas y meta- heurísticas como derivados del VRP que sirven para dar solución a problemas con gran cantidad de variables y restricciones, teniendo como apoyo soluciones que puedan ser cercanas a las óptimas o generando combinaciones de algoritmos para llegar a la óptima o la mejor factible, considerando el tiempo de solución y el valor arrojado. Aplicando el modelo de búsqueda tabú en la respectiva universidad se encontró que el tiempo total de viaje de los estudiantes podía ser reducido en un 19,33%, estos algoritmos fueron puestos a prueba en tres escuelas de Dar es Salaam, Tanzania; Atlas escuela primaria, guardería africana y la escuela secundaria yemení evaluando estas heurísticas cuando el tiempo de solución es restringido y cuando no lo es. Como resultados demostrando liderazgo la colonia de hormigas en tiempo restringido y la búsqueda tabú en tiempo libre. (Semba, 2019, pp. 2-10)

Un último caso de estudio reciente para el problema de SBRP se presenta en un artículo publicado por CompuSoft, donde fue solucionado mediante la programación de enteros mixtos teniendo como parámetro el lugar o ubicación de paradas de los autobuses y la distancia entre paradas sin el número de estudiantes en cada parada de autobús, obteniendo una disminución del 55,04% en la disminución de todas las rutas de autobús en comparación con las que se tenía actualmente. Se expone que este problema se originó con “el problema del camión de despacho” por Dantzig y Ramser en 1959, que consta de encontrar rutas óptimas entregando gasolina en estaciones de servicio. Se entiende que es una variante del modelo VRP donde se pueden presentar algoritmos de solución como el “algoritmo de ahorro” por Clarke y Wright. El objetivo del SBRP es diseñar rutas contemplando el eficiente horario para transportar niños a las escuelas y desde las mismas, relacionando variables o parámetros como ventanas de tiempo, capacidad del vehículo. (Boonperm, 2019, pp. 1-2).

El SBRP puede tener tres características especiales como: Las rutas de cada autobús del SBRP son las rutas del SBRP, el número total de estudiantes de cada autobús no puede exceder la capacidad del autobús y la distancia o el tiempo de cada ruta está limitada por tiempo apropiado. Para el desarrollo de este problema, utilizando programación de enteros mixtos se logró una memoria a largo plazo o solución a largo plazo dado que el número de estudiantes no varía en cada parada de autobús cumpliendo la restricción de capacidad del vehículo, obteniendo mejores soluciones a las empleadas anteriormente, con un uso de 26 autobuses y una disminución de distancia del 55,04%. (Boonperm, 2019, pp. 1-2).

## 4.2 Marco teórico

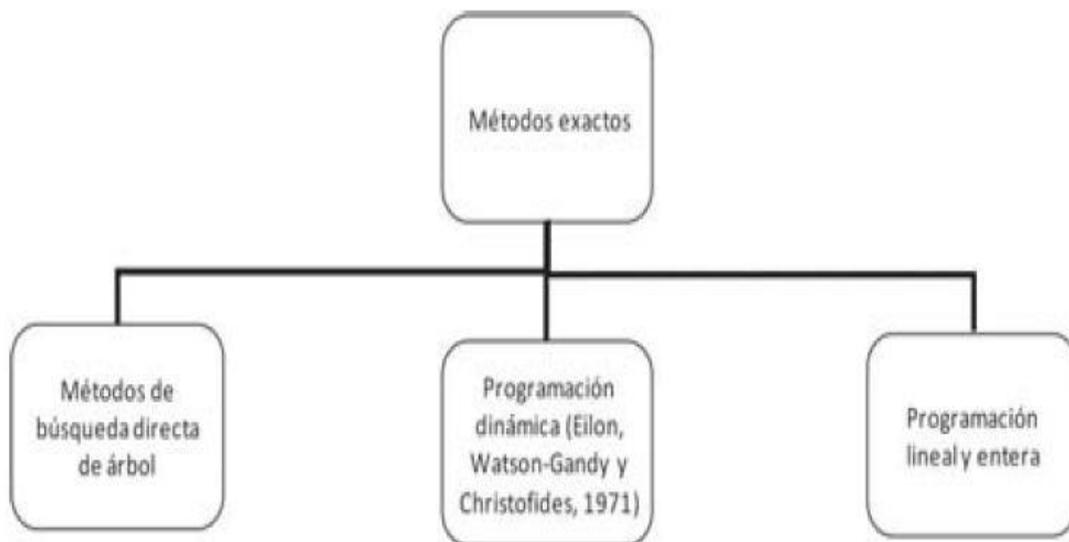
### 4.2.1 Modelos matemáticos para la solución del problema de ruteo.

Problemas como los anteriormente expuestos han generado un incremento en las investigaciones a medida que va avanzando el tiempo. De acuerdo con Rocha (2011) las primeras investigaciones se pueden contemplar en 1997 donde fueron publicadas, pero no se publicaba sobre este tema de manera continua. A medida que avanza el tiempo aumenta la investigación de ruteo de vehículos y a su vez los artículos de investigación publicados referentes a estos temas de investigación teniendo en el año 2009 un total de 620 artículos que estudian este problema. (p. 3).

Se puede contemplar tres métodos de soluciones para los diversos tipos de problemas de ruteo. Estos métodos de solución se presentan de menor complejidad (comprendido en variables, parámetros y restricción) a mayor complejidad.

4.2.1.1 **Métodos exactos.** Por medio de estos métodos se puede llegar a una solución óptima en un tiempo razonable, como se observa en la

4.2.1.2 Figura 19. Métodos exactos. los métodos que pueden dar solución a estos problemas son tres: búsqueda directa de árbol, programación dinámica y programación lineal entera. Los cuales son factibles cuando comprenden hasta 50 depósitos (Rocha, 2011, p. 9).



**Figura 19.** Métodos exactos. Recuperada de Rocha (2011).

#### 4.2.1.2.1 *Búsqueda directa de árbol.*

Este método se puede dividir en cuatro algoritmos, los cuales son: asignación de cota inferior, ramificación y acotamiento, ramificación y corte y búsqueda de árbol donde se realiza una búsqueda en cada nodo del árbol cumpliendo ciertos parámetros y/o especificaciones. La técnica del algoritmo de ramificación y corte, originado en 1958 por Gomory, propone soluciones lineales sin restricciones enteras. Al momento de obtener una solución no entera para una variable entera, se utiliza el algoritmo de planos cortantes. El algoritmo de búsqueda de árbol, originado en 1964 por Dakin, propone una solución compuesta en cuatro partes, las cuales son: aristas que no son pertenecientes al árbol, aristas pertenecientes al árbol, aristas incidentes en el primer vértice y aristas no incidentes respectivamente. En el modelo matemático, estos cuatro componentes son restricciones y la función objetivo es la sumatoria de los mismos. El algoritmo de ramificación y acotamiento originado en 1968 por Little, consta de realizar una búsqueda desde el nodo origen hasta los nodos “hojas” determinando cuales se pueden eliminar. Repitiendo este proceso hasta obtener la mayor cota inferior. La técnica de asignación cota inferior originado en 1986 por Laporte, propone asignar una cota inferior disminuyendo a su vez la asignación de vehículos para visitar a los clientes, solucionando el problema como un TSP (Travelling Salesman Problem) (Montes, 2017, p. 33).

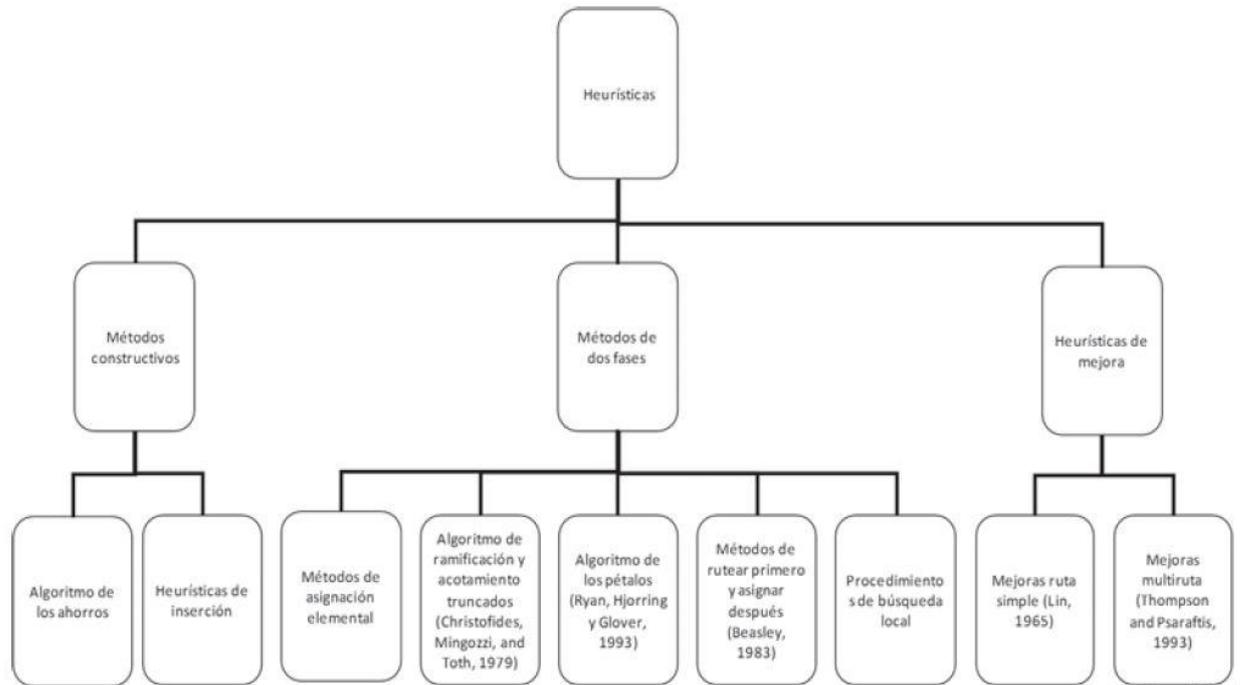
#### 4.2.1.2.2 *Programación dinámica.*

Este método se origina en 1971 por Eilon, donde se tienen establecida una cantidad determinada de vehículos para ser asignados a rutas independientes. Después de asignar los vehículos a subconjuntos se suman los costos del trayecto y utilización de los mismos obteniendo un costo total por la utilización de todos los vehículos (Montes, 2017, p. 34).

#### 4.2.1.2.3 *Programación lineal entera.*

En la programación lineal y entera se pueden comprender tres técnicas para su solución, una es el conjunto de particiones y generaciones de columnas originadas en 1964 por Balinski y Quandt, donde se resuelve el problema a través del método simplex, sin embargo, debido a gran cantidad de columnas a evaluar solamente se evalúan aquellas que tengan un mayor costo reducido. La segunda técnica es la formulación de flujo de vehículos de dos índices originado en 1978 por Fisher y Jaikumar donde se origina por primera vez la utilización de variables binarias para determinar la utilización o no de determinadas aristas. La tercera técnica es la formulación de vehículos de tres índices originado en 1978 por Fisher y Jaikumar, donde consiste en asignar dos o tres índices de más a la programación lineal del VRP original (Montes, 2017, p. 34).

**4.2.1.3 Heurísticas.** Se comprenden como métodos donde arrojan una solución aceptable en un tiempo restringido para encontrar la respectiva solución. Clarke y Wriyth propusieron en 1964 el primer algoritmo que resulto efectivo para resolver el VRP, donde el propósito de estas heurísticas es encontrar el “mejor par” considerándolo entre el nodo y la ruta. Como se observa en la Figura 20. Métodos heurísticos. se puede dividir en tres tipos la composición de las heurísticas, como: métodos constructivos, métodos de dos fases y heurísticas de mejora donde estos últimos son la combinación de diferentes métodos que componen los anteriores para generar una nueva solución aceptable. (Rocha, 2011, p. 10).



**Figura 20.** Métodos heurísticos. Recuperada de Rocha (2011).

#### 4.2.1.3.1 Métodos constructivos.

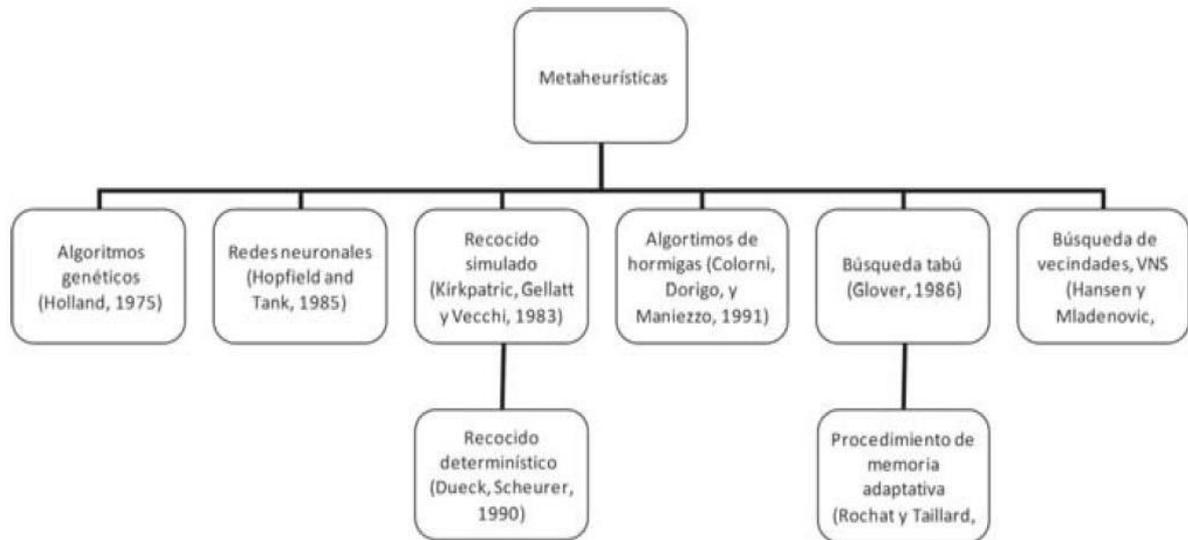
Se pueden comprender dos métodos en esta metodología, el algoritmo de ahorros y las heurísticas de inserción. El algoritmo de ahorros se origina por Clarke y Wriyth en 1964 donde parte de la creación de dos rutas que pueden ser unidas si el costo del viaje de una sola ruta es menos que el de las dos rutas por separado. El algoritmo realiza las uniones necesarias siempre y cuando cumpla la restricción anteriormente mencionada, es decir, se pueden unir tantas rutas sean necesarias siempre y cuando el costo de unirlos sea menor que el costo de asignar rutas independientes. Este algoritmo tiene dos métodos, uno es de forma paralela, donde el vehículo va al punto asignado y vuelve al depósito y tiene un costo relacionado al viaje de ida y vuelta, evaluando la posibilidad de unir dos rutas siempre y cuando el costo de la unión sea menor al del trayecto individual. El segundo método es de forma secuencial, donde la funcionalidad es similar a la anterior, pero evalúa la unión de los

arcos que se encuentran de extremo, es decir, el más lejano en comparación al más cercano. El segundo método constructivo es el de inserción, donde su principio se basa en la inserción y construcción de rutas empezando desde el depósito y asignando un punto que no haya sido visitado. Igualmente, al método de ahorro se puede realizar de manera secuencial (asignando puntos no visitados, uno después de otro) o paralela (evaluando los costos del trayecto independiente Vs unión de trayectos). En los casos más empleados del método de inserción es en el CVRP debido que se debe construir una secuencia cumpliendo una capacidad máxima del vehículo. Los criterios más seleccionados en este método de inserción son: **El vecino más cercano**, inserción más lejana, inserción de menor costo e inserción aleatoria (Castañeda, 2014, pp. 31-33).

#### 4.2.1.3.2 *Método de dos fases.*

Son métodos que construyen soluciones que normalmente no son óptimas, por lo tanto, dividen el problema en dos fases. La primera fase es la asignación de grupos de clientes, es decir, se seleccionan subgrupos dentro del grupo de los clientes asignado a visitar. La segunda fase es la asignación de los puntos para la construcción de la ruta. Se pueden establecer cinco métodos de solución donde se hará énfasis en los tres primeros y los últimos dos solo se mencionarán. El primer método es el de rutear primero y asignar después, donde se emplea cualquier algoritmo de construcción que permita la asignación de las rutas, sin tener en cuenta ninguna restricción del problema. Seguido de tener las rutas establecidas, se emplea el agrupamiento de las rutas para poder cumplir con la capacidad del vehículo y/o demás restricciones. Este problema ha sido solucionado comúnmente a través del algoritmo de Dijkstra. El segundo método es el de asignar primero y rutear después, donde tiene la misma funcionalidad del método anterior, teniendo presente que los grupos asignados desde un principio serán los mismos empleados en la solución final para poder crear las rutas de los respectivos grupos o clústeres. El tercer método es la **heurística de Barrido**, donde se encarga de la asignación de grupos (clústeres) de manera exitosa para posteriormente utilizar un algoritmo de construcción. El método cuatro y cinco la heurística de asignación generalizada de Fisher y Jaikumar, y la heurística de localización de Bramel y Simchi-Levi respectivamente (Castañeda, 2014, pp. 32-35).

**4.2.1.4 Metaheurísticas.** Se caracterizan por generar soluciones de alta calidad, las cuales fueron desarrolladas a finales de los 90, como se observa en la Figura 21. Métodos metaheurísticos. se pueden dividir en seis métodos que conforman las metaheurísticas los cuales son: recocido simulado, redes neuronales, búsqueda tabú, algoritmos genéticos, algoritmos de hormigas y búsqueda de vecindades (Rocha, 2011, p. 15).



**Figura 21.** Métodos metaheurísticos. Recuperada de Rocha (2011).

#### 4.2.1.4.1 Búsqueda local.

Parte de la idea que hay una solución existente, a la cual se le realizan interacciones para evaluar una posible mejoría de dicha solución. Dichas interacciones consisten en la búsqueda exhaustiva de una solución óptima a través de vecindades, es decir, cuando encuentra una solución la compara con una solución de una nueva búsqueda realizando modificaciones entre las conexiones de los puntos asignados al problema. Después de comparar diferentes secuencias de conexión determina como solución óptima la que tuvo un mayor ahorro de la ruta (Guambo, 2017, p. 60).

#### 4.2.1.4.2 Algoritmos genéticos.

Consiste en la generación de cromosomas siguiendo el patrón del algoritmo de búsqueda local, teniendo una solución inicial y donde parte de la teoría evolutiva del principio de reproducción. La funcionalidad del algoritmo básicamente parte de un cromosoma “X” donde crea un cromosoma hijo, cada cromosoma busca interacciones nuevas para mejorar la solución inicial. Cada vez que un cromosoma hijo encuentra una solución mejor a la anterior, se elimina el cromosoma hijo que tuvo la respectiva solución inferior. Cada solución encontrada por un cromosoma se codifica como gen

y a su vez el conjunto de cromosomas que generan una solución se denomina como generación (Guambo, 2017, p. 61).

#### 4.2.1.4.3 *Algoritmos de hormigas.*

El funcionamiento sigue los mismos patrones de una hormiga en búsqueda de su comida, donde parte de la colonia y segrega feromonas indicando la alta probabilidad de encontrar el alimento en un camino determinado. A medida que la feromona se intensifica la hormiga sigue el camino ya indicado por la anterior, relacionando este evento, al momento que se va encontrando una ruta con una menor distancia, más alta será la feromona que las demás hormigas deberán seguir y así realizando una nueva búsqueda desde el punto establecido anteriormente por la mayor cantidad de feromona (menor distancia). Se construye la solución por medio de dos parámetros, el primero son los valores de las feromonas locales (aquellos caminos que ya se habían establecido con anterioridad) y el segundo es la información heurística local (información a priori). Se establecen dos patrones en la búsqueda, la intensidad y la diversificación donde el primero es a la feromona anteriormente dicha y el segundo es la separación de las hormigas en su búsqueda por un mejor óptimo (De la Fuente, 2011, pp. 4-5).

#### 4.2.1.4.4 *Búsqueda Tabú.*

El algoritmo se desarrolló en 1986 por Glover, donde su principio se basa en el de búsqueda local, permitiendo una evaluación de los subconjuntos de un conjunto de puntos. Permitiendo las interacciones que optimicen el costo de movilización, es decir, en un conjunto “X” hay establecida una solución óptima, donde se procede a modificar las conexiones del conjunto creando subconjuntos con nuevas conexiones. Como no necesariamente las interacciones generan una mejor solución, se crea una lista prohibida donde descarta los movimientos que no generan ahorro (Montes, 2017, p. 39). Está fundamentado principalmente en los movimientos prohibidos, generando una mejoría en la búsqueda de una solución buscando nuevas interacciones marcando las anteriores como “Tabú” o prohibidas para tener un mejor panorama de búsqueda teniendo una memoria de corto plazo donde se va alimentando a medida que va realizando nuevas interacciones, descartando posibles conexiones hasta que se encuentre la solución óptima después de realizar todas las posibles interacciones (Castañeda, 2014, p. 38).

### 4.3 Marco conceptual

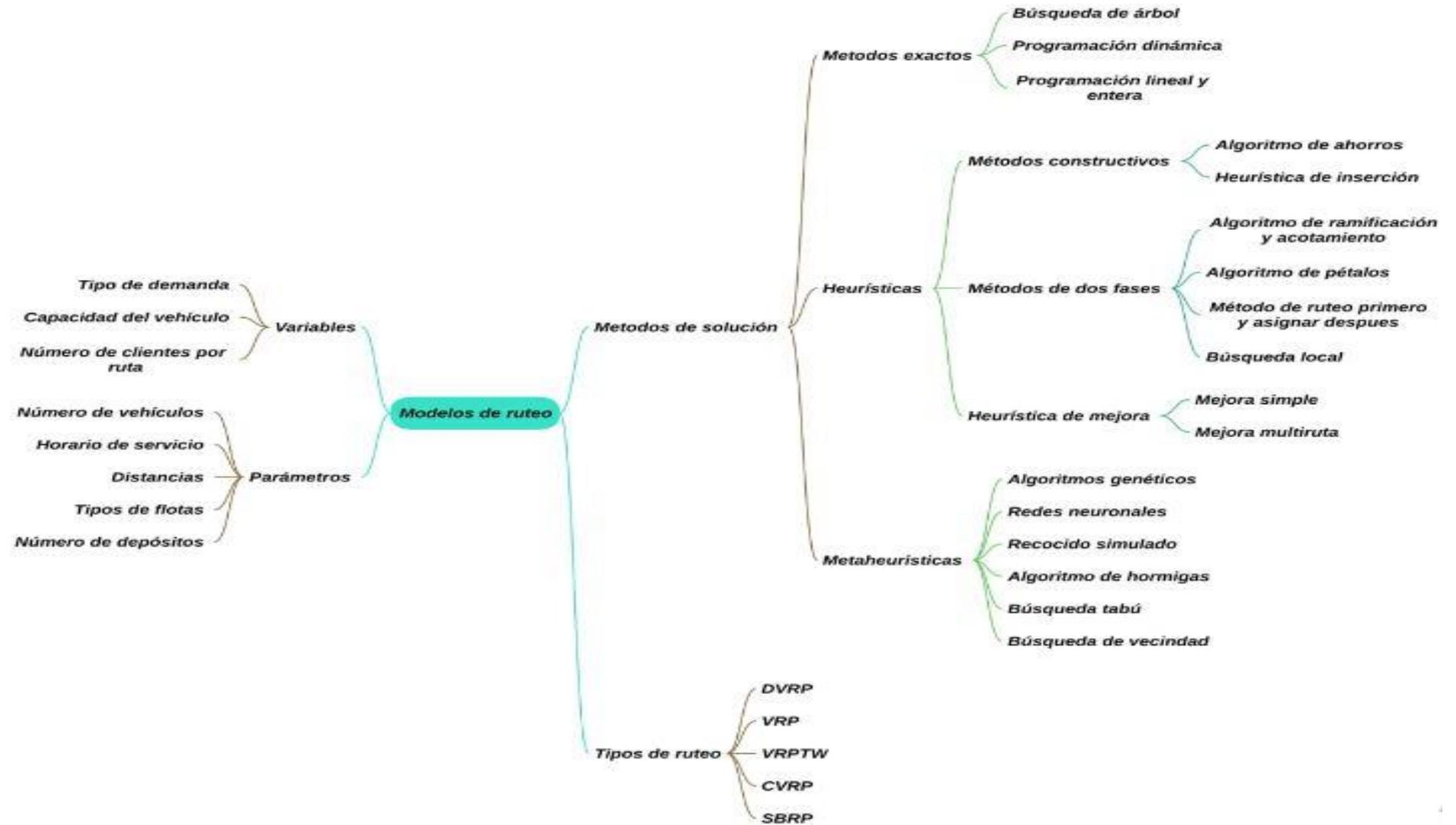


Figura 22. Marco conceptual. Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 Marco legal

Tabla 2.

*Normatividad vigente del STC en Colombia, parte 1.*

<b>Normativa</b>	<b>Detalle</b>	<b>Función</b>
Ley 105/1993	Sector y sistema nacional de transporte, infraestructura del transporte y planeación del transporte y la infraestructura.	Regula e unifica los principios y criterios para el transporte público aéreo, marítimo, férreo, masivo y terrestre.
Ley 336/1996	Código Nacional de Transito: Creación y funcionamiento de las empresas de transporte público, del sector de transporte, de la seguridad, sanciones y procedimientos	Unifica los principios y criterios del transporte aéreo, marítimo, fluvial, terrestre y férreo.
Ley 769/2002	Autores, centros de enseñanza, licencia, vehículos, seguros de transporte, normas de peatones	Norma que rige a los peatones, motociclistas, conductores, ciclistas o agentes de tránsito con el fin de regular la circulación nacional
Decreto 3366/2003	Régimen de sanciones	Establece el régimen de sanciones por infracciones a las normas de tránsito
Resolución 1122/2005	Medidas especiales para que el transporte especial prevenga la accidentalidad	Velocidad máxima, modelos de vehículos
Ley 1383/2010	licencias, condiciones trecnomecánicas, condiciones ambientales	Rigen la normativa para la circulación de peatones y vehículos
Ley 1503/2012	lineamientos de seguridad vial	pretende fijar normas de conducta de seguridad vial
Decreto 2851/2013	Reglamentación artículos 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 13, 18 y 19	Reglamentación de la Ley 1503/2012

Nota: Autoría propia.

Tabla 3.

*Normatividad vigente del STC en Colombia, parte 2.*

<b>Normativa</b>	<b>Detalle</b>	<b>Función</b>
Resolución 3068/2014	establecer un único formato del FUEC	
Resolución 1565/2014	Guía metodología del PESV	Plan Estratégico de Seguridad Vial
Decreto 348/2015	habilitación de un servicio eficiente, seguro, oportuno y económico	Reglamenta el transporte público especial
Decreto 1906/2015	modifica el decreto 1079/2015 del Plan Estratégico de Seguridad Vial	
Resolución 1231/2016	Guía del Plan Estratégico de Seguridad Vial	
Decreto 431/2017	Modifica el decreto 1079	
ISO 9001/2015	Sistema de Gestión de Calidad del Transporte	Mejorar los procesos y sistemas de la empresa,
OHSAS 18001/2007	Sistema de gestión de la seguridad y salud en el trabajo	Busca el bienestar de los empleados en relación al trabajo de los trabajadores, analizando los riesgos, su actividad laboral, sus funciones y control del rendimiento
Resolución 2273/2014	Ajustes al plan de seguridad vial	Pilares estratégicos, programas y acciones del plan nacional de seguridad vial y Pilar estratégico sobre comportamiento humano
GTC 45	Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional	Analiza las organizaciones desde sus necesidades, su naturaleza, el alcance de las actividades y sus recursos.

Nota: Autoría propia.

Tabla 4.

*Normatividad vigente del STC en Colombia, parte 3.*

<b>Normativa</b>	<b>Detalle</b>	<b>Función</b>
Decreto 315	Mantenimiento de los vehículos	Implementación de mantenimientos preventivos y analizar los vehículos en mantenimiento, su vigilancia, control e inspección
ISO 39001/	Sistema de Gestión de la Seguridad Vial	Herramienta que permite prevenir los accidentes de tráfico y sus consecuencias

Nota: Autoría propia.

## 5 Marco metodológico

### 5.1 Tipo de investigación

El presente trabajo logra abordar diferentes tipos de investigación teniendo presente el propósito o contexto en el que se observe. Inicialmente según el tipo de objetivo que pretende la investigación se categoriza como aplicada debido que aborda un problema en específico (Castillero, s.f., párr. 4), el cual es proponer por medio de un modelo matemático de ruteo la trazabilidad de rutas para generar una solución factible en la movilización de buses escolares.

Como segundo factor se contempla el nivel de profundización en el objeto de estudio, siendo exploratoria debido que este proyecto será el primer acercamiento en el tema que está abordando, dejando una propuesta de solución al problema de ruteo en la Uniagustiniana para que futuras investigaciones aborden el presente proyecto y puedan generar una continuación. De igual manera contiene tipo descriptiva debido que no se abordan a profundidad las causas ni consecuencias, sino una descripción de problema con una aproximación del comportamiento del problema por medio de encuestas a una muestra poblacional (Castillero, s.f., párr. 6-7).

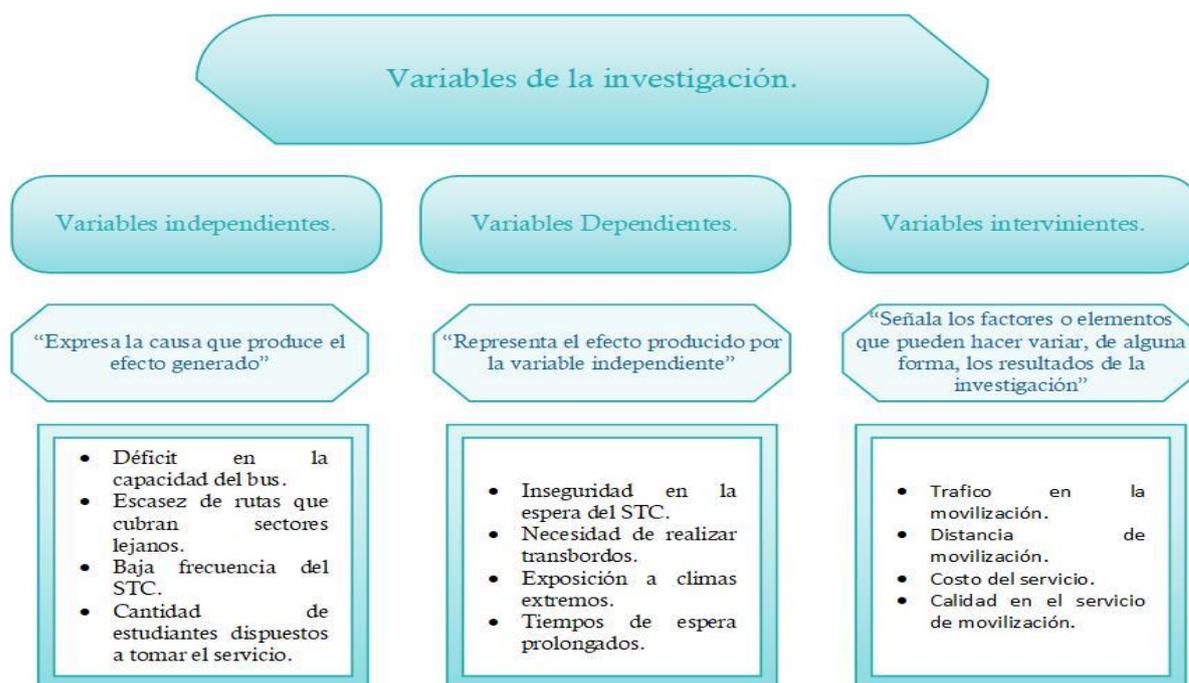
Como tercer factor se tiene el tipo de datos empleados, cumpliendo con las características de investigación tipo cuantitativa debido a la procedencia de los datos por medio de encuestas y determinación de la muestra para generar información que sea relevante para formular el modelo matemático que pueda dar una solución factible al presente caso (Castillero, s.f., párr. 11).

Como cuarto factor se tiene la manipulación de las variables, se puede deducir que cumple las características de no experimental debido que se basa el proyecto en la observación y sus variables no son controlables (Castillero, s.f., párr. 15).

Como quinto factor se categoriza respecto al tipo de inferencia, se puede determinar que cumple el método inductivo debido que con a la observación de los eventos se podrán establecer unas conclusiones que determinen la viabilidad de la implementación de rutas escolares en la Uniagustiniana, con parte hipotético-deductivo por el modelo matemático con generación de hipótesis que deberán ser comprobadas en la recolección de datos (Castillero, s.f., párr. 18-19).

Como último factor, según el periodo temporal se establece transversal debido la comparación de los flujos de tráfico y densidad de población en un momento específico (Castillero, s.f., párr. 22). Siendo una investigación proyectiva debido que es aplicación del conocimiento.

## 5.2 Variables de investigación



**Figura 23.** Variables de la investigación. Recuperada y modificada de Castellanos (2017).

## 5.3 Hipótesis de la investigación

### 5.3.1 Hipótesis general.

La implementación de rutas escolares para la Uniagustiniana por medio del algoritmo de berrido y el vecino más cercano establecerá el número y tipo de buses según su capacidad para la movilización de los estudiantes.

### 5.3.2 Hipótesis específica.

- Los usuarios pueden adquirir un servicio de movilización que brinde mayor comodidad y calidad que el STC tradicional.
- Los buses escolares pueden movilizar a los usuarios cubriendo la totalidad del trayecto.
- La inseguridad de los estudiantes disminuirá debido que adquirirán el servicio desde la Uniagustiniana directamente.
- Los usuarios no estarán expuestos a climas extremos y tiempos de espera prolongados debido a la adquisición de la ruta escolar inmediata.

## 5.4 Tamaño poblacional y muestra

Los integrantes de la Uniagustiniana tienen una población total de 6299 personas contemplada entre 6068 estudiantes y 277 docentes con un total de 6.345 usuarios que puedan tomar el servicio

de transporte de buses escolares, con base a este tamaño poblacional se determina el tamaño muestral para los estudiantes y los docentes con la ecuación 9:

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

Donde:

- N = Tamaño de la población
- Z = Con una seguridad del 95%, 1.96
- p = Proporción esperada
- q = 1 - p
- d = precisión, en este caso 5%

Sin embargo, se tomará como tamaño muestral para la realización de la encuesta final la totalidad de los usuarios teniendo como tamaño muestral de 363 usuarios, como muestra la

Tabla 5 con la respectiva fórmula para el cálculo de muestras poblacionales finitas, teniendo un 95% de confianza y 5% de precisión.

Tabla 5.

*Cálculo de la muestra poblacional.*

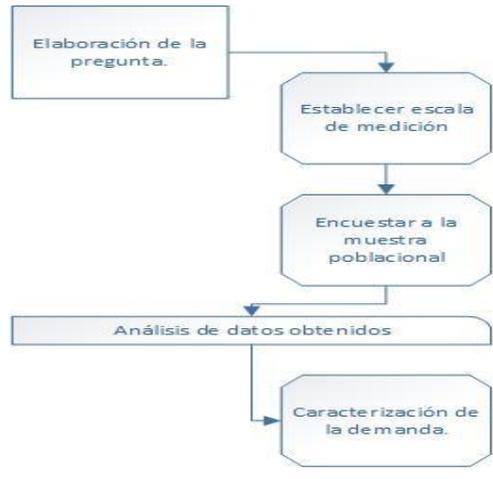
CARGOS	CANTIDAD POBLACIONAL	MUESTRA	FORMULA
Estudiantes	6068 estudiantes pregrado	362 estudiantes	$n = \frac{6068 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.05^2 * (6068 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}$
Docentes	277 docentes pregrado	162 docentes	$n = \frac{277 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.05^2 * (277 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}$
Total	6345 usuarios	363 usuarios	$n = \frac{6345 * 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}{0.05^2 * (6345 - 1) + 1.96^2 * 0.5 * (1 - 0.5)}$

Nota: Autoría propia.

5.5 Proceso metodológico

Tabla 6.

Proceso metodológico, parte 1.

Variables de investigación	Sistematización del problema	Objetivo específico	Proceso metodológico	Instrumentos de recolección de datos
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Costo del servicio</li> <li>* Tiempo de movilización</li> <li>* Calidad del servicio</li> <li>* Seguridad del servicio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* ¿Cuánto estaría dispuesto a pagar un estudiante por tomar el servicio de la ruta escolar?</li> <li>* ¿Cuánto tiempo normalmente invierte un estudiante en la movilización?</li> <li>* ¿Cómo se siente el estudiante con la calidad del STC?</li> <li>* ¿A qué riesgos está expuesto el estudiante en la espera del STC?</li> </ul>	<p>Caracterizar la demanda de los estudiantes en jornada nocturna que requieran y estén interesados un sistema de ruta para su para llegar a sus hogares.</p>	 <pre> graph TD     A[Elaboración de la pregunta.] --&gt; B{{Establecer escala de medición}}     B --&gt; C{{Encuestar a la muestra poblacional}}     C --&gt; D[Análisis de datos obtenidos]     D --&gt; E{{Caracterización de la demanda.}}             </pre>	<p>Encuestas</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Distancias desde la Uniagustiniana hasta el destino</li> <li>* Cantidad de estudiantes</li> <li>*Capacidad del vehículo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* ¿Qué tan lejos se dirige el estudiante?</li> <li>* ¿Cuántos estudiantes estarían dispuestos a tomar el servicio?</li> <li>* ¿Qué tipo de buses escolares se contratarían?</li> </ul>	<p>Formular el modelo matemático del problema de ruta del autobús escolar basado en el Algoritmo de Barrido y el Vecino Más Cercano.</p>		<p>Excel, borrador a mano</p>



Nota: Autoría propia.

**Tabla 7.**

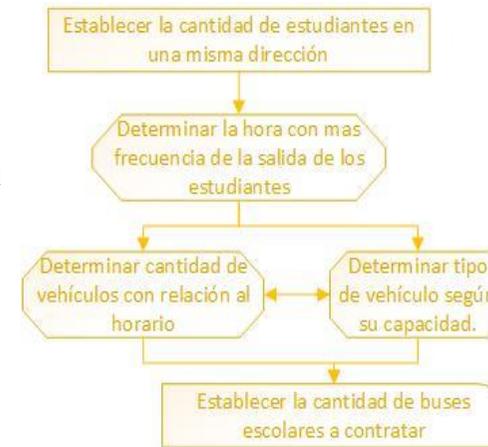
*Proceso metodológico, parte 2.*

Variables de investigación	Sistematización del problema	Objetivo específico	Proceso metodológico	Instrumentos de recolección de datos
* Algoritmo matemático * Lenguaje de programación Visual Basic	* ¿Cómo funciona la heurística del algoritmo de barrido y el Vecino Más Cercano? * ¿Cómo se programa macros estructuradas en Visual Basic?	Implementar el algoritmo de Barrido y el Vecino Más Cercano para la solución del problema de ruteo de buses escolares en Visual Basic.	<pre>             graph TD               A[Estudio de la lógica del algoritmo de Barrido y el VMC] --&gt; B[Determinar parámetros y variables]               B --&gt; C[Formulación de matrices en Excel]               D[Estudio del lenguaje de Visual Basic] --&gt; C               C --&gt; E[Desarrollo de la Heurística]               E --&gt; F[Análisis de la ruta obtenida]           </pre>	Excel, Visual Basic

- \* Cantidad de estudiantes por localidades
- \* Hora con más frecuencia de la salida de los estudiantes

- \* ¿Cuántos estudiantes viven en una misma localidad o en su cercanía?
- \* ¿Cuál es la hora con más frecuencia de salida de los estudiantes que tomarían el servicio de ruta escolar?

Determinar la cantidad de rutas por densidad poblacional en la U.A. mediante la solución del problema de ruteo de rutas escolares



Excel

## **5.6 Análisis de los resultados obtenidos**

Inicialmente se elaboró una encuesta piloto para hacer un panorama del comportamiento del problema y establecer las causas y efectos que afectan a los estudiantes en su movilización, sin embargo, no se puede establecer un análisis estadístico con las encuestas realizadas debido que no cumplen determinados parámetros (como escalas) para la medición de confiabilidad.

En la realización de la encuesta que se realizará a la muestra poblacional comprendida en 363 usuarios, se determinaran escalas como Likert, matriz de medición de lado a lado, nominal, ordinal, entre otros, logrando establecer los puntos de destino (hogares) de los estudiantes, realizando la prueba del alfa de Cronbach para la fiabilidad de los datos obtenidos con la encuesta final. Con las encuestas realizadas se establecen los factores que afectan a los estudiantes de manera cotidiana, como también se logró delimitar el proyecto para un alcance en un tiempo razonable, estableciendo como población a la comunidad agustiniana, centrando la problemática en la jornada nocturna al momento que los usuarios salen de la Uniagustiniana hasta sus hogares.

## 6 Presupuesto

### 6.1 Presupuesto por hora de la mano de obra

Se puede contemplar el presupuesto de la mano de obra invertido para la elaboración del ante proyecto, esto teniendo en cuenta un salario base tanto para el estudiante que ha elaborado el presente proyecto como para el tutor que lo ha orientado en el proceso del mismo. En la Tabla 8., se puede ver la fórmula para el cálculo del valor de una hora semanal invertida en el desarrollo del ante proyecto. Teniendo como referente el valor del salario sobre 240 horas. Teniendo como total un presupuesto de \$ 22.200 por hora semanal.

Tabla 8.

*Presupuesto (hora).*

CARGO	SALARIO (SIN PRESTACIONES)	PRESUPUESTO (HORA)	FORMULA
Docente	\$ 4.500.000	\$ 18.750	$p_h = \frac{4,500,000}{240}$
Estudiante	\$ 828.116	\$ 3.450	$p_h = \frac{828,116}{240}$
Total	\$ 5.328.116	\$ 22.200	$p_h = 3,450 + 18,750$

Nota: Autoría propia.

### 6.2 Presupuesto por mes de la mano de obra

En el desarrollo del proyecto se tuvo una intervención del Docente de una hora semanal durante 4 meses que fueron los establecidos para el ante proyecto, sin embargo, el Estudiante tuvo una intervención de cuatro horas semanales para poder implementar correcciones, observaciones y complementos que permitieron el correcto desarrollo del mismo. En la Tabla 9., se puede observar la fórmula que permite establecer el presupuesto de 4 meses (16 semanas) para el Docente y el Estudiante que son los establecidos para el desarrollo del ante proyecto teniendo un total de \$ 520.800.

Tabla 9.

*Presupuesto (mes).*

CARGO	PRESUPUESTO (HORA)	PRESUPUESTO (4 MESES)	FORMULA
Docente	\$ 18.750	\$ 300.000	$p_m = 18750 * 16$
Estudiante	\$ 3.450	\$ 220.800	$p_m = (3450 * 4) * 16$
Total	\$ 22.200	\$ 520.800	$p_m = 300,000 + 220,800$

Nota: Autoría propia.

### 6.3 Presupuesto de las encuestas

Para el desarrollo del presupuesto de las encuestas, se tiene en cuenta el costo de impresión de las hojas con un valor de \$ 100 por hoja, siendo el valor establecido por la Uniagustiniana. Las encuestas ocupan dos hojas por lo tanto tiene un valor de \$ 200 por encuesta.

En la Tabla 10., se contempla el valor de las encuestas piloto realizadas a 50 estudiantes, donde se establecieron puntos clave para la elaboración del ante proyecto delimitando su alcance. Sin embargo, se realizó un presupuesto para las encuestas finales que serán implementadas a la muestra total de los integrantes de la Uniagustiniana (363 usuarios), teniendo un total de \$ 82.600.

Tabla 10.

*Presupuesto (encuestas).*

TAREA	CANTIDAD	VALOR/HOJA	TOTAL	FORMULA
Impresión de encuestas piloto	50	\$ 100	\$ 10.000	$p_e = 200 * 50$
Impresión de encuestas finales	363	\$ 100	\$ 72.600	$p_e = 200 * 363$
Total	413	\$ 200	\$ 82.600	$p_e = 10,000 + 72,600$

Nota: Autoría propia.

#### 6.4 Presupuesto total

Teniendo como base el presupuesto de los 4 meses que permiten la elaboración del ante proyecto y el presupuesto de las encuestas se puede calcular un presupuesto total. En la Tabla 11., se puede contemplar el total del presupuesto de mano de obra y el total del presupuesto de las encuestas, teniendo un total global de \$ 603.400, siendo éste último el presupuesto empleado para la elaboración del ante proyecto.

Tabla 11.

*Presupuesto (total).*

<b>PRESUPUESTO</b>	<b>TOTAL</b>	<b>FORMULA</b>
Presupuesto (mes)	\$ 520.800	$p_m = 300,000 + 220,800$
Presupuesto (encuestas)	\$ 82.600	$p_e = 10,000 + 72,600$
Total	\$ 603.400	$p_t = 520,800 + 82600$

Nota: Autoría propia.

## 7 Caracterización de la demanda de la comunidad agustiniana de la jornada nocturna de la Uniagustiniana

### 7.1 Diseño encuesta

Con la finalidad de medir la satisfacción de la comunidad Agustiniana de la jornada nocturna con su medio de transporte actual se diseñó una encuesta de 12 preguntas distribuidas en tres secciones, donde la primera sección contiene cinco preguntas respecto al transporte colectivo, la segunda sección contiene cuatro preguntas respecto al transporte individual como lo puede ser Uber, Didi, taxi, entre otros. Finalmente, la cuarta sección contiene tres preguntas respecto al transporte en bicicleta. Adicionalmente hay una cuarta sección donde se realiza una propuesta para la implementación de un sistema de rutas en la Uniagustiniana y una última sección donde se recolectan los horarios de salida de los estudiantes junto con la ubicación geográfica de sus hogares.

En la Tabla 12. se presenta la encuesta que se realizó a los estudiantes, teniendo un total de 12 preguntas respecto a los medios de movilización y dos preguntas adicionales donde la primera es la propuesta de implementación del sistema de rutas y la segunda recolecta los horarios de salida de los estudiantes junto con su ubicación geográfica. La dimensión representa la sección en estudio, donde la dimensión “1” representa el transporte colectivo, la dimensión “2” el transporte individual, la dimensión “3” el transporte en bicicleta, la dimensión “4” representa la propuesta de implementación del sistema de rutas en la Uniagustiniana y por último la dimensión “5” y “6” recolectan los datos que alimentará el modelo matemático.

Tabla 12.

*Diseño de la encuesta.*

Numero	Pregunta	Dimensión
1	1. ¿Con que frecuencia utiliza el transporte Colectivo?	1
2	¿Cuántos transportes utiliza para llegar a su hogar desde la Uniagustiniana? 1- Un transporte 2- Dos transportes 3- Tres o más transportes	1
3	¿Con que frecuencia debe esperar para poder obtener un medio de transporte que lo movilice hasta su destino? 1- Menos de 15 minutos 2- Entre 16 y 30 minutos 3- Mas de 30 minutos	1

4	<b>¿Qué tan de acuerdo esta con afirmar que los siguientes casos pueden ocurrir durante la espera de un medio de transporte que lo movilice hacia su destino al finalizar clases?</b> 1- Robo o intento de robo 2- Exposición de lluvias 3- Exposición al frío (fuertes vientos)	1
5	<b>La movilización a su hogar es demorada debido a las siguientes causas:</b> 1- La baja frecuencia del transporte colectivo para obtener el servicio 2- Congestión en las vías. 3- Baja flexibilidad del transporte público para evitar el tráfico.	1
6	<b>2. ¿Con que frecuencia utiliza el transporte Individual?</b>	2
7	<b>¿Con que frecuencia utiliza los siguientes medios de pago?</b> 1- Efectivo 2- Tarjeta de crédito	2
8	<b>Al momento de elegir este medio de transporte. ¿De qué forma se moviliza?</b> 1- Solo 2- En grupo	2
9	<b>Al momento de elegir este medio de transporte:</b> 1- ¿Qué tan frecuente ha tenido que pagar sobre costos (alteración del taxímetro o tarifas adicionales) por el mismo servicio de transporte hacia su destino?	2
10	<b>3. Con que frecuencia utiliza la bicicleta?</b>	3
11	<b>¿Con que frecuencia se le han presentado los siguientes casos?</b> 1- Exposición a climas extremos como: fuerte vientos y lluvias 2- Intento de robo durante la movilización 3- Exposición a accidentes viales	3
12	<b>¿Con que frecuencia se le presentan los siguientes tipos de incidentes?</b> 1- Descompostura del neumático (pinchar) 2- Desajuste de la cadena 3- Desajuste de los frenos	3
13	<b>Si se ofreciera un sistema de rutas que lo ayude a moverse hasta su destino:</b> 1- ¿Está de acuerdo que debería implementarse un sistema de rutas para estudiantes, docentes y administrativos de la jornada nocturna?	4
14	<b>¿En qué horario finaliza sus clases?</b> 1- Lunes 2- Martes 3- Miércoles 4- Jueves 5- Viernes	5
15	<b>¿Cuál es la dirección o el nombre de un sitio referente a su destino?</b> <b>Ejemplo: C.C Hayuelos</b>	6

*Nota:* Autoría propia.

## 7.2 Resultados de la encuesta

Debido a la pandemia que afecto la continuidad de las clases presenciales de los estudiantes no se pudo realizar las encuestas a la comunidad agustiniana establecida en la muestra poblacional. Sin embargo, con el apoyo de la dirección del programa de ingeniería, docentes de otros programas de la facultad de ingeniería y también algunos docentes de otras facultades, se logró aplicar la encuesta a 167 estudiantes de los cuales 152 describieron un lugar georeferente a sus viviendas. La prueba de confiabilidad realizada en el programa IBM SPSS Statistics de las respectivas encuestas fue de 0.718 como se puede ilustrar en la Figura 24, siendo un instrumento aceptable. Se tenía como resultado esperado un instrumento excelente o bueno (en su defecto), sin embargo, debido a la falta de encuestados siendo un total de 196, se obtuvo el respectivo resultado.

**Resumen de procesamiento de casos**

		N	%
Casos	Válido	63	37,7
	Excluido <sup>a</sup>	104	62,3
	Total	167	100,0

a. La eliminación por lista se basa en todas las variables del procedimiento.

**Estadísticas de fiabilidad**

Alfa de Cronbach	N de elementos
,718	32

**Figura 24.** Resultado del Alfa de Cronbach. Elaboración propia

Se puede contemplar el número de casos (encuestados), siendo 167 en total y un número total de elementos (preguntas) de 32, teniendo presente que hay ítems dependientes donde evalúan posibles sucesos entre cada pregunta independiente. Es decir, la composición de la encuesta se puede representar en la Tabla 13 de la siguiente manera:

Tabla 13.

*Estructura de la encuesta.*

<b>Numero de preguntas:</b> 15 preguntas.
<b>Numero de respuestas:</b> 32 respuestas.
<b>Transporte colectivo:</b> 13 respuestas.
- 1 de selección inicial.
- 12 respuestas comprendidas en 4 preguntas, las cuatro preguntas en forma de matriz de 3 categorías por pregunta y 5 niveles de escala.
<b>Transporte individual:</b> 6 respuestas.
- 1 de selección inicial.
- 5 respuestas comprendidas en 3 preguntas, dos preguntas en forma de matriz de 2 categorías por pregunta y 5 niveles de escala y una en forma de matriz de 1 categoría y 5 niveles de escala.
<b>Transporte en bicicleta:</b> 7 respuestas.
- 1 de selección inicial.
- 6 respuestas comprendidas en 2 preguntas, las dos preguntas en forma de matriz de 3 categorías y 5 niveles de escala.
<b>Propuesta de mejoramiento:</b> 1 respuesta.
- 1 respuesta en forma de matriz de 1 categoría con 5 niveles de escala.
<b>Datos para evaluar las rutas:</b> 5 respuestas.
- 5 respuestas comprendidas en una pregunta en forma de matriz de 5 categorías y 5 niveles de escala.

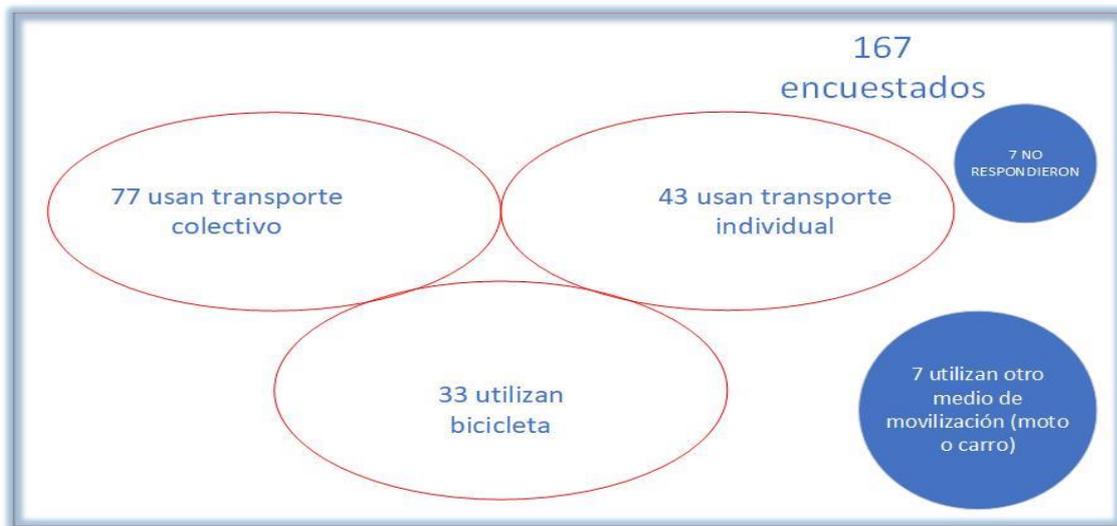
*Nota:* Autoría propia.

### 7.3 Estimación de los clientes potenciales

#### 7.3.1 Distribución de los datos de los clientes potenciales.

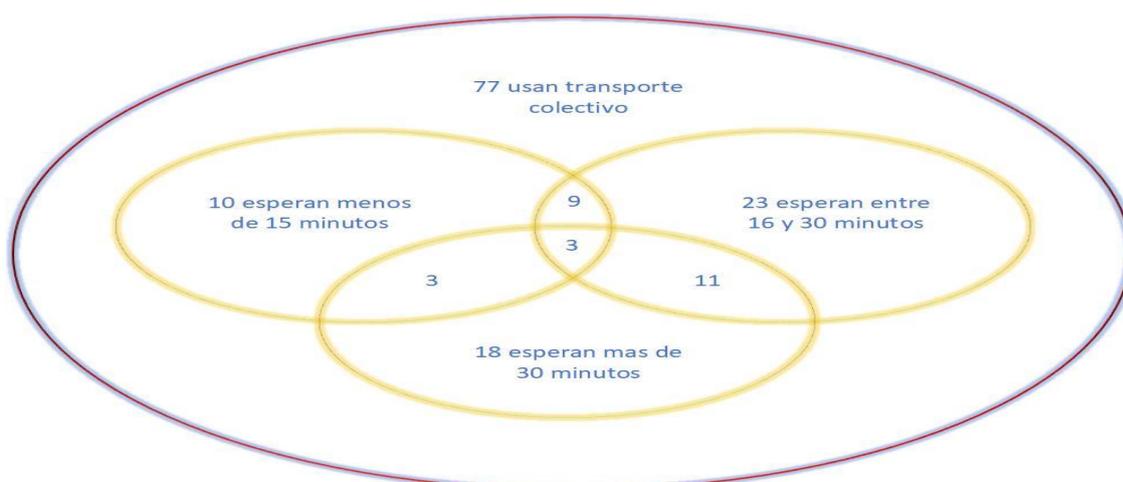
Debido a la situación actual de la pandemia causada por el COVID-19, se lograron recolectar 167 encuestas de las cuales 7 encuestados no aceptaron el tratamiento de los datos y por ende no pudieron dar respuesta a las respectivas preguntas, por otro lado, se determinó que otros 7 estudiantes utilizan un medio de movilización distinto a los establecidos en la encuesta, debido que sus respuestas fueron “nunca” en las tres secciones que evalúan los tipos de movilización.

En la Figura 25, se puede contemplar la distribución de los respectivos encuestados, donde 77 utilizan el transporte colectivo, 43 el transporte individual y 33 se movilizan a través de la bicicleta.



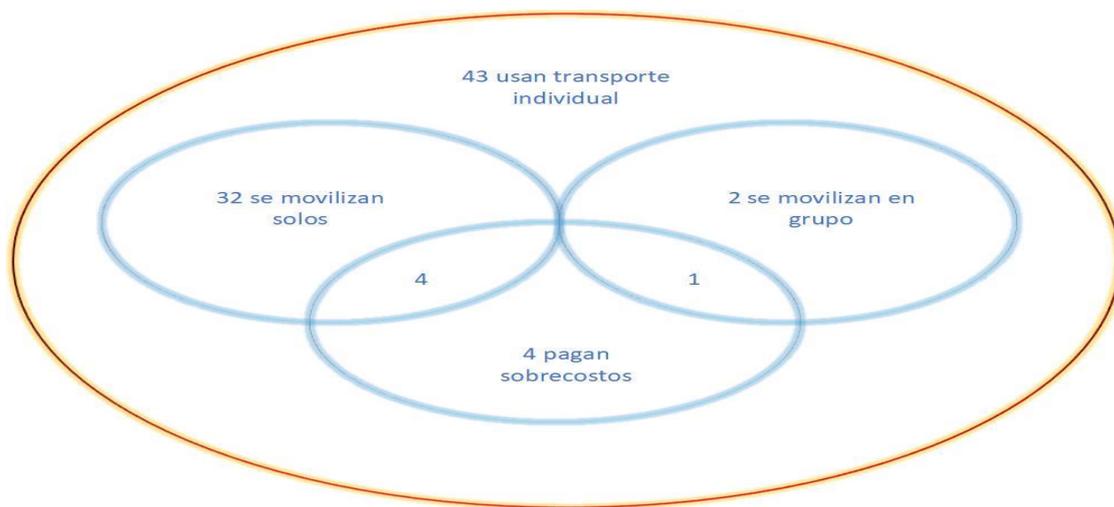
**Figura 25.** Distribución de los encuestados según tipo de transporte. Elaboración propia

Con relación al transporte colectivo, se determinaron tres grupos donde hacen referencia a los tiempos de espera para obtener el respectivo servicio de movilización. En la Figura 26, se puede apreciar la distribución de los encuestados según los tiempos de espera, donde tres estudiantes tienen variación en los tres tipos de horario, por otro lado, 20 estudiantes tienen variación en dos tipos de horario durante la espera, finalmente 51 estudiantes normalmente deben esperar un horario determinado para la obtención del respectivo servicio de movilización.



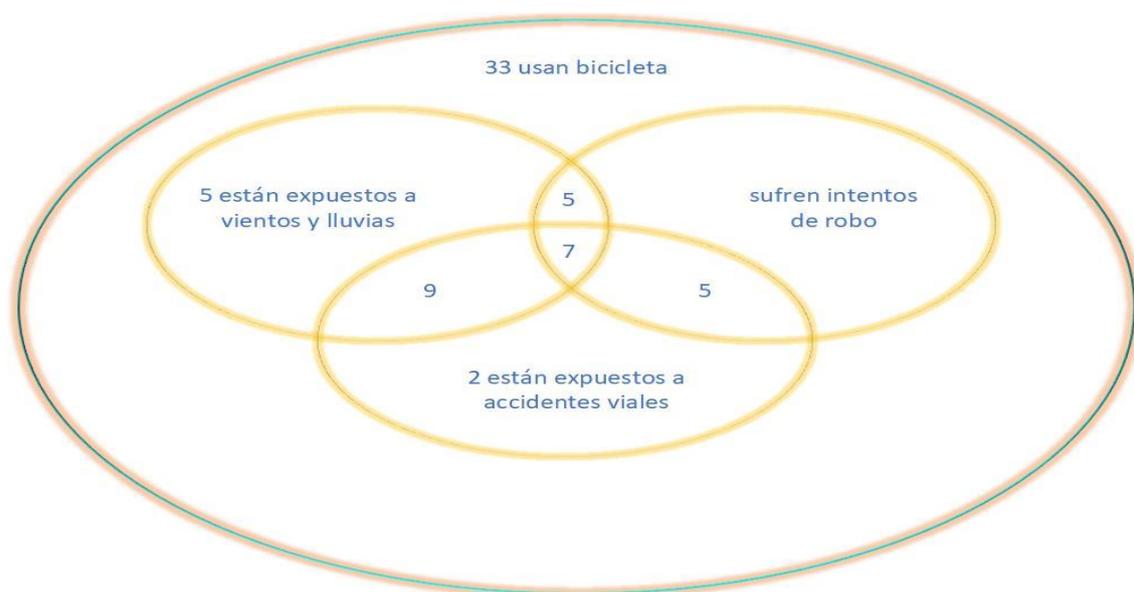
**Figura 26.** Distribución según el transporte colectivo. Elaboración propia.

De igual manera, se determinaron tres categorías o eventualidades que se les presentan a los usuarios que se movilizan a través del transporte individual como se ilustra en la Figura 27, donde 32 encuestados se movilizan solos, 2 se movilizan en grupo y 4 han tenido que pagar sobre costos o han sufrido de alteraciones del taxímetro al momento de finalizar su movilización. Sin embargo, 4 usuarios que se movilizan solos han tenido que pagar sobre costos y 1 usuario que se moviliza en grupo ha tenido que pagar de igual manera sobre costos.



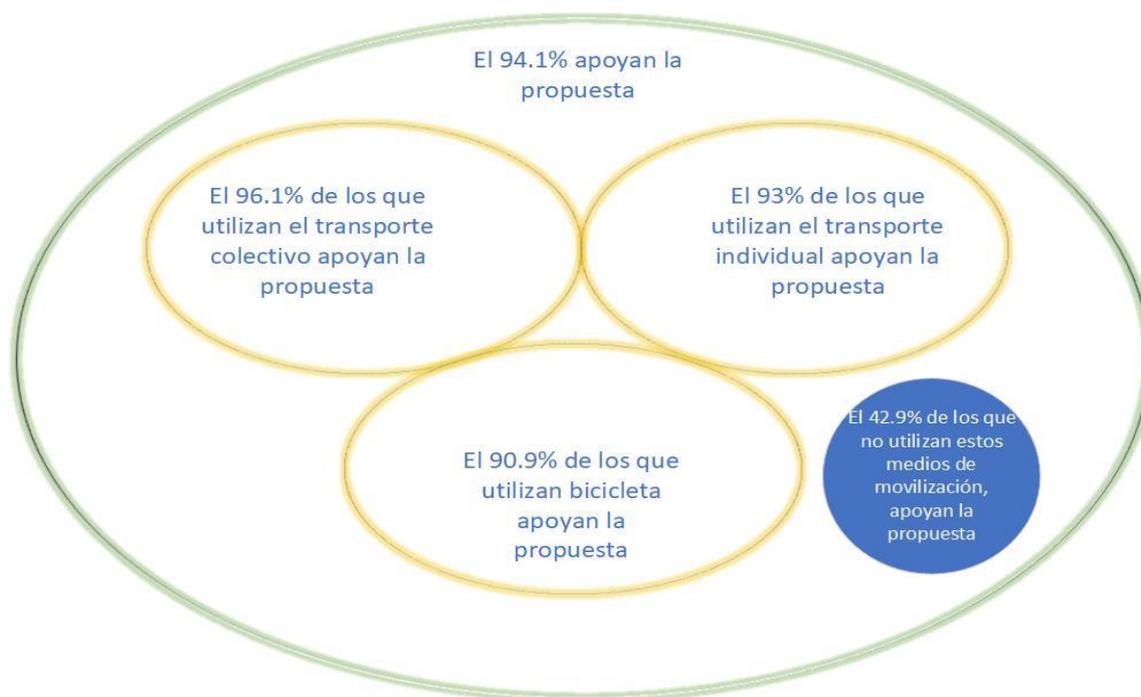
**Figura 27.** Distribución según el transporte individual. Elaboración propia.

Por último, se determinó tres eventualidades de las cuales están expuestos los usuarios que se movilizan a través de la bicicleta como se puede apreciar en la Figura 28, donde 5 están expuestos a lluvias y fuertes vientos y 2 están expuestos a accidentes viales únicamente. Por otro lado, 5 usuarios están expuestos a intentos de robo y de igual manera a accidentes viales, 9 están expuestos a fuertes vientos y lluvias junto con exposición a accidentes viales y 5 sufren intentos de robo y están expuestos a fuertes vientos y lluvias de igual manera. Finalmente, 7 usuarios están expuestos a las tres eventualidades.



**Figura 28.** Distribución según la movilización en bicicleta. Elaboración propia.

Adicionalmente, se determinó la participación relativa de los encuestados según el tipo de movilización que apoyan la propuesta de implementación de rutas en la Uniagustiniana, es decir, del total de los encuestados por tipo de transporte, cuantos apoyan la respectiva propuesta donde el 94.1% en general la apoya. En la Figura 29, se ilustra la participación relativa de los encuestados según el tipo de movilización que apoyan la respectiva propuesta, donde el 96.1% de los encuestados que utilizan el transporte colectivo la apoyan, el 93% de los encuestados que utilizan el transporte individual de igual manera la apoyan, el 90.9% de los encuestados que se movilizan a través de la bicicleta la apoyan y por último, el 42.9% de los encuestados que no utilizan ninguno de los tres tipos de movilización apoyan la respectiva propuesta.



**Figura 29.** Aprobación de los encuestados para la propuesta. Elaboración propia.

### 7.3.2 Tratamiento de los datos para las estimaciones.

En Uniagustiniana (sede Tagaste) de la jornada nocturna se encuentran registrados 3016 estudiantes actualmente, donde 152 de estos compartieron su ubicación a través de la encuesta realizada. Para realizar las estimaciones de la demanda como se ilustra en la Tabla 14, se establecieron cuatro criterios para determinar la probabilidad de participación de los estudiantes respecto a cada medio de movilización evaluado (colectivo, individual y bicicleta). Finalmente se multiplica la probabilidad obtenida de cada medio de movilización con la totalidad de estudiantes registrados en la jornada nocturna (3016), sumando cada valor y determinando la población estimada. Los criterios se dividen en cuatro categorías, el primero es la cantidad de usuarios (% Us.), el segundo es la cantidad de usuarios insatisfechos con su respectivo medio de transporte (% Ins.), el tercero se compone por los usuarios que confirmaron si al servicio de rutas en la Uniagustiniana (% Conf. Si.), por último, los estudiantes que tienen clases todos los días (% Días.). Estos criterios se determinan calculando la frecuencia relativa de cada medio de transporte entre el total de usuarios que se movilizan a través de los respectivos medios de movilización, es decir, la cantidad de usuarios que se movilizan a través del transporte colectivo entre el total de usuarios, repitiendo la misma operación para cada medio de transporte. Finalmente, cada criterio por tipo de transporte se multiplica, obteniendo la probabilidad de estudiantes (T. Prob.) que están interesados en adquirir el servicio de movilización, y

multiplicando esta probabilidad con la totalidad de estudiantes pertenecientes a la jornada nocturna, determinando la población estimada (P. Estimada.).

Tabla 14.

*Población estimada.*

<b>T. transporte</b>	<b>% Us.</b>	<b>% Ins.</b>	<b>% Conf. Si.</b>	<b>% Días.</b>	<b>T. Prob.</b>	<b>P. Estimada.</b>
Colectivo	50,3%	88,3%	96,1%	63,6%	27,2%	819
Individual	28,1%	58,1%	93,0%	74,4%	11,3%	341
Bicicleta	21,6%	42,4%	90,9%	78,8%	6,6%	198
<b>T. general</b>						<b>1358</b>

*Nota:* Autoría propia.

Los datos empleados para calcular las respectivas frecuencias relativas se pueden apreciar en la Tabla 15, donde se tiene la cantidad de usuarios (Cant. Usuarios) que utilizan cada medio de transporte, siendo un total de 153 usuarios, de igual manera la cantidad de usuarios insatisfechos por el medio de transporte que utilizan para su movilización (Cant. Insatisfacción.), teniendo presente que considera insatisfacción cuando un usuario tiene más de una eventualidad en su medio de transporte. Finalmente, la cantidad de usuarios que confirmaron si en el servicio de rutas para la Uniagustiniana (Cant. Conf. Si.).

Tabla 15.

*Datos de la encuesta.*

<b>T. Transporte</b>	<b>Cant. Usuarios</b>	<b>Cant. Insatisfacción</b>	<b>Cant. Conf. Si.</b>
Colectivo	77	68	74
Individual	43	25	40
Bicicleta	33	14	30
<b>Total, general</b>	<b>153</b>	<b>107</b>	<b>144</b>

*Nota:* Autoría propia.

Por otro lado, para el cálculo de los estudiantes que utilizan su respectivo medio de transporte todos los días, se puede contemplar la Tabla 16. donde se realiza la frecuencia relativa de cada medio de transporte, es decir, la cantidad de usuarios que asisten los cinco días (Cant. Cinco días.) de cada medio de transporte, dividido entre la totalidad de usuarios (Cant. Usuarios) de cada medio de transporte. Finalmente, se puede apreciar que la mayoría de los usuarios que

asisten los cinco días de la semana, se movilizan a través de la bicicleta, seguido de aquellos que se movilizan a través del transporte individual y, por último, el transporte colectivo.

Tabla 16.

*Usuarios que asisten todos los días a clases.*

<b>T. Transporte</b>	<b>Cant. Usuarios</b>	<b>Cant. Cinco días.</b>	<b>Total %</b>
Colectivo	77	49	63,6%
Individual	43	32	74,4%
Bicicleta	33	26	78,8%
<b>Total, general</b>	<b>153</b>	<b>107</b>	<b>69,9%</b>

*Nota:* Autoría propia.

## 8 Formulación del modelo matemático OCVRP

### 8.1 Open Capacitated Vehicle Routing Problem (OCVRP)

El OCVRP busca solucionar un problema donde se tiene como parámetros realizar recorrido donde se tiene una capacidad del vehículo establecida y esté no debe regresar al depósito de donde partió. Se pretende visitar todos los clientes y satisfacer la demanda optimizando costos sin exceder la capacidad del vehículo siendo esta limitada. Como factor adicional, el vehículo debe iniciar su enrutamiento desde un depósito y visitar cada punto. En el momento que termina de realizar la ruta el vehículo no debe regresar al punto inicial, es decir, la ruta comienza desde un depósito, pero termina en el momento que culmina el servicio en el último punto. Este problema comprende un costo de transporte únicamente desde el punto de partida hasta el último punto a visitar, lo que se diferencia del problema tradicional del VRP (Vehicle Routing Problem), donde debe regresar al depósito una vez haya visitado el último punto enrutado. Una diferencia entre el CVRP y el OVRP es que en el CVRP se comprende como un ciclo de enrutamiento con capacidad limitada que comúnmente se soluciona por asignación de vehículos individuales según su capacidad, mientras el OVRP es un camino de enrutamiento que asume una capacidad ilimitada en el vehículo pero que no retorna al depósito, lo que genera un camino desde un punto de partida hasta un punto final sin ser cíclico. Al momento de combinar estas dos metodologías se estudia un caso de enrutamiento con capacidad sin ser cíclico (Miné, 2013, p. 1).

El presente método de solución puede ser representado con la notación matemática del OVRP, sin embargo, se tomó la notación matemática de un caso de estudio similar al presente donde establecen variables y parámetros idénticas a las requeridas. En la ecuación 2, se presenta la función objetivo que busca minimizar los costos fijos y variables, los cuales son el costo del viaje del vehículo y la activación del mismo respectivamente, donde el costo del viaje está directamente relacionado con la distancia total recorrida, donde la notación será de la siguiente manera (Pichka, 2014, p. 47):

Índices:

- D: Número de depósitos.
- N: Número de clientes
- I, J: Conjunto de depósitos y clientes ( $i, j = 1, 2, 3, \dots, D, D+1, \dots, D+N$ ).
- D: destino.
- H: Conjunto de vehículos ( $h = 1, 2, 3, \dots, K$ )

Parámetros:

- Q: Capacidad de un vehículo
- V: Número máximo de vehículos que se pueden activar en cada depósito.
- K: Número máximo de vehículos que se pueden activar en todos los depósitos ( $K = V \times D$ )
- FC: Costo de activación del vehículo (costo fijo)
- Cij: Costo de viaje del cliente / depósito i al cliente j
- qi: Demanda del cliente i

Variables de decisión:

- $X_{ijh}$ : 1, si el vehículo “h” viaja directamente de “i” a “j”, siendo “i” diferente a “j”. 0, de lo contrario.
- $Y_{ih}$ : 1, si el cliente “i” es visitado por el vehículo “h”. 0, de lo contrario

$$\sum_{h=1}^K \sum_{i=1}^{D+N} \sum_{j=D+1}^{D+N} X_{ijh} * C_{ij} \quad 2$$

En la ecuación 3, se expresa la activación del uso de los vehículos (Pichka, 2014, p. 47):

$$FC * \sum_{i=1}^D \sum_{h=1}^K Y_{ih} \quad 3$$

La función objetivo se representa en la ecuación 4, donde es la unión de los costos fijos y variables más la activación del uso de los vehículos:

$$\sum_{h=1}^K \sum_{i=1}^{D+N} \sum_{j=D+1}^{D+N} X_{ijh} * C_{ij} + FC * \sum_{i=1}^D \sum_{h=1}^K Y_{ih} \quad 4$$

En las siguientes ecuaciones se expresan las variables y parámetros a los que se encuentra sujeto el modelo matemático. En la ecuación 5, se determina que cada punto será asignado a un único vehículo. En la ecuación 6, se establece que la empleabilidad de los vehículos debe ser igual o menor a los disponibles. En la ecuación 7, se establece que cada vehículo debe ser activado en un solo depósito, que en el presente caso se dispone de un único depósito. En la ecuación 8, limita la activación de vehículos por depósito, es decir, limita el uso de vehículos en el depósito evaluado. En la ecuación 9, se establece que solo se puede tener un cliente o depósito como predecesor, de igual manera la ecuación 10, establece que solo se puede tener un cliente como sucesor. En la ecuación 11, se establece la capacidad del vehículo y las ecuaciones 12, 13 y 14, establecen las restricciones de integridad (Pichka, 2014, p.49)

Sujeto a:

$$\sum_{h=1}^K Y_{ih} = 1 \quad (i = D + 1, \dots, D + N) \quad 5$$

$$1 \leq \sum_{h=1}^K \sum_{i=1}^D Y_{ih} \leq K \quad 6$$

$$\sum_{i=1}^D Y_{ih} \leq 1 \quad \forall h \quad 7$$

$$\sum_{h=1}^K Y_{ih} \leq V \quad (i = 1, \dots, D) \quad 8$$

$$\sum_{i=1}^{D+N} X_{ijh} = Y_{ih} \quad (j = D + 1, \dots, D + N), \forall h \quad 9$$

$$\sum_{j=D+1}^{D+N} X_{ijh} \leq Y_{ih} \quad (i = 1, \dots, D + N), \forall h \quad 10$$

$$\sum_{i=1}^{D+N} Y_{ih} * q_i \leq Q \quad \forall h \quad 11$$

$$X_{ijh} = 0 \text{ si } : i = j \quad \forall i, j, h \quad 12$$

$$X_{ijh} = \{0, 1\} \quad \forall i, j, h \quad 13$$

$$Y_{ih} = \{0, 1\} \quad \forall i, h \quad 14$$

## 8.2 School Bus Routing Problem (SBRP)

El SBRP es un caso de ruteo donde se enfoca en el transporte de personas conocido como Dial a Ride que pretende el sistema de transporte puerta a puerta, con un enfoque que se encuentra ubicado entre un bus colectivo que tiene un sistema de ruteo rígido donde es preestablecida su ruta, y un sistema flexible como el transporte privado (taxi, Uber, entre otros). Donde se asigna en la mayoría de los casos un solo sistema de transporte que pueda movilizar al usuario (cliente), desde un origen de partida hasta el destino donde se desea, logrando la satisfacción del cliente, este es un factor diferenciador entre un sistema de transporte de

personas y un sistema de transporte de mercancías, dado que se debe procurar la satisfacción del cliente en el proceso de ruteo contemplando tiempos en la recogida del usuario y el tiempo determinado en la hora de llegada, más conocido como ventanas de tiempo. Se tiene como referente la asignación de un vehículo o varios (según la cantidad de los clientes) efectuando las rutas con base a la necesidad de los clientes procurando un costo mínimo que se obtiene de la suma del costo total de los vehículos empleados, distancia recorrida y “las molestias de los clientes” (Doerner, 2011, pp. 1-2).

Cada ruta debe obedecer las siguientes restricciones: la visita a cada cliente debe ser una única vez, cada vehículo debe volver al depósito origen, los servicios de recogida y entrega por cada cliente debe ser realizado por el mismo vehículo, la solicitud de cada cliente debe ser recogida antes de ser entregada, el número de usuarios no puede exceder la capacidad del vehículo, cada usuario debe ser recogido y entregado en los intervalos de tiempos establecidos, la espera del vehículo por la llegada del usuario no puede exceder el valor o la cantidad dada, el tiempo de viaje no puede exceder el valor preestablecido. Al obedecer a estas restricciones se les puede definir como: restricción de capacidad al tener un límite de personas para movilizar, si debe pasar una única vez por cliente se conoce como grúa apiladora, cuando se debe cumplir la recogida y entrega dentro de los intervalos de tiempo se denomina como ventanas de tiempo. Se puede contemplar dos estados en las peticiones de los clientes, estático o dinámico, donde el estático es cuando se conocen con anterioridad las rutas de los clientes, el número de clientes y éste no cambia, es decir, esta preestablecido. El dinámico puede contemplar dos maneras, las solicitudes se insertan en el problema cuando ocurren, es decir, solicitud inmediata y el segundo caso se da por medio de probabilidades según el comportamiento histórico del mismo con un comportamiento estocástico (Doerner, 2011, pp. 2-3).

Se puede tomar como referente una programación general del VRP para la solución del SBRP donde pretende empezar en el depósito y contemplar los horarios y lugar de recogida establecidos por los usuarios, tiempo dentro del bus, capacidad del bus, máximo tiempo de espera del usuario, entre otros, como se puede apreciar en la ecuación 15, 16, 17, 18; donde la notación será de la siguiente manera (Doerner, 2011, p. 6):

- 0: donde comienza la ruta.
- $2n + 1$ : finalización de la ruta después de visitar todos los puntos comprendidos entre P (origen) y D (destino) de la ruta.
- P: origen.

- $D$ : destino.
- $i + 1$ : ubicación en la ruta después de “ $i$ ”.
- $i - 1$ : ubicación anterior de “ $i$ ”.
- Secuencia de la ruta:  $0, 1, \dots, h, 2n + 1$ .
- $T_i$ : Hora de inicio del servicio en la ubicación “ $i$ ” para cada una de las ubicaciones “ $h$ ” de la ruta.
- $T_0$ : Momento en que el vehículo abandona la ubicación 0.
- $T_{h+1}$ : Momento en que el vehículo ingresa a la ubicación “ $2n + 1$ ”.

Minimizar  $T_{h+1}$ :

Sujeto “ $T$ ”

$$T_i + t_{i, i+1} \leq T_{i+1} \quad \forall i \in P \cup D \quad 15$$

$$a_i \leq T_i \leq b_i \quad \forall i \in P \cup D \quad 16$$

$$T_i - a_i \leq W_i \quad \forall i \in P \quad 17$$

$$(T_{(i+n)-1} + t_{(i+n)-1, i+n}) - T_i \leq R_i \quad \forall i \in P \quad 18$$

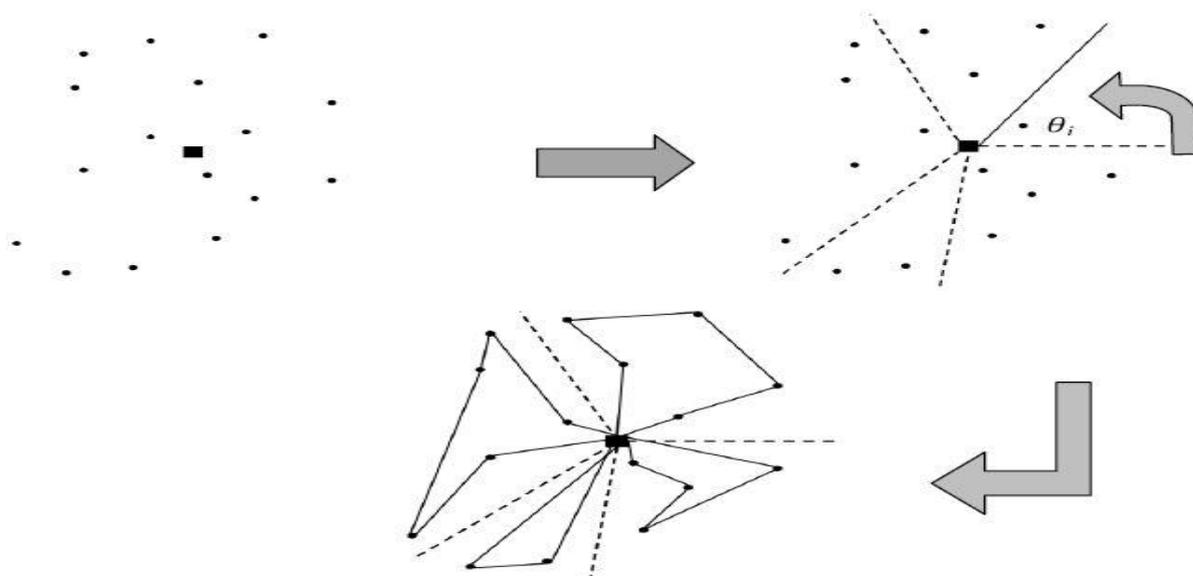
Donde  $W_i$ : es el tiempo de espera máximo para el cliente “ $i$ ”, y  $R_i$ : es el tiempo máximo de viaje (Doerner, 2011, p. 6)

## 9 Algoritmo de Barrido y el Vecino Más Cercano para solución del OCVRP

### 9.1 Heurística de Barrido

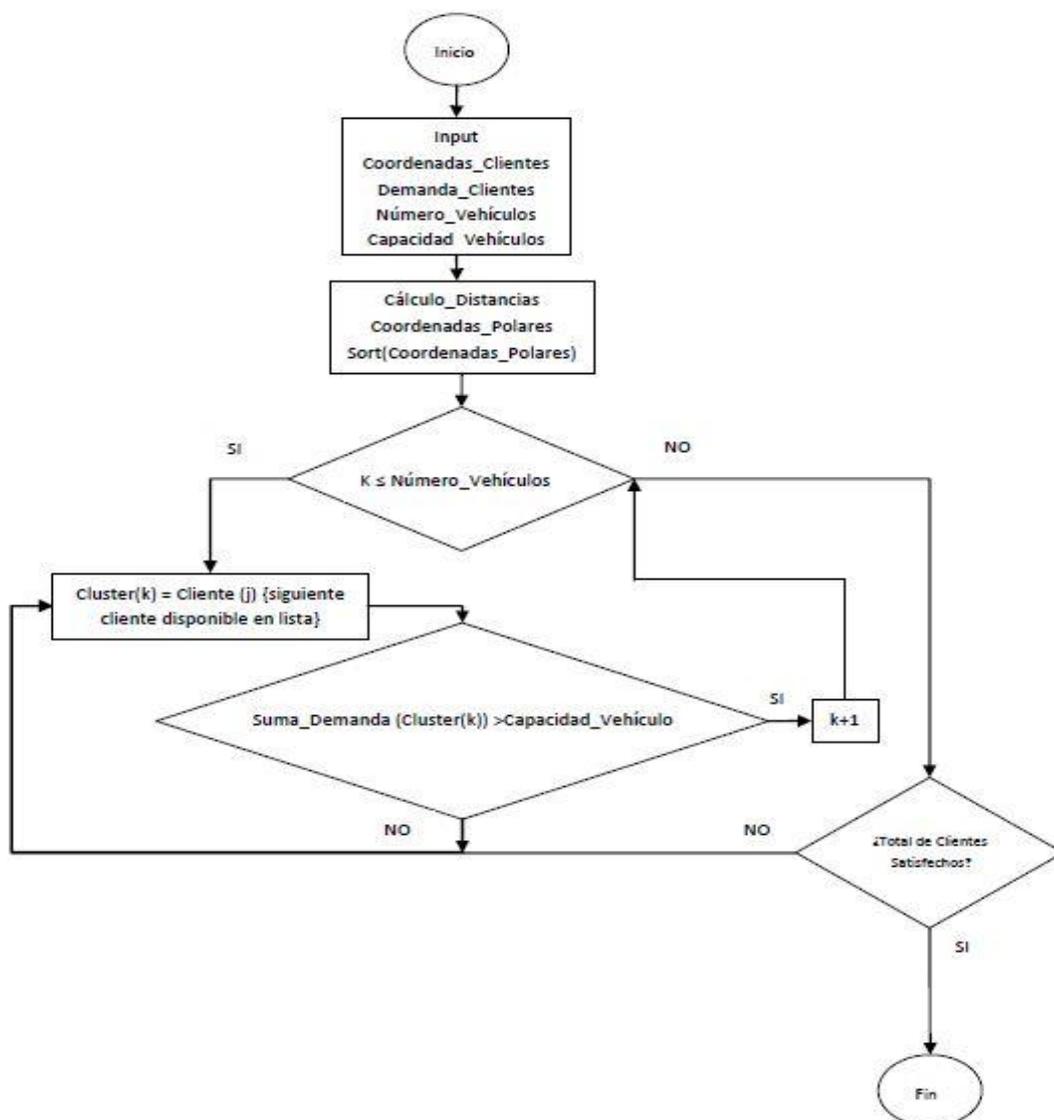
Esta heurística es perteneciente a las Heurísticas de construcción y a los métodos de dos fases, una en busca de la asignación de clientes para cada vehículo y otra en la determinación del orden de visita de los clientes, esta heurística es categorizada como perteneciente a un CVRP dado que los clústeres tienen un máximo de capacidad. Para la asignación de los clientes en cada vehículo o “clúster” se realizan por medio de una semirrecta originada en el depósito incorporando los clientes “barridos” por dicha semirrecta hasta que cumpla la restricción de capacidad. Para el desarrollo de esta heurística se tienen en cuenta tres pasos, primero que es la inicialización donde establece los puntos más cercanos en distancia (normalmente euclidiana) hasta los más lejanos, el segundo es selección que por medio del barrido incorpora los puntos a una ruta hasta cumplir la restricción de capacidad y por último optimización donde se establecen los clústeres para resolverlos posteriormente como rutas individuales (Orrego, 2013, pp. 26-28).

En la Figura 30, se ilustra un ejemplo de la metodología que realiza el algoritmo de barrido, teniendo un centroide y del respectivo se originan las semirrectas las cuales van girando y a su vez incorporan los puntos a un clúster determinado hasta cumplir la restricción de capacidad, que en este caso será la capacidad máxima del vehículo.



**Figura 30.** Ejemplo de Barrido. Orrego (2013)

En la Figura 31, se presenta la secuencia lógica del algoritmo de barrido donde se asignan los clústeres para después poder ser solucionados como rutas independientes. La secuencia que sigue es la asignación de las coordenadas (euclidianas) de cada punto, la demanda de los usuarios que en este caso son la cantidad de estudiantes, docentes y administrativos que estén interesados en adquirir el servicio, luego asigna el número de vehículos requeridos según su capacidad. El algoritmo procede a calcular las distancias existentes entre cada punto para agruparlas según su cercanía, seguido de esto asigna los clústeres por cercanía y cumpliendo la capacidad máxima del vehículo repitiendo este proceso hasta haber asignado todos los puntos a un determinado clúster:



**Figura 31.** Secuencia lógica del Algoritmo de Barrido. Orrego (2013)

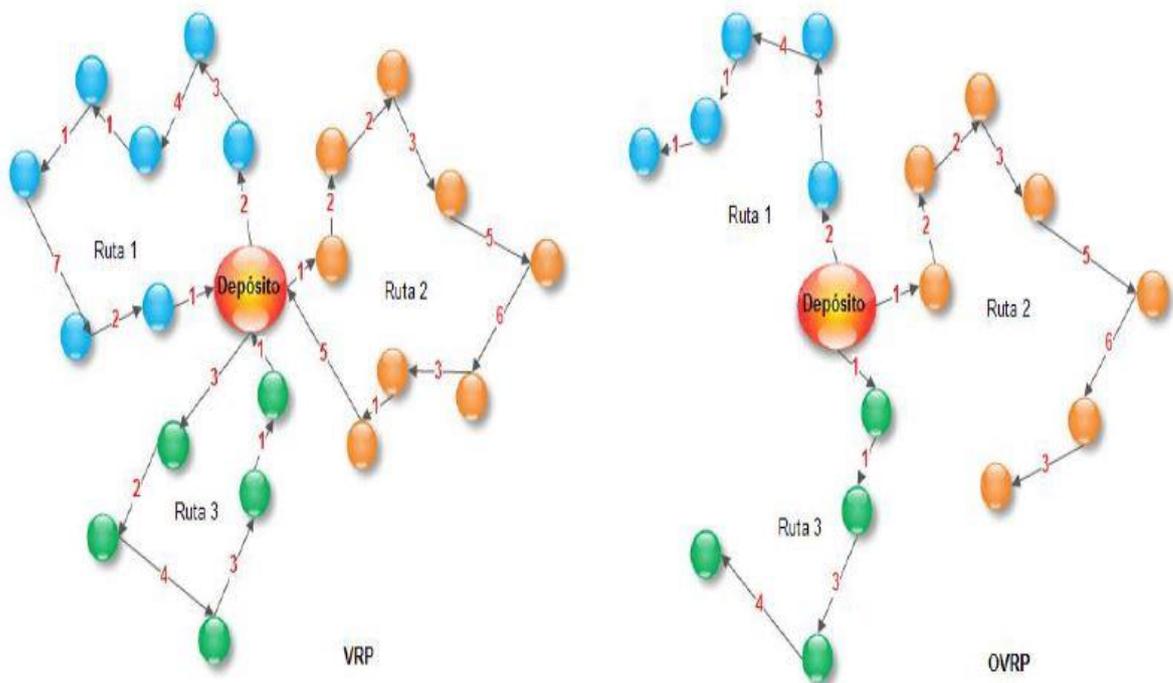
## 9.2 Vecino más cercano

Esta heurística es perteneciente a las Heurísticas de construcción y a los métodos de inserción, obteniendo una solución factible muy cercana a la óptima. Su metodología se basa en encontrar el punto más cercano desde el punto de partida, es decir, incursiona el punto con menor distancia empezando en el depósito, luego busca el siguiente punto con menor distancia para establecer la secuencia u orden de ruta hasta llegar al último punto. En la incursión de estos puntos a visitar se pueden tener tres factores en cuenta, como: tiempo total de la ruta, capacidad del vehículo y distancia total de la ruta (Ramírez, 2016, pp. 6-18).

Este algoritmo busca disminuir las distancias, optimizando recursos de tal manera que al momento de evaluar los posibles puntos que se puede visitar, se escoge el que tenga menor distancia. Normalmente en la aplicación de este algoritmo se emplean distancias euclidianas permitiendo una mayor aproximación y eficiencia en tiempo computacional al momento de calcular los datos (Moreno, 2004, pp. 17-21).

El algoritmo del vecino más cercano es empleado en el caso del OVRP debido que asigna los puntos con menor distancia entre sí, permitiendo la construcción de la ruta buscando cumplir el objetivo de minimizar distancias empleando la menor cantidad de vehículos posibles. Los vehículos iniciaran en el depósito que en este caso será la Uniagustiniana, visitando todos los puntos una única vez. Para visitar los puntos asignados en la ruta se debe cumplir la restricción del punto más cercano entre el que se encuentra en estudio y los siguientes a visitar. Cuando todos los puntos hayan sido visitados, el vehículo no está obligado a volver al depósito, creando una ruta abierta y cumpliendo las características del OVRP (Ramírez, 2016, pp. 16-18).

En la Figura 32, se ilustra un ejemplo del algoritmo del vecino más cercano donde hay un depósito y varios puntos que debe visitar el vehículo. Los puntos inicialmente están agrupados por cercanía, es decir, hay tres (3) clústeres asignados, sin embargo, están ordenados de tal manera que, al momento de visitar todos los puntos, el vehículo debe retornar al depósito. En la gráfica derecha se presenta el principio del algoritmo del vecino más cercano, donde los puntos se asignan según cercanía y la ruta termina abierta, es decir, no retorna al depósito al momento de visitar todos los puntos.



**Figura 32.** VRP y OVRP. Ramírez (2016).

En la Figura 33, se presenta la secuencia lógica del Algoritmo del Vecino más cercano, donde se establecen los parámetros de entrada como: coordenadas (euclidianas), velocidad promedio del vehículo, tiempo de servicio y capacidad del tiempo de ruta (tiempo máximo de viaje que puede realizar el vehículo). Después crea la matriz de distancias donde se determina la distancia existente entre cada punto, seguido de esto se inicializa el algoritmo del vecino más cercano, donde se evalúa la distancia del punto más cercano desde el punto que se encuentra actualmente y luego asignarlo a la ruta. Este proceso se repite hasta que se hayan asignado todos los puntos y no supere el tiempo de recorrido al tiempo máximo de viaje.

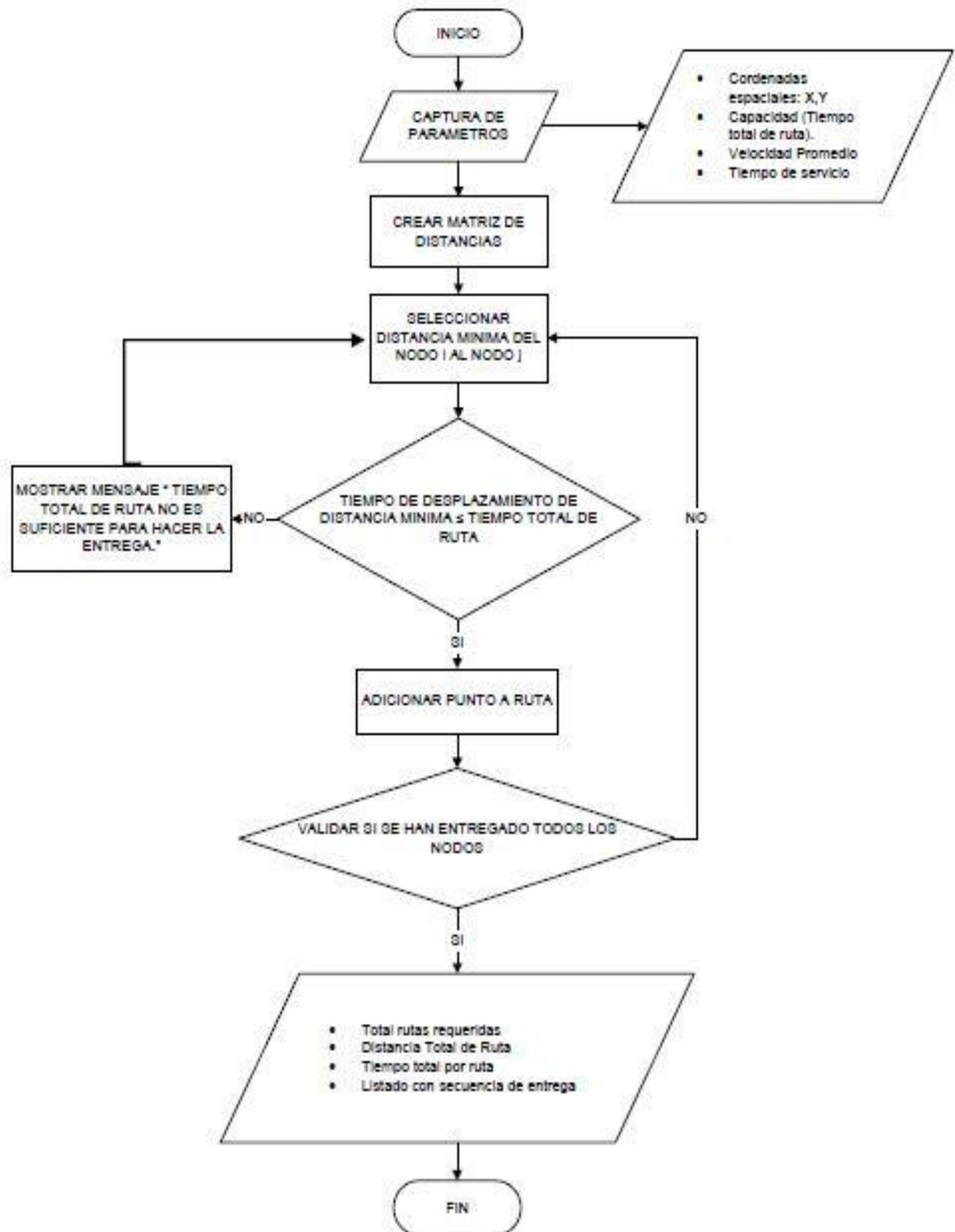


Figura 33. Secuencia lógica del Vecino Más Cercano. Ramírez (2016)

## 10 Rutas estimadas para la comunidad agustiniana de la sede Tagaste

### 10.1 Coordenadas y dispersión geográfica de los encuestados

Se establecieron las direcciones de los encuestados o lugares referentes a sus viviendas, donde se pudo determinar las coordenadas euclidianas a través del buscador geográfico Google Maps. En el respectivo ejercicio se encontraron lugares referentes a sus viviendas repetidos, lo cual complicaría el funcionamiento del algoritmo del vecino más cercano, sin embargo, se establecieron coordenadas cercanas dentro del punto referente para poder realizar una ejecución con un buen desempeño.

En la Tabla 17 se ilustran algunas coordenadas de los 152 encuestados, donde se establece el “ID Punto” que permite identificar el punto en cuestión, el “lugar” describe el sitio referente a su vivienda o la dirección de residencia y finalmente se establecen las coordenadas euclidianas de longitud (X) y latitud (Y) de cada punto en cuestión.

Tabla 17

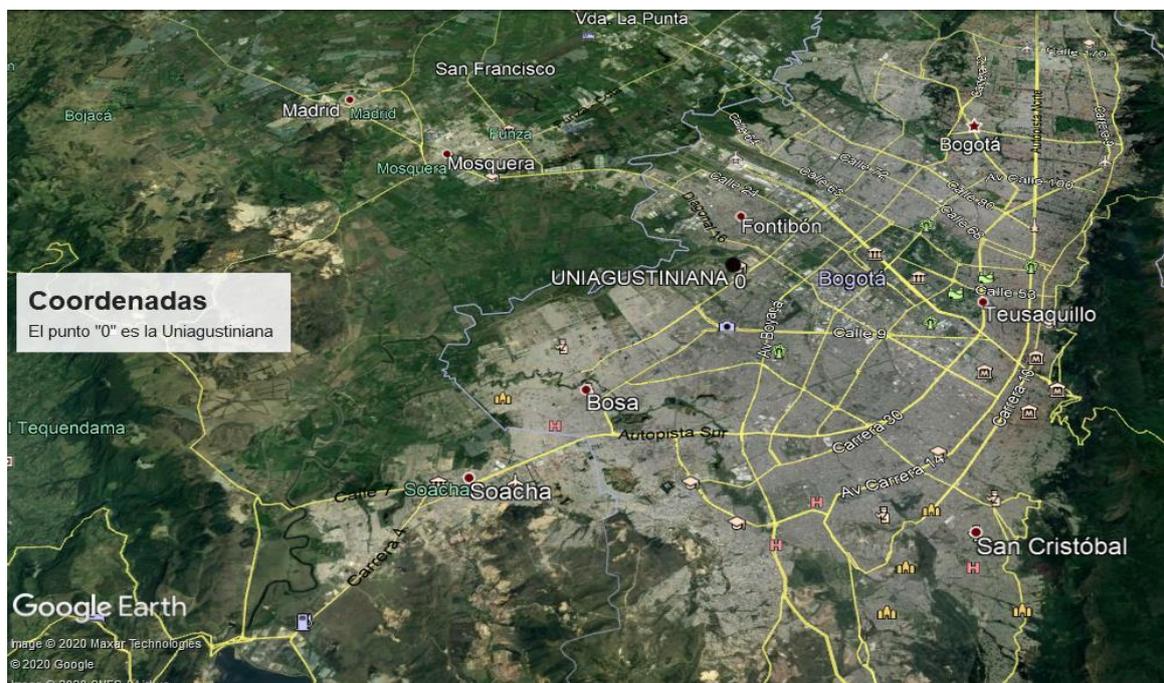
*Coordenadas de los encuestados.*

<b>ID PUNTO</b>	<b>LUGAR</b>	<b>X LONG</b>	<b>Y LAT</b>
0	<i>Uniagustiniana</i>	4,653067	-74,146032
1	<i>A 10 minutos del portal Américas</i>	4,633968	-74,173930
2	<i>Abastos</i>	4,633039	-74,158796
3	<i>Alsacia</i>	4,643485	-74,127887
4	<i>Andalucía</i>	4,653909	-74,138145
5	<i>Av. Américas con av. ciudad de Cali,</i>	4,640781	-74,156415
6	<i>Banderas</i>	4,630145	-74,150926
7	<i>barrio jazmín (calle 3 con carrera 50)</i>	4,615044	-74,114716
8	<i>Barrio nueva dely; San Cristóbal</i>	4,522568	-74,088464
9	<i>Barrio Tierra buena</i>	4,649312	-74,171396
10	<i>Biblioteca Tintal</i>	4,643191	-74,154816
11	<i>Bosa</i>	4,612123	-74,188259
12	<i>Bosa</i>	4,615717	-74,192551
13	<i>Bosa Atalayas</i>	4,629964	-74,193762
14	<i>Bosa Atalayas</i>	4,633672	-74,198215
15	<i>bosa el porvenir</i>	4,638519	-74,185829
16	<i>Bosa el recreo</i>	4,633722	-74,198460
17	<i>Bosa escocia</i>	4,621527	-74,185335
18	<i>Bosa la libertad</i>	4,623846	-74,192047
19	<i>Bosa libertad</i>	4,623813	-74,192186
20	<i>Bosa Recreo</i>	4,631100	-74,199751
21	<i>C, C ecoplaza Mosquera</i>	4,712233	-74,221377

22	<i>C, C milenio plaza</i>	4,630266	-74,168192
23	<i>C, C Hayuelos</i>	4,663935	-74,130734
24	<i>C, C HAYUELOS</i>	4,663849	-74,130959
25	<i>C, C mercurio</i>	4,582776	-74,211687
26	<i>C, C mercurio Soacha</i>	4,587239	-74,203598
27	<i>c, c metrorecreo</i>	4,632758	-74,200897
28	<i>C, C Mi centro</i>	4,717525	-74,209461
29	<i>C, C MI CENTRO PORVENIR</i>	4,637789	-74,187939
30	<i>C, C Mi Centro Porvenir</i>	4,636217	-74,189017
31	<i>C, C Milenio Plaza</i>	4,630256	-74,168138
32	<i>C, C Milenio plaza</i>	4,630139	-74,168266
33	<i>C, C portal 80</i>	4,710509	-74,112505
34	<i>C, C Tintal plaza</i>	4,641662	-74,155377
35	<i>C, C TREBOLIS EL PORVENIR</i>	4,639505	-74,183961
36	<i>CAI patio bonito</i>	4,639033	-74,161067
37	<i>Calle 11a N 88a-65</i>	4,654611	-74,148336
38	<i>Calle 126#130-65</i>	4,738599	-74,112241
39	<i>Calle 22 H N°104B - 51</i>	4,628053	-74,092575
40	<i>Calle 54 con carrera 7</i>	4,640047	-74,062846

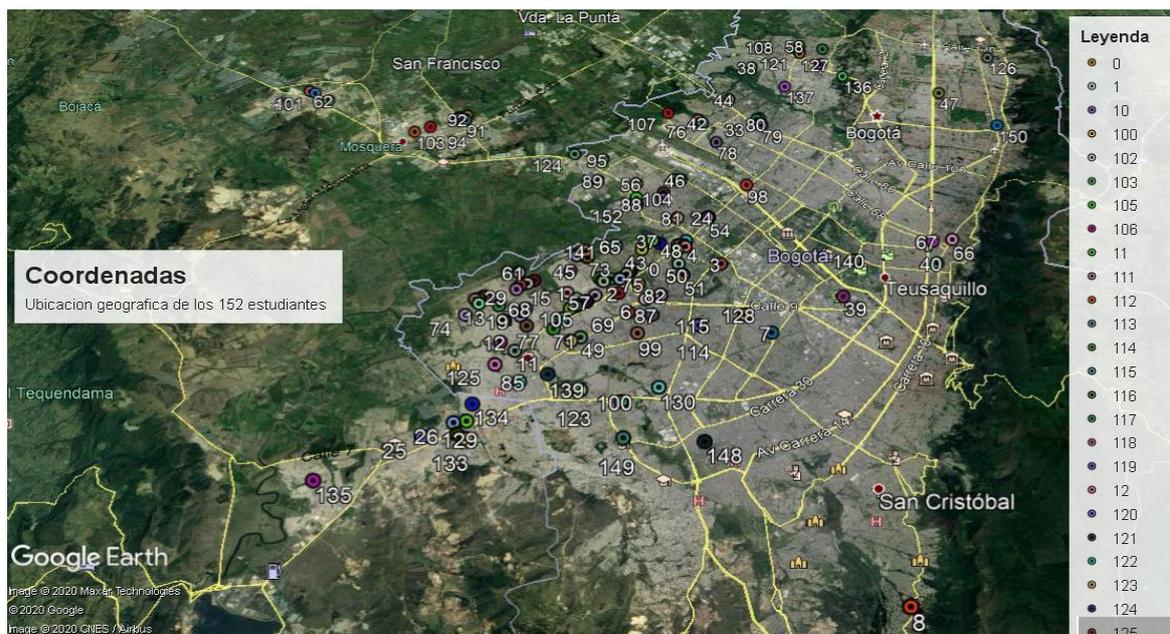
Nota: Autoría propia.

Se situaron los puntos 152 puntos en estudio a través del programa Google Earth, permitiendo una visualización general de la dispersión geográfica. En la Figura 34 se ilustra la ubicación geográfica de la Uniagustiniana con el punto referente “0”.



**Figura 34.** Ubicación geográfica de la Uniagustiniana. Elaboración propia.

De igual manera, se situaron los 152 puntos referentes a los encuestados, teniendo la dispersión geográfica de cada punto como se puede ver en la Figura 35. Como se puede apreciar en la imagen, la mayor concentración de estudiantes se encuentra en el sur-occidente entre Tintal, Kennedy y Patio bonito lo cual es coherente con la ubicación geográfica de la sede Tagaste de la Uniagustiniana en el sector Tintal. De igual manera se puede apreciar que la ubicación más lejana es San Cristóbal, Madrid, Mosquera, Soacha, Engativá y las cercanías de la calera.



**Figura 35.** Ubicación geográfica de los 152 estudiantes. Elaboración propia.

## 10.2 Coordenadas estimadas y dispersión geográfica de datos aleatorios

Con relación a las coordenadas proporcionadas de los 152 encuestados, se determinaron 1206 coordenadas aleatorias siguiendo el mismo patrón de distribución de los encuestados, es decir, asignar puntos aleatorios entre 6 metros de distancia (mínimo) y 1 kilómetro (máximo). En la Tabla 18., se ilustran los datos empleados para calcular las distancias aleatorias entre cada punto, donde 0.00005 es el valor mínimo equivalente con relación a las coordenadas euclidianas y 0.008594 es el valor máximo de las mismas.

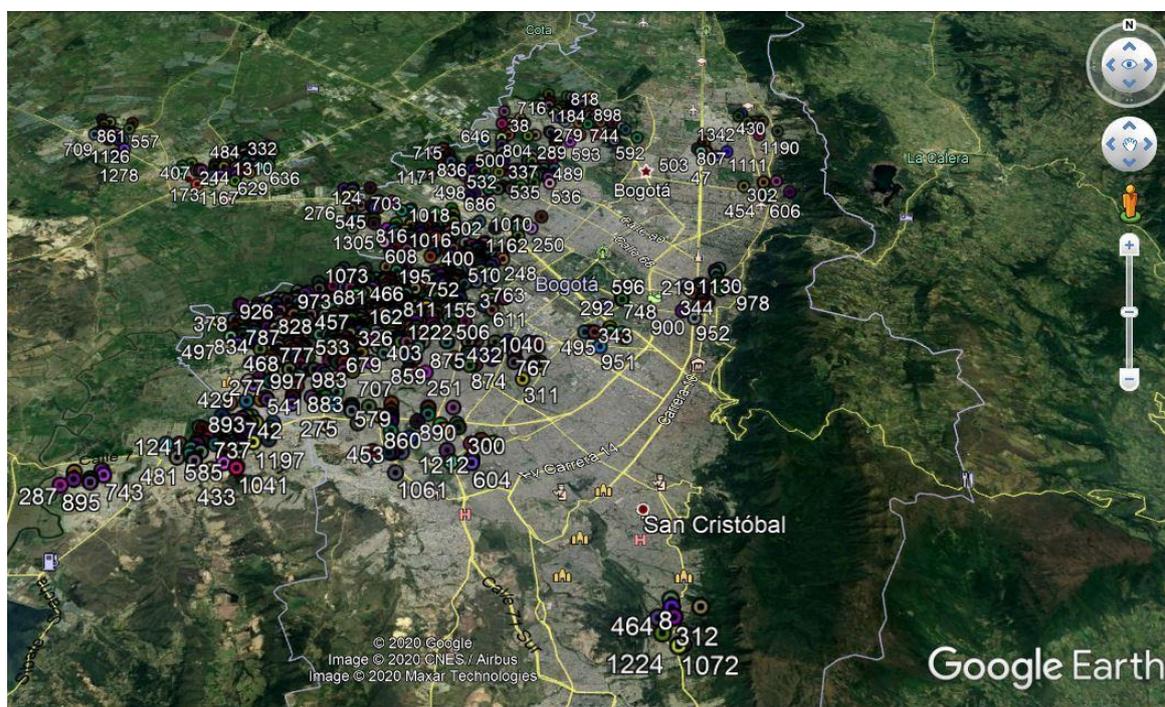
Tabla 18.

*Parámetros para las coordenadas aleatorias.*

Parámetros	
Equivalencia distancias en km	116,3626
Distancia Alrededor en km	1
Distancia Alrededor en Coordenadas	0,00859
Intervalo	
Mínimo	0,00005      6 metros aprox.
Máximo	0,008594      1 km
Datos	
Base	153
Cantidad Final	1358
Aleatorios por base	9

Nota: Autoría propia.

Las coordenadas aleatorias generadas con la respectiva formula se pueden contemplar en la Figura 36, donde se ilustra mayor concentración de igual manera en las localidades de Tintal, Kennedy y Patio bonito, tiendo como punto más lejanos San Cristóbal, Madrid, Mosquera, Soacha, Engativá y las cercanías de la calera.



**Figura 36.** Coordenadas aleatorias. Elaboración propia.

### 10.3 Implementación del algoritmo híbrido de barrido con el vecino más cercano

#### 10.3.1 Algoritmo de barrido.

Se desarrollo mediante la herramienta de Visual Basic de Excel el algoritmo de barrido y del vecino más cercano, permitiendo dar una solución factible al problema de ruteo de buses escolares. En la Figura 37, se ilustra la interface del algoritmo de barrido, donde se tiene la ubicación de la Uniagustiniana en el costado inferior derecho con un ID referenciado de "0". Estas coordenadas son el centroide, donde parte el algoritmo para agrupar los puntos en cuestión, por otro lado, en el costado superior izquierdo se ingresan los puntos de los encuestados, teniendo un ID que permite identificar los puntos en estudio, seguido de las coordenadas euclidianas (X Long. – Y Lat.).

ID PUNTO	X Long	Y Lat.	HORA INICIO	HORA FIN	RANGO
1	4,633968	-74,173930	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
2	4,633039	-74,158796	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
3	4,643485	-74,127887	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
4	4,653909	-74,138145	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
5	4,640781	-74,156415	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
6	4,630145	-74,150926	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
7	4,615044	-74,114716	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
8	4,522568	-74,088464	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
9	4,649312	-74,171396	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
10	4,643191	-74,154816	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
11	4,612123	-74,188259	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
12	4,615717	-74,192551	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
13	4,629964	-74,193762	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
14	4,633672	-74,198215	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
15	4,638519	-74,185829	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
16	4,633722	-74,198460	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
17	4,621527	-74,185335	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
18	4,623846	-74,192047	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
19	4,623813	-74,192186	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
20	4,631100	-74,199751	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
21	4,712233	-74,221377	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
22	4,630266	-74,168192	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
23	4,663935	-74,130734	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
24	4,663849	-74,130959	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
25	4,582776	-74,211687	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00
26	4,587239	-74,203598	8:00:00 a. m.	6:00:00 p. m.	10:00:00

**HEURÍSTICA DE BARRIDO**

Parámetros:

ID Punto: En preferencia numeración de los puntos a enrutar o nombre del punto a visitar.

X LONG: Coordenadas de las abscisas.

Y LAT: Coordenadas de las ordenadas.

Instrucciones:

- Ingresar las coordenadas del CEDI o deposito. El ID del respectivo debe ser el numero "0"
- Hacer clic en "Heurística de Barrido."

ID PUNTO	X Long	Y Lat.
0	4,653067	-74,146032

Coordenadas del CEDI o deposito:

**Figura 37.** Interface de coordenadas del algoritmo de barrido. Elaboración propia.

Para determinar la capacidad de cada clúster (grupo), se debe establecer la cantidad de vehículos a emplear junto con la capacidad máxima de movilización de cada uno. En la Figura 38, se puede contemplar en el costado superior izquierdo, la cantidad de clústeres (Vehículos) a emplear, seguido de la capacidad de cada uno, siendo en el presente caso 20 usuarios por clúster. De igual manera, se puede ilustrar al lado derecho la totalidad de usuarios que pueden ser movilizados por los ochos clústeres.

CLUSTER	CAPACIDAD	HORA INICIO	HORA FIN	RANGO
1	20	8:00:00	18:00:00	10:00:00
2	20	8:00:00	18:00:00	10:00:00
3	20	8:00:00	18:00:00	10:00:00
4	20	8:00:00	18:00:00	10:00:00
5	20	8:00:00	18:00:00	10:00:00
6	20	8:00:00	18:00:00	10:00:00
7	20	8:00:00	18:00:00	10:00:00
8	20	8:00:00	18:00:00	10:00:00

Capacidad total **160 Usuarios**

**Parámetros:**

**Cluster:** Cantidad de vehiculos dispinibles.

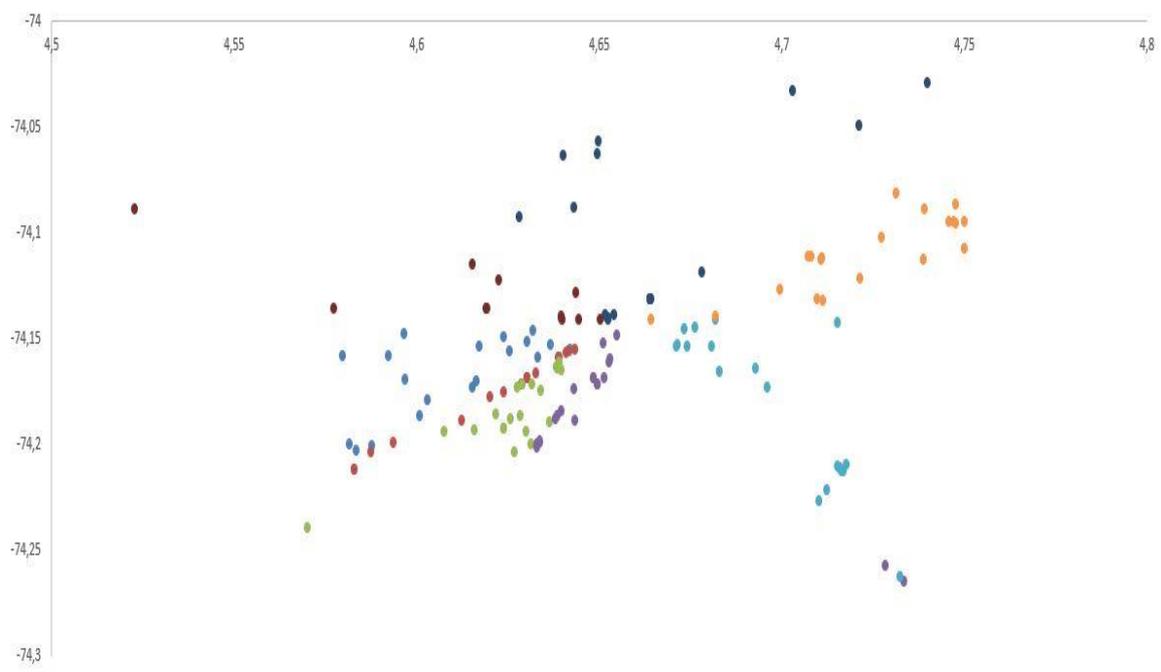
**Capacidad:** Cantidad de usuarios que se pueden movilizar por cluster.

**Instrucciones:**

- Ingresar los clusters disponibles para efectuar la movilizacion.
- Establecer la capacidad de cada cluster.

**Figura 38.** Interface para la asignación de clústeres. Elaboración propia.

Finalmente, al momento de ejecutar el algoritmo de barrido se pudo obtener la agrupación de los encuestados en ocho clústeres, mediante un gráfico de dispersión de puntos se puede representar las coordenadas de cada encuestado, donde es agrupado por cada clúster teniendo una capacidad máxima de 20 usuarios por vehículo. En la Figura 39, se puede contemplar lo expuesto.



**Figura 39.** Resultados del algoritmo de barrido. Elaboración propia.

### 10.3.2 Algoritmo del Vecino Mas Cercano (VMC).

Una vez agrupados los puntos en clústeres, se procede a la asignación u ordenamiento de cada punto dentro de los clústeres, es decir, el algoritmo procede a determinar el orden de visita de los puntos pertenecientes a cada clúster, cumpliendo la restricción de no retorno y bajo el parámetro del punto más cercano respecto al que está en estudio. En la Figura 40, se puede ilustrar la interface del algoritmo VMC, donde se ingresan las coordenadas en el costado superior izquierdo obtenidas por el algoritmo de barrido, teniendo como “Origen” la Uniagustiniana que es el punto de partida de cada bus. El orden de entrada de los datos (coordenadas), se puede contemplar en la etiqueta anexa en el costado derecho, donde las coordenadas de la Uniagustiniana deben ser colocadas dentro del área que se encuentra en rojo, seguido de los puntos del clúster en estudio.

	ID PUNTO	X LONG	Y LAT
Coordenadas. Deposito	0	4,653067	-74,146032
Coordenadas. Clientes	2	4,633039	-74,158796
	6	4,630145	-74,150926
	34	4,641662	-74,155377
	49	4,616159	-74,169685
	60	4,641977	-74,155123
	69	4,625197	-74,155942
	71	4,615039	-74,172408
	75	4,636437	-74,152807
	82	4,631656	-74,146249
	85	4,600645	-74,186429
	87	4,623753	-74,149037
	99	4,616909	-74,153341
	100	4,592055	-74,158137
	123	4,596712	-74,169368
	129	4,581502	-74,199718
	130	4,596546	-74,147629
	132	4,587596	-74,200132
	133	4,583318	-74,202363
	139	4,602943	-74,178662
	149	4,579498	-74,157564

GENERAR
RESTABLECER

Parámetros:

ID Punto: En preferencia numeración de los puntos a enutar o nombre del punto a visitar.

X LONG: Coordenadas de las abscisas.

Y LAT: Coordenadas de las ordenadas.

Instrucciones:

- En la zona roja ubicar las coordenadas del deposito. Para pegar las coordenadas deben ser insertadas con la opción de "pegar como Valores"
- Seleccionar los puntos asignados por cada Clúster y pegarlos como "Valores" desde la zona gris.

**Figura 40.** Interface de coordenadas del algoritmo VMC. Elaboración propia.

En la Figura 41, se puede contemplar los últimos datos de alimentación para el desarrollo del algoritmo VMC, donde se requiere la velocidad máxima promedio permitida del bus que efectuara el servicio de movilización de la comunidad agustiniana. De igual manera se tiene un parámetro que es el tiempo de máximo de movilización del bus, es decir, cuanto tiempo máximo puede tardar en movilizar a la comunidad agustiniana hasta el momento de movilizar al último usuario. Finalmente, se debe especificar el tiempo promedio de servicio por usuario, es decir, cuanto tiempo hay desde que el bus realiza una parada para que pueda descender el usuario, hasta que este retoma su movilización.

ID PUNTO	X LONG	Y LAT
0	4,653067	-74,146032
2	4,633039	-74,158796
6	4,630145	-74,150926
34	4,641662	-74,155377
49	4,616159	-74,169685
60	4,641977	-74,155123
69	4,625197	-74,155942
71	4,615039	-74,172408
75	4,636437	-74,152807
82	4,631656	-74,146249
85	4,600645	-74,186429
87	4,623753	-74,149037
99	4,616909	-74,153341
100	4,592055	-74,158137
123	4,596712	-74,169368
129	4,581502	-74,199718
130	4,596546	-74,147629
132	4,587596	-74,200132
133	4,583318	-74,202363
139	4,602943	-74,178662
149	4,579498	-74,157564

SOLUCIONAR

NUEVO

LIMPIAR

Para ingresar una nueva serie de datos, por favor oprima el botón "Nuevo" y repita los pasos anteriores:

Para ejecutar el algoritmo del Vecino Mas Cercano (VMC), por favor oprima el botón de "Limpiar" y a continuación ingrese los siguientes datos:

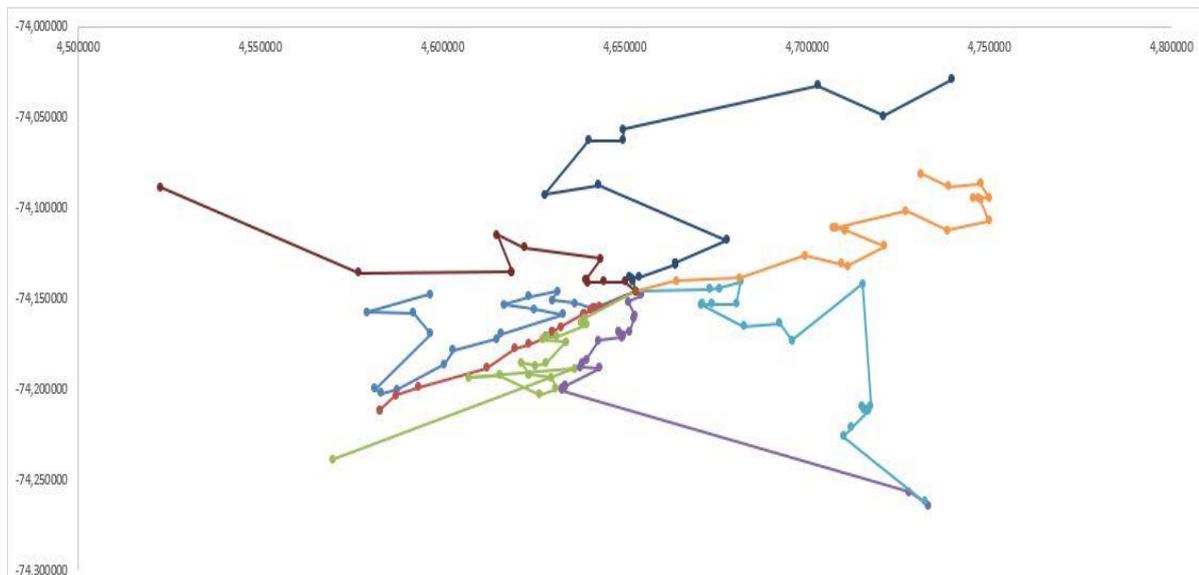
Velocidad promedio (Km/h):	24 Km/h
Tiempo total máximo de ruta permitido, valor en horas "0,00 ":	2 Hora(s)
Tiempo de servicio, valor en horas "0,00 ":	0,01666667 Hora(s)

**Resultados computacionales obtenidos:**

Total de puntos. Incluido el deposito	
Tiempo computacional "h:mm:ss"	
Total vehículos requeridos:	

**Figura 41.** Interface de parámetros del algoritmo VMC. Elaboración propia

Finalmente, al momento de ejecutar el algoritmo VMC, se obtiene el orden de visita de cada punto. Como se puede contemplar en la Figura 42, se tiene el orden de visita de los ochos clústeres cumpliendo la restricción de no retorno.



**Figura 42.** Resultados del algoritmo VMC. Elaboración propia.

Adicionalmente, se presenta el orden de visita de cada punto por "ID" referenciado y coordenadas euclidianas. En la Figura 43, se ilustra los resultados obtenidos, teniendo un total de tiempo de movilización de cada clúster, como lo puede ser el Clúster 2 con un tiempo total de 0.78 horas, siendo el menor tiempo de movilización.

0	4,653067	-74,146032
60	4,641977	-74,155123
34	4,641662	-74,155377
75	4,636437	-74,152807
6	4,630145	-74,150926
82	4,631656	-74,146249
87	4,623753	-74,149037
99	4,616909	-74,153341
69	4,625197	-74,155942
2	4,633039	-74,158796
49	4,616159	-74,169685
71	4,615039	-74,172408
139	4,602943	-74,178662
85	4,600645	-74,186429
132	4,587596	-74,200132
133	4,583318	-74,202363
129	4,581502	-74,199718
123	4,596712	-74,169368
100	4,592055	-74,158137
149	4,579498	-74,157564
130	4,596546	-74,147629
1		
1,19 horas		

0	4,653067	-74,146032
10	4,643191	-74,154816
59	4,641464	-74,155756
5	4,640781	-74,156415
83	4,638801	-74,158338
84	4,638926	-74,158491
86	4,632473	-74,165658
31	4,630256	-74,168138
22	4,630266	-74,168192
63	4,630256	-74,168234
32	4,630139	-74,168266
57	4,630053	-74,168449
116	4,628509	-74,171093
118	4,628688	-74,171164
105	4,623845	-74,175093
77	4,619869	-74,177528
11	4,612123	-74,188259
134	4,593413	-74,198893
26	4,587239	-74,203598
131	4,582821	-74,211676
25	4,582776	-74,211687
2		
0,78 horas		

0	4,653067	-74,146032
36	4,639033	-74,161067
111	4,638065	-74,163185
110	4,638536	-74,163614
112	4,639573	-74,164569
147	4,631363	-74,171152
117	4,628816	-74,171217
119	4,627544	-74,172945
1	4,633968	-74,17393
68	4,628332	-74,185869
70	4,625487	-74,187308
17	4,621527	-74,185335
18	4,623846	-74,192047
19	4,623813	-74,192186
13	4,629964	-74,193762
20	4,6311	-74,199751
74	4,626755	-74,203347
12	4,615717	-74,192551
125	4,607333	-74,193601
30	4,636217	-74,189017
135	4,570026	-74,238794
3		
1,24 horas		

0	4,653067	-74,146032
37	4,654611	-74,148336
43	4,650937	-74,151678
65	4,652843	-74,159532
109	4,652531	-74,160849
141	4,651273	-74,168593
72	4,648428	-74,168179
73	4,648374	-74,168125
142	4,649501	-74,171187
9	4,649312	-74,171396
45	4,642956	-74,173207
35	4,639505	-74,183961
15	4,638519	-74,185829
29	4,637899	-74,187939
61	4,643195	-74,188547
14	4,633672	-74,198215
16	4,633722	-74,19846
41	4,632855	-74,199903
27	4,632758	-74,200897
62	4,72815	-74,25717
102	4,733435	-74,264246
4		
1,16 horas		

**Figura 43.** Asignación de puntos y tiempo de movilización 1°. Elaboración propia

De igual manera, en la Figura 44, se puede contemplar el clúster 5, con un tiempo total de 1.42 horas, siendo el mayor tiempo de movilización y el clúster 8 teniendo un total de 12 usuarios por movilizar.

0	4,653067	-74,146032
104	4,673249	-74,144828
113	4,676029	-74,144512
106	4,681767	-74,140892
56	4,680588	-74,153062
151	4,673984	-74,153124
88	4,671219	-74,152949
152	4,670938	-74,153428
89	4,682778	-74,165271
95	4,692621	-74,163924
124	4,695939	-74,173046
107	4,715273	-74,142028
28	4,717525	-74,209461
91	4,715241	-74,209832
92	4,715744	-74,210819
94	4,715744	-74,210819
90	4,716332	-74,21216
93	4,716781	-74,212063
21	4,712233	-74,221377
103	4,709993	-74,226306
101	4,732323	-74,262358
5		
1,42 horas		

0	4,653067	-74,146032
81	4,664193	-74,14045
46	4,681627	-74,138885
78	4,699454	-74,126577
42	4,709492	-74,130723
76	4,711216	-74,132076
44	4,721391	-74,121137
33	4,710509	-74,112505
64	4,710798	-74,111508
80	4,707931	-74,111109
79	4,707076	-74,111109
137	4,727301	-74,101651
38	4,738599	-74,112241
108	4,750043	-74,107071
122	4,747606	-74,095606
120	4,747029	-74,094716
121	4,745607	-74,094866
58	4,750046	-74,094498
138	4,747609	-74,086546
127	4,73894	-74,08819
136	4,731324	-74,081279
6		
1,10 Horas		

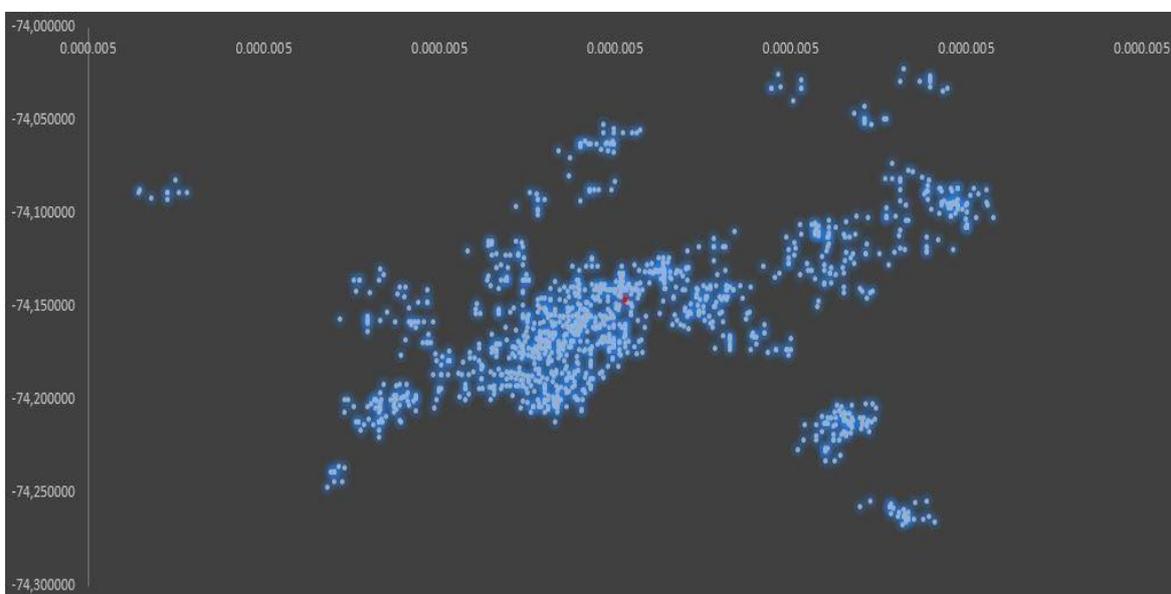
0	4,653067	-74,146032
146	4,65234	-74,140736
143	4,65229	-74,13997
144	4,651902	-74,138923
145	4,651442	-74,138365
4	4,653909	-74,138145
97	4,664095	-74,131174
24	4,663849	-74,130959
54	4,663849	-74,130809
96	4,663892	-74,130734
23	4,663935	-74,130734
55	4,66386	-74,130648
98	4,678082	-74,117979
140	4,642853	-74,087493
39	4,628053	-74,092575
40	4,640047	-74,062846
67	4,649523	-74,062647
66	4,649724	-74,056635
150	4,703	-74,032578
47	4,721046	-74,049276
126	4,739667	-74,029002
7		
1,39 horas		

0	4,653067	-74,146032
48	4,65009	-74,140913
53	4,644201	-74,140668
52	4,639893	-74,140989
50	4,639444	-74,139573
51	4,639487	-74,139487
3	4,643485	-74,127887
128	4,622462	-74,122073
7	4,615044	-74,114716
114	4,619081	-74,135377
115	4,619017	-74,135613
148	4,577106	-74,135756
8	4,522568	-74,088464
8		
0,98 horas		

**Figura 44.** Asignación de puntos y tiempo de movilización 2°. Elaboración propia

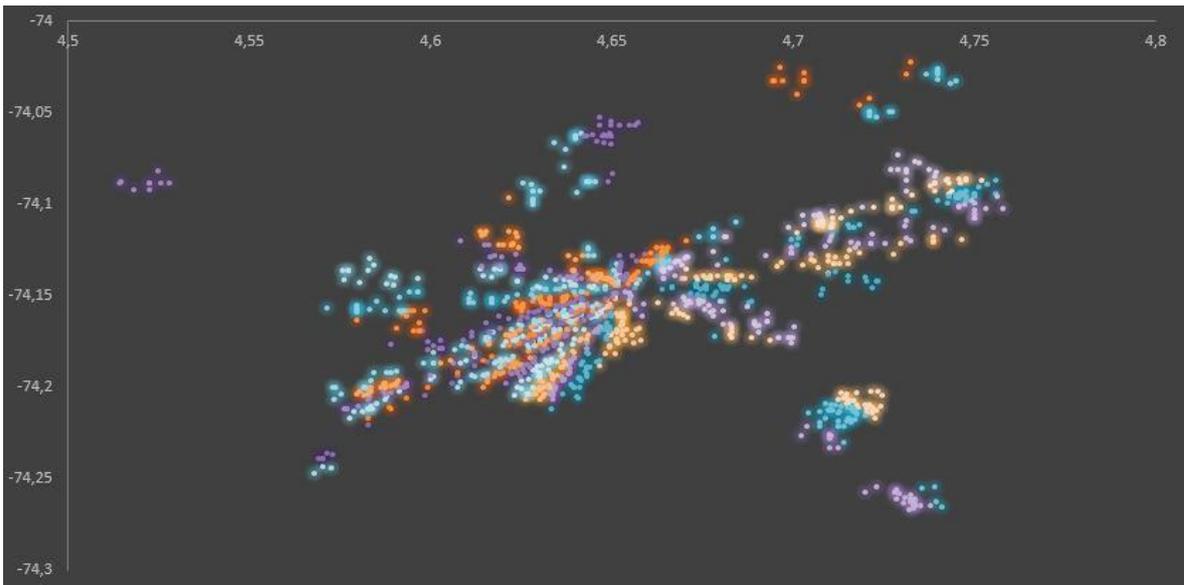
### 10.3.3 Algoritmo de barrido con coordenadas aleatorias.

Al momento de generar las coordenadas aleatorias se siguió el mismo patrón de distribución de los estudiantes que compartieron su ubicación y/o lugar referente a sus viviendas, permitiendo establecer la cantidad de rutas a requerir a través del algoritmo de barrido, donde se tiene una capacidad de 40 usuarios por vehículo, siendo el doble de capacidad que en el ejemplo anterior, debido que la demanda estimada de estudiantes es considerablemente mayor en comparación a la prueba piloto que se realizó con los datos recolectados de los encuestados. En la Figura 45, se ilustra la distribución de los 1358 puntos, siendo representados por un gráfico de distribución que permite identificar el centroide, siendo el punto rojo que corresponde a la Uniagustiniana y, por otro lado, las 1358 coordenadas aleatorias las cuales están representadas de color azul.



**Figura 45.** Distribución de las 1358 coordenadas. Elaboración propia.

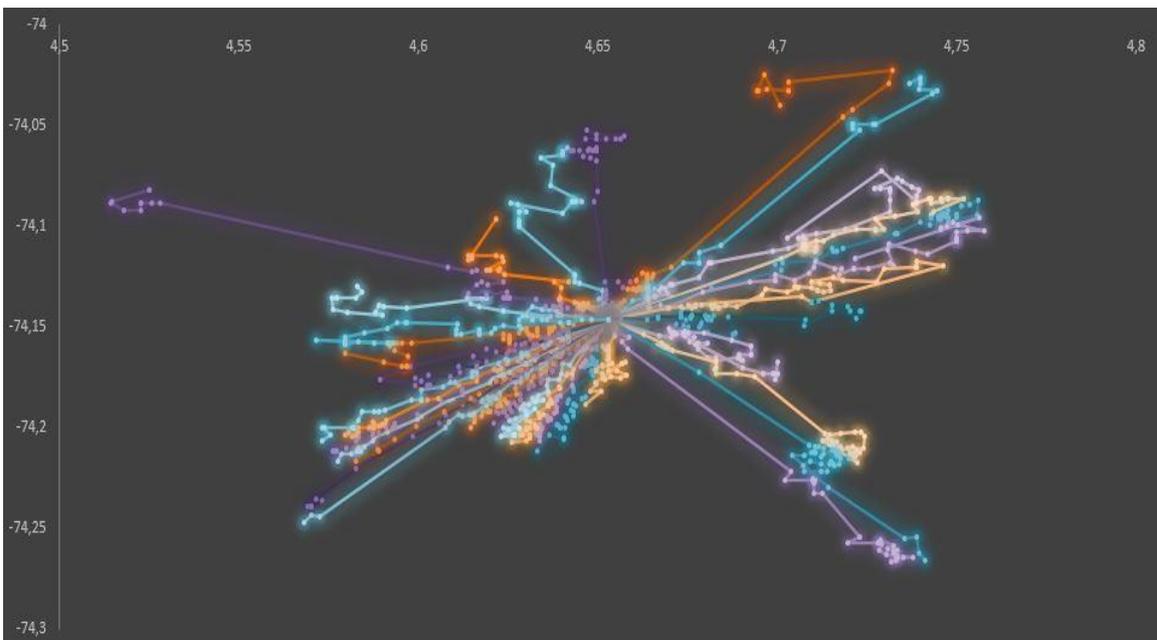
Con relación en lo anterior, se puede establecer que se requieren 34 vehículos que movilicen a los 1358 estudiantes estimados de la jornada nocturna. En la Figura 46, se ilustra la distribución de las coordenadas de los 152 encuestados junto con la distribución de los 1206 datos aleatorios, donde se puede ver mayor concentración en el sur – occidente del centroide (Uniagustiniana), siendo las localidades de Tintal, Kennedy y Patio bonito.



**Figura 46.** Algoritmo de barrido 1358 puntos. Elaboración propia.

#### 10.3.4 Algoritmo del vecino más cercano con coordenadas aleatorias.

Finalmente, cuando se determinaron los 34 clústeres a través del algoritmo de barrido, se procedió a la asignación u ordenamiento de los puntos con el algoritmo del vecino más cercano. En la Figura 47, se ilustra el orden de visita de los puntos asignados por clúster, cumpliendo la restricción final de ruta abierta.



**Figura 47.** Algoritmo del VMC 1358 puntos. Elaboración propia

Adicionalmente, se puede estimar que la mayoría de los estudiantes terminan clases entre las 9:15 de la noche y las 10:00 de la noche como se ilustra en la Tabla 19., teniendo una frecuencia relativa del 78% (setenta y ocho por ciento). Por otro lado, se puede estimar una frecuencia relativa del 22% (veinte y dos por ciento) comprendida entre los horarios de 7:15 de la noche y 8:30 de la noche. El total de estudiantes dentro de los horarios 7:45 y 8:30 de la noche son 147, de igual manera el total de estudiantes dentro de los horarios 9:15 y 10:00 de la noche son 517, teniendo un total de 664 estudiantes. La frecuencia relativa de estos dos grupos de horario de salida se realizó dividiendo cada grupo entre el total de estudiantes.

Tabla 19.

*Distribución de los estudiantes según horario de salida.*

<b>H. Salida</b>	<b>Lunes</b>	<b>Martes</b>	<b>Miércoles</b>	<b>Jueves</b>	<b>Viernes</b>	<b>Total</b>
7:45 - 8:30	21	31	28	27	40	147
9:15 - 10:00	109	100	101	115	92	517
<b>Total, general</b>	<b>130</b>	<b>131</b>	<b>129</b>	<b>142</b>	<b>132</b>	<b>664</b>
% 7:45 - 8:30	16,2%	23,7%	21,7%	19,0%	30,3%	22%
% 9:15 - 10:00	83,8%	76,3%	78,3%	81,0%	69,7%	78%

*Nota:* Autoría propia.

Con relación en lo anterior, se realiza una estimación con base a los estudiantes que adquieran el servicio de rutas de la Uniagustiniana y con relación al porcentaje del horario de salida de los respectivos Usuarios. En la Tabla 20., se puede apreciar que 1059 estudiantes necesitarían el servicio de rutas dentro de los horarios de 9:15 y 10:00 de la noche. Por otro lado, 299 estudiantes necesitarían el servicio de ruta dentro de los horarios de 7:45 y 8:30 de la noche.

Tabla 20.

*Estimación de estudiantes según horario de salida.*

<b>H. Salida</b>	<b>% Salida</b>	<b>N. Usuarios</b>	<b>Cant. Estimada</b>
7:45 - 8:30	22%	1358	299
9:15 - 10:00	78%	1358	1059

*Nota:* Autoría propia.

Con relación en lo anterior, se puede estimar que 1059 estudiantes estarían dispuestos adquirir y necesitarían el respectivo servicio de rutas privado en la Uniagustiniana, teniendo presente que hay una mayor concentración de estudiantes en los horarios de 9:15 y 10:00 de la noche. Sin embargo, como se ilustra en la Tabla 21. y contemplando como ejemplo el sistema

de movilización de la Organización de transportes (ORT), teniendo una capacidad de 40 usuarios por vehículo, se puede determinar que se requieren 26 rutas que puedan movilizar a los respectivos estudiantes, con un costo promedio de \$ 9'784.320 por las 26 rutas y un valor por estudiante de \$ 9.250 para los 1059 estudiantes.

Tabla 21.

*Costo promedio por usuario.*

<b>Ruta programada</b>	<b>Costo</b>	<b>Cant. Vehículos</b>	<b>Costo total</b>	<b>V. Usuario</b>
Cundinamarca - Funza	369600	-	-	-
Cundinamarca - Mosquera	369600	-	-	-
Cundinamarca - Madrid	380800	-	-	-
Cundinamarca - Soacha	380800	-	-	-
Cundinamarca - La calera	380800	-	-	-
<b>Total - Promedio</b>	<b>376320</b>	<b>26</b>	<b>\$ 9'784.320</b>	<b>\$ 9.239</b>

*Nota:* Autoría propia.

## 11 Validación del modelo matemático OCVRP

Para realizar la validación del respectivo modelo matemático se pretende medir la respuesta de los resultados del algoritmo de barrido y del vecino más cercano, al realizar variaciones en el parámetro de capacidad del vehículo, donde se puso a prueba con diferentes tipos de flotas donde varia la capacidad máxima de movilización de los usuarios. Como se puede contemplar en la Tabla 22., se tiene dos grupos de datos, donde el primero son solos parámetros de entrada (P. Entrada) que se compone por los usuarios estimados (U. Est.) y la capacidad del vehículo (C. V.). Por otro lado, los parámetros de salida (P. Salida) son la cantidad de vehículos requeridos de acuerdo al algoritmo de barrido (C. V. A. B.), distancia total recorrida por todos los vehículos (Km) (D. T. R.), kilómetros promedio por vehículo (K. P. V.), kilómetros recorridos por usuario en promedio (K. R. U.), tiempo total recorrido por todos los vehículos (Horas) (T. T. R.), tiempo promedio por vehículo (Horas) (T. P. V.) y tiempo de recorrido por usuario en promedio (Minutos) (T. R. U.). Respecto al tipo de flota se pueden contemplar seis, cada una con una capacidad distinta y resultados distintos durante la movilización, donde sus respectivas capacidades son de 14 usuarios, 20 usuarios, 26 usuarios, 30 usuarios, 40 usuarios y 46 usuarios.

Tabla 22.

*Validación del modelo matemático.*

P. Entrada			P. Salida					
U. Est	C. V.	C. V. A. B.	D. T. R.	K. P. V.	K. R. U.	T. T. R.	T. P. V.	T. R. U.
1358	14	97	879,5	9,1	0,65	59,3	0,6	2,62
1358	20	68	673,9	9,9	0,50	50,7	0,7	2,24
1358	26	52	571,7	11,0	0,42	46,4	0,9	2,05
1358	30	45	528,4	11,7	0,39	44,5	1,0	1,97
1358	40	34	462,9	13,6	0,34	41,9	1,2	1,85
1358	45	30	457,0	15,2	0,34	41,5	1,4	1,84

*Nota:* Autoría propia.

Con relación en lo anterior, se puede presenciar que a medida que aumenta la capacidad del vehículo se puede apreciar que disminuye la distancia total recorrida por todos los vehículos, al igual que el tiempo total recorrido por todos los vehículos. Por otro lado, a medida que aumenta la capacidad del vehículo, igualmente aumenta los kilómetros promedio por vehículo junto con el tiempo promedio por vehículo, siendo algo consistente debido que a mayor cantidad de estudiantes mayor tiempo requerido y distancia (kilómetros) recorrida por vehículo. De igual manera, a medida que aumenta la capacidad del vehículo tiene mayor cobertura de los puntos

a visitar, es decir, visita mayor cantidad de puntos cercanos disminuyendo la distancia total recorrida por todos los vehículos junto con el tiempo total recorrido.

## Conclusiones

Para poder realizar la caracterización de la demanda se realizó una encuesta que evalúa tres tipos de transportes para la movilización de los estudiantes, donde la recolección de la información requirió de un tiempo adicional no previsto debido al aislamiento social, sin embargo, se pudieron recolectar 167 encuestas de la muestra prevista siendo 363 encuestas y, de las cuales se realizaron estimaciones para la caracterización de la demanda. Uno de los principales resultados encontrados es la insatisfacción de los usuarios con relación a su medio de movilización, donde los usuarios que se movilizan a través de la bicicleta representan una menor inconformidad en comparación a los que se movilizan en el transporte individual y principalmente en comparación al transporte colectivo. Por otro lado, se determinó los estudiantes que deben asistir los cinco días de la semana a la Uniagustiniana junto con los estudiantes que confirmaron si a la propuesta del servicio de rutas, donde en este último la mayor participación corresponde a los estudiantes que se movilizan a través del transporte colectivo. Finalmente, se realizó la estimación de los resultados donde se concluyó que 1358 estudiantes, estarían interesados en adquirir un servicio de rutas desde la Uniagustiniana.

Dando solución al respectivo problema, se realizó una búsqueda de los posibles modelos matemáticos que pueden describir el caso en estudio, donde este es un problema que presenta durante la espera y la movilización de los estudiantes. El respectivo problema tiene dos restricciones en específico, la primera es la restricción de capacidad del vehículo debido que se debe movilizar una cantidad determinada de estudiantes sin exceder su capacidad. La segunda es la restricción de ruta abierta, donde el servicio de la respectiva ruta finaliza cuando haya movilizadado al último estudiante. Con relación a lo expuesto anteriormente, se puede representar el problema en cuestión a través del modelo OCVRP aplicado al problema del autobús escolar, donde obedece a las especificaciones de movilización de estudiantes por medio de un bus escolar que tiene un límite máximo permitido de velocidad e igualmente cada bus tiene una capacidad máxima de usuarios. Para el modelo OCVRP se realizó la implementación del algoritmo híbrido entre el vecino más cercano y barrido, donde permite determinar la cantidad de vehículos según su capacidad y la asignación u ordenamiento de los puntos dejando la ruta abierta cumpliendo las restricciones de capacidad y de ruta abierta.

Con la ayuda de la herramienta Visual Basic de Excel, se pudo realizar una implementación satisfactoria del algoritmo de barrido y del vecino más cercano, permitiendo dar una solución factible con relación al problema de movilización de los estudiantes y optimizando distancias

durante la movilización. El desarrollo del algoritmo del vecino más cercano permitió determinar un tiempo aproximado de movilización por cada vehículo junto con la distancia total recorrida.

El algoritmo de barrido permitió determinar la cantidad de rutas a requerir según la capacidad del vehículo, teniendo presente que, a menor capacidad del vehículo, mayor número de rutas se requerirán para el servicio de movilización, lo que puede generar congestión en las vías de la entrada de la Uniagustiniana.

Finalmente, se determinó que modificando la capacidad del vehículo hay variaciones significativas en el modelo matemático, donde a mayor capacidad del vehículo hay mayor cobertura durante la movilización, es decir, disminuye significativamente la distancia total del recorrido y de igual manera el tiempo total de movilización de los estudiantes. Esto genera una consistencia debida que el algoritmo de barrido agrupa a los estudiantes que requieren ser movilizadas por sectores y cumpliendo la capacidad máxima del vehículo, lo que permite determinar puntos concentrados a través de clústeres. Por otro lado, el algoritmo del vecino más cercano asigna u ordena los puntos de cada clúster con el principio del punto más cercano respecto al punto que está en estudio, permitiendo minimizar la distancia recorrida que a su vez se puede representar como el tiempo total de movilización.

### **Recomendaciones**

Como recomendaciones para el respectivo proyecto propone inicialmente ampliar la encuesta para medir la satisfacción de los estudiantes con su sistema de transporte actual y estandarizar la necesidad de un sistema de transporte de rutas privado que facilite la movilización de los estudiantes y docentes hacia sus casas al momento de culminar sus deberes en la jornada nocturna de la Uniagustiniana.

Por otro lado, para una futura encuesta se deben proponer preguntas que contemplen un panorama más amplio con relación a otros tipos de movilización, por ejemplo, unos de estos tipos de movilización pueden ser el transporte en carro propio o motocicleta. De igual manera, se propone diseñar una encuesta que sea prueba de fallas debido que en algunos resultados de los encuestados presentaban respuestas redundantes donde respondieron que utilizaban el transporte colectivo con una frecuencia de siempre, respondiendo el mismo tipo de frecuencia para otro medio de transporte como por ejemplo el tipo de transporte individual.

Con relación al número de encuestados, se propone realizar una encuesta a una mayor muestra de la propuesta, teniendo presente que por el aislamiento social se limitó el número de encuestados a 167, sin embargo, al aumentar en número de encuestado se puede determinar un nivel de satisfacción más preciso y permitiendo a su vez establecer una dispersión geográfica más exacta.

Adicionalmente, dentro de futuros estudios se recomienda hacer un estudio de la sensibilidad del precio ya que este puede ser un factor determinante en la probabilidad de la obtención del respectivo servicio de rutas para los estudiantes y docentes que estén interesados en adquirirlo. Finalmente, proponer una metodología para la selección y evaluación de proveedores que permitan un servicio de calidad y cumplan los requerimientos para la movilización de la comunidad agustiniana, donde unos de estos requerimientos pueden ser la capacidad de los vehículos, la cobertura del trayecto requerido, es decir, que puedan movilizar al estudiante hasta su destino sin ningún inconveniente y los costos asociados al respectivo servicio.

## Referencias

- Amaya, A. (2018) De los carruajes al autocar amarillo pollo: La fascinante historia de los icónicos autobuses escolares. Autonocion.com. Recuperado de: <https://www.autonocion.com/historia-autobus-escolar-amarillo/>
- Benito, A. (2015). Problemas de rutas de vehículos: modelos, aplicaciones logísticas y métodos de resolución (Trabajo de grado). Recuperado de: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/13287/TFG-I-236.pdf;jsessionid=F189519EBA187794F5C9AB484B799C88?sequence=1>
- Boonperm, A. Pansuwan, A. Sintunavarat, W. (2019). Optimal School Bus Routes Using Mixed-Integer Programming for Long-Term School Bus System, 8(7). Recuperado de: <https://search.proquest.com/openview/ecdd76a52c0b197cafcbf3f6e962ca56/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2032622>
- Caceres, H. (2019). Special need students school bus routing: Consideration for mixed load and heterogeneous fleet. Socio-Economic Planning Sciences, Vol (65). Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012117301374>
- Castañeda, J. Cardona, J. (2014). Implementación del método del ahorro para resolver el vrp aplicado al diseño de una red de logística inversa para la recolección de aceite vehicular usado generado en los puntos de acopio ubicados en Pereira. (Trabajo de grado). Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/71397901.pdf>
- Castillero, O. (s.f.) Los 15 tipos de investigación (y características). Psicología y mente. Recuperado de: <https://psicologiaymente.com/miscelanea/tipos-de-investigacion>
- De la Fuente, D. (2011). Estado del arte de algoritmos basados en colonias de hormigas para la resolución del problema VRP. 5th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Recuperado de: [http://www.adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2011/metodos\\_cuantitativos/811-824.pdf](http://www.adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2011/metodos_cuantitativos/811-824.pdf)
- Guambo, A. (2017). Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) (2018). Congreso Internacional I+D+i en Sostenibilidad Energética. Quito-Ecuador. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/Massimo\\_Palme/publication/327068227\\_Evaluacion\\_de\\_la\\_intensidad\\_de\\_la\\_Isla\\_Urbana\\_de\\_Calor\\_en\\_la\\_ciudad\\_de\\_Guayaquil/links/5b763404a6fdcc87df817c5b/Evaluacion-de-la-intensidad-de-la-Isla-Urbana-de-Calor-en-la-ciudad-de-Guayaquil.pdf#page=58](https://www.researchgate.net/profile/Massimo_Palme/publication/327068227_Evaluacion_de_la_intensidad_de_la_Isla_Urbana_de_Calor_en_la_ciudad_de_Guayaquil/links/5b763404a6fdcc87df817c5b/Evaluacion-de-la-intensidad-de-la-Isla-Urbana-de-Calor-en-la-ciudad-de-Guayaquil.pdf#page=58)

- Guillermo Castellanos Crespo. (18 oct. 2017). Las Variables Son elementos o atributos del objeto de investigación que puede ser clasificados en categorías y que además se pueden medir y cuantificar [Archivo de video]. Recuperado de: <https://slideplayer.es/slide/10305300/>
- Juan, A. (2010). Aplicación de un modelo de optimización en la planeación de rutas de los buses escolares del colegio liceo de cervantes norte. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/71418778.pdf>
- María, G (2012). Transporte público colectivo: su rol en los procesos de inclusión social. Bitacora24, vol 24 (1). Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5001822>
- Miné, A. Simson, D. Talía, D. (2013). A Heuristic Approach Based on Clarke-Wright Algorithm for Open Vehicle Routing Problem. The ScientificWorld Journal, Vol (2013). Recuperado de: [https://scholar.google.com.co/scholar?q=A+Heuristic+Approach+Based+on+Clarke-Wright+Algorithm+for&hl=es&as\\_sdt=0&as\\_vis=1&oi=scholart](https://scholar.google.com.co/scholar?q=A+Heuristic+Approach+Based+on+Clarke-Wright+Algorithm+for&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart)
- Montes, E. (2017). Metaheurísticas para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRP-TW). (Trabajo de posgrado). Recuperado de: <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/5699>
- Moovit. (2019). Paradas en la universitaria agustiniana [JPEG]. Recuperado de: [https://moovitapp.com/index/es-419/transporte\\_p%C3%BAblico-Universidad\\_Agustiniana-Bogota-site\\_28804252-762](https://moovitapp.com/index/es-419/transporte_p%C3%BAblico-Universidad_Agustiniana-Bogota-site_28804252-762)
- Moreno, F. (2004). Clasificadores eficaces basados en algoritmos rápidos de búsqueda del vecino más cercano (Tesis Doctoral). Recuperado de: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/11790/1/Moreno-Seco-Francisco.pdf>
- Orrego, J. (2013). Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada “cvrp” a través de la heurística de barrido y la implementación del algoritmo genético de chubasley. (Trabajo de grado, universidad tecnológica de Pereira). Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/71397682.pdf>
- Pérez, R. Arturo, A. (2017). Un Algoritmo de Estimación de Distribuciones copulado con la Distribución Generalizada de Mallows para el Problema de Ruteo de Autobuses Escolares con Selección de Paradas. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, Vol. 14 (1). Recuperado de: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/9211>

- Pichka, Kh. Ashjari, B. Ziaefar, A. Nickbeen, P. (2014). Open Vehicle Routing Problem Optimization under Realistic Assumptions. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, Vol (3). Recuperado de: [http://www.riejournal.com/article\\_47997\\_08a232e0e64857a009a93b3355e4cd54.pdf](http://www.riejournal.com/article_47997_08a232e0e64857a009a93b3355e4cd54.pdf)
- Ramírez, L. (2016). Una solución al problema de ruteo de vehículos abierto (ovrp), implementando la heurística del vecino más cercano (Tesis de especialización). Recuperado de: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/2985/1/RamirezRodriguezLuisErnesto.pdf>
- Rocha, M (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. Recuperado de: [http://virtual.uniagustiniana.edu.co/AVAP/pluginfile.php/127263/mod\\_resource/content/1/Una%20revisi%C3%B3n%20al%20estado.pdf](http://virtual.uniagustiniana.edu.co/AVAP/pluginfile.php/127263/mod_resource/content/1/Una%20revisi%C3%B3n%20al%20estado.pdf)
- Secretaria de movilidad. (2015). Datos abiertos [JPEG]. Recuperado de: [https://www.movilidadbogota.gov.co/web/datos\\_abiertos](https://www.movilidadbogota.gov.co/web/datos_abiertos)
- Semba, S. (2019). An Empirical Performance Comparison of Metaheuristic Algorithms for School Bus Routing Problem. *Tanzania Journal of Science* 45(1). Recuperado de: <https://www.ajol.info/index.php/tjs/article/view/187053>
- Sun, S. Duan, Z. Xu, Q. (2018). School bus routing problem in the stochastic and time-dependent transportation network. *PLoS ONE* 13 (8): e0202618. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202618>
- Tajada, J (2002). El Transporte Colectivo Urbano: Aplicación del Enfoque de Sistemas para un mejor Servicio. *Fermentum*, vol. 12 (34). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/705/70511239005.pdf>
- Toth, P. Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. Bologna, Italia: Society for Industrial and Applied Mathematics
- Toth, Paolo Vigo, Daniele. (2014). *Vehicle Routing - Problems, Methods, and Applications* (2nd Edition) - 7.3.1 The Whole Problem. Society for Industrial and Applied Mathematics. Recuperado de: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0119ZUAD/vehicle-routing-problems/the-whole-problem>

## Anexos

### 1.1 Resultados de la encuesta piloto

Se realizaron encuestas a 49 estudiantes de la Universitaria Agustiniana con el fin de justificar los eventos que se están presentando en la movilización de los mismos estudiantes. Dichas encuestas contienen 13 preguntas que son pertenecientes a una prueba piloto para describir el problema y delimitar el alcance del proyecto.

En la Figura 48, se puede visualizar en medio de transporte que utilizan los encuestados, donde el 34.7% se moviliza a través del SITP, el 24.5% motocicleta, 16.3% en bicicleta, 16.3% en bus provisional.

#### 1. ¿Cuál es el medio de movilización o de transporte que más utiliza para llegar a la universidad?

49 respuestas

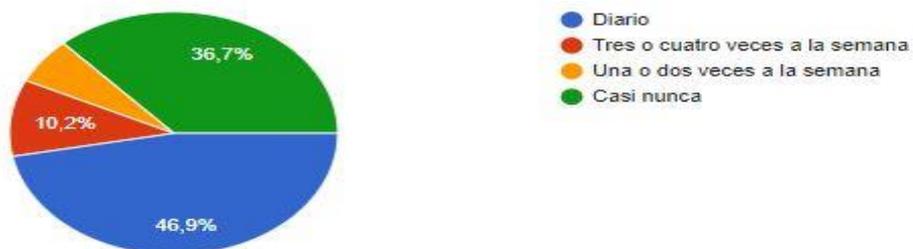


**Figura 48.** Pregunta N° 1. Elaboración propia.

En la Figura 49, se pueden contemplar la frecuencia de movilización en el STC de los encuestados, dando una relatividad del 46.9% diario, 36,7% casi nunca, 10,2% tres o cuatro veces a la semana, 6,1% una o dos veces a la semana.

#### 2. ¿Qué tan frecuente usa el transporte público hacia y desde la Universidad?

49 respuestas

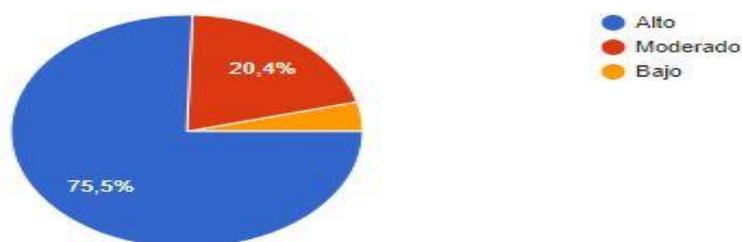


**Figura 49.** Pregunta N° 2. Elaboración propia.

En la Figura 50, se pueden contemplar el costo de la tarifa del medio de transporte con relación al servicio que le brindan a los encuestados, dando una relatividad del 75,5% alto, 20,4% moderado y 4,1% bajo.

### 3. ¿Cómo le parece la tarifa del medio de transporte que utiliza con relación al servicio que le brindan?

49 respuestas

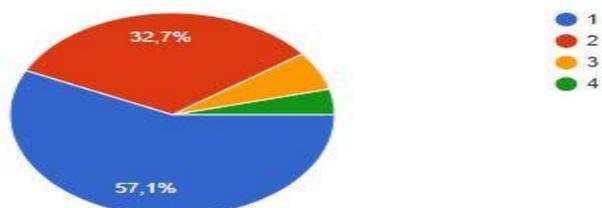


**Figura 50.** Pregunta N° 3. Elaboración propia.

En la Figura 51, se puede contemplar el número de pasajes que pagan los encuestados, donde el 57.1% paga un único pasaje, 32.7% dos y el 10.2% paga más de dos pasajes.

### 4. ¿Cuántos pasajes paga para llegar desde su casa o trabajo hasta la universidad?

49 respuestas

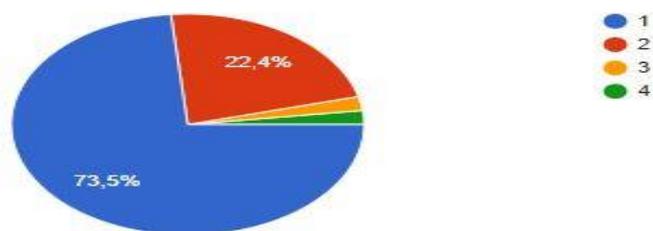


**Figura 51.** Pregunta N° 4. Elaboración propia.

En la Figura 52, se pueden contemplar el número de pasajes que pagan los encuestados desde la U.A hasta el origen, dando una relatividad del 73,5% un pasaje, 22,4% dos pasajes, 2% tres pasajes y 2% cuatro pasajes.

### 5. ¿Cuántos pasajes paga desde la Universidad hasta su casa al finalizar clases?

49 respuestas



**Figura 52.** Pregunta N° 5. Elaboración propia.

En la Figura 53, se puede contemplar el tiempo de espera para obtener un medio de transporte que los ayude en su movilización, donde el 22.4% de los encuestados deben esperar menos de 10 minutos, el 40.9% de 11 a 20 minutos, 14.3% de 21 a 30 minutos y 22.4% de 31 a 40 minutos.

### 6. ¿Cuánto tiempo debe esperar para obtener el servicio de transporte que lo movilice desde su casa o trabajo hasta la universidad?

49 respuestas

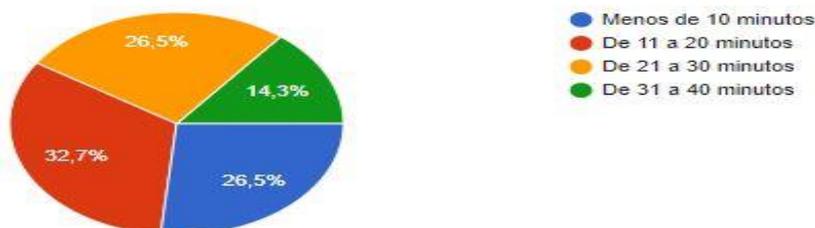


**Figura 53.** Pregunta N° 6. Elaboración propia.

En la Figura 54, se pueden contemplar el tiempo de espera para la obtención del medio de transporte desde la U.A hasta el origen, dando una relatividad del 32,7% de once a veinte minutos, 26,5% menos de diez minutos, 26,5% de veintiuno a treinta minutos y 14,3% treinta y uno a cuarenta minutos.

### 7. ¿Cuánto tiempo debe esperar para obtener el servicio de transporte que lo movilice desde la universidad hasta su casa?

49 respuestas



**Figura 54.** Pregunta N° 7. Elaboración propia.

En la Figura 55, se puede contemplar el tiempo de movilización de los encuestados para poder movilizarse hasta la Uniagustiniana, donde el 10.2% debe esperar menos de 15 minutos, 12.2% de 16 a 30 minutos, 30.6% de 31 minutos a 1 hora, 28.6% de 1 hora a 1 hora y 30 minutos y el 3.6% debe esperar más de 1 hora y 30 minutos.

### 8. En un día normal ¿Cuánto tiempo invierte para transporte desde su casa o trabajo hasta la Universidad?

49 respuestas

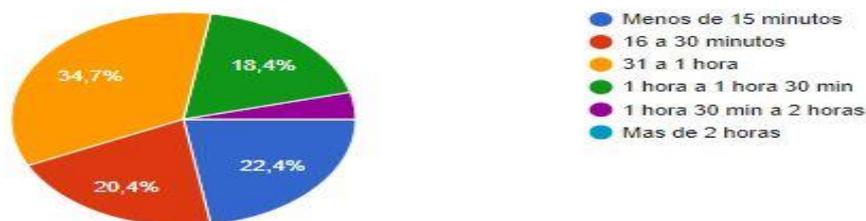


**Figura 55.** Pregunta N° 8. Elaboración propia.

En la Figura 56, se pueden contemplar el tiempo que invierte un usuario en el medio de transporte desde la U.A hasta el origen, dando una relatividad del 34,7% de treinta y un minutos a una hora, 22,4% menos de quince minutos, 20,4% de diez y seis a treinta minutos, 18,4% de una hora a hora y media y 4,1% de hora y media a dos horas.

9. En un día normal ¿Cuánto tiempo invierte para transporte desde la Universidad hasta su casa al finalizar clases?

49 respuestas

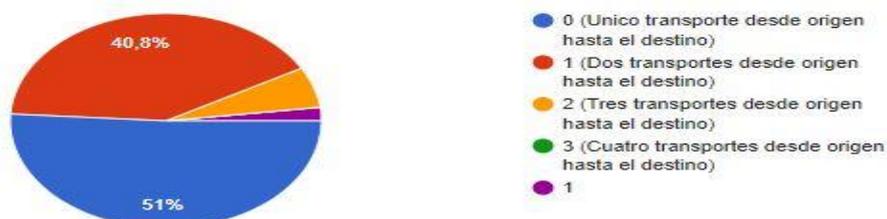


**Figura 56.** Pregunta N° 9. Elaboración propia.

En la Figura 57, se pueden contemplar la cantidad de transbordos que debe realizar los encuestados para poder llegar a sus destinos, donde el 49% de los encuestados utiliza dos o mas transportes.

10. Para poder desplazarse desde la casa o trabajo a la Universidad ¿Cuántos transbordos (cambio de vehiculo) debe realizar para poder movilizarse?

49 respuestas

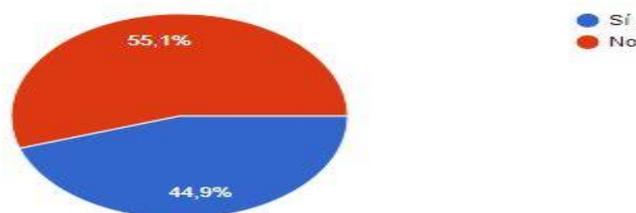


**Figura 57.** Pregunta N° 10. Elaboración propia.

En la Figura 58, se pueden contemplar la vulnerabilidad de los usuarios al momento de adquirir el medio de movilización, dando una relatividad del 55,1% siendo negativa y 44,9% siendo afirmativa.

11. ¿Alguna vez lo han robado o ha sufrido un intento de robo en la espera del bus para llegar a la Universidad o después de finalización de clases para llegar a su casa?

49 respuestas



**Figura 58.** Pregunta N° 11. Elaboración propia.

En la Figura 59, se pueden contemplar las posibles causas en la demora de la movilización del STC desde un origen hasta la U.A, dando una relatividad del 46,9% como todas las anteriores, 24,5% como tráfico en la hora pico y paradas del transporte público para recoger (y dejar) usuarios, 10,2% como tráfico en la hora pico y tiempos de espera prolongados entre un medio de transporte y otro que cubran la ruta que se necesita, 8,2% como paradas del transporte público para recoger (y dejar) usuarios y tiempos de espera prolongados entre un medio de transporte y otro que cubran la ruta que se necesita, 4,1% como tiempos de espera prolongados entre un medio de transporte y otro que cubran la ruta que se necesita, 4,1% como tráfico en la hora pico y 2% como paradas del transporte público para recoger (y dejar) usuarios.

12. Usted en lo personal, ¿Cuál considera que origina la demora en la movilización en el medio de transporte público desde su casa o trabajo hasta la Universidad?

49 respuestas



**Figura 59.** Pregunta N° 12. Elaboración propia.

En la Figura 60, se pueden contemplar la 1 decisión de los encuestados entre adquirir un medio de transporte de la U.A. que lo ayude en la movilización, dando una relatividad del 98% siendo afirmativa y 2% siendo negativa.

13. Si la Universidad ofreciera un servicio de transporte que lo ayudará a movilizarse desde su casa o trabajo hasta la Universidad y de regreso, ¿Usted lo consideraría como opción al transporte?

49 respuestas



**Figura 60.** Pregunta N° 13. Elaboración propia.