

DISEÑO DE RUTAS ESCOLARES CONSIDERANDO ELEMENTOS SOCIALES

JULIÁN ANDRES CORREA TRUJILLO

MARIA ALEJANDRA JARAMILLO MEDINA



DIRECTOR

CARLOS ALBERTO ROJAS

M.Cs. Ingeniería industrial

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

INGENIERÍA INDUSTRIAL (3751)

ZARZAL, VALLE DEL CAUCA

2019

DISEÑO DE RUTAS ESCOLARES CONSIDERANDO ELEMENTOS SOCIALES

JULIÁN ANDRES CORREA TRUJILLO

MARIA ALEJANDRA JARAMILLO MEDINA



TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR

CARLOS ALBERTO ROJAS

M.Cs. Ingeniería industrial

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

INGENIERÍA INDUSTRIAL (3751)

ZARZAL, VALLE DEL CAUCA

2019

DEDICATORIA

Este trabajo de grado es dedicado con todo el amor a Dios, por llenarnos de paciencia y fortaleza durante el camino y metas alcanzadas hasta el momento, a nuestras familias por el apoyo incondicional y ser el motivo para seguir construyendo este sueño.

Julián Andrés Correa Trujillo

Maria Alejandra Jaramillo Medina

AGRADECIMIENTOS

Siempre hay personas que te dan la mano para que subas o te cogen el pie para que bajes, gracias profesor Juan Pablo Orejuela.

No hay amor más sincero que el apoyo incondicional y desinteresado que puedas recibir, gracias a ti porque me muestras siempre un arcoíris por el que hay que luchar. Andres Camilo Torres.

El apoyo incondicional de un profesor como Carlos Rojas nos deja ver el gran ser humano que es.

Maria Alejandra Jaramillo Medina

Quiero agradecerles a todas las personas que me brindaron un apoyo para poder cumplir y culminar un sueño que tenía guardado hace años. A mi esposa e hijas por el acompañamiento en todo este proceso.

Julián Andres Correa Trujillo

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.2 Descripción y planteamiento del problema.....	11
1.3 Justificación.....	12
1.4 Objetivos	14
1.5 Metodología	14
2. CARACTERÍSTICAS DEL SBRP	15
3. ELEMENTOS SOCIALES EN EL TRANSPORTE.....	21
3.1 Aplicaciones, usos e importancia ante la sociedad el Ruteo de Buses Escolares.....	21
3.2 Desempeño del servicio público y la equidad como elemento social ...	21
4. FORMULACIÓN DEL MODELO.....	24
4.1 FASE I - caracterización del SBRP	24
4.1.1 Preparación de datos	25
4.1.2 Caracterización del problema	25
4.1.3 Matriz de distancia	25
4.2 Fase II asignación de estudiantes	25
4.2.1 Integración elemento social	25
4.2.2 Heurística del barrido.....	25
4.2.3 Propuesta de asignación con capacidad homogénea y restricción de edad.....	27
4.3 Fase III - generación de ruta de autobús	31
4.4 RESULTADOS	31
4.4.1 Desarrollo de la fase I	31
4.4.2 Distancias de los estudiantes	32
4.5 Desarrollo de la fase II.....	33
4.5.1 Aplicación de heurística de barrido (funciones y sub- funciones)	
33	
4.5.2 Función ejecutar barrido	34

4.5.3	Función calcular distancia	34
4.5.4	Función datos	35
4.6	Desarrollo fase III	36
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
5.1	Análisis de sensibilidad	40
5.1.1	Escenario 1- Capacidad de vehículo	40
5.1.2	Escenario 2 - Restricción de edad	41
5.1.3	Escenario 3 - Otras variaciones	42
6.	CONCLUSIONES	44
8.	ANEXOS	46
9.	BIBLIOGRAFÍA	47

ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Metodología.....	24
Ilustración 2 Diagrama de flujo, método del barrido.....	27
Ilustración 3 Costos variables de transporte	33
Ilustración 4 Costos fijos de transporte	33
Ilustración 5 Rutas generadas	37
Ilustración 6 Comparación distancias	38
Ilustración 7 Comparación distancias totales	39
Ilustración 8 Comportamiento de distancias	40
Ilustración 9 Comportamiento edad	41
Ilustración 10 Edad y cantidad de niños en cada nodo.....	46

TABLA DE TABLAS

Tabla 1 Características del SBRP.....	19
Tabla 2 Caracterización del problema	32
Tabla 3 Conjunto de estudiantes, solución barrido	35
Tabla 4 Rango de edades.....	35
Tabla 5 Datos mejor solución.....	36
Tabla 6 Agrupación estudiantes TSP.....	37
Tabla 7 Datos adicionales métodos del barrido	38
Tabla 8 Capacidad del vehículo.....	40
Tabla 9 Restricción de edad	41
Tabla 10 Otras variaciones	42
Tabla 11 Datos comparativos	43

1. INTRODUCCIÓN

Las rutas escolares actualmente son comunes ya que las instituciones educativas se encuentran retiradas de los hogares generando así desplazamiento, inseguridad y un costo adicional cada vez mayor por la adquisición del servicio. Este trabajo se enfoca en la realización de un modelo de asignación y ruteo de vehículos de transporte escolar que establece un elemento de desempeño o justicia social en cuanto a la equidad, el beneficio y el bienestar (Chen, Ahtari, Majkut, & Sheu, 2017).

La importancia del desplazamiento consiste en ubicar estratégicamente las rutas, estaciones o paradas para el autobús de manera que logren reducir los costos y tiempos muertos asociados al viaje del vehículo, adicionalmente aumenta el nivel de servicio en el proceso de transporte. Este documento toma en cuenta el School Bus Routing Problem (SBRP) que es una variante del Vehicle routing problem (VRP); este primero se enfoca en la preparación de datos y selección de paradas para generar rutas óptimas y seguras que mejoran el rendimiento del servicio de transporte escolar tomando en cuenta factores de desempeño como el social (Bowerman, 1995).

Para clarificar mejor el concepto del ruteo de autobuses escolares según (Bowerman, 1995), el SBRP se puede especificar como un grupo de estudiantes espacialmente distribuidos que deben recibir transporte público desde sus hogares hacia y desde sus escuelas.

Al abordar el problema del ruteo escolar, se busca alcanzar beneficios con respecto al ruteo clásico, como tener en cuenta la comodidad, la seguridad y además del antes mencionado elemento social, el cual direcciona el enfoque de este proyecto.

El bullying se ha convertido en un problema social bastante preocupante, ya que puede llevar a consecuencias negativas tanto para el acosador como la víctima, como dice (Modecki, Minchin, Harbaugh, Guerra, & Runions, 2014) La intimidación en cualquier forma puede tener consecuencias físicas y emocionales duraderas

para los adolescentes. Este tipo de comportamientos se presentan a diario en cualquier tipo de espacio que no cuente con supervisión adulta, ya que por lo general los niños y adolescentes aprovechan el estar solos y tomar autoridad sobre los demás.

(Cozma, Kukaswadia, Janssen, Craig, & Pickett, 2015) en un estudio transnacional reciente de países principalmente europeos y norteamericanos, los informes de participación reciente en conductas de acoso escolar entre jóvenes de 11 a 15 años oscilaron entre el 9% y el 13% para la victimización, y entre el 8% y el 12% para la perpetración.

Con los resultados anteriores se puede observar que la diferencia de edad en la ruta escolar puede generar situaciones no deseadas como el bullying que puede desglosar en maltrato verbal, psicológico y físico; además de exponer a niños muy pequeños, a temas de conversación y comportamientos para los cuales no están preparados debido a la edad en la que se encuentran. (Gandhi, n.d.)

1.2 Descripción y planteamiento del problema

El servicio de transporte y por consiguiente las rutas escolares en Colombia deben de estar sujetas al Decreto 431 del 2017, que reglamenta el servicio público de transporte terrestre automotor espacial, dicho transporte debe proporcionar seguridad, condiciones de libertad de acceso y calidad. Este decreto antes mencionado contiene unas normas las cuales buscan el bienestar de los pasajeros considerados el factor de importancia en este trabajo ya que es necesario proporcionar condiciones donde se asegure la relevancia del aspecto social de los niños en contribución a su desarrollo intelectual.

La diferencia de edad puede traer consigo problemas de convivencia en el bus escolar. Esto es un ejemplo que citó (Gandhi, n.d.) El bullying es definido de una forma genérica como “un abuso sistemático de poder”, y más específicamente como un comportamiento intencional y repetido (que incluye maltrato físico, verbal o

psicológico), que puede ser realizado por un individuo o un grupo que adopta un papel dominante en virtud de su fuerza o en virtud de ser mayores, provocando deliberadamente daño o miedo en otra persona más débil que él o ellos mismos y no por una buena razón.

Como cita (Sampasa-Kanyinga, Chaput, Hamilton, & Larouche, 2016) un meta-análisis ha demostrado que la intimidación que solía ocurrir en los patios escolares, también está ocurriendo en la ruta hacia y desde la escuela entre los estudiantes que participan en el transporte activo. Dado que se sabe que la intimidación ocurre en lugares que tienen niveles más bajos de supervisión por parte de adultos, los viajes en autobús escolar pueden conducir al comportamiento y la victimización de la intimidación.

También (Cozma et al., 2015) afirman que la supervisión de un adulto es un factor protector importante para todas las formas de acoso infantil. En comparación con los compañeros de la misma edad, los adultos son más propensos a intervenir en los episodios de acoso. Por lo tanto, niveles más bajos de supervisión de adultos y un monitoreo inadecuado están relacionados con mayores riesgos de comportamiento agresivo entre los jóvenes.

Dado lo anterior, todas las acciones que se realizan para fortalecer el desempeño social dentro de la región, tienen como objetivo brindar un mayor bienestar y tranquilidad a los padres en el momento en que sus hijos toman este servicio para cumplir con sus obligaciones escolares. Por esto el problema que se aborda desde lo social y económico es encontrar un balance para generar ambientes que contribuyan a los esfuerzos de promoción de la salud física y mental dirigidos a la optimización del bienestar de los niños dentro de las rutas escolares.

1.3 Justificación

El School bus routing problem, en combinación con lo social, lleva este proyecto a un enfoque diferente el cual puede ser desarrollado con profundidad tomando en cuenta el crecimiento constante de las ciudades y la cantidad considerable de los

mismos que acceden al transporte y rutas como el medio más rápido y económico para poder cumplir con su jornada académica.

Un factor importante a tener en cuenta, es que debido a la intimidación o acoso los niños pueden perder fácilmente las ganas a participar activamente en el transporte, es decir, pierden el interés por transportarse a su escuela enérgicamente. Fomentar la cohesión social se trata de luchar por una mayor inclusión, más participación ciudadana y creando oportunidades para la movilidad ascendente. (Larouche, 2018). Con esto se puede tener en cuenta que la opinión asertiva y confianza de los niños con sus padres y maestros puede llegar a ser el puente para la intervención de factores negativos que se puedan presentar dentro de la agrupación e integración de un grupo de alumnos que compartan un mismo sitio público.

Debido a esto, se reconoce la importancia de agrupar los niños por edades. Como dice (Ramirez Ruiz, 2011) Los niños entre la edad de 5 a 6 años adquieren conciencia de sí mismos y el ambiente que los rodea, logrando desarrollar confianza, hábitos de auto cuidado, relaciones interpersonales y diferenciación entre la realidad y el inicio de una conciencia moral y cívica. Además de considerar que conviven en un espacio donde comparten con jóvenes que pueden sentir y expresarse en tonos diferentes.

Los beneficiarios de este proyecto están los estudiantes, los padres de familia, las instituciones educativas, los conductores y principalmente el sistema educativo colombiano porque se contribuye al rendimiento escolar fortaleciendo la confianza, seguridad y tranquilidad para el cumplimiento de sus obligaciones escolares.

Por último, hay que resaltar que la finalidad del proyecto es demostrar que el cambio constante en la mentalidad de la sociedad ha llevado a darle importancia al bienestar de la persona como individuo dentro de esta, y por esto es significativo mostrar que factores como el bienestar, forman parte crítica de cada actividad, enfocada en el objeto social de prestar un servicio rápido y seguro, considerando además la minimización de los costos de transporte (Granados Forero, 2011). Por esta razón, en este proyecto se propone una alternativa para mejorar las

condiciones de transporte escolar de los niños, mediante la consideración de restricciones de carácter social y la minimización del costo total de transporte asociado a la operación.

1.4 Objetivos

Como objetivo general del proyecto se tiene el diseño de un modelo matemático que permita la programación de rutas de buses escolares considerando limitaciones de carácter social. De igual forma se deriva como primer objetivo específico la identificación de las características generales del problema de SBRP. Como segundo objetivo específico se definen las medidas de desempeño social que se ajuste al entorno de los colegios del Valle del Cauca. Posteriormente, se formula un modelo para determinar la mejor propuesta de asignación de rutas. Finalmente, se valida el modelo en un caso colegio del Valle, con el propósito identificar las condiciones de aplicabilidad del modelo.

1.5 Metodología

Para dar cumplimiento al primer objetivo específico, se desarrolló una revisión de la literatura identificando las principales características asociadas al problema del SBRP a partir de la consulta de bases de datos especializadas de la universidad. Dando cumplimiento al segundo objetivo específico se definieron las medidas de desempeño social asociadas al entorno académico que se desarrolla en los colegios del Valle del Cauca, para ello se realizó una consulta bibliográfica basada en artículos de investigación y revisión, así como trabajos de grado. Para dar cumplimiento al tercer objetivo específico se formuló un modelo matemático que contribuya a determinar la mejor propuesta de asignación de rutas, para ello se definieron los supuestos, conjuntos principales e inducidos, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones. Por último, se validó el modelo matemático a partir de un caso de estudio asociado con un colegio del Valle del Cauca. Además se realizó un análisis de los resultados obtenidos del modelo y un análisis de sensibilidad mediante la variación de parámetros de interés y su impacto en la función de desempeño.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SBRP

Para identificar las características se realiza la siguiente revisión literaria:

(Schittekat¹, Sevaux², & Sirensen³, n.d.) Discutieron un problema de ruteo para buses escolares muy similar al VRP pero con algunas consideraciones especiales, para este caso los autores asumieron paradas potenciales y los estudiantes pueden ir a una o más estaciones propuestas, además los buses tienen una capacidad finita. Para escoger la ruta óptima los estudiantes se pueden desplazar a pie en distancias menores a 750 mt desde sus hogares, buscando encontrar la ruta óptima de recorrido de los buses escolares y proponer un acercamiento a una meta heurística la cual puede ser sujeta a nuevas consideraciones a futuro.

Un año después (Fügenschuh, 2009) propuso un algoritmo matemático para las áreas rurales de Alemania, donde grandes grupos de estudiantes se movilizaban por medio del servicio público de autobuses y por ende, donde buscaban, generar propuestas para mejorar el flujo de transporte y la prestación del servicio para la empresa de autobuses por medio de resultados computacionales. Utilizando el método de ramificación y corte lograron encontrar soluciones donde reducían la necesidad de utilización de autobuses de entre el 10% y 25% logrando grandes ahorros en costos del servicio público.

Algún tiempo después (Park & Kim, 2010) realizaron una revisión literaria del problema del ruteo de buses escolares, donde resumen las limitaciones, consideraciones adicionales y soluciones propuestas por diferentes autores mostrando las ramificaciones del tema, donde concluyen las oportunidades de crecimiento orientado a futuras investigaciones con nuevas consideraciones, además que el problema de ruteo de carga mixta es bastante útil para futuras propuestas que mantengan el principio de equidad para los estudiantes.

Más adelante,(Sebastián, Rojas, José, & Jiménez, n.d.) En su trabajo de grado aplicó un modelo de optimización en la planeación de rutas escolares, basado en la meta heurística, optimización por colonia de hormigas donde realizó 10

simulaciones con 11 grupos de buses encontrando finalmente que con el modelo propuesto se pueden encontrar soluciones óptimas que ahorran un 8,3% de recorrido en la mañana y un 21,4% en la tarde, conllevando a disminución de costos, tiempos de transporte y contaminación.

Un año después (Martínez & Viegas, 2011) diseñaron e implementaron un modelo para la prestación de un servicio de autobuses escolares de alta calidad, introduciendo Mixed Integre Linear Programming para encontrar las mejores ubicaciones de paradas de autobuses y la ruta óptima. Demuestran por medio de resultados que la capacidad del modelo puede encontrar soluciones exactas a problemas de tamaño medio. Por último concluyen que la adición de limitaciones de la realidad, necesita una revisión detallada de información para generar propuestas estables en la realidad.

Este mismo año (Granados Forero, 2011) diseñó una propuesta de ruteo de buses escolares, enfocada en el objeto social de prestar un servicio rápido y seguro, que sea percibido por sus clientes como una buena alternativa para el transporte escolar, al mismo tiempo en el que generaba soluciones que minimizaban costos de transporte. La autora concluye que la implementación de un primer prototipo, proporcionó importantes mejoras en el rendimiento del servicio aunque el problema se ve afectado por la falta de actualización de la información de los clientes que están inscritos al servicio de ruta escolar, pero que de igual forma, el 82% de las rutas existentes pueden ser ajustables mediante un proceso de optimización.

También (Riera-Ledesma & Salazar-González, 2012) introducen al concepto general del problema de ruteo de vehículos una generalización llamada Problema de agente viajero con múltiples vehículos modelando un grupo de problemas los cuales incluyen seleccionar las paradas, generación de rutas y flota homogénea. Finalmente propusieron un algoritmo de ramificación y corte para validar el modelo, donde se lograron generar 125 paradas potenciales y 125 localizaciones de estudiantes donde lograron mejorar en tres combinaciones mejorar el rendimiento en un 10%.

Además los autores (Albornoz & Johns, 2011) propusieron un modelo de ruteo para transporte de trabajadores combinando la asignación de paradas con la generación de rutas, por medio de programación lineal entera. Finalmente llegando a la conclusión que para problemas de grandes tamaños debe ser resuelto bajo nuevas alternativas jerárquicas que encuentran buenas respuestas, mas no asegura optimalidad, pero su artículo se puede tomar como base para el desarrollo de futuras investigaciones debido a que este encuentra soluciones equilibradas entre costos de operación y nivel de servicio esperado.

Después (Kim, Kim, & Park, 2012) se enfocan en la prestación de servicio de buses escolares, para distintas instituciones educativas en la misma ruta, en la que cada institución cuenta con su respectiva ventana de tiempo y tanto las paradas como las instituciones deben ser secuenciadas respectivamente. Proponen dos enfoques exactos para la solución del problema en casos especiales y un enfoque heurístico para la solución más generalizada de este tipo de ruteo con ventanas de tiempo.

El mismo año (Diana et al., n.d.) presentaron un modelo de programación entera mixta de ruteo de vehículos de transporte escolar, donde tomaron como principal medida de rendimiento la reducción de costos de transporte, equilibrando este criterio con la cantidad recorrida por los estudiante hasta las paradas de bus para problemas de tamaño pequeño, donde se sigue concluyendo que el problema de ruteo de buses escolares óptimo es simplemente mucho más efectivo para problemas con pocas variables y restricciones ya que para métodos de solución exactos el aumento de variables y restricciones aumenta considerablemente el tiempo de recorrido.

Las investigaciones realizadas por varios autores, tienen diferentes enfoques en la realización de la metodología del estudio de Ruteo de Buses Escolares, (Schittekat1 et al., n.d.) Tenía como objetivo disminuir la distancia recorrida considerando una flota homogénea y estudiantes en general, (Sampasa-Kanyinga et al., 2016) desarrollaron su estudio con un modelo de optimización para el diseño del transporte escolar basado en la eficiencia económica y social. (Jaradat & Shatnawi,

2017) también desarrollaron para un problema de enrutamiento que logre minimizar costos de los estudiantes y maximizar las ganancias por la prestación del servicio.

Un año después, (Caceres, Batta, & He, 2018) solucionaron un problema de ruteo considerando necesidades especiales para una carga mixta y una flota heterogénea mediante la descomposición de problemas por generación de columnas. En el mismo año, (Moura, Camargo, Conceição, Porto, & Nunes, 2018) tuvieron en cuenta múltiples escuelas en el área rural con el objetivo de maximizar las ganancias por la prestación del servicio y minimizar los costos de los estudiantes, teniendo en cuenta la capacidad de los buses.

Según (Park & Kim, 2010) el SBRP consiste en sub-problemas más pequeños. Según (Basri, 2016) el SBRP puede ser resuelto por cinco pasos:

Preparación de datos: En este sub-problema se especifica la red vial y se preparan cuatro tipos de datos para el SBRP: estudiantes, Escuelas, vehículos y matriz OD. Los datos para los estudiantes incluyen: La ubicación (dirección) de sus hogares, la escuela de destino de Estudiante y tipo de estudiante.

Selección de parada de autobús (asignación de estudiantes a paradas): busca seleccionar un conjunto de paradas, donde serán recogidos los estudiantes, según (Park & Kim, 2010), este criterio no es muy utilizado en los artículos de asignación de rutas de buses escolares y por el contrario los investigadores recurren principalmente a métodos heurísticos.

Generación de ruta de autobús: En la generación de la ruta del autobús, las rutas de la escuela se construyen. La generación “primero ruta-segundo clúster”; se hace por medio del **TSP** generando rutas cortas, considerando las restricciones del problema. En el caso de ser primero “clúster-segundo ruta” agrupa los estudiantes en paradas para luego ser recogidos por el bus asignado a esa ruta.

Ajuste de horario escolar: En la mayoría de los estudios, el tiempo inicial y final de las escuelas son restricciones. Sin embargo, existen varias obras que consideran

los tiempos como variables de decisión e intentan encontrar los tiempos óptimos de inicio y finalización para maximizar el número de rutas que pueden ser servidas secuencialmente por el mismo bus y para reducir el número de buses utilizados.

Programación de rutas: La programación de rutas especifica el tiempo exacto de inicio y Cada ruta y forma una cadena de rutas que pueden ser ejecutadas sucesivamente por el mismo bus.

(Park & Kim, 2010) desarrollaron un Anexo que puede considerarse el más importante, ya que ayuda a tener un mejor diagnóstico de las variables involucradas en el ruteo de buses escolares como los atributos a tener en cuenta a la hora del desarrollo de una investigación enfocado en el transporte de estudiantes, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1 Características del SBRP

Característica	Variantes
Número de escuelas	Una escuela
	Múltiples escuelas
Tipo de servicio	Urbano
	Rural
Jornada estudiantil	Mañana (Recoger estudiantes)
	Tarde (Dejar estudiantes)
	Ambos
Recogidas combinadas	Recogidas combinadas permitidas (estudiantes de diferentes escuelas), carque mixto
	Recogidas combinadas no permitidas (estudiantes de la misma escuela), cargue simple
Estudiantes especiales	Estudiantes especiales (requerimientos especiales)
	Estudiantes en general
Tipo de flota	Flota homogénea
	Flota heterogénea
Objetivo	Número de buses usados
	Tiempo o distancia total en el viaje de los buses
	Distancia o tiempo total de permanencia de los estudiantes en el bus
	Distancia de caminata de los estudiantes
	Balanceo de carga
	Distancia máxima de ruta
	Tiempo perdido de estudiantes
Constantes	Capacidad de buses
	Tiempo máximo de permanencia de los estudiantes en el bus
	Ventanas de tiempo de la escuela
	Máxima distancia o tiempo de caminata
	Recogida más temprana
	Número mínimo de estudiantes para crear una ruta

Fuente: (Park & Kim, 2010)

Los aspectos relacionados ayudan a clasificar el tipo de problema que se va abordar, dando posibilidad a resolver múltiples situaciones propuestas con variedad de enfoques. Según (Park & Kim, 2010), se pueden considerar distintas variantes asociadas al problema del SBRP.

Teniendo claro lo anterior es importante apoyarse en teorías de ruteo las cuales permitan encontrar aproximaciones o respuestas exactas del problema propuesto en este documento, abarcando las particularidades del mismo buscando apoyo en la literatura.

3. ELEMENTOS SOCIALES EN EL TRANSPORTE

3.1 Aplicaciones, usos e importancia ante la sociedad el Ruteo de Buses Escolares.

El transporte por medio de rutas escolares, es un servicio que está fuertemente relacionado con factores que intervienen directa o indirectamente con el desarrollo, calidad educativa y bienestar general de los estudiantes. Hay riesgos latentes, como la irresponsabilidad de conductores particulares y de servicio público, la inseguridad de la ruta que debe recorrer y barreras que dificultan el acercamiento del niño a la institución, como la distancia a la que se encuentra su vivienda del lugar de estudio, el horario de trabajo de los padres o adultos responsables que dificulte el acompañamiento y la falta de recursos propios para movilizarse; las cuales se vuelven más notorias si no se tiene acceso a una ruta escolar (Farrington 2013).

Dado a lo anterior, se considera que los beneficios asociados a un uso adecuado de las rutas escolares para el transporte de estudiantes, consiste en la disminución de riesgos al caminar por diferentes puntos peligrosos con dirección a la institución educativa, además de asegurar la contratación de un profesional que vele por el bienestar de los niños. Por otra parte, mejoran las relaciones interpersonales ayudando a desarrollar una mejor comunicación e independencia.

3.2 Desempeño del servicio público y la equidad como elemento social

Según (Savas, 2016) existen tres medidas para evaluar el desempeño del servicio público, estos son, eficiencia, efectividad y equidad.

La **eficiencia** es definida como la razón entre el nivel de servicio y el costo de los recursos requeridos para proveer dicho servicio. En un nivel de servicio fijo la eficiencia del servicio puede estar determinada por su costo.

La **efectividad** del servicio se mide como la proporción de demanda satisfecha. Un sistema de transporte escolar efectivo debería estar disponible para todos los

estudiantes y debería tener un nivel aceptable de servicio. La efectividad de un servicio de bus escolar puede ser determinada utilizando medidas como el tiempo que gastan los estudiantes en un bus escolar y la distancia total que estos deben caminar.

Las consideraciones de **equidad** se refieren a la justicia o imparcialidad en la prestación del servicio. Una solución con una buena medida de eficiencia puede ser más barata y mejor en costo y tiempo, pero podría ser inaceptable dada la imparcialidad de la prestación del servicio a los estudiantes. Este eje temático ha sido descuidado tanto en la evaluación del desempeño del servicio de transporte escolar como en la evaluación del desempeño del servicio de transporte público. Sin embargo, la importancia de tener en cuenta la equidad del servicio va en aumento, aseguran (Park & Kim, 2010). Para mejorar la equidad en el servicio de transporte escolar se deben balancear las cargas y se deberían tener en cuenta los tiempos de transporte entre los buses.

Por otro lado, como dice (Ramírez Ruiz, 2011) Los usuarios cuentan con diferentes características de desarrollo y personalidad, convirtiendo el espacio del bus como ambientes de libertad que pueden incurrir positiva o negativamente en el aprendizaje, ya que los niños de menor edad tienden a imitar a los mayores en el ámbito de valores y prácticas socioculturales. Por esto, se considera un elemento fundamental el factor social dentro de las rutas escolares, para que el espacio de transporte se convierta en un lugar de formación, fortalecimiento de valores, tolerancia y aprendizaje de la diversidad de culturas que puedan presentar sus compañeros.

Además, la influencia o presión de la sociedad juega un papel muy importante en el desarrollo del menor, así como se muestra en el escrito ("Los_Factores_Sociales_Que_Influyen_En_El," n.d.). La influencia de la sociedad contribuye al desarrollo de la inteligencia, la afectividad, el comportamiento y la formación de la personalidad. Cuando una persona ha vivido en sociedad y por razones extremas se encuentra privada de las relaciones con los demás, teniendo

que vivir totalmente aislado, de inmediato comienza a organizar su vida siguiendo los patrones que la sociedad en la que vivía le enseñó.

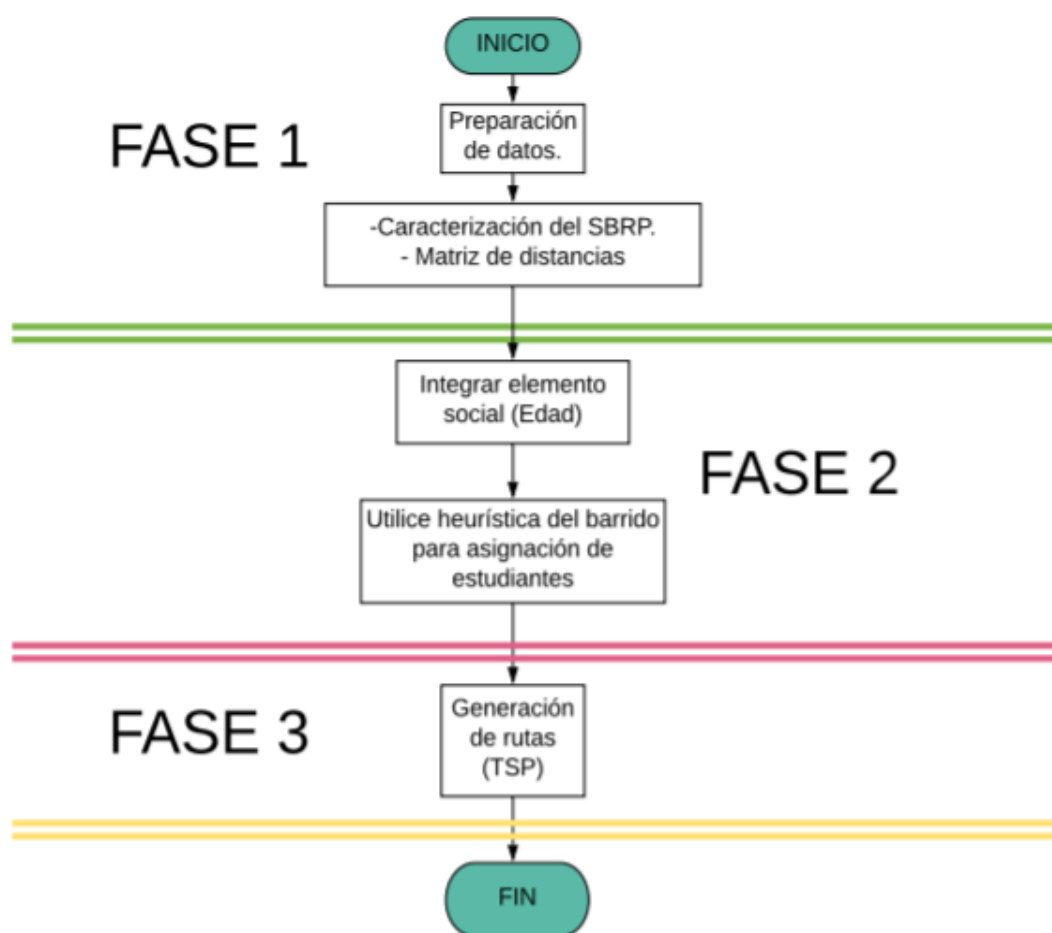
Dado lo anterior, se toma la equidad como elemento social a trabajar, puesto que es importante darle valor, asegurar y alcanzar la igualdad de condiciones y comodidades en la prestación del servicio y todo lo que este incluye (tiempo de viaje, tamaño de la ruta, comodidad, tranquilidad emocional). El balance de cargas ayudará a determinar el número de paradas, cantidad de estudiantes transportados, longitud de la ruta y/o tiempo del recorrido; generando así un equilibrio entre lo social y lo económico.

Para la medición del rango de edad como indicador social, se toma la edad mínima y la edad máxima de los niños que van ingresando al bus, de esta forma el rango de edad se va estableciendo de manera que el niño mayor y menor no sobrepase los límites establecidos. Con esto se asegura que los niños pequeños y los mayores se transporten en un ambiente adecuado a su etapa de crecimiento.

4. FORMULACIÓN DEL MODELO

Para la solución del problema de ruteo de buses escolares considerando elementos de carácter social, se propone abordarlo desde los sub-problemas como plantea (Bowerman, 1995) la selección de paradas de buses escolares, la asignación de estudiantes para estas paradas y la generación de ruta escolar (*Ver ilustración 1*).

Ilustración 1 Metodología



Fuente: elaboración propia

4.1 FASE I - caracterización del SBRP

Esta etapa es la principal del desarrollo de la metodología, ya que se encarga de la descripción que constituye la problemática. Es importante tener en cuenta que el

objetivo de esta fase es realizar cuidadosamente un análisis de los componentes para realizar una buena investigación.

4.1.1 Preparación de datos

Se especifica la red vial y se preparan cuatro tipos de datos para el SBRP: estudiantes, colegio, vehículos y matriz de distancias. Los datos para los estudiantes incluyen: La ubicación (dirección) de sus hogares, el colegio destino, edad del niño, número de niños por cada hogar y costos de transporte.

4.1.2 Caracterización del problema

La caracterización del caso consiste en clasificar los atributos de acuerdo a los criterios más utilizados (Park & Kim, 2010).

4.1.3 Matriz de distancia

Se tuvo en cuenta la ubicación de cada uno de los hogares correspondientes a cada alumno, además se realizó el cálculo en coordenadas planas, para así determinar la matriz, asumiendo que las distancias son simétricas entre sí.

4.2 Fase II asignación de estudiantes

Para la asignación de estudiantes a cada uno de los vehículos se emplea el método heurístico del barrido, teniendo en cuenta la capacidad de los buses y el rango de edad (elemento social), con esto se determina el número de estudiantes asignados a cada bus.

4.2.1 Integración elemento social

Antes de implementar el método del barrido se tiene que involucrar la edad del niño como elemento social del problema, de manera que al ir abarcando el conjunto de niños asignados al bus escolar no sobrepase el rango correspondiente a la edad máxima y la edad mínima del estudiante mayor y menor de cada bus. Este factor es el más importante en el estudio, ya que brinda al estudiante un espacio adecuado para su formación.

4.2.2 Heurística del barrido

(Ballou, 2004) El método "de barrido" puede describirse como sigue:

Localizar todas las paradas, incluyendo el depósito" sobre un mapa o cuadrícula. Trazar una línea recta desde el depósito en cualquier dirección. Girar la línea en el sentido de las manecillas del reloj, o en sentido contrario, hasta que intersecte una parada. Hacer la pregunta: Si la parada insertada está incluida en la ruta, ¿se excederá la capacidad del vehículo? Si la respuesta es no, se procede con la rotación de la línea hasta intersectar la siguiente parada. Hacer la pregunta: ¿Excederá la capacidad del vehículo el volumen acumulado? Se usan los camiones más grandes primero. Si la respuesta es sí, se excluye el último punto y se define la ruta. Continuando el barrido de la línea, se empieza una nueva ruta con el último punto que fue excluido de la ruta previa.

Se continúa con el barrido hasta que todos los puntos se hayan asignado a las rutas. Dentro de cada ruta se efectúa una secuencia de las paradas para minimizar la distancia.

Para la elaboración del método se tiene en cuenta los siguientes pasos:

Paso 1. Asociar cada niño a su hogar con su respectiva edad.

Paso 2. Asegurar que en cada punto exista al menos un niño para visitar.

Paso 3. Establecer aleatoriamente un punto de inicio y empezar a girar en el sentido contrario a las manecillas del reloj, o sea, "barrer" de acuerdo al punto que tenga el menor crecimiento angular con respecto al origen, para esto se utiliza la función **DISRAD** (distancia angular).

Paso 4. Recoger cada niño de la ruta, teniendo en cuenta el factor capacidad y el rango de edad permitida (elemento social), la edad del primer niño recogido se convierte en el punto referencial para las siguientes recolecciones.

Paso 5. Se evalúa si hay capacidad para seguir recogiendo niños y si la diferencia de edad cumple la restricción para asignarlo al bus.

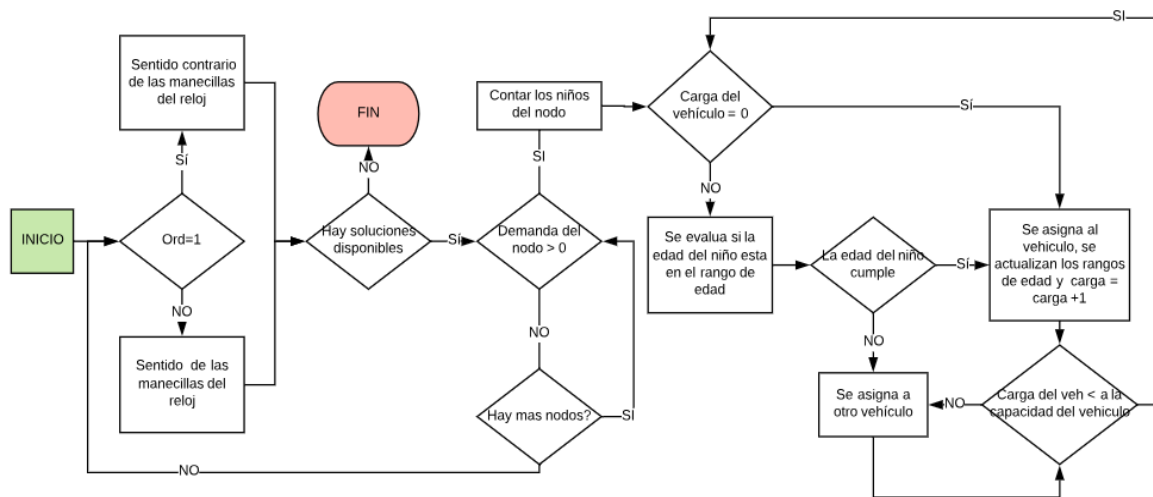
Paso 6. Si el niño no cumple con la diferencia de edad, se asigna al siguiente bus donde pueda cumplir con las dos condiciones (capacidad y edad).

Paso 7. Todo niño tiene que ser asignado a un bus.

Paso 8. Después de haber realizado todas las posibles rutas por medio del método del barrido en sentido de las manecillas del reloj y en sentido opuesto, en MATLAB

Paso 9. Se emplea el modelo TSP a cada ruta de la solución; por medio del algoritmo 2opt se optimiza el orden de recolección de los niños para mejorar la solución.

Ilustración 2 Diagrama de flujo, método del barrido



Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Propuesta de asignación con capacidad homogénea y restricción de edad

Supuestos

- Flota homogénea (Igual capacidad para todos).
- Flota fija (igual número de vehículos).
- Cada bus tiene como mismo origen y destino el colegio.
- Distancias simétricas.
- Todas las vías son de doble sentido, no tiene impacto en la ruta.

- Se activan los buses necesarios para la recolección de los niños.

Conjuntos

- **H:** Conjunto de hogares indexado por el subíndice h .
- **N:** Conjunto de niños indexado por el subíndice niños n .
- **V:** Conjunto de vehículos indexado por el subíndice v

Conjunto inducido

- **NH (h):** Niños que $\in$ al hogar h
- **HN (n):** Hogar al que $\in$ el niño n

Parámetros

- E_n : Edad del niño n
- D_{hi} : Distancia del nodo h al nodo i tal que , $h \in H, i \neq h$
- CTV_v : Costo de transporte variable del vehículo v .
- CF : Costo de transporte fijo del vehículo v .
- CP_v : Capacidad del vehículo v .
- **M:** Número positivo muy grande

Variables de decisión

- $X_{hiv} = 1$ si el vehículo v se desplaza del nodo h al nodo i , 0 de lo contrario. $\forall h \in H, v \in V$.
- $A_{nv} = 1$ si el niño n se asigna al vehículo v , 0 de lo contrario. $\forall n \in N, v \in V$.
- Y_{iv} = Cantidad de niños asignados al vehículo v al llegar al nodo i .

Función objetivo

Minimizar el costo total de la operación considerando limitaciones de carácter social.

$$Min = \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \sum_{v \in V} X_{hiv} * Dhi * CTV + CF$$

Restricciones

$$\sum_{h \in H/h \neq 0} X_{0hv} = 1 \quad \forall v \in V \quad (1)$$

$$\sum_{h \in H/h \neq 0} X_{h0v} = 1 \quad \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in H} X_{ihv} = \sum_{j \in H} X_{h jv} \quad \forall h \in H/h \neq 0, v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{i \in H} X_{ihv} \geq 1 \quad \forall h \in H \quad h \neq 0 \quad i \neq h \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{h \in H} X_{ihv} \geq 1 \quad \forall i \in H \quad i \neq 0 \quad i \neq h \quad (5)$$

$$\sum_{v \in V} A_{nv} = 1 \quad \forall n \in N \quad (6)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{h \in HN(n)} X_{hiv} = A_{nv}$$

$$\forall v \in V, n \in N \neq h \quad i \neq h \quad (7)$$

$$\sum_{i \in H/i \neq 0} X_{i0v} = \sum_{j \in H/j \neq 0} X_{0jv} \quad \forall v \in V \quad (8)$$

$$\sum_{n \in N} A_{nv} \leq CPv * \sum_{i \in H/i \neq 0} X_{0iv} \quad \forall v \in V \quad (9)$$

$$A_{nv} \leq CPv * \sum_{i \in H} \sum_{h \in HN(n)} X_{ihv} \quad \forall v \in V, \forall n \in N \quad (10)$$

$$A_{nv} * e_n - A_{mv} * e_m \leq e_{max}$$

$$r y n \in N \quad \forall r \neq n \quad (11)$$

$$A_{nv} * E_n - A_{mv} * E_m \geq -E_{max}$$

$$m \text{ y } n \in N \quad \forall m \neq n \text{ (12)}$$

$$Y_{iv} + \sum_{n \in NH(i)} A_{nv} \leq Y_{jv} + M * (1 - X_{ijv}) \text{ (13)}$$

$$\forall j \in H, \forall v \in V$$

$$\forall i \in H, i \neq 0$$

$$Y_{iv} + \sum_{n \in NH(i)} A_{nv} \geq Y_{jv} - M * (1 - X_{ijv}) \text{ (14)}$$

$$\forall j \in H, \forall v \in V$$

$$\forall i \in H, i \neq 0$$

$$X_{hiv} \in \{0,1\} \quad h \in H, i \in H, i \neq h, v \in V \text{ (15)}$$

$$A_{nv} \in \{0,1\} \quad n \in N, v \in V \text{ (16)}$$

$$Y_{iv} \geq 0 \quad i \in H, v \in V; Y_{iv} \in \text{Enteros} \text{ (17)}$$

La restricción **(1)** explica como todos los vehículos **v** salen a visitar un hogar **h**, es decir, no puede salir del colegio **0** y regresar sin visitar ninguno, garantizando además que todos los vehículos salgan del colegio a algún nodo. Mientras tanto en la restricción **(2)** garantiza que todos los vehículos **v**, vayan de un nodo **h** hasta el colegio **0**, además la restricción **(3)** garantiza que si el vehículo **v** va del punto **i** al punto **h** (h es diferente al punto del colegio, 0) tiene que salir de ese punto **h** a cualquier otro punto **j** donde puede ser el colegio.

Por otro lado la restricción **(4)** garantiza que un nodo debe ser visitado al menos 1 vez por un vehículo **v**, al mismo tiempo la restricción **(5)** garantiza que todo vehículo

v que visita un nodo h debe de salir a otro, en cuanto a la restricción **(6)** asigna cada niño n a un solo vehículo v , además la número **(7)** garantiza que, si el niño n es asignado al vehículo v , ese vehículo va a la casa del niño, también la restricción **(8)** garantiza que todo el vehículo v sale del origen 0 , tiene que regresar al origen.

Asimismo la restricción número **(9)** dice que los niños n que son asignados al vehículo v , deben de ser menor o igual a la capacidad del vehículo v , la número **(10)** dice que el niño n asignado al vehículo v , tiene que ser menor o igual a la capacidad del vehículo y que el niño tiene que ser recogido en la casa, así mismo la restricción **(11)** garantiza que ningún niño recogido por el vehículo v exceda los límites de la diferencia de la edad. **(12)** ayuda a tomar los valores negativos como positivos para que no se presente ninguna dificultad a la hora de realizar la resta de las edades. **(13)** elimina los sub tours, por último la restricción **(14)** garantiza que la cantidad de niños con la que el vehículo v sale del nodo, es igual a la cantidad de niños que tenía antes de llegar, más la cantidad de niños que recoge, dándole así un orden de recogida a los niños. La restricción **(15)** y **(16)** son binarias y por último la **(17)** es la de la no negatividad.

Las restricciones **(11)** y **(12)** son las de carácter social, es decir, relacionan el modelo con el objetivo social del proyecto.

4.3 Fase III - generación de ruta de autobús

La generación se hace por medio del **TSP** generando rutas cortas, considerando las restricciones del problema.

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Desarrollo de la fase I

El problema de ruteo de buses escolares consiste en recoger a 170 niños ubicados en la ciudad de Cali pertenecientes a un único colegio, se cuenta para ello con la

disposición de 12 buses considerando una flota homogénea (igual capacidad de 15 niños), las rutas escolares son manejadas por una empresa prestadora del servicio que se encarga de recoger a los estudiantes en sus hogares todos los días para ser llevados a su destino (colegio), en este caso se asume que los buses inician y terminan su recorrido en el mismo lugar, es decir, en el colegio destino. Además se tiene en cuenta un elemento social que considera la edad de cada uno de los niños [\(ver anexo, ilustración 15\)](#) en la solución del problema, es decir, que cada bus no sobrepase un rango establecido. Con esto se busca que los niños se encuentren en un ambiente seguro y cómodo dentro del recorrido de la casa al colegio y viceversa.

Tabla 2 Caracterización del problema

Característica	Variantes
Número de escuelas	Una escuela
Tipo de servicio	Urbano
Jornada estudiantil	Mañana (Recoger estudiantes)
Recogidas combinadas	Recogidas combinadas no permitidas (estudiantes de la misma escuela), cargue simple.
Estudiantes especiales	Estudiantes en general
Tipo de flota	Flota homogénea.
Objetivo	Distancia total en el viaje de los buses.
	Equidad del servicio prestado (la edad de los niños n que van en el vehículo v no se pase del rango de edades aceptadas, para asegurar que así no exista mucha diferencia de edad en los niños que están en el bus).
Constantes	Capacidad de los buses.
	Todos los buses duermen y salen del colegio
	Número mínimo de estudiantes para crear una ruta
	Edad de los niños.

Fuente: (Park & Kim, 2010)

4.4.2 Distancias de los estudiantes

Se tiene en cuenta 171 paradas (incluyendo el colegio) que corresponde la matriz de distancias 171×171 lo que equivalen 29.241 sin embargo, como se asumen que las distancias son simétricas, se debe realizar el cálculo de 14.620 distancias, además se tiene en cuenta 12 buses de igual capacidad. [\(Matriz distancias\)](#)

4.5 Desarrollo de la fase II

La flota corresponde a 12 vehículos (**v**) con igual capacidad de 15 estudiantes cada uno, para un total de 170 niños (**n**) pertenecientes a 146 (**h**) hogares. A continuación, se muestran los criterios tenidos en cuenta para encontrar los costos correspondientes a la ruta (solo los costos asociados a la recolección de los niños).

Ilustración 3 Costos variables de transporte

TIPO DE VEHÍCULO	Renault Master (2)	Kia Pregio (2)	Nissan Urban (2)	Nv350 (2)	Nv350 Techo alto (1)	Chevrolet express passenger (1)	Van foton (2)
Consumo medio (L/ 100KM)	10,6	7,6	7,3	10,8	7,5	6,0	6,7
Coste del litro	\$ 2.253	\$ 2.253	\$ 2.253	\$ 2.253	\$ 2.253	\$ 2.253	\$ 2.253
Coste por vehículo	\$ 238,82	\$ 171,23	\$ 164,47	\$ 243,32	\$ 168,98	\$ 135,18	\$ 150,95
Aceite	\$ 40	\$ 40	\$ 40	\$ 40	\$ 40	\$ 40	\$ 40
Neumáticos cada 100.000 km	\$ 8,8	\$ 8,8	\$ 8,8	\$ 8,8	\$ 8,8	\$ 8,8	\$ 8,8

Fuente: elaboración propia

Ilustración 4 Costos fijos de transporte

TIPO DE VEHÍCULO	Renault Master	Kia Pregio	Nissan Urban	Nv350	Nv350 Techo alto	Chevrolet express passenger	Van foton
Seguro	\$ 703.900	\$ 703.900	\$ 703.900	\$ 703.900	\$ 703.900	\$ 703.900	\$ 703.900
Salario, de acuerdo al decreto de transporte le corresponden 2 SMMLV	\$ 16.652.664	\$ 16.652.664	\$ 16.652.664	\$ 16.652.664	\$ 16.652.664	\$ 16.652.664	\$ 16.652.664
aux transporte	\$ 873.288	\$ 873.288	\$ 873.288	\$ 873.288	\$ 873.288	\$ 873.288	\$ 873.288
seguridad social	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107
Pension	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107	\$ 666.107
Costo del vehiculo	\$118.790.000	\$ 107.000.000	\$112.000.000	\$ 103.490.000	\$ 112.990.000	\$ 109.800.000	\$ 103.000.000

Fuente: elaboración propia

Se asume que toda la flota de transportes es nueva y se va adquirir para el colegio, por eso se incluye el valor de adquisición del vehículo.

4.5.1 Aplicación de heurística de barrido (funciones y sub- funciones)

El desarrollo del método del barrido en MATLAB se realizó con la construcción de 3 funciones principales, que son las encargadas de almacenar todos los datos recolectados como se explicó en la fase I. Por otro lado, el código está estructurado por funciones que toman un conjunto de información (entradas), transformándolas en soluciones (salidas) al caso de estudio. Para la ejecución del código se realizó lo siguiente:

4.5.2 Función ejecutar barrido

Primero se crea esta función, ya que toma el conjunto de entrada de datos como la demanda, la distancia, la capacidad del vehículo, la cantidad de niños en cada nodo y luego arroja las siguientes salidas:

- **PRUTAS2:** contiene todas las posibles soluciones del barrido.
- **NRUTAS:** el número de rutas.
- **NRUTAS2:** corresponde a las edades de los niños correspondientes a cada ruta.
- **AD:** matriz que muestra información específica de cada solución como: distancia de la ruta más larga, distancia de la ruta más corta, cantidad de niños en la ruta que recoge menos niños, cantidad de niños en la ruta que recoge más niños, paradas en la ruta con más paradas, paradas en la ruta con menos paradas, rango de edades en la ruta con mayor rango de edades, rango de edades en la ruta con menor rango, utilización por vehículo, vehículo con menor utilización, vehículo con mayor utilización, utilización promedio, distancia total recorrida.
- **Mveh:** cantidad máxima de vehículos permitidos.

4.5.3 Función calcular distancia

Calcula la matriz de distancia necesaria para resolver el método del barrido, además almacena la información de la demanda de cada uno de los nodos y las coordenadas en X y Y arrojados como respuesta de la sub función **DATOSN**, además muestra como salida lo siguiente:

- **PUN:** coordenadas extraídas de los datos.
- **DIS:** distancia entre cada uno de los nodos.
- **RAD:** ángulo entre cada nodo con respecto a la escuela.

- **DEM:** demanda de niños

4.5.4 Función datos

Esta función carga todos los datos que contiene las coordenadas en x e y en una matriz datos, además de los niños que hay en cada hogar (demanda) y la edad de cada uno. Generando salidas como:

- **DATOS:** Corresponde a una matriz formada por las coordenadas x e y.
- **Ninosnodo:** Corresponde a una matriz formada por la demanda y la edad de los niños por cada uno de los hogares.

De las 340 soluciones conseguidas por este método, la mejor solución obtenida por el programa es la número 76 con la siguiente agrupación:

Tabla 3 Conjunto de estudiantes, solución barrido

CAP. BUS	B1	Edades	B2	Edades	B3	Edades	B4	Edades	B5	Edades	B6	Edades	B7	Edades	B8	Edades	B9	Edades	B10	Edades	B11	Edades	B12	Edades
1	E94	15	E166	5	E92	16	E95	4	E25	4	E13	10	E30	16	E59	10	E63	16	E115	8	E114	10	E45	4
2	E91	11	E163	7	E162	16	E104	4	E23	4	E14	10	E6	12	E128	10	E38	16	E71	5	E155	7	E165	6
3	E146	10	E93	8	E131	16	E136	6	E21	6	E50	7	E15	15	E53	10	E36	16	E151	4	E46	8	E149	7
4	E147	10	E132	7	E145	16	E137	8	E26	8	E58	5	E3	16	E56	10	E61	16	E40	9	E82	5	E107	8
5	E102	11	E135	5	E97	16	E112	9	E22	9	E126	10	E7	14	E73	15	E76	16	E121	6	E85	5	E108	6
6	E103	11	E129	8	E139	14	E138	6	E27	6	E51	7	E31	14	E74	14	E113	14	E123	9	E35	8	E148	5
7	E111	15	E81	6	E140	13	E157	8	E5	8	E57	9	E17	15	E124	14	E119	11	E125	4	E86	9		
8	E161	13	E130	5	E141	11	E101	6	E10	6	E62	6	E70	16	E117	14	E83	16	E39	9	E84	8		
9	E90	14	E144	6	E143	13	E142	7	E9	7	E69	8	E48	12	E118	13	E66	11	E88	7	E41	8		
10	E105	12	E89	4	E19	14	E158	6	E16	6	E55	8	E49	12	E122	15	E156	15	E34	8	E43	7		
11	E168	10	E100	5	E29	14	E159	8	E2	8	E52	6	E169	14	E120	14	E42	16	E44	5	E78	10		
12	E160	14	E98	8	E2	16	E20	4	E4	4	E37	9	E47	16	E87	12	E80	13	E77	9	E110	9		
13	E134	10	E99	5	E11	13	E24	4	E32	4	E127	9	E68	15	E152	10	E79	14	E33	6	E116	10		
14	E106	13	E133	7	E28	13	E18	6	E170	6	E64	5	E60	16	E72	15	E109	12	E150	8	E96	5		
15	E156	13	E164	5	E8	15	E1	5	E67	5	E65	8	E54	13	E75	10			E154	5	E167	5		

Fuente: elaboración propia

Tabla 4 Rango de edades

RANGO DE EDADES																							
B1	15	B2	8	B3	16	B4	9	B5	9	B6	10	B7	16	B8	15	B9	16	B10	9	B11	10	B12	8
B1	10	B2	4	B3	11	B4	4	B5	4	B6	5	B7	12	B8	10	B9	11	B10	4	B11	5	B12	4

Fuente: elaboración propia

Los resultados arrojan 12 rutas, para 12 vehículos (v) el B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B10, B11 completan toda la capacidad del bus, mientras que la utilización del B9 es de 93.33 % y B12 es del 40%. Además se puede observar que en cada ruta el rango de edades se cumple, ninguno se sale del parámetro establecido de más de 5 años de diferencia.

Tabla 5 Datos mejor solución

Distancia de la ruta mas larga (km)	55,0146
Distancia de la ruta mas corta (km)	23,924
Cantidad de niños en la ruta que tiene mas niños	15 niños
Cantidad de niños en la ruta que tiene menos niños	6 niños
Rutas con mas paradas	15
Rutas con menos paradas	5
Ruta con mayor rango de edades	5 años
Ruta con menos rango de edades	4 años
Utilizacion por vehiculo	13 niños
Vehículo con mayor utilización	100%
Vehículo con menor utilización	40%
Utilizacion promedio	94%
Distancia total recorrida (km)	481,3438
Costo variable anual de recogida	\$ 20.313.395
Costo total anual de recogida	\$ 1.566.408.176

Fuente: elaboración propia

4.6 Desarrollo fase III

Aplicación del modelo matemático del TSP

A la mejor solución obtenida mediante el método del barrido, se aplica el modelo TSP para determinar el orden de las paradas de acuerdo al conjunto de niños a recoger por cada bus. Para la realización se utilizó funciones y variables pertenecientes al código del modelo, como se describe a continuación:

- Se aplica el modelo TSP en MATLAB de tal manera que resuelva el problema de secuenciación.
- Creación de una matriz que contiene las coordenadas en X (latitud) e Y (longitud) de cada uno de los nodos, es decir, los hogares de los niños y el colegio (punto de origen).

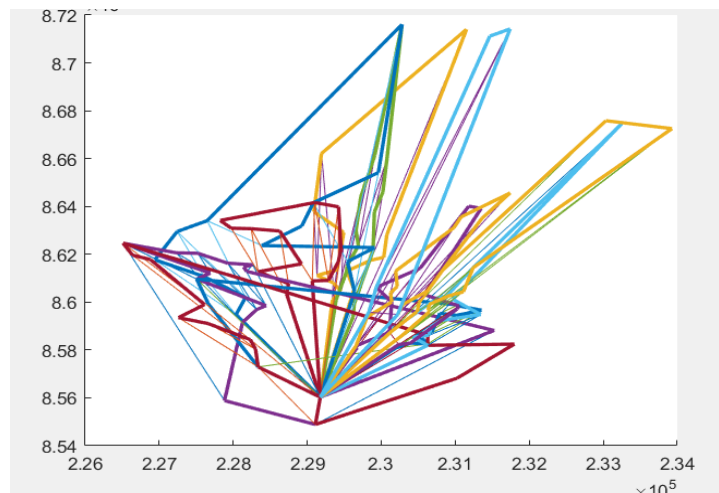
- Se realiza un gráfico de coordenadas.
- Se generan las posibles combinaciones de cada uno de los nodos.
- Se calculan las distancias euclidianas entre los nodos.
- Se genera la restricción que garantiza que se realice un viaje de entrada y uno de salida para cada uno de los nodos.
- Se ejecuta el Solver para resolver el modelo.
- Se identifican y eliminan las sub-rutas y se repite el mismo paso hasta que quede una sola ruta.

Tabla 6 Agrupación estudiantes TSP

CAP. BUS	B1	Edades	B2	Edades	B3	Edades	B4	Edades	B5	Edades	B6	Edades	B7	Edades	B8	Edades	B9	Edades	B10	Edades	B11	Edades	B12	Edades
1	E103	11	E166	5	E162	16	E157	8	E170	6	E50	7	E48	12	E59	10	E61	16	E71	5	E46	8	E45	4
2	E111	15	E163	7	E97	16	E112	9	E32	4	E14	10	E49	12	E56	10	E63	16	E40	9	E35	8	E149	7
3	E102	11	E93	8	E92	16	E104	4	E16	6	E13	10	E31	14	E53	10	E38	16	E39	9	E114	10	E148	5
4	E94	15	E135	5	E143	13	E95	4	E27	6	E127	9	E30	16	E74	14	E36	16	E34	8	E155	7	E107	8
5	E91	11	E132	7	E140	13	E136	6	E26	8	E37	9	E17	15	E73	15	E119	11	E121	6	E85	5	E108	6
6	E146	10	E129	8	E141	11	E137	8	E12	6	E126	10	E70	16	E128	10	E113	14	E125	4	E82	5	E165	6
7	E147	10	E144	6	E139	14	E138	6	E10	6	E69	8	E15	15	E124	14	E83	16	E123	9	E84	8		
8	E134	10	E130	5	E131	16	E1	5	E4	4	E64	5	E6	12	E117	14	E66	11	E115	8	E86	9		
9	E53	10	E133	7	E145	16	E18	6	E9	7	E65	8	E7	14	E118	13	E156	15	E88	7	E96	5		
10	E90	14	E89	4	E19	14	E20	4	E5	8	E51	7	E3	16	E152	10	E109	12	E151	4	E110	9		
11	E105	12	E81	6	E2	16	E142	7	E22	9	E55	8	E54	13	E87	12	E42	16	E150	8	E116	10		
12	E106	13	E98	8	E8	15	E101	6	E25	4	E57	9	E60	16	E122	15	E76	16	E154	5	E41	8		
13	E160	14	E99	5	E11	13	E24	4	E21	6	E58	5	E68	15	E120	14	E79	14	E33	6	E43	7		
14	E161	13	E100	5	E29	14	E158	6	E23	4	E62	6	E47	16	E72	15	E80	13	E44	5	E167	5		
15	E168	10	E164	5	E28	13	E159	8	E67	5	E52	6	E169	14	E75	10			E77	9	E78	10		

Fuente: elaboración propia

Ilustración 5 Rutas generadas



Fuente: MATLAB

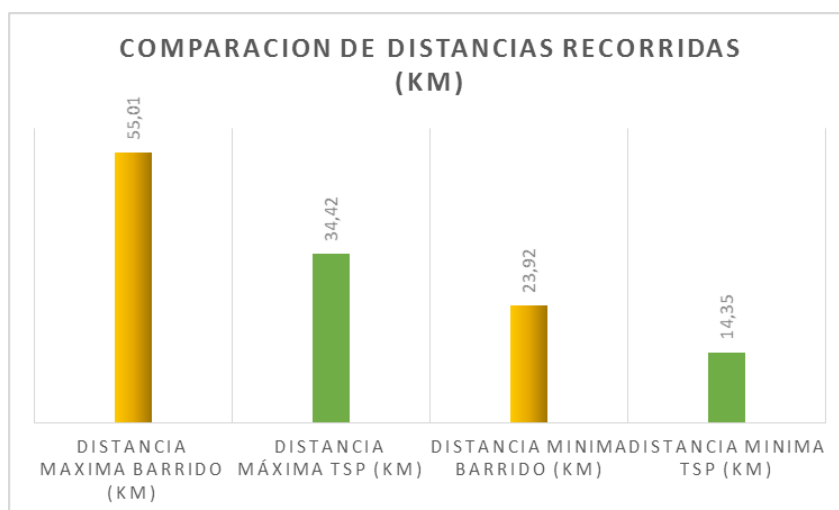
De la mejor solución encontrada por medio del método del barrido, y ordenada por medio del Tsp, la distancia recorrida en la mejor solución disminuyó a un 40.1% mostrando la gran capacidad de mejora que puede aportar el algoritmo 2-opt para encontrar soluciones exitosas y con resultados satisfactorios a nivel económico, reduciendo desde la mayor distancia de una ruta hasta la mínima distancia recorrida en otra y por consiguiente la distancia total y el costo asociado a esta distancia por kilómetro, tomado como el costo variable de la solución.(ver tabla 7 e ilustración 6)

Tabla 7 Datos adicionales métodos del barrido

VARIABLE	MÉTODO DEL BARRIDO	TSP
Costo variable anual de recogida	\$ 20.313.395	\$ 12.377.284,41
Costo total por viaje (anual)	\$ 1.566.408.176	\$ 1.558.472.066
Reducción en costos	\$ 7.936.110	
Reducción en costos %	39%	
Distancia máxima recorrida en una ruta (Km)	55,0146	34,42
Distancia mínima recorrida (Km)	23,924	14,35
Distancia total de la mejor solución (Km)	481,3438	288,27
Porcentaje de mejora de la distancia recorrida	40,1%	

Fuente: elaboración propia

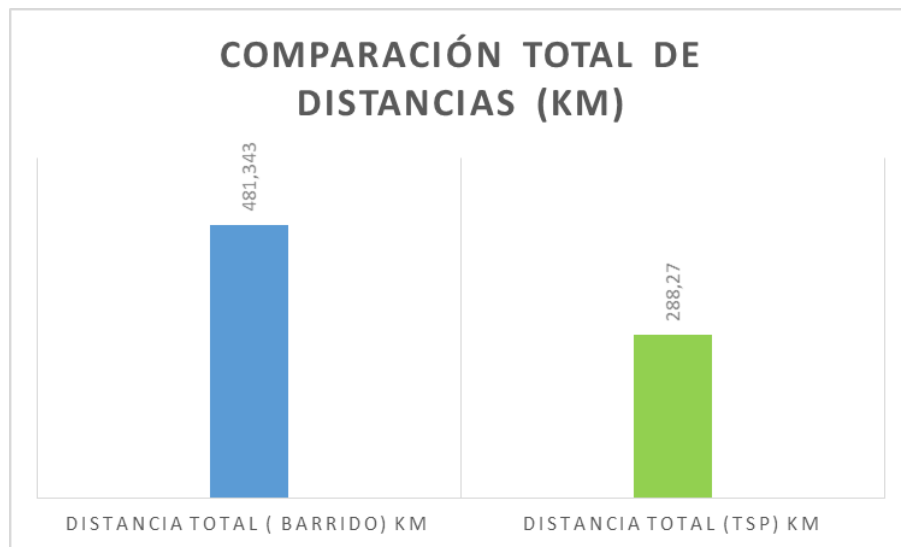
Ilustración 6 Comparación distancias



Fuente: elaboración propia

Se observa que tanto la distancia máxima como la distancia mínima se reducen a un 37,42% y 40% respectivamente. Es interesante lograr ver esta reducción ya que era lo que se buscaba inicialmente sobre dicho recorrido, pero también es importante notar que la ruta con menor distancia disminuyó de manera considerable. (Ver ilustración 7)

Ilustración 7 Comparación distancias totales



Fuente: elaboración propia

Al comparar la distancia total del recorrido de la ruta del método del barrido y el algoritmo 2opt, se reduce en un 40,1 %, logrando acortar la distancia y el costo de transporte asociados; además contribuye a mejorar la percepción del servicio, para los padres de familia ya que sus hijos estarán en un ambiente óptimo para su edad, lo que conlleva una reducción de situaciones negativas como conflictos internos dentro del bus con otros niños y el bullying.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Análisis de sensibilidad

El objetivo del análisis es evaluar las variaciones que puede tener el problema de acuerdo al cambio de algunos parámetros del modelo, además con los resultados se evalúa las diferentes alternativas para una mejor solución.

Para conocer el comportamiento del modelo propuesto, se realizaron variaciones en términos de capacidad de los vehículos, cantidad de niños para asignar y la restricción de edad del modelo para evaluar distintos escenarios.

5.1.1 Escenario 1- Capacidad de vehículo

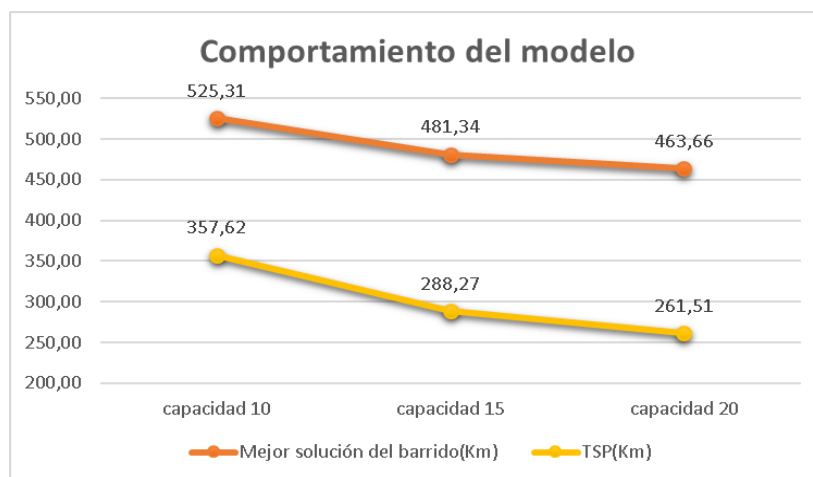
Al disminuir o aumentar la capacidad de los vehículos, se pretende analizar el impacto en la distancia total recorrida y además compararla con la solución original mostrando la diferencia entre el mejor resultado de cada escenario (ver *tabla 8* e *ilustración 8*).

Tabla 8 Capacidad del vehículo

DATOS	capacidad 15	vehículo con capacidad 20	vehículo con capacidad 10
Mejor solución del barrido (Km)	481,34	463,66	525,31
TSP(Km)	288,27	261,51	357,62
Reducción de distancia	40,11%	43,64%	31,92%

Fuente: elaboración propia

Ilustración 8 Comportamiento de distancias



Fuente: elaboración propia

Después de seleccionar la mejor solución de todos los posibles barridos en cada escenario, se puede demostrar que la capacidad afecta directamente el comportamiento del modelo. Se puede inferir que a mayor capacidad vehicular, la distancia recorrida se reduce, por ejemplo, cuando la capacidad de los buses oscila entre 10 y 15 estudiantes, se genera un ahorro del 8% con respecto a la solución inicial. De igual forma, es importante analizar que el aumento de recolecciones asociadas al aumento de la capacidad, genera por medio del modelo TSP más posibilidades para reordenar la recolección, mostrando un ahorro de 202,15 kilómetros (43,64%) en el escenario con mayor capacidad en comparación al escenario de menor capacidad que reduce 167,69 kilómetros (31,92%) con respecto a la solución de sus respectivos barridos.

5.1.2 Escenario 2 - Restricción de edad

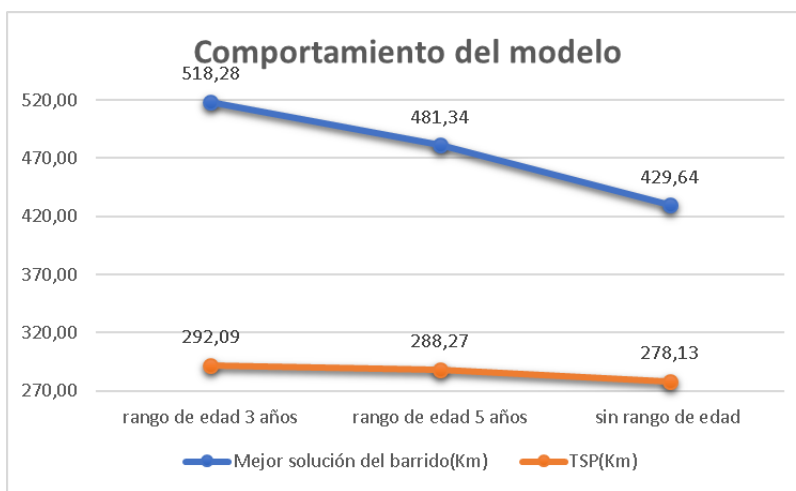
Evaluar diferentes instancias de la restricción de edad, tiene como objetivo analizar el impacto de este factor en la configuración de la recolección (Ver tabla 9 e ilustración 9).

Tabla 9 Restricción de edad

DATOS	rango de edad 5 años	rango de edad 3 años	sin rango de edad
Mejor solución del barrido(Km)	481,34	518,28	429,64
TSP(Km)	288,27	292,09	278,13
Reducción de distancia	40,11%	43,60%	35,26%

Fuente: elaboración propia

Ilustración 9 Comportamiento edad



Fuente: elaboración propia

Al ver el comportamiento variando el rango de edad, se hace notorio que el TSP sigue siendo bastante efectivo al aplicar el método del barrido para producir reducciones importantes en distancias, pero lo más importante, es que, entre menor sea el rango de edad, el esfuerzo computacional del modelo TSP va a ser mayor con respecto a la búsqueda de niños con edades similares en el proceso de construcción de la ruta. Como se puede ver en la *ilustración 14*, al incluir la restricción de edad de los niños a partir de un rango de 3 años el ahorro en distancia es más significativo cuando no se considera limitaciones de edad. Por ejemplo, un rango de edad de 3 años genera un ahorro del 43,60% con respecto a la solución del método del barrido y un ahorro del 35,26% cuando no existen restricciones de edad.

5.1.3 Escenario 3 - Otras variaciones

Se evaluaron otras dos posibilidades, donde la primera consiste en disminuir el rango de edad a 3 años y aumentar la capacidad vehicular a 20 y el otro escenario corresponde a la recolección de 300 niños con buses de capacidad de 20 (Ver *tabla 10*).

Tabla 10 Otras variaciones

DATOS	170 niños	capacidad 20 y rango de edad 3	300 niños
Mejor solución del barrido(Km)	481,34	487	1129,77
TSP(Km)	288,27	284,42	460,43
Reducción de distancia	40,11%	41,61%	59,25%

Fuente: elaboración propia

En el primer escenario se pudo ver que el rango de edad afecta negativamente el aumento de capacidad, ya que hace que se configuren rutas más complejas y con recorridos un poco más altos en el barrido, pero mayores mejoras con el modelo del TSP. Finalmente, al aumentar la cantidad de niños, muestra que entre más posibles recorridos haya, el modelo TSP tenga más posibilidades de mejorar cada ruta, generando importantes disminuciones, incluso teniendo en cuenta la restricción de edad (Ver *tabla 11*).

Tabla 11 Datos comparativos

DATOS	170 niños, cap 15 y rango 5 años	vehículo con capacidad 20	vehículo con capacidad 10	rango de edad 3 años	sin rango de edad	capacidad 20 y rango de edad 3	300 niños
Mejor solución del barrido (Km)	481,34	463,66	525,31	518,28	429,64	487	1129,77
TSP(Km)	288,27	261,51	357,62	292,09	278,13	284,42	460,43
Reducción de distancia	40,11%	43,64%	31,92%	43,60%	35,26%	41,61%	59,25%
costo de mejor solución por viaje	\$22.141,81	\$21.029,00	\$24.164,69	\$23.840,66	\$19.763,34	\$ 22.405,00	\$ 51.969,32
costo de mejor solución por viaje TSP	\$13.260,81	\$12.029,00	\$16.450,00	\$13.436,15	\$12.793,94	\$ 13.083,25	\$ 21.179,96

Fuente: elaboración propia

Finalmente, se puede concluir que, aunque la capacidad genera variaciones más grandes, la restricción de edad no solo afecta el modelo si no que afecta negativamente el aumento de capacidad, porque hace que sean necesarios recorridos más largos para completar su capacidad. También, se puede concluir que las rutas que son más restrictivas por medio del barrido tienen más posibilidades de ser mejoradas por el TSP, de igual forma, al considerar el componente social es posible encontrar respuestas satisfactorias.

6. CONCLUSIONES

- El SBRP es un tipo de ruteo que se centra principalmente en la distribución de los estudiantes dentro de la ruta escolar, permitiendo la inclusión de otros factores humanos importantes que deben ir ligados con la optimización.
- El ruteo de buses escolares permite clasificar las diferentes características que puede poseer las rutas escolares, con el fin de ayudar a identificar las constantes y demás atributos necesarios para la solución de un problema de ruteo.
- Dentro de la literatura revisada, se encuentran pocos trabajos que involucren un elemento social con un ruteo de buses escolares.
- El elemento social considerado en el problema, ayuda a tener una visión más amplia de que tan impactante pueden ser los elementos sociales y que tanto pueden llegar afectar los resultados de optimización matemática.
- Brindar dentro de las rutas escolares espacios donde puedan desarrollarse libremente sin tener temor o afán por crecer y pertenecer a un grupo social no acorde a sus principios, debe de considerarse el elemento más significativo para el buen desarrollo social y mental de las futuras generaciones.
- Con los resultados mostrados por medio de la asignación y ruteo de vehículos, que el método del barrido, como método de asignación de rutas, adaptado con sus respectivas condiciones y restricciones, encuentra buenas soluciones, exitosas por si solas, pero con altas posibilidades de mejoras, proporcionando como ventaja una aplicación con respecto a métodos más ajustados, pero computacionalmente mucho más complejos.

- Es necesario un esfuerzo computacional relativamente grande para obtener resultados detallados del proceso que realiza Matlab, pero se logra observar que esto puede ser aplicado, incluso aun a mayor escala con resultados exitosos en situaciones incluso más restrictivas.
- Utilizar métodos más complejos para la asignación de rutas, como el método de los ahorros para obtener aún mejores resultados para seguir su comportamiento con respecto a la investigación actual.
- Para futuras investigaciones se propone mejorar por medio de TSP una mayor cantidad de buenas soluciones, para encontrar su comportamiento y que tan exitoso puede ser el código sometido a diferentes cambios.
- También se recomienda, utilizar más métodos para la recolección de información, y poder evaluar diferentes factores sociales, como la seguridad percibida por los padres, seguridad del medio de transporte, las paradas y la ruta, entre otros.
- Se recomienda usar equipos con un poder de procesamiento mayor, si se planea utilizar métodos de resolución más complejos, mayores instancias y restricciones adicionales de cualquier tipo.

8. ANEXOS

Ilustración 10 Edad y cantidad de niños en cada nodo

NIÑO	EDAD	NIÑO	EDAD	NIÑO	EDAD	NIÑO	EDAD
[1]	[5]	[55 56]	[8 10]	[110]	[9]	[164]	[5]
[2]	[16]	[57]	[5]	[111]	[15]	[165]	[6]
[3 4]	[16 9]	[58]	[9]	[112]	[9]	[166]	[5]
[5]	[9]	[59 60]	[10 16]	[113 114]	[14 10]	[167]	[5]
[6]	[12]	[61]	[16]	[115]	[8]	[168]	[10]
[7]	[14]	[62 63]	[9 16]	[116]	[10]	[169]	[14]
[8]	[15]	[64 65]	[9 5]	[117 118]	[14 13]	[170]	[5]
[9]	[8]	[66]	[11]	[119]	[11]		
[10]	[6]	[67]	[8]	[120]	[14]		
[11]	[13]	[68]	[15]	[121]	[6]		
[12 13]	[6 4]	[69]	[9]	[122 123]	[15 9]		
[14]	[4]	[70]	[16]	[124]	[14]		
[15]	[15]	[71]	[5]	[125]	[4]		
[16]	[8]	[72]	[15]	[126]	[6]		
[17]	[15]	[73]	[15]	[127]	[9]		
[18]	[6]	[74]	[14]	[128]	[10]		
[19]	[14]	[75]	[10]	[129]	[8]		
[20]	[4]	[76]	[16]	[130]	[5]		
[21]	[7]	[77]	[9]	[131]	[16]		
[22]	[10]	[78 79]	[10 14]	[132]	[7]		
[23]	[10]	[80]	[13]	[133]	[7]		
[24]	[4]	[81]	[6]	[134]	[10]		
[25]	[10]	[82]	[5]	[135]	[5]		
[26]	[5]	[83]	[16]	[136 137]	[6 8]		
[27]	[7]	[84]	[8]	[138]	[6]		
[28]	[13]	[85]	[5]	[139]	[14]		
[29]	[14]	[86]	[9]	[140 141]	[13 11]		
[30]	[16]	[87 88]	[12 7]	[142]	[7]		
[31]	[14]	[89]	[4]	[143]	[13]		
[32]	[9]	[90]	[14]	[144 145]	[6 16]		
[33]	[6]	[91]	[11]	[146 147]	[10 10]		
[34]	[8]	[92]	[16]	[148]	[5]		
[35]	[8]	[93]	[8]	[149]	[7]		
[36 37]	[16 6]	[94]	[15]	[150]	[8]		
[38]	[16]	[95]	[4]	[151]	[4]		
[39]	[9]	[96]	[5]	[152]	[10]		
[40]	[9]	[97]	[16]	[153]	[13]		
[41 42 43]	[8 16 7]	[98 99]	[8 5]	[154 155]	[5 7]		
[44]	[5]	[100]	[5]	[156]	[15]		
[45 46]	[4 8]	[101]	[6]	[157]	[8]		
[47]	[16]	[102]	[11]	[158]	[6]		
[48 49 50]	[12 12]	[103]	[11]	[159]	[8]		
[51]	[8]	[104]	[4]	[160]	[14]		
[52]	[8]	[105]	[12]	[161]	[13]		
[53]	[10]	[106]	[13]	[162]	[16]		
[54]	[13]	[107 108 109]	[8 6]	[163]	[7]		

Fuente: elaboración propia

9. BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz, V. M., & Johns, E. H. (2011). Localización de paraderos de detención y diseño óptimo de rutas en el transporte de personal A location-routing approach for personnel transportation, *19*(3), 457–472.
- Ballou, R. (2004). *Decisiones sobre políticas de inventarios. Logística. Adm. la cadena Suminist.* <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Basri, Z. (2016). No Titlenppoo. *Mmum*, 2016.
- Bowerman, R. (1995). A MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION APPROACH TO URBAN SCHOOL BUS ROUTING: FORMULATION AND SOLUTION METHOD. *Pergamon Transpn. Res.-A*, *29*(2), 107–123.
- Caceres, H., Batta, R., & He, Q. (2018). AC. *Socio-Economic Planning Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.02.008>
- Chen, C., Achdari, G., Majkut, K., & Sheu, J. B. (2017). Balancing equity and cost in rural transportation management with multi-objective utility analysis and data envelopment analysis: A case of Quinte West. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *95*, 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.015>
- Cozma, I., Kukaswadia, A., Janssen, I., Craig, W., & Pickett, W. (2015). Active transportation and bullying in Canadian schoolchildren: A cross-sectional study. *BMC Public Health*, *15*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-1466-2>
- Diana, N., Sanhueza, A., Enrique, C., Níñez, O., Enrique, G., & Belmar, P. (n.d.). UN MODELO DE PROGRAMACIÓN LINEAL ENTERA MIXTA PARA EL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHICULOS EN EL TRANSPORTE ESCOLAR.
- Fügenschuh, A. (2009). Solving a school bus scheduling problem with integer programming. *European Journal of Operational Research*, *193*(3), 867–884. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.10.055>

Gandhi, M. (n.d.). Tipos de problemas que deterioran la convivencia escolar, 1–17.

Granados Forero, D. (2011). Diseño e implementación de un modelo para la asignación de rutas escolares en la cooperativa multiactiva claveriana Ltda “comulclaver.” *Profesional Proposal*, 1–122.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Jaradat, A. S., & Shatnawi, M. Q. (2017). Solving School Bus Routing Problem by Intelligent Water Drops Algorithm. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2017>.

Kim, B. I., Kim, S., & Park, J. (2012). A school bus scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 218(2), 577–585.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.035>

Los_Factores_Sociales_Que_Influyen_En_El. (n.d.).

Martínez, L. M., & Viegas, J. M. (2011). Design and deployment of an innovative school bus service in Lisbon. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.017>

Modecki, K. L., Minchin, J., Harbaugh, A. G., Guerra, N. G., & Runions, K. C. (2014). Bullying prevalence across contexts: A meta-analysis measuring cyber and traditional bullying. *Journal of Adolescent Health*, 55(5), 602–611.
<https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2014.06.007>

Moura, D., Camargo, R. S. De, Conceição, S. V, Porto, M. F., & Nunes, N. T. R. (2018). A multi-loading school bus routing problem, 101, 228–242.

No Title. (n.d.).

Park, J., & Kim, B. I. (2010). The school bus routing problem: A review. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.017>

Riera-Ledesma, J., & Salazar-González, J. J. (2012). Solving school bus routing using the multiple vehicle traveling purchaser problem: A branch-and-cut approach. *Computers and Operations Research*.

<https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.04.015>

Sampasa-Kanyinga, H., Chaput, J. P., Hamilton, H. A., & Larouche, R. (2016). School bus travel is associated with bullying victimization among Canadian male, but not female, middle and high school students. *Child Abuse and Neglect*, 58, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.chiabu.2016.06.021>

Savas, E. S. (2016). On Equity in Providing Public Services, (August). <https://doi.org/10.1287/mnsc.24.8.800>

Schittekat1, P., Sevaux2, M., & Sirensen3, K. (n.d.). A mathematical formulation for a school bus routing problem.

Sebastián, J., Rojas, A., José, I., & Jiménez, F. (n.d.). APLICACIÓN.

Larouche, R. (2018). Community Factors Related to Active Transportation. Children's Active Transportation. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811931-0.00009-0>

Farrington David P (2013). Understanding and preventing Bullying, 84(1993), 487–492. Retrieved from <http://ir.obihiro.ac.jp/dspace/handle/10322/3933>