

**SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN PARA LA NUEVA
SEDE DE UNA ACADEMIA DE MÚSICA
VALLENATA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ, A
TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN**

Jaime Ricardo López Pachón

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Decanatura de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2019**

**SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN PARA LA NUEVA
SEDE DE UNA ACADEMIA DE MÚSICA
VALLENATA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ, A
TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN**

Jaime Ricardo López Pachón

**Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Ingeniería Industrial**

**Director
Ing. Sonia Alexandra Jaimes Suárez, M.Sc.
Ingeniera Industrial**

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Decanatura de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2019**

© Únicamente se puede usar el contenido de las publicaciones para propósitos de información. No se debe copiar, enviar, recortar, transmitir o redistribuir este material para propósitos comerciales sin la autorización de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Cuando se use el material de la Escuela se debe incluir la siguiente nota “Derechos reservados a Escuela Colombiana de Ingeniería” en cualquier copia en un lugar visible. Y el material no se debe notificar sin el permiso de la Escuela.

Publicado en 2019 por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Avenida 13 No 205-59 Bogotá. Colombia
TEL: +57 – 1 668 36 00

Reconocimiento o Agradecimientos

Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de este trabajo. En primer lugar, quiero agradecer a la ingeniera Sonia Alexandra Jaimes Suárez, directora de esta tesis; quien fue la primera que creyó en este proyecto, y respaldó con todo su conocimiento y experiencia personal y profesional, el proceso de desarrollo y conclusión de esta investigación. Es un honor y orgullo para mí, haber contado con su respaldo.

En segundo lugar, agradecerle a Dios y en especial a mi hijo Matías Ricardo López Layton, quien se convirtió en mi principal motivación para desarrollar con gran satisfacción este trabajo. A toda mi familia, y en agradecimiento absoluto a mi madre Lucero Pachón y mi padre Jaime López, quienes me respaldaron y apoyaron incondicionalmente para obtener el logro que, con mucha ilusión, ganas y fe, inicié hace algunos años. También a los ingenieros Carlos Mario Socarras y Cristian David Candia, quienes aportaron su conocimiento para la ejecución de este proyecto.

Asimismo, quiero agradecer a mi casa, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, que por tantos años me abrió sus puertas y me ha visto crecer, personal y profesionalmente. A todos mis maestros, quienes aportaron su maravilloso conocimiento para mi formación; los (as) ingenieros (as): Enrique Romero Motta, Jairo Montoya, Hugo René Sarmiento, Ignacio Pérez, Angélica Sarmiento, Carlos Ruíz, Carlos Quintero, Luis Fernando Pinilla, Jairo Raúl Chacón, Liliana Tamayo, Mónica Marcela Suarez, Carlos Oramas y William Guerrero, muchas gracias.

Finalmente, mi agradecimiento para todas las directivas de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre”, una institución de enorme calidad humana y profesional; que confiaron en mi conocimiento y trabajo, con el objetivo de emprender un proyecto que aquí inicia y estoy seguro culminará con éxito absoluto.

Resumen

Este proyecto está enfocado en resolver un problema de localización de instalaciones para atender una demanda de clientes del sector musical, a través de la implementación de un modelo matemático de optimización de Cobertura Máxima con Capacidad. Se plantea determinar en qué punto de la ciudad de Bogotá (Colombia) sería óptimo localizar una nueva sede de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre”, estableciendo las posibles sedes en funcionamiento a las que deben asistir los alumnos de una determinada zona de la ciudad. Adicionalmente, se desarrolló un análisis de escenarios en donde se probaron diferentes radios de cobertura y se logró determinar los porcentajes de capacidad utilizados en las instalaciones, dependiendo del número de sedes a abrir. Finalmente, se determinó que, la localidad que en conjunto con la sede actual brinda una mayor cobertura para la atención de los estudiantes que a la fecha hacen parte de la academia, es Usaquén.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	9
1.1	PROBLEMÁTICA (JUSTIFICACIÓN)	11
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	ALCANCE Y LIMITACIONES	16
1.4	METODOLOGÍA	17
1.5	REVISIÓN ESTADO DEL ARTE	20
2	ESCENARIO INICIAL	43
2.1	MODELO BASE DE MÁXIMA COBERTURA CON CAPACIDAD	43
2.1.1	<i>FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO DE COBERTURA MÁXIMA IMPLEMENTADO</i>	45
2.1.2	<i>ASPECTOS BÁSICOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO</i>	47
2.1.3	<i>OBTENCIÓN DE DATOS</i>	50
3	RESULTADOS OBTENIDOS	56
3.1	RESULTADOS ESCENARIO INICIAL	56
3.1.1	<i>ASIGNACIÓN DE ESTUDIANTES Y CAPACIDAD UTILIZADA</i>	56
3.1.2	<i>DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESCENARIO INICIAL</i>	58
3.2	RESULTADOS PROPUESTA ESCENARIO 2	59
3.2.1	<i>RESULTADOS PRUEBAS ESCENARIO 2</i>	60
3.2.2	<i>DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESCENARIO 2</i>	62
3.3	RESULTADOS PROPUESTA ESCENARIO 3	63
3.3.1	<i>RESULTADOS PRUEBAS ESCENARIO 3</i>	64
3.3.2	<i>DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESCENARIO 3</i>	65
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
5	BIBLIOGRAFÍA	71
	ABREVIACIONES	76
	ANEXOS	77

Lista de Figuras

Figura 1 Datos de deserción estudiantil por motivos de desplazamiento a la sede principal, periodos 2013 – 2017 (Elaboración Propia).....	13
Figura 2 Encuesta “Preferencias de ubicación de los estudiantes de la Academia” (Elaboración Propia).	51
Figura 3 Encuesta “Definición de horas adicionales” (Elaboración Propia).....	52
Figura 4 Preferencias de ubicación para la nueva sede (Elaboración propia).	53
Figura 5 Demanda potencial de horas adicionales por sede de preferencia (Elaboración propia).....	53
Figura 6 Mapa de distribución de estudiantes, posibles sedes y sede actual en la ciudad de Bogotá D.C. (Elaboración Propia).....	55
Figura 7 Resultados del escenario inicial (Elaboración Propia).....	57
Figura 8 Resultados del escenario 2 (Elaboración Propia).	60
Figura 9 Resultados del escenario 2 (Elaboración Propia).	64

Lista de Tablas

Tabla 1 Academias de música vallenata oficiales, ubicadas en la ciudad de Bogotá. (RUES, 2018)	14
Tabla 2 Lista de productos del trabajo de investigación.	16
Tabla 3 Tabla Resumen de Aspectos Relevantes en la Revisión de Literatura	29
Tabla 4 Variables que definen la capacidad de una Academia	48
Tabla 5 Asociación de radios de cobertura vs tiempo de desplazamiento	49
Tabla 6 Distribución estudiantes con la apertura de una nueva sede en Usaquén.....	57
Tabla 7 Datos empleados en las pruebas del Escenario 2.	59
Tabla 8 Distribución de estudiantes por sede escenario 2	60
Tabla 9 Datos empleados en las pruebas del Escenario 3.	63
Tabla 10 Distribución de estudiantes por sede escenario 3	64
Tabla 11 Distribución prueba 1 del escenario 3	66

1 Introducción

Los problemas discretos de localización consideran localizar un cierto número de instalaciones, seleccionando la ubicación de estas a partir de un conjunto predeterminado de ubicaciones potenciales, para dar servicio a un conjunto de clientes. Las ubicaciones de las instalaciones deben seleccionarse de una manera óptima con respecto a uno o varios criterios.

Los problemas de localización de instalaciones se aplican a una gama muy amplia de situaciones y por ello son muy estudiados en el ámbito de la investigación de operaciones. El caso más simple es el problema de cobertura de conjuntos, que busca atender a todos los clientes ubicando el mínimo de instalaciones posibles que cumplan con este fin; cabe anotar que, en el problema de cobertura de conjuntos todos los clientes tienen la misma importancia. Es decir, es igualmente importante proporcionar cobertura a un cliente que genere 10 peticiones de servicio por año, que proporcionar cobertura a un cliente que genere 10,000 peticiones de servicio por año. De las dos consideraciones anteriores surge el problema de máxima cobertura.

El problema de Localización de Máxima Cobertura (**MCLP**, por sus siglas en inglés) restringe el número de plantas a localizar a un número finito de ubicaciones, maximizando la cantidad de demanda cubierta. En este modelo el grupo de plantas candidatas es el mismo que el grupo de los puntos de demanda, por lo tanto, el MCLP permite que las plantas puedan ser localizadas en cualquiera de estos puntos.

En este trabajo se pretende solucionar la problemática planteada, a través de la implementación del **Maximal Covering Problem With Capacity (CMCLP)**, seleccionando el punto de ubicación de la instalación más adecuado, que permita asignar y atender la demanda actual, partiendo de un radio de cobertura y una capacidad de atención dada. Asimismo, se parte de la base de la existencia actual de una cantidad potencial de clientes en determinados puntos de la ciudad (estudiantes activos) y de una sede con la que cuenta la academia, que atiende y cubre toda su demanda.

El modelo planteado en el trabajo considera el cómo atender la cantidad de horas mínimas contratadas por los estudiantes, y adicionalmente incluir las horas extras que éstos estarían dispuestos a tomar como consecuencia de tener la nueva sede de la academia en la ubicación de su preferencia. Así como tener en cuenta, en la medida de lo posible, la asignación de los estudiantes a una sede, según el radio de cobertura establecido.

Este trabajo se encuentra organizado en 4 capítulos. En el capítulo 1, se muestra la justificación y/o problemática del trabajo, al igual que los objetivos, alcance y limitaciones, metodología y la revisión de la literatura. En el capítulo 2 se describe la formulación del modelo propuesto CMCLP y la forma en como fueron obtenidos los datos. En el capítulo 3 se muestran y se discuten los resultados obtenidos por la implementación del modelo planteado. Finalmente, en el capítulo 4, se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado para futuras investigaciones.

1.1 Problemática (Justificación)

Durante la última década, el interés de las personas por formarse musicalmente a nivel profesional e informal ha crecido significativamente. Datos estadísticos del Ministerio de Educación muestran que, a nivel nacional, desde el año 2000 al 2016, aproximadamente 72.544 personas han mostrado interés por adquirir conocimientos musicales. Vale la pena resaltar que la educación No formal en este campo acapara la mayor cantidad de personas inscritas. Por ejemplo, a nivel profesional entre el año 2000 y 2016 se han inscrito a los programas de música a nivel profesional cerca de 545 personas, lo que representa una cantidad mínima con respecto a los programas y/o cursos no formales (MEN, 2018).

En la ciudad de Bogotá, actualmente se encuentran registradas 30 academias de música. De éstas, 2 pertenecen al género vallenato (RUES, 2018). Durante los últimos 25 años este movimiento musical ha tomado gran reconocimiento a nivel nacional e internacional, y aún más en la actualidad, ya que el vallenato ha sido declarado patrimonio cultural e inmaterial de la humanidad (BBC, 2018).

La primera institución de música vallenata creada en Colombia en el año 1991 fue la **Academia Folclórica Vallenata “Francisco El Hombre”**, una institución de educación no formal, que tiene como objetivo principal la enseñanza de los instrumentos que hacen parte del folclor vallenato. Desde su fundación, la academia ha atendido cerca de 3.500 estudiantes (Francisco El Hombre, 2018).

Actualmente la institución cuenta con una (1) sede ubicada en la zona centro de Bogotá, específicamente en la localidad de los Mártires. El hecho de encontrarse localizada en esta zona, implica una limitación en la cobertura del mercado con respecto a clientes que se encuentran ubicados en otras zonas de la ciudad de Bogotá, como por ejemplo las localidades de Usaquén, Barrios Unidos, Suba, entre

otras, y que con respecto a este sector se encuentran a una distancia considerablemente alejadas.

Es muy importante resaltar que hay clientes que han dejado de asistir a la academia por la problemática social del Bronx y su comunidad de habitantes de calle. Debido a esta situación, desde el año 2016 y hasta la fecha, la sede principal se ha visto afectada significativamente, por lo cual, las directivas de la academia decidieron inaugurar una segunda sede en la localidad de Santa Fe, aprovechando que allí actualmente se encuentra localizada una tienda para la venta de instrumentos musicales, que es de su propiedad y contaba con un espacio físico que se podía adecuar con el objetivo de atender a los clientes que prefirieron abstenerse de asistir a la sede principal por la emergencia social que, a la fecha continúa presentándose. Finalmente, debido a su localización y la baja demanda, esta sede fue cerrada al culminar el año 2017.

Datos Oficiales de la institución evidencian que desde el año 2013 al 2017, el nivel de deserción estudiantil por motivo principalmente del desplazamiento hasta la sede actual, por las largas distancias entre la localización de algunos de los estudiantes y la sede, acompañado recientemente de la inseguridad en la zona, ha crecido notablemente (ver Figura 1). Por ejemplo, Durante el año 2014, de los 80 alumnos que iniciaron el periodo, se retiraron cerca de 27 alumnos, quienes manifestaron que el motivo de su retiro se debía a las dificultades para llegar hasta la sede actual (Francisco El Hombre, 2018) (aún sin tener en cuenta la crisis social presentada en el sector que inició en el año 2016). Se debe tener en cuenta también que la ciudad de Bogotá cuenta con una población de aproximadamente 7.794.763 habitantes (DANE, 2018), tiene una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente (Bogotá, 2018) y que la movilidad en la capital del país es compleja; convirtiéndose en un factor que indudablemente influye a la hora de dirigirse a la sede actual por parte de quienes se encuentran en zonas alejadas.

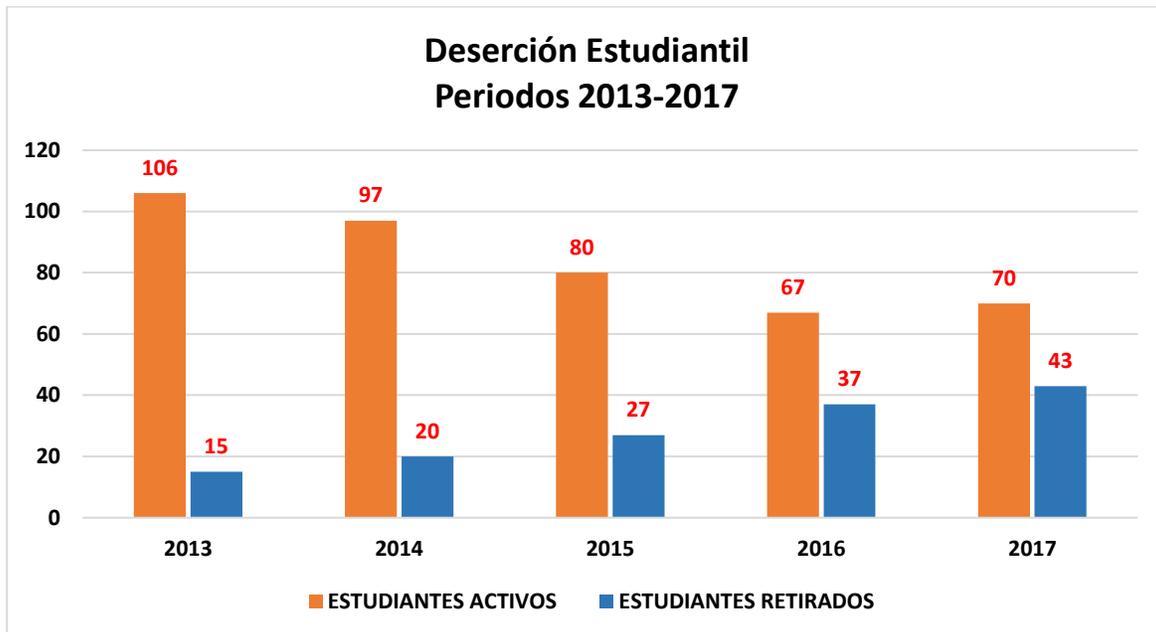


Figura 1 Datos de deserción estudiantil por motivos de desplazamiento a la sede principal, periodos 2013 – 2017
(Elaboración Propia).

Al mes de septiembre de 2018, la academia contaba con 95 estudiantes; aproximadamente 46 de ellos, provenientes de la zona norte de la capital, 12 de la zona sur, 13 de la zona oriental, 7 de la zona occidental, 15 de la zona centro y 2 de fuera de la capital. Por ejemplo, de este último grupo, 1 proviene de un municipio al norte de la capital (sopó) y 1 estudiante proviene de la zona oriental Cáqueza (Francisco El Hombre, 2018).

En Bogotá, actualmente hay registradas ante la Cámara de Comercio dos academias de música vallenata (ver Tabla 1), una de éstas se encuentra localizada en la zona occidental de la capital y la sede de la academia en cuestión se encuentra en la zona Centro. Existen otros dos establecimientos que prestan servicios similares y que no están legalmente constituidos.

Tabla 1 Academias de música vallenata oficiales, ubicadas en la ciudad de Bogotá. (RUES, 2018)

Cámara de Comercio	Matrícula	Razón Social	Organización Jurídica	Ultimo año renovado	Estado
BOGOTÁ	0002328757	ACADEMIA BOGOTA VALLENATA	ESTABLECIMIENTO DE COMERCIO	2017	ACTIVA
BOGOTÁ	0000500965	ACADEMIA FOLCLORICA VALLENATA FRANCISCO EL HOMBRE	ESTABLECIMIENTO DE COMERCIO	2018	ACTIVA

A pesar de que el nombre de la Academia es muy reconocida en el mercado, la empresa ha manifestado que otras instituciones que han venido surgiendo, se han convertido en fuertes competidores, una razón más por la cual la Academia Vallenata “Francisco El Hombre” desde hace algún tiempo y teniendo en cuenta la situación actual, se ha visto en la necesidad de plantearse como objetivo ubicar una segunda sede en la capital del país y así ampliar su radio de cobertura, fortalecer la empresa y disminuir el porcentaje de deserción de los estudiantes que por los motivos planteados anteriormente, han dejado de asistir.

1.2 Objetivos

Objetivo General:

- ✓ Determinar la ubicación de una nueva sede de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre” en la ciudad de Bogotá, a través de la implementación de un modelo matemático de optimización, que le permita a la institución atender la mayor cantidad de horas de clase y tener una mejor cobertura del mercado.

Objetivos Específicos:

1. Caracterizar y diagnosticar el proceso de selección de la ubicación de la nueva sede de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre” en la ciudad de Bogotá, identificando las variables y restricciones críticas que influyen en este proceso.
2. Evaluar los diferentes modelos y casos prácticos de localización que la literatura presenta, con el fin de validar las variables, restricciones, criterios y características que sean aplicables al modelo matemático seleccionado, para determinar la ubicación de la nueva sede de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre” en la ciudad de Bogotá.
3. Proponer un modelo matemático de optimización que represente y contemple los parámetros y factores que se involucran en la selección del sitio de ubicación para una nueva sede de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre”.
4. Implementar el modelo matemático planteado, utilizando un software de optimización comercial para problemas de optimización combinatoria.

5. Realizar un análisis de escenarios que permitan representar diferentes posibles situaciones para el caso de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre”, con el fin de analizar las alternativas con que cuenta la compañía.

1.3 Alcance y Limitaciones

El Alcance de este proyecto se encuentra enmarcado dentro de los siguientes productos:

Tabla 2 Lista de productos del trabajo de investigación.

PRODUCTO	DESCRIPCIÓN
1. Informe Final	<p>Modelo Matemático de Optimización: Modelo que permitirá a la Academia Vallenata “Francisco El Hombre”, determinar el mejor punto de ubicación para una nueva sede en la ciudad de Bogotá.</p> <p>Análisis de Escenarios: Análisis de sensibilidad para el modelo propuesto, que permita el análisis por escenarios de la situación de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre”.</p>
2. Artículo Científico	Artículo científico que contiene los hallazgos del presente trabajo.

Algunas limitaciones relevantes dentro del desarrollo del proyecto, las podemos denotar a continuación:

Este trabajo de investigación responde a una necesidad puntual de la academia, y dentro de los supuestos o condiciones que se establecieron en esta fase inicial, fue la de no incluir costos. Con la información y resultados obtenidos en este trabajo, la academia posteriormente realizará el análisis respectivo.

Las ubicaciones para las posibles nuevas sedes en cada localidad están sujetas a variación en el momento de la implementación de la solución propuesta. Para la selección de las coordenadas se tuvieron en cuenta variables como zonas comerciales de la localidad, normatividad legal vigente de ordenamiento territorial y distancias con las principales vías de acceso. Posteriormente a este estudio, se determinará el punto más adecuado para la nueva sede, dentro de la localidad seleccionada y alrededores de las coordenadas usadas.

Para el proyecto se tienen en cuenta 12 Localidades de la ciudad de Bogotá, debido a que, por consideración de las directivas de la institución y en conjunto con los encargados del desarrollo de este trabajo, son las más influyentes y representativas para poder evaluar la opción de ubicar una nueva sede.

1.4 Metodología

El proyecto representa una investigación cuantitativa de tipo exploratorio, debido a la implementación de un modelo matemático de optimización, que busca determinar el mejor punto de localización para una nueva sede de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre” en la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta elementos como:

- ✓ Demanda.
- ✓ Ubicaciones candidatas propuestas por las directivas de la Academia.

- ✓ Normatividad legal en materia de planes de ordenamiento territorial.
- ✓ Vías de acceso.
- ✓ Competencia (ubicación, cantidad de alumnos y capacidad de atención).

El proyecto se desarrolla en cuatro fases para cumplir con cada uno de los objetivos planteados:

1. En la primera fase se busca responder el primer objetivo específico; para esto se analiza el histórico del comportamiento de la demanda para esta Academia de música, tomando como base el estudio de la distribución geográfica de los alumnos activos de la institución. Igualmente se consultan fuentes primarias como son las bases de datos de la Academia y algunas secundarias como la realización y tabulación de encuestas a los alumnos activos, con el objetivo de evaluar las preferencias respecto a la posible nueva localización. Se decidió aplicar la encuesta a los estudiantes activos debido a que la competencia no es mucha, hay muy pocas academias formales de este tipo para atender el mercado. La academia quiere ampliar su capacidad para dar una mejor atención a la demanda actual y el posible potencial, es decir, se quiere apostar a que haya una nueva opción para los alumnos que tal vez por las distancias y demás temas mencionados, prefieren tomar cursos virtuales, o solicitar clases a domicilio, entre otras opciones.

Adicionalmente se tienen en cuenta los medios de transporte en los que se pueden movilizar los estudiantes de la institución y la facilidad o dificultad que tienen para desplazarse hacia las diferentes zonas de la ciudad de Bogotá; por ejemplo, en términos de accesibilidad se analizarán aspectos como:

- ✓ Vías de transporte.
- ✓ Tiempos de viaje en los horarios habilitados para las clases.

- ✓ Distancia desde el lugar de origen del estudiante hasta la Academia.
- ✓ Seguridad de la zona.
- ✓ Otros.

De los aspectos mencionados anteriormente y a través de una encuesta aplicada al total de la población estudiantil (95 alumnos activos), se logran identificar los aspectos de preferencia más relevantes de los estudiantes a la hora de elegir una nueva sede de su preferencia. En esta se observa que, para los alumnos, el factor más preponderante es “Seguridad de la Zona”, uno de los temas principales por los que actualmente la sede actual sufre una gran problemática y que influye significativamente en la decisión final de los estudiantes.

2. En la segunda fase, se busca dar respuesta el segundo objetivo específico; para esto se realizó una revisión de literatura de los modelos de toma de decisión que contienen elementos afines con la problemática a tratar, con miras a identificar cual es aquel que se adaptan al caso bajo estudio en esta investigación.
3. En la tercera fase, se busca responder el tercer objetivo específico, donde se implementa y se soluciona el modelo matemático de optimización acorde a las características, parámetros, variables y restricciones identificadas.
4. En la cuarta fase se busca responder el cuarto y quinto objetivo específico, en donde se soluciona, se valida el modelo matemático y se diseñan escenarios con variaciones en los radios de cobertura y en el número de ubicaciones a abrir, que permiten representar y evaluar diferentes posibles escenarios para el caso de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre”, con el fin de analizar las alternativas con las que cuenta la compañía.

5. Finalmente se elaboran los productos académicos resultados de este Trabajo de Grado.

1.5 Revisión Estado Del Arte

En la literatura el problema de localización de instalaciones se conoce comúnmente como un problema general de Facility Location. Este problema ha sido estudiado en la literatura bajo diferentes variantes; entre los problemas más conocidos están el problema de la p-mediana (Owen & Daskin, 1998) (Current, Daskin, & Schilling, 2001), el Problema de p-centro (Marianov & Taborga, 2001) y el Problema de Cobertura (Church & ReVelle, 1974). Son estudios de gran relevancia, que han marcado las bases de los problemas de localización de instalaciones, aplicados a situaciones en las que el servicio depende de la distancia entre el cliente y la instalación a la que está asignado.

Los problemas discretos de localización de instalaciones están relacionados con procesos de toma de decisiones estratégicas y en su mayoría consideran que se debe ubicar un cierto número de instalaciones, seleccionando la ubicación de estas a partir de un conjunto predeterminado de ubicaciones potenciales, como en el caso planteado en este trabajo; esto con el objetivo de dar servicio a un conjunto de clientes. Así lo explican (ReVelle & Eiselt, 2005) quienes muestran y resaltan algunas de las características, facetas de la formulación y análisis de los problemas de localización más relevantes.

Debido a la gran clasificación de modelos de localización-asignación y a su naturaleza multiobjetivo, la fase de modelado de estos problemas adquiere una gran dificultad para su resolución. Cada centro de demanda, representa un criterio que valora positivamente el acercamiento de la posición destinada a la ubicación de la nueva utilidad; esto ha motivado el estudio de diversas medidas que intentan optimizar la eficiencia y eficacia de estos modelos, como lo mencionan (Ramirez &

Bosque Sendra, 2001) y (Owen & Daskin, 1998), quienes explican el problema de *p-mediana* el cual busca medir la eficacia de la ubicación de una nueva instalación, mediante la determinación de la distancia media recorrida por quienes la visitan. Es importante tener en cuenta que, para este trabajo, si las distancias de viaje entre los puntos de demandas y la nueva sede aumentan, determina que la eficacia de la selección de las ubicaciones es menor. Algunas de sus características son que la única forma de asignar la demanda es a través de la cercanía con las instalaciones (ReVelle & Swain, 1970).

Se encuentra también el problema de *p-centro*, el cual que busca minimizar la distancia máxima existente entre algún nodo de demanda y el centro que la satisface. Este modelo es similar al de *p-mediana*, debido a que comparten algunas restricciones, como lo describen (Marianov & Taborga, 2001) y (Serra & Marianov, 1998). También se encuentra el modelo de *Gravitación Comercial*, que plantea las áreas de mercado como zonas geográficas de influencia de un establecimiento comercial. Un área de mercado podría abarcar, por tanto, desde un conjunto de calles de una ciudad, hasta una extensión geográfica mayor que comprendiera un conjunto de municipios.

El caso más simple es el problema de Cobertura de Conjuntos, que busca recubrir a todos los clientes ubicando el mínimo de instalaciones. Igualmente, en este tipo de problemas, se da la misma relevancia a todos los clientes, es decir, no se discrimina la cobertura por si se tiene un cliente que consume el servicio en mayor o menor magnitud. De estas consideraciones anteriores surge el problema de Cobertura Máxima (MCLP), analizado por (Berman & Krass, 2002), quienes consideran una generalización del problema de ubicación de cobertura máxima, discutiendo las áreas de aplicación potenciales para este tipo de modelo, en la ubicación de establecimientos minoristas.

En la literatura, se encuentran diferentes investigaciones y casos de aplicación del modelo MCLP. Algunas de las primeras investigaciones más relevantes fueron las realizadas por (Church & ReVelle, 1974) al igual que (Toregas, Swain, ReVelle, & Bergman, 1971) quienes proponen los primeros modelos matemáticos de problemas de cobertura, al considerar el modelado de la ubicación de las instalaciones de servicios de emergencia. También están las propuestas por (Schilling, Jayaraman, & Barkhi, 1993), en donde se distinguen dos tipos de modelos: el primero, *Location Set Covering*, que minimiza el costo de apertura de las instalaciones tal que se tenga un nivel de cobertura deseado para todos los integrantes de la demanda y el segundo que es el *Maximal Covering Problem (MCLP)* que maximiza la demanda cubierta dado un nivel de servicio. En este modelo no se realiza asignación demanda-instalación, sólo se asegura que el nodo está dentro del radio de cobertura, por lo cual, hasta el momento se ha planteado aplicar esta variante para resolver el problema en cuestión.

En este proyecto de investigación se estudió una variante del Problema de Cobertura Máxima (MCLP). *Este problema* tiene como objetivo seleccionar la ubicación de un número fijo de instalaciones para maximizar los nodos cubiertos. Un nodo cubierto tiene al menos una instalación dentro de una distancia o tiempo predeterminado, llamado "radio de cobertura". Conocidos como modelos de cobertura, estos son muy populares entre los investigadores debido a sus aplicaciones en problemas del mundo real, donde el objetivo es cubrir la demanda satisfaciendo un nivel de servicio requerido (generalmente tiempo o distancia máxima a recorrer), en muchos casos, la distancia o tiempo de respuesta entre los clientes y los puntos que prestan los servicios es decisiva para su satisfacción. El MCLP restringe el número de instalaciones a localizar a un número finito de ubicaciones, maximizando la cantidad de demanda cubierta. Se considera que una población está cubierta cuando se encuentra dentro del radio de atención de la instalación. Este tipo de problemas tiene aplicaciones tanto en el sector privado

como en el público; por ejemplo, (Buzai, 2011) realiza un análisis espacial de Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en la ciudad de Luján, Argentina, aplicando el modelo de cobertura máxima y teniendo como base la estructura espacial vectorial compuesta por puntos, arcos (líneas) y polígonos (áreas). Las líneas corresponden a las calles como vías de circulación mediante las cuales se vincularán espacialmente los puntos de oferta y demanda, y los polígonos son áreas con diversos valores poblacionales de utilidad potencial. Finalmente, al aplicar el modelo, se logra determinar la mejor ubicación para un total de 12 CAPS, considerando que cada uno de los radios censales, a través de su centroide, se presenta como sitio candidato para la localización. El resultado final presenta la configuración espacial de 12 puntos seleccionados de un total de 70, es decir, una única solución a partir de la gran cantidad de posibilidades de combinación existentes.

Las aplicaciones del MCLP se han centrado en gran medida en la ubicación de instalaciones para satisfacer la demanda de servicios del sector público, tales como la respuesta de emergencia (Schilling D. , 1980) y (Ramshani, Huang, & Li, 2018). Otros ejemplos de aplicación del MCLP son la localización de servicios médicos de emergencia o ayudas humanitarias (Ramshani, Huang, & Li, 2018) y (Maharjana & Hanaokaa, 2017), localización de antenas de telecomunicación, localización de escuelas (Gac, Martínez, & Weintraub, 2006) y (Broseghini, F., Pizzolato, N., & Nogueira, L., 2004), bibliotecas, paradas de autobuses, servicio de ambulancias (van den Berg, Kommer, & Zuzáková, 2015), estaciones de bomberos y policía (Curtin, Hayslett-McCall, & Qiu, 2007), centros de salud rurales, localización de sucursales de bancos, centros comerciales, parques, entre otras .

Por otra parte, como plantean (Farahani, Asgari, Heidari, Hosseininia, & Goh, 2011) en algunos problemas de cobertura máxima, un cliente debe ser servido por al menos una instalación dentro de una distancia crítica dada (no necesariamente la

instalación más cercana). En la mayoría de los problemas, los clientes reciben servicios por las instalaciones en función de la distancia entre el cliente y las instalaciones. En el caso de estudio de este trabajo, el ubicar determinada sede en una zona no necesariamente garantiza que ésta tenga que suplir la demanda exclusivamente de los clientes que se encuentren allí ubicados. En este proyecto, se considera un espacio discreto y se asume que todas las instalaciones ofrecen niveles de servicio similares. Además, las demandas de los nodos son deterministas.

Algunas de las investigaciones más relevantes, son por ejemplo las realizadas por (Arakaki & Lorena, 2006), quienes desarrollaron una heurística para problemas de asignación de instalaciones de servicios teniendo en cuenta restricciones y variantes del problema MCLP y p-mediana. Igualmente, (Máximo, Nascimento, & Carvalho, 2016) quienes presentan una variante a la solución de este tipo de problemas, a través de un enfoque comparativo entre el resultado de un modelo matemático de optimización MCLP y una metaheurística denominada IGAS “Búsqueda adaptativa guiada por inteligencia” que proporciona una solución más eficiente que los métodos de soluciones comúnmente encontrados en la literatura para el problema MCLP.

Por otra parte, (Drakulić, Takači, & Marić, 2016) presentan una variación del modelo MCLP, en donde la principal novedad es la introducción del radio de cobertura difuso, que radica en la naturaleza de la cobertura de los problemas de ubicación. En un modelo estándar de MCLP, denominado FMCLP, en donde las ubicaciones cercanas al radio de cobertura no tienen ningún efecto sobre la calidad de la solución. En ese planteamiento se presenta un nuevo método para calcular los grados de cobertura y una nueva condición para la asignación de una ubicación cubierta por el centro más cercano. (Berman, Krass, & Kalcsics, 2015) consideran dos problemas de localización de cobertura de una red, donde la demanda se

distribuye a lo largo de bordes; (Karatas, Razi, & Tozan, 2016) analizan y realizan una comparación entre el funcionamiento de los modelos de p-mediana y los de ubicación de cobertura máxima para asignación de sedes cuando la cobertura múltiple es requerida.

Otro ejemplo particular, es el que presentan (Bagherinejad, Bashiri, & Nikzad, 2017) quienes explican el concepto del modelo de cobertura máxima gradual cooperativo (CGMCLP), que es la integración del modelo de cobertura gradual y de cobertura cooperativa y que están fundamentados en la formulación empleada en el MCLP. Este problema tiene muchas aplicaciones en mundo real, como la ubicación de las torres de luz, las sirenas de advertencia y las torres de teléfonos celulares, así como el diseño de sistemas de respuesta de emergencia. Lo interesante es poder observar el paralelo que se puede realizar entre los parámetros más representativos en cada modelo; por ejemplo, el MCLP se ejecuta bajo el planteamiento de radios de cobertura y el CGMCLP bajo señales de frecuencia. De allí se puede concluir que, es posible integrar y generalizar las características de distintos modelos en uno solo, esto puede ayudar a los investigadores y otros profesionales a tener un modelo general que les permita obtener resultados bastante eficientes.

Asimismo, las formulaciones propuestas en los distintos estudios del problema de cobertura máxima evidentemente se asocian al caso de estudio del presente proyecto. A pesar de que el MCLP se ha aplicado en diferentes problemas del mundo real con varias modificaciones, contextos similares a los que se están tratando de resolver aquí no han sido resueltos. Por tal razón, se tendrá en cuenta el tipo de programación matemática empleado en este tipo de problemas, con el fin de utilizarlos dentro de la solución del problema propuesto. A raíz de que existen cargas de trabajo que limitan la capacidad para la prestación de los servicios, como en el caso aquí estudiado; surge el problema de **Cobertura Máxima con Capacidad** (López, 2005), que será el modelo empleado para dar solución a la

problemática planteada en este trabajo. En el *Maximal Covering Problem With Capacity* (CMCLP) el objetivo es encontrar las mejores ubicaciones para un número p de instalaciones ya conocidas, de manera que se maximice la demanda cubierta con una distancia predefinida y teniendo en cuenta la capacidad límite dada.

Como lo explican (Church & Murray, 2018), el CMCLP, busca maximizar la demanda total cubierta dentro del servicio máximo; las restricciones del modelo requieren que la demanda se asigne completamente a las instalaciones, se establecen capacidades a las instalaciones que atienden la demanda, una cantidad p de instalaciones a abrir y la inclusión de restricciones para que cada demanda sea asignada a la instalación más cercana, incluso para instalaciones equidistantes. Por ejemplo, (Andrade, Morejón, & Inga, 2016) analizan y comprueban mediante una simulación el comportamiento de redes inalámbricas de una manera interna, dentro de una vivienda u hogar inteligente, teniendo en cuenta varios parámetros o restricciones como son la distancia de cobertura, la capacidad y el porcentaje de cobertura.

(Gendreau, Laporte, & Semet, 2006) maximizan el valor esperado de la demanda utilizando un modelo matemático de optimización denominado como “Problema de relocalización de máxima cobertura esperada” (Maximal Expected Coverage Relocation Problem - MECRP). Su objetivo era diseñar una política de reubicación que permitiera asegurar una cobertura máxima de la demanda mientras se controlaba el número de relocalizaciones de servicios de ambulancias. Igualmente, (Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet, F., 2001) utilizaron un modelo de relocalización de doble cobertura para maximizar la demanda cubierta, es decir, garantizar la cobertura de la demanda al menos dos veces dentro de un radio de acción en el cual el vehículo se puede mover en un tiempo T establecido. Este modelo contiene limitaciones de cobertura y capacidad de las ubicaciones.

Por otra parte, (Guarín, Ramírez , & Villegas, 2015) consideran un problema de localización de cobertura máxima con restricciones de presupuesto para determinar la ubicación óptima de instalaciones policiales que brinden atención rápida a potenciales puntos criminales, con el objetivo de mitigar la actividad delictiva en Medellín (Colombia). Lo interesante de este estudio, es la utilización de la plataforma tecnológica de programación de Google Maps, para estimar tiempos promedio de viaje entre las unidades policiales y los puntos criminales.

Finalmente, uno de los casos reales más representativos que la literatura presenta, es el que plantean (Noridayu Mah, Sarifah Radiah, & Sayang Mohd, 2017), quienes a través de un caso real, basado en el escenario de evacuación de las víctimas por las inundaciones de sus hogares durante en la ciudad de Kuantan en el año 2013, decidieron aplicar los modelos MCLP y CMCLP para analizar atacar la problemática y analizar las diferencias en los resultados. El MCLP consistió en ubicar un número fijo de centros de socorro para cubrir el número máximo de víctimas de inundaciones en las zonas afectadas. Los resultados indicaron que el MCLP no mostró ningún problema significativo en la asignación de las víctimas de las inundaciones a los centros de socorro, ya que las instalaciones estaban fácilmente disponibles. Mientras tanto, al tener en cuenta la capacidad y por tal razón aplicar el CMCLP, se pudo observar que la capacidad limitada afecta e influye en el número de víctimas de inundaciones que pueden ser reubicadas. Igualmente, (Menezes & Domingues Pizzolato, 2014) muestran otro caso de estudio real, en donde el objetivo era contribuir con la planificación de la red de escuelas públicas en la región de Guaratiba (Rio de Janeiro, Brasil), y considerando el pronóstico de fuerte crecimiento de la población entre los años 2015 y 2020; decidieron a través de la implementación del modelo de cobertura máxima con capacidad y de la ayuda de diversos recursos informáticos para medir distancias recorridas, proponer localizar nuevas escuelas que buscan maximizar el número de estudiantes cubiertos por la

red escolar, de acuerdo con una distancia máxima dada a lo largo de la red vial, y teniendo en cuenta la capacidad de las escuelas.

Tabla 3 Tabla Resumen de Aspectos Relevantes en la Revisión de Literatura

Título	Autor	Año	Contexto Principal
Central facilities location	ReVelle, C; Swain, R	1970	La formulación presentada en este problema hace referencia al problema de ubicación de instalaciones centrales, utilizando programación lineal para realizar la ubicación óptima de éstas. La idea fundamental es la de ubicar puntos de demandas a los que estarán asignadas las poblaciones de las comunidades. Por tal razón, la función objetivo busca minimizar las distancias entre la ubicación de las poblaciones y los puntos de demanda asignados, logrando minimizar la distancia promedio de recorrido.
The Location of Emergency Service Facilities.	Toregas, R; Swain, C; ReVelle, C; Bergman, L	1971	En esta investigación se considera un problema de localización para servicios de emergencia, donde se establecen conjuntos que se componen de puntos potenciales dentro de un tiempo o distancia especificada para cada punto de demanda. La función objetivo es minimizar el número total de instalaciones a localizar para suministrar la atención requerida.
The Maximal Covering Problem.	Church, R., & Reville, C.	1974	En esta investigación se realizan algunos de los primeros estudios y análisis con respecto a los problemas de cobertura máxima. Aquí los autores plantean que la función objetivo de este tipo de modelado es el de maximizar el número de personas atendidas o cubiertas, dentro de una distancia de servicio deseada "S" por la localización de un número fijo de instalaciones.

Dynamic location modeling for public-sector facilities: A multi-criteria approach.	Schilling, D.	1980	Explica las aplicaciones del MCLP que se han centrado en gran medida en la ubicación de instalaciones para satisfacer la demanda de servicios del sector público, tales como las respuestas de emergencia.
A review of covering problems in facility location.	Schilling, D; Jayaraman, V; Barkhi, R	1993	Explican el funcionamiento de dos tipos de modelos: el primero, Location Set Covering, en donde la función objetivo minimiza el costo de apertura de las instalaciones tal que se tenga un nivel de cobertura deseado para todos los integrantes de la demanda y el segundo que es el Maximal Covering Problem (MCLP) que maximiza la demanda cubierta dado un nivel de servicio.
The p-median problem in a changing network: the case of Barcelona.	Serra, D; Marianov, V	1998	Esta investigación presenta una formulación de un modelo de ubicación discreta para abordar el problema de p-mediana bajo incertidumbre. El modelo se aplica a la ubicación de estaciones de bomberos en la ciudad de Barcelona y su función objetivo busca minimizar la distancia máxima existente entre algún nodo de demanda y el centro que la satisface.
Strategic facility location: A review	Owen & Daskin	1998	En esta investigación se realiza una revisión de algunas de los problemas de localización más empleados. Primero se explica el modelo de p-mediana en donde la función objetivo es minimizar la distancia total ponderada por la demanda entre clientes e instalaciones. A continuación, se da una explicación de los problemas de cobertura, en donde muestra que la función objetivo puede estar enfocada en minimizar el costo de la ubicación de la instalación, o en otros casos, se asume que,

			<p>si los costos c_j son iguales para todos los sitios de instalaciones potenciales j, implica un objetivo equivalente a minimizar el número de instalaciones ubicadas. Posteriormente se muestra el problema de cobertura máxima en donde la función objetivo está enfocada en maximizar la cantidad de demanda cubierta dentro del distancia de servicio aceptable "S", al ubicar un número de instalaciones "p". Después se explica el problema de p-centro en donde el objetivo es el de minimizar la distancia máxima entre cualquier nodo de demanda y su instalación más cercana. Adicionalmente, hace una explicación de los problemas dinámicos determinísticos, donde se plantea que el objetivo es la combinación de T problemas de cobertura máximos, en diferentes horizontes de tiempo. El objetivo es tomar como referencia un vector de T objetivos del período individual que no tendrán, en general, un único óptimo. El modelo asume que una vez que se abre una instalación, ésta permanece abierta para todos los períodos futuros.</p>
Optimal location of public health centers which provide free and paid services.	Marianov, V; Taborga, P	2001	La función objetivo planteada en la formulación del problema presentado en esta investigación, busca minimizar la distancia máxima existente entre algún nodo de demanda y el centro que la satisface.
Discrete Network Location Models. In: Facility Location	Current, J., Daskin, M., & Schilling, D	2001	Explican la formulación de los problemas de p-mediana, estableciendo que la función objetivo minimiza la máxima

Theory: Applications and Methods			demanda-distancia entre cada nodo de demanda y la localidad seleccionada más cercana.
A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation	Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet, F., 2001	2001	Plantean un modelo de relocalización de doble cobertura, para maximizar la demanda cubierta, es decir, garantizar la cobertura de la demanda al menos dos veces dentro de un radio de acción en el cual el vehículo (ambulancia) se puede mover en un tiempo T establecido, acompañado de restricciones de limitación de cobertura y capacidad.
The generalized maximal covering location problem	Berman, O; Krass, D	2002	Consideran una generalización del problema de ubicación de cobertura máxima que, tiene como objetivo maximizar la cobertura parcial de los clientes, y el grado de cobertura es una función escalonada no creciente de la distancia a la instalación más cercana. Adicionalmente se discuten las áreas de aplicación potenciales para este modelo generalizado para ubicar establecimientos minoristas.
Localização de escolas do ensino fundamental com modelos capacitado e não capacitado: caso de vitória/es.	Broseghini, F; Pizzolato, N; Nogueira, L	2004	Emplean una heurística Lagrangiana para resolver un problema de p-mediana, incluyendo capacidades de las escuelas. Las variables de decisión usadas corresponden a una que indica la apertura de escuelas en un sitio específico, y otra que indica a qué escuela deben ir los alumnos de cierta zona. La formulación utilizada en este problema tiene como objetivo minimizar distancia recorrida. Allí se establece con antelación cuántas escuelas se deben abrir, y no se toma en cuenta las escuelas existentes.

Location analysis: A synthesis and survey	ReVelle, C; Eiselt, H	2005	En esta investigación simplemente se destaca que dentro de la literatura, los diferentes investigadores se han centrado tanto en el desarrollo de algoritmos como en formulaciones en diversos entornos del sector privado (por ejemplo: plantas industriales, bancos, establecimientos minoristas, etc.) y el sector público (por ejemplo, localización de servicios de ambulancias, clínicas, etc.).
Propuesta Algorítmica para el problema de máxima cobertura capacitado	López, C	2005	Propone un algoritmo que permite obtener soluciones de buena calidad para el problema de localización de Máxima Cobertura Capacitado, estableciendo como parámetro base que la función objetivo para este problema, es el de maximizar la cantidad de clientes cubiertos por una (s) instalación.
A Location-Allocation Heuristic (LAH) for Facility Location Problems.	Arakaki, R; Lorena, L	2006	Desarrollaron una heurística para problemas de asignación de instalaciones de servicios teniendo en cuenta restricciones y variantes del problema MCLP y p-mediana, pero donde el objetivo es el de minimizar los costos de localización.
Modelo de Optimización lineal determinístico para la localización de colegios.	Gac, I; Martínez, F; Weintraub, A	2006	Muestran un modelo lineal en donde la función objetivo es maximizar el beneficio social, incluyendo el captado por los estudiantes a través de la calidad del servicio. El modelo decide dónde se puede localizar escuelas y la asignación de estudiantes de una zona específica a alguna de las escuelas que se encuentran en una determinada zona.
The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles	Gendreau, M. ; Laporte, G. ; Semet, F.	2006	La función objetivo del problema aquí planteado, busca maximizar el valor esperado de la demanda, utilizando un modelo matemático de optimización denominado como

			<p>problema de relocalización de máxima cobertura esperada (Maximal Expected Coverage Relocation Problem -MECRP). Su objetivo era diseñar una política de reubicación que permitiera asegurar una cobertura máxima de la demanda mientras se controlaba el número de relocalizaciones de servicios de ambulancias.</p>
<p>Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models</p>	<p>Curtin, M; Hayslett-McCall, K; Qiu, F</p>	<p>2007</p>	<p>Presentan un nuevo método para determinar la distribución espacial eficiente de las áreas de patrulla de la policía, mediante la aplicación del MCLP. Este método emplea una innovadora formulación para proporcionar soluciones óptimas alternativas para quienes toman las decisiones en la policía, y para hacer frente a la falta de métodos cuantitativos objetivos para el diseño de la zona de policía en la literatura o en la práctica. El objetivo es maximizar el número de personas afectadas asistidas, o que tienen respuesta en un rango de tiempo aceptable.</p>
<p>Covering problems in facility location: a review.</p>	<p>Farahani, RZ., Asgari, N., Heidari, N., Hosseini, M., & Goh, M.,</p>	<p>2011</p>	<p>En esta investigación se muestra un resumen de los problemas de cobertura más relevantes en la localización de instalaciones: Inicialmente se explican los modelos más básicos y relevantes en la literatura, mostrando un listado resumen de estos. De los más relevantes se puede mencionar el primer modelo matemático de problemas de cobertura, desarrollado por (Toregas, Swain, ReVelle, & Bergman, 1971), un problema de localización para servicios de emergencia, en</p>

			<p>el que la función objetivo es el de minimizar el número total de instalaciones a localizar para dar atención. Posteriormente se explica el modelo Set Covering Problem (SCP) en donde la función objetivo es minimizar el costo de la decisión de ubicación de una instalación, satisfaciendo un nivel específico de cobertura; y también se habla sobre el modelo Location Set Covering Problem, en donde el objetivo es el de minimizar la cantidad de instalaciones, atendiendo la mayor área de demanda. En conclusión, en la mayoría de los problemas de este tipo, los clientes reciben servicios en función de la distancia entre el cliente y las instalaciones.</p>
<p>Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos: análisis espacial de Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en la ciudad de Luján, Argentina</p>	<p>Buzai, Gustavo D.</p>	<p>2011</p>	<p>En esta investigación se ejemplifica la capacidad del modelo de cobertura máxima, basado en el cálculo de cobertura para la búsqueda de eficiencia y equidad espacial de los CAPS en la ciudad de Luján. Se logró establecer los sitios candidatos que pueden capturar la totalidad de la población de demanda. La función objetivo busca maximizar los valores totales de la demanda dentro de un radio de cobertura (R) prefijado para los puntos de oferta, logrando que dentro de estas superficies quede asignado la mayor cantidad de demanda.</p> <p>En este caso el modelo se puede ampliar a partir de la incorporación de una restricción de distancia, cuyo objetivo es el de maximizar los valores totales de la demanda dentro de un radio de cobertura prefijado para los puntos de oferta; lo anterior solo es posible si se considera que toda la demanda</p>

			se encuentra dentro de un radio S , mayor que el alcance del bien o servicio.
Locating Public Schools in Fast Expanding Areas: Application of the Capacitated P-Median and Maximal Covering Location Models		2014	<p>La función objetivo aquí planteada es la de maximizar la cobertura de una población dada, en relación con un conjunto dado de instalaciones comunitarias y un radio de cobertura dado, buscando asegurar que se cubra el mayor número posible de usuarios, mientras que cualquier usuario que se encuentre más allá de la distancia crítica, no está cubierto por este servicio.</p> <p>La variable de decisión es básicamente la distancia aceptable entre la ubicación del servicio y la de sus clientes. Por lo tanto, en el MCLP de este caso de estudio, el problema tiene como objetivo localizar p instalaciones de manera que hay tantos usuarios como sea posible dentro de la máxima distancia predefinida S. En algunas aplicaciones, esta distancia crítica S puede verse como un parámetro de conveniencia, en el que los valores más pequeños son más deseables. Ciertamente, la calidad de un conjunto dado de ubicaciones puede medirse por el número de estudiantes que viven más allá de la distancia máxima.</p>
On covering location problems on networks with edge demand.	Berman, O; Krass, D; Kalcsics, J	2015	Consideran dos problemas de localización de cobertura de una red donde la demanda se distribuye a lo largo de bordes. El primero es el problema de ubicación de cobertura máxima clásico, en donde la función objetivo es la de maximizar la demanda cubierta por p instalaciones. El segundo es una

			versión que los autores denominan “desagradable” en donde la cobertura debe minimizarse, sujeto a algunas restricciones de distancia entre las instalaciones.
Linear formulation for the Maximum Expected Coverage Location Model with fractional coverage	van den Berg, P; Kommer, G; Zuzáková, B	2015	Muestran un caso de localización y distribución de ambulancias. El objetivo es minimizar el tiempo de atención a pacientes, es decir, estar estratégicamente ubicados para cubrir de forma eficiente los llamados de emergencia.
Fast reaction police units in Medellín: A budget-constrained maximal homicide covering location	Guarín, Arlen; Ramírez, Andrés ; Villegas, Juan G.	2015	Los autores aquí plantear una metodología para determinar la ubicación óptima de las unidades de policía de reacción de emergencia en Medellín. El objetivo es maximizar la cobertura de los lugares de posibles homicidios. Para desarrollar y resolver el modelo MCLP aquí planteado, es fundamental identificar los lugares que representan reclamaciones potenciales a lo largo del espacio. Vale la pena resaltar que, los autores utilizan como datos para resolver el modelo el tiempo promedio de viaje entre las unidades policiales y las ubicaciones de los homicidios, a través de la herramienta Google Maps. Es decir, evitan emplear datos de distancias.

<p>New Model of Maximal Covering Location Problem with Computing and Informatics</p>	<p>Drakulić, D; Takači, A; Marić, M</p>	<p>2016</p>	<p>Presentan una variación del modelo MCLP, en donde la principal novedad es la introducción del radio de cobertura difuso, que radica en la naturaleza de la cobertura de los problemas de ubicación. En un modelo estándar de MCLP, denominado FMCLP, en donde las ubicaciones cercanas al radio de cobertura no tienen ningún efecto sobre la calidad de la solución. Aquí se presenta un nuevo método para calcular los grados de cobertura y una nueva condición para la asignación de una ubicación cubierta por el centro más cercano. La función objetivo del problema es maximizar el grado de cobertura de la ubicación i.</p>
<p>Intelligent-guided adaptive search for the maximum covering location problem.</p>	<p>Máximo, V; Nascimento, M; Carvalho, A</p>	<p>2016</p>	<p>Aquí se presenta una nueva alternativa a la solución de los problemas de cobertura máxima tradicionales, a través de la implementación de una Metaheurística denominada "Búsqueda adaptativa guiada por inteligencia (IGAS)", que proporciona una solución eficiente al problema MCLP. Los experimentos computacionales realizados por los autores muestran que las soluciones encontradas por IGAS son mejores que las soluciones obtenidas por métodos populares encontrados en la literatura.</p>
<p>A comparison of p-median and maximal coverage location models with Q-coverage requirement.</p>	<p>Karatas, M; Razi, N; Tozan, H</p>	<p>2016</p>	<p>En esta investigación se realiza una comparación entre el funcionamiento de los modelos de p-mediana y los de cobertura máxima para asignación de sedes, cuando la cobertura múltiple es requerida. Las comparaciones aquí</p>

			<p>realizadas revelan las ventajas y desventajas de seleccionar el modelo de ubicación para un determinado problema, cuando el que toma las decisiones evalúa el rendimiento con múltiples criterios. El primer modelo planteado p-mediana teniendo en cuenta un número Q de cobertura requerida, tiene como objetivo minimizar la distancia ponderada total entre las demandas y sus instalaciones más cercanas. El segundo modelo analizado para realizar la comparación es el MCLP, en donde la función objetivo es maximizar el número total ponderado de demandas cubiertas.</p>
<p>Cobertura máxima de redes de sensores inalámbricos para un sistema de gestión de energía en hogares inteligentes</p>	<p>Andrade, Paúl Alexander; Morejón, Jose Luis; Inga, Esteban Mauricio</p>	<p>2016</p>	<p>En este caso de estudio, se describe la infraestructura de redes inteligentes y se plantea un modelo matemático para minimizar la distancia de los sensores a los puntos de acceso dentro del área considerada. Además, se realiza un enfoque en el diseño de estas redes inteligentes, donde se realiza una optimización de los diferentes puntos factibles, con lo que se logra una máxima cobertura de los sensores para implementar un adecuado sistema de gestión de energía en hogares inteligentes, basado en un servicio fiable de la conectividad de la red. Se tuvo en cuenta principalmente:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Radios de cobertura de los sensores para cubrir un determinado acceso.

			<ul style="list-style-type: none"> - La capacidad de los puntos de acceso, es decir, la cantidad de sensores que será capaz de atender cada punto de acceso simultáneamente.
Warehouse location determination for humanitarian relief distribution in Nepal	Maharjana, R; Hanaokaa, S	2017	Este estudio determina la cantidad de ubicaciones óptimas de los almacenes que se abrirán en diferentes partes de Nepal para una cadena de socorro humanitario que respondería a desastres de aparición repentina. El estudio utiliza una versión modificada del problema de ubicación de cobertura máxima que introduce restricciones adicionales que reflejan el escenario real de Nepal. Se eligen tres escenarios según la distancia de cobertura. Los resultados muestran el número y las ubicaciones espaciales de los almacenes para cada escenario, así como sus coberturas máximas y mínimas. El objetivo es maximizar la cantidad de personas atendidas por la emergencia, gracias a la adecuada ubicación de los diferentes centros de atención.
General form of a cooperative gradual maximal covering location problem	Bagherinejad, Jafar; Bashiri, Mahdi ; Nikzad, Hamideh	2017	Se da una explicación del modelo de cobertura máxima gradual cooperativo (CGMCLP), que es la integración del modelo de cobertura gradual y de cobertura cooperativa, que están fundamentados en la formulación empleada en el MCLP, y tiene el mismo objetivo de maximizar la atención de la demanda, dentro de un radio de cobertura determinado.

<p>Capacitated Maximal Covering Location Allocation Problem During Flood Disaster</p>	<p>Noridayu Mah, Hashim; Sarifah Radiah, Shariff; Sayang Mohd, Deni</p>	<p>2017</p>	<p>En este caso de estudio los autores aplican los modelos MCLP y CMCLP para analizar las diferencias dentro de un contexto de emergencia por inundaciones. El MCLP consistió en ubicar un número fijo de centros de socorro para cubrir el número máximo de víctimas de inundaciones en las zonas de demanda. Los resultados indicaron que el MCLP no mostró ningún problema significativo en la asignación de las víctimas de las inundaciones a los centros de socorro, ya que las instalaciones están fácilmente disponibles. Mientras tanto, al tener en cuenta la capacidad y por tal razón aplicar el CMCLP, se pudo observar que la capacidad limitada puede afectar el número de víctimas de inundaciones que pueden ser reubicadas.</p>
<p>Cooperative maximal covering models for humanitarian relief chain management</p>	<p>Ramshani, M; Huang, Y; Li, X</p>	<p>2018</p>	<p>Esta investigación examina la estructura general de la logística de la cadena de socorro humanitario y se centra en desarrollar un modelo de cobertura cooperativa máxima, con consideraciones presupuestarias con el objetivo de maximizar los beneficios para atender la población afectada en regiones desastrosas.</p>
<p>Location Covering Models: History, Applications and Advancements</p>	<p>Church, Richard L.; Murray, Alan</p>	<p>2018</p>	<p>En este libro, los autores realizan una explicación de las características más representativas que contiene el modelo de cobertura máxima con capacidad y detallan los siguientes aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La función objetivo es maximizar la demanda total cubierta dentro de un nivel de servicio.

			<ul style="list-style-type: none">- Las restricciones del modelo requieren que la demanda se asigne completamente a las instalaciones.- Se deben establecer capacidades a las instalaciones que atienden la demanda.- Se debe definir la cantidad p de instalaciones a abrir.- Se debe incluir restricciones para que cada demanda sea asignada a la instalación más cercana, incluso para instalaciones equidistantes.
--	--	--	---

2 ESCENARIO INICIAL

2.1 MODELO BASE DE MÁXIMA COBERTURA CON CAPACIDAD

El problema de localización de máxima cobertura con capacidad considera la siguiente situación (López, 2005): Sea $I = \{1, \dots, m\}$ el conjunto de índices de ubicaciones potenciales para localizar instalaciones (centros de servicio), y $J = \{1, \dots, n\}$ el conjunto de índices para los clientes. Para cada cliente $j \in J$ se especifica una cierta demanda del servicio h_j , y para cada par $i \in I, j \in J$ se especifica una distancia d_{ij} . Se requiere determinar cuál es la máxima cobertura de la demanda, dado un radio de cobertura δ , seleccionando como máximo p instalaciones (p es un valor dado). Se consideran las siguientes variables de decisión para formular el problema de máxima cobertura capacitado, teniendo una capacidad b_i de cada instalación $i \in I$:

✓ **Parámetros a Utilizar:**

$h_j =$ Demanda de servicio del cliente j .

$d_{i,j} =$ Distancia entre los clientes j y las instalaciones i

$\delta =$ Radio de cobertura.

$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el cliente } j \in J \text{ puede ser cubierto por una instalación ubicada en el nodo } i \in I \text{ (i. e. } d_{ij} \leq \delta) \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$

$b_i =$ Capacidad de la instalación i .

$p =$ Máximo número de instalaciones que atienden a clientes.

✓ **Variables De Decisión:**

$$x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{si el cliente } j \in \text{ está cubierto por una instalación ubicada en el nodo } i \in I \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$$y_i \begin{cases} 1 & \text{si se selecciona una instalación en la ubicación } i \in I \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

✓ **Función Objetivo:**

$$\text{Maximizar } Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_{ij} * h_j * x_{ij} \quad (1)$$

La Función Objetivo (1) busca maximizar la demanda atendida de todas las instalaciones dentro de una distancia específica entre las instalaciones y los clientes que demandan el servicio.

✓ **Restricciones:**

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

Restricción Asignación de Clientes (2): Esta restricción asegura que cada cliente sea asignado a una sola instalación.

$$\sum_{j \in J} a_{ij} h_{ij} x_{ij} \leq b_i y_i \quad \forall i \in I \quad (3)$$

Restricción Capacidad de Instalaciones (3): Garantiza que se respete la capacidad de las instalaciones seleccionadas y, además, prohíben la asignación de clientes a centros cerrados.

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (4)$$

Restricción Selección de Instalaciones (4): Permite seleccionar a lo más p instalaciones.

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall i \in I \quad (5)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (6)$$

Restricciones de NO Negatividad (Ecuación 5 y 6)

2.1.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO DE COBERTURA MÁXIMA IMPLEMENTADO

✓ **Parámetros a Utilizar:**

h_{al} = Demanda de horas de clase mensuales por cada alumno, $al \in$ Alumnos.

$h_{al,u}$ = Horas adicionales de clase por cada alumno al en la academia u .

Radio = Cobertura de cada Academia expresada en Kilometros.

$dist_{al,u}$ = Distancia en kilometros entre el alumno al y la academia u .

$$ar_{al,u} \begin{cases} 1 & \text{si el alumno } al \in \text{ Alumnos se encuentra dentro del radio de cobertura de la academia } u \in \text{ Ubicaciones} \\ & dist_{al,u} \leq \text{Radio} \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

p = Máximo número de academias que atenderan alumnos.

b_u = Capacidad en horas mensuales disponibles en la academia u .

✓ **Variables de Decisión:**

$$x_{al,u} \begin{cases} 1 & \text{si el alumno } al \in \text{ Alumnos, es atendido por la academia } u \in \text{ Ubicaciones} \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$$y_u \begin{cases} 1 & \text{si se abre la academia } u \in \text{ Ubicaciones} \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

✓ **Función Objetivo:**

La Función Objetivo (Ecuación 9) busca maximizar la demanda atendida de todas las sedes de la Academia dentro de una distancia específica entre las Academias y la localidad en donde residen los estudiantes. Esta función consta de dos partes: La primera (7) permite conocer el número total de horas que demandarán los alumnos asignados a las academias que estén dentro de su radio de cobertura. Para el escenario inicial, este valor será un valor conocido y no tendrá impacto en la función objetivo; sin embargo, para los demás escenarios propuestos en los que no se garantiza la asignación de todos los alumnos a las academias posibles, éste será un valor que el modelo buscará maximizar. Adicionalmente la segunda parte de la función objetivo (8) busca maximizar el número de horas adicionales que los alumnos están dispuestos a tomar como consecuencia de tener la nueva sede de la Academia en la ubicación de su preferencia.

$$Asignados = \sum_{al \in Alumnos} \sum_{u \in Ubica(al)} ar_{al,u} * h_{al} * X_{al,u} \quad (7)$$

$$HoraAdicional = \sum_{al \in Alumnos} \sum_{u \in Ubica(al)} h_{al,u} * X_{al,u} \quad (8)$$

Maximizar (Asignados + HoraAdicional)

$$Max: Z = \sum_{al \in Alumnos} \sum_{u \in Ubica(al)} ar_{al,u} * h_{al} * X_{al,u} + \sum_{al \in Alumnos} \sum_{u \in Ubica(al)} h_{al,u} * X_{al,u}$$

(9)

✓ **Restricciones:**

Con respecto a las restricciones, las variaciones con respecto a la formulación principal son:

$$\sum_{u \in Ubica(al)} x_{al,u} = 1 \quad \forall al \in Alumnos \quad (10)$$

Restricción Cobertura de los Clientes (Ecuación 10): Garantiza que todos los alumnos sean cubiertos por una sola sede de la Academia, es decir, cada alumno debe ser atendido exclusivamente por un punto.

$$\sum_{al \in Alum(u)} ar_{al,u} * h_{al} * x_{al,u} \leq b_u * Y_u \quad \forall u \in Ubicaciones \quad (11)$$

Restricción Capacidad de la Instalación (Ecuación 11): Garantiza que se respeta la capacidad de horas que ofrece la academia y prohíbe la asignación a Academias cerradas.

$$\sum_{u \in Ubicaciones} Y_u \leq p \quad (12)$$

Restricción Selección de Instalaciones (Ecuación 12): Garantiza que únicamente se de apertura a un número P definido de instalaciones posibles.

$$Y_{Martires} = 1 \quad (13)$$

Restricción de Condicionalidad de Sedes (Ecuación 13): Se garantiza que la sede de la Academia actual, que se encuentra ubicada en la localidad de los Mártires esté disponible para atender a los alumnos que no están dentro del radio de cobertura.

$$x_{al,u} \in \{0,1\} \quad \forall al \in Alumnos, \forall u \in Ubicaciones \quad (14)$$

$$y_u \in \{0,1\} \quad \forall u \in Ubicaciones \quad (15)$$

Restricción de NO Negatividad (Ecuaciones 14 y 15)

2.1.2 ASPECTOS BÁSICOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo propuesto se implementó en el software IBM CPLEX Optimization Studio 12.8. La programación del modelo de optimización CPLEX, se detalla en el anexo 1 de este trabajo.

Según los parámetros establecidos para solucionar el modelo, vale la pena resaltar los siguientes aspectos:

- ✓ Se define la capacidad de cada sede de la Academia de la siguiente forma:

Tabla 4 Variables que definen la capacidad de una Academia

HORAS AL DÍA DISPONIBLES	# SALONES DISPONIBLES	# SEMANAS / MES	# DÍAS TRABAJADOS	# ALUMNOS / SALÓN	TOTAL, CAPACIDAD (HORAS)
8	3	4	6	3	1728

- ✓ La cantidad de horas mínimas de clase que toma cada alumno es de 8 horas.
- ✓ Como resultado de las encuestas y teniendo en cuenta el punto de vista de los alumnos, los radios de cobertura fueron determinados a partir de: Ubicación de residencia del alumno vs. Tiempo de desplazamiento a las sedes propuestas, utilizando Google Maps en los horarios de funcionamiento de la institución y bajo el supuesto de que la mayoría los estudiantes se desplazan en transporte público.
- ✓ El radio de cobertura en cada una de las pruebas varía en tres rangos diferentes, equivalentes a la cantidad de minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá
- ✓ Los radios de cobertura seleccionados para realizar cada una de las pruebas y corridas del modelo, varía en tres valores diferentes: 8km, 10km y 15 km, que son equivalentes en promedio a la cantidad máxima de minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá que los estudiantes estarían dispuestos a tomar para desplazarse desde su punto de ubicación hasta las posibles sedes de la academia. Las horas picos seleccionadas y analizadas en la herramienta

“Google Maps”, corresponden a horarios entre las 4:00 p.m. y las 7:00 p.m. los días lunes y viernes, y entre las 8:00 a.m. y las 3:00 p.m. los días sábado.

Tabla 5 Asociación de radios de cobertura vs tiempo de desplazamiento

RADIOS DE COBERTURA (km)
8 km (Corresponden a 45 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)
10 km (Corresponden a 55 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)
15 km (Corresponden a 68 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)

- ✓ La selección de localidades fue determinada a partir de la ubicación de los alumnos actuales y en conjunto con las directivas de la Academia Vallenata “Francisco el Hombre” según sus preferencias.
- ✓ El trabajo es realizado con el total de la población estudiantil actual con el que cuenta la Academia (95 estudiantes), con lo que se logró definir los aspectos de preferencia más relevantes para elegir una nueva sede, como, por ejemplo: Seguridad de la zona y cercanía a su lugar de residencia o trabajo.
- ✓ Para el análisis del escenario principal, las directivas de la Academia determinaron que la sede actual (Mártires) debe permanecer abierta, no es una opción cerrarla y se quiere evaluar de todas las opciones de sedes, cuál es la que tiene (si se abre) un mayor impacto en la función objetivo planteada.
- ✓ Un elemento clave para la ejecución del modelo, es el número de horas adicionales de clase que el estudiante tomaría con respecto a su plan regular, en una nueva sede de su preferencia y que varía entre 2 y 8 horas.

2.1.3 OBTENCIÓN DE DATOS

El siguiente fue el proceso de obtención de datos para la implementación y ejecución del modelo:

- ✓ En primera instancia se aplicaron dos encuestas a un total de 95 estudiantes, que son el total de la población de alumnos con los que cuenta la Academia actualmente, y que nos permitieron observar algunas de sus preferencias con respecto a la posible apertura de una nueva sede de la Academia en la ciudad de Bogotá. En éstas, ellos eligieron la localidad de su preferencia y adicionalmente especificaron qué cantidad de horas adicionales estarían dispuestos a tomar si la ubicación de la nueva sede fuese la que ellos desearían (Ver figuras 2 y 3).
- ✓ Adicionalmente la encuesta de la figura 2 permitió observar, conocer y concluir que, para los estudiantes la “Seguridad de la Zona”, es un factor de total importancia y que está asociado evidentemente a su decisión de seleccionar el nuevo punto de ubicación de su preferencia para la nueva la sede de la Academia, es decir, al decidir una determinada localidad, el estudiante está pensando conjuntamente en su seguridad.

ENCUESTA
ACADEMIA VALLENATA "FRANCISCO EL HOMBRE"

Señor encuestado, tenga en cuenta que la siguiente encuesta es anónima, por tal razón no está obligado a escribir su nombre.

Edad:
Instrumento:
Nivel:
Localidad de Residencia:
Medio de Transporte Que Emplea:

Con el objetivo de conocer cuál es la importancia que usted le daría a cada una de las características descritas a continuación, a la hora de tomar la decisión de asistir a una posible nueva sede de nuestra institución en la ciudad de Bogotá; por favor califique de 1 a 5 (siendo 1 lo menos importante y 5 lo más importante) las siguientes opciones:

OPCIÓN	
Vías de Acceso Cercanas	
Transporte Público de Fácil Acceso	
Sitios de Comidas Cercanas	
Horarios de Atención Diurnas	
Horarios de Atención Nocturnas	
Horarios de Atención Diurnas y Nocturnas	
Parqueadero Cercano	
Seguridad de la Zona de Ubicación	
Salas de Ensayo Internas	
Cafetería Interna	
Tienda Musical	
Otro (Mencione cuál y califíquelo):	

A continuación, seleccione marcando con una X la opción que indica la Zona y/o Localidad de la ciudad de Bogotá en la que le gustaría que estuviese ubicada una sede de la Academia (por favor, solo marque una opción):

ZONA / LOCALIDAD	
Localidad de Usaquén	
Localidad de Engativá	
Localidad de Fontibón	
Localidad de Kennedy	
Localidad de Chapinero	
Localidad de Barrios Unidos	
Localidad de Bosa	
Localidad Rafael Uribe	
Localidad de Suba	
Localidad de Teusaquillo	
Localidad de Puente Aranda	



En la Academia ValLENATA "Francisco El Hombre" nuestro compromiso es el adecuado manejo de los datos personales; información que los estudiantes nos han entregado libremente. Desde todos los procesos, velamos por la confidencialidad de los datos, por contar con las herramientas tecnológicas idóneas para su almacenamiento y el buen uso de estos en función de darle la asesoría y el acompañamiento que nuestros estudiantes necesitan.

De acuerdo con lo anterior, y como responsables del uso de la información de nuestros clientes, damos cumplimiento a la Ley 1581 de 2012 de Protección de Datos Personales.

Figura 2 Encuesta "Preferencias de ubicación de los estudiantes de la Academia" (Elaboración Propia).

ENCUESTA
ACADEMIA VALLENATA "FRANCISCO EL HOMBRE"

Señor encuestado, tenga en cuenta que la siguiente encuesta es anónima, por tal razón no está obligado a escribir su nombre.

Edad:
Instrumento:
Nivel:
Localidad y Dirección de Residencia:
Medio de Transporte Que Emplea:

Con el objetivo de conocer la importancia que para usted representa que una nueva sede de la academia sea ubicada en la localidad de su preferencia, indique si esto lo incentivaría a tomar o no horas adicionales y especifique cuántas:

¿Tomaría Horas Adicionales?

SI

Indique la cantidad de horas mensuales seleccionando con una X alguna de las siguientes opciones:

<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/> 8
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

(Recuerde que la cantidad mínima de horas fijas que usted toma en su curso es de 8 horas mensuales)

NO

¿Por Qué?:

En la Academia Vallenata "Francisco El Hombre" nuestro compromiso es el adecuado manejo de los datos personales, información que los estudiantes nos han entregado libremente. Desde todos los procesos, velamos por la confidencialidad de los datos, por contar con las herramientas tecnológicas idóneas para su almacenamiento y el buen uso de estos en función de darle la asesoría y el acompañamiento que nuestros estudiantes necesitan.

De acuerdo con lo anterior, y como responsables del uso de la información de nuestros clientes, damos cumplimiento a la Ley 1581 de 2012 de Protección de Datos Personales.

Figura 3 Encuesta "Definición de horas adicionales" (Elaboración Propia)

A continuación, en las figuras 4 y 5 se muestran los resultados obtenidos:

- ✓ La figura 4 muestra la cantidad de estudiantes que, seleccionaron la localidad de su preferencia en donde les gustaría que estuviese ubicada una nueva sede de la Academia, y el porcentaje respectivo del total de la muestra empleada.

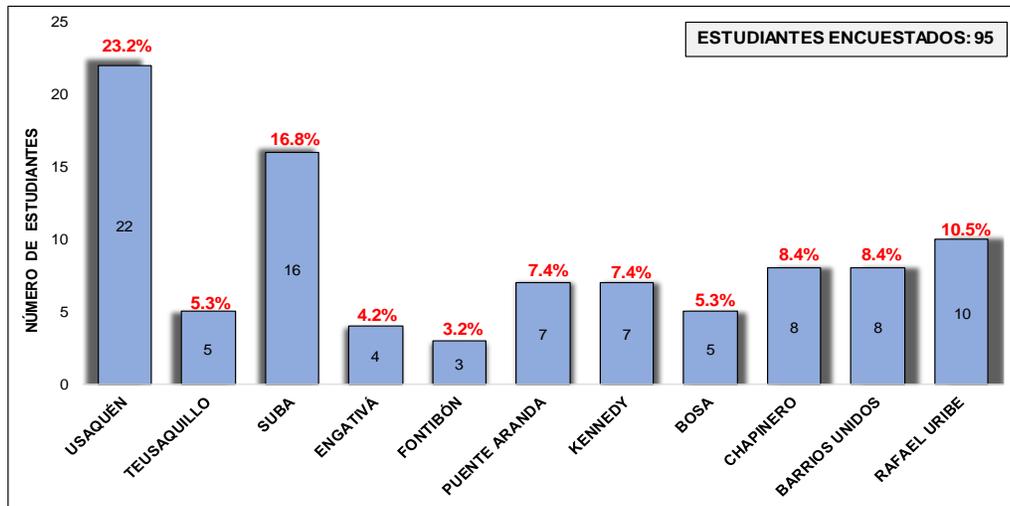


Figura 4 Preferencias de ubicación para la nueva sede (Elaboración propia).

- ✓ La figura 5 muestra la cantidad de horas adicionales que, los estudiantes estarían dispuestos a tomar si la nueva sede de la Academia fuera ubicada en el lugar de su preferencia.

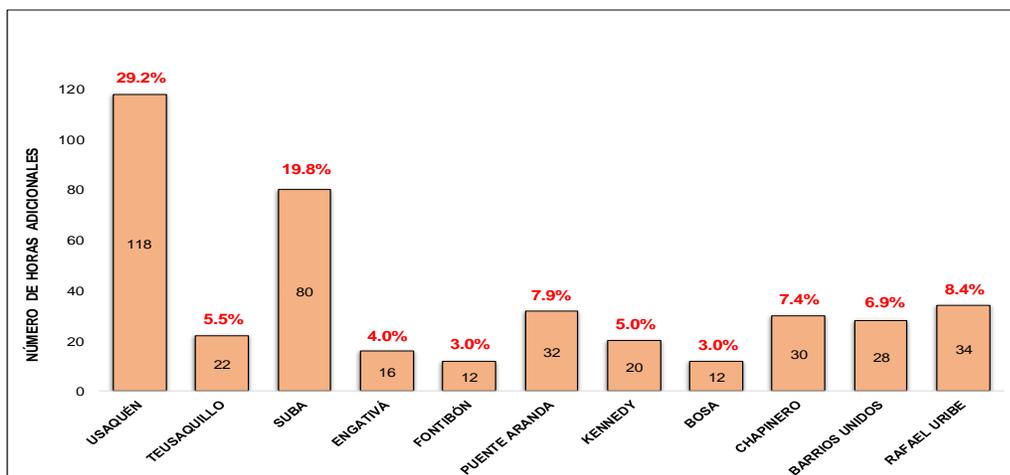


Figura 5 Demanda potencial de horas adicionales por sede de preferencia (Elaboración propia).

- ✓ Adicionalmente con la ayuda de profesores de la decanatura de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se definieron las distancias lineales y las distancias de la red de vías principales de los posibles puntos de ubicación en cada una de las localidades seleccionadas y los lugares de ubicación de cada uno de los alumnos encuestados, utilizando el software TransCAD y Google Maps. Es importante aclarar que el modelo a implementar se ejecuta bajo el cálculo de las distancias de la red de vías principales; el detalle de la matriz se encuentra en el anexo 2 de este trabajo. A continuación, se muestra el mapa de distribución de las ubicaciones actuales de los estudiantes, de las posibles sedes y de la sede actual en la ciudad de Bogotá D.C:

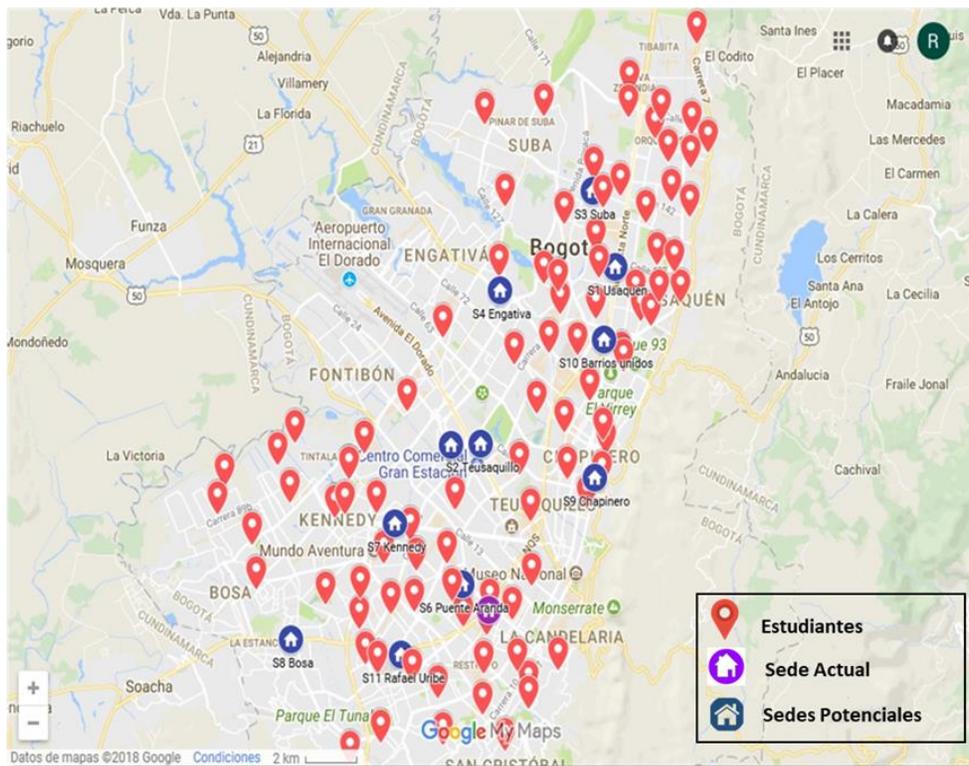


Figura 6 Mapa de distribución de estudiantes, posibles sedes y sede actual en la ciudad de Bogotá D.C. (Elaboración Propia).

3 RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 RESULTADOS ESCENARIO INICIAL

Para el escenario inicial, se definió un radio de cobertura de 8 kilómetros, y una cantidad de 2 (dos) sedes para dar apertura (P), teniendo en cuenta que la sede de la localidad de “**MÁRTIRES**” (sede actual) debe como obligación abrirse. Este escenario también se probó con un radio de cobertura de 10 y 15 km, pero el resultado final no varió. Dado lo anterior, la implementación del modelo arroja los siguientes resultados:

- ✓ El resultado muestra que la localidad seleccionada para ubicar una nueva sede de la Academia es “**USAQUÉN**”. El total de horas demandas es de 760 horas, que es el resultado de la ubicación de los 95 alumnos multiplicado por las 8 horas básicas que toman en su programa de estudio, al ser estudiantes activos de la Academia, y se obtienen 118 horas adicionales por abrir la nueva sede en esta localidad; estas horas corresponden al tiempo que los alumnos tomarían adicionalmente por si la ubicación de la nueva sede fuese en el lugar de su preferencia.
- ✓ La suma de las 760 horas que es un valor conocido para este escenario, más las 118 horas adicionales, permiten a la academia conocer el total de horas que se demandarán para atender a los alumnos, que serán en total 878 horas.

3.1.1 ASIGNACIÓN DE ESTUDIANTES Y CAPACIDAD UTILIZADA

El porcentaje de asignación de estudiantes a cada sede y la capacidad utilizada en cada una se detalla a continuación:

Tabla 6 Distribución estudiantes con la apertura de una nueva sede en Usaquén

SEDE	% ESTUDIANTES ATENDIDOS EN LA SEDE	% CAPACIDAD UTILIZADA DE LA SEDE
MÁRTIRES	78.90%	34.72%
USAQUEN	21.10%	16.10%

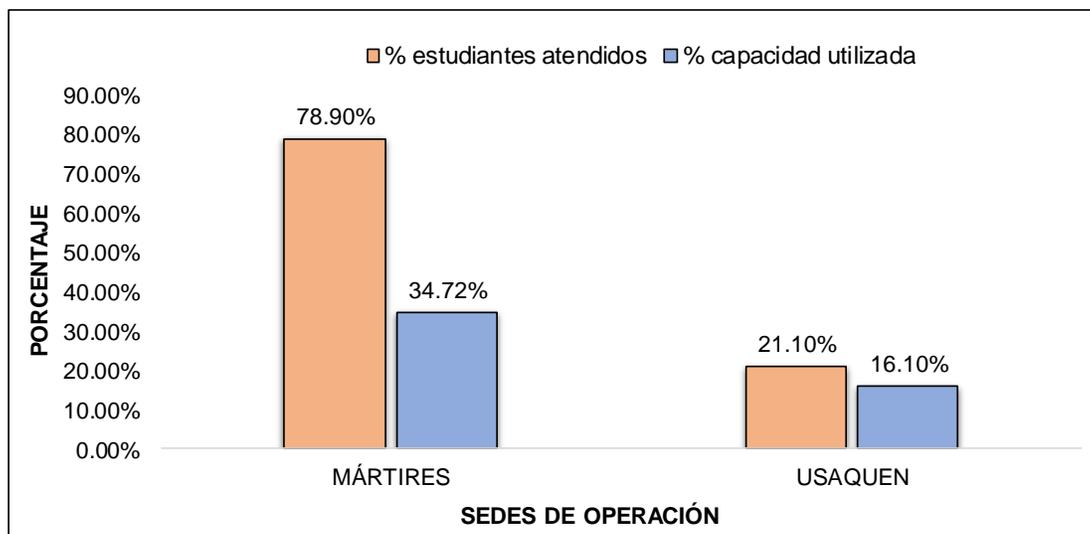


Figura 7 Resultados del escenario inicial (Elaboración Propia).

- ✓ Se puede observar que de la población total (95 estudiantes activos), la nueva sede ubicada en la localidad de Usaquén atendería el 21,1%, es decir, 20 estudiantes. La sede actual Mártires, continuaría recibiendo la mayoría de los alumnos, con un 78,9%, que corresponde a 75 estudiantes.
- ✓ En cuanto a la capacidad utilizada, se puede observar que la sede Mártires utilizará solo el 34,72% de la capacidad total, es decir, emplearía 600 horas del total de 1728 horas disponibles para trabajar. La nueva sede ubicada en la localidad de Usaquén utilizaría solo el 16,1% de su capacidad, lo que representan 278 horas mensuales trabajadas incluyendo las 118 horas adicionales por la preferencia de los estudiantes al asistir a este nuevo punto.

3.1.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESCENARIO INICIAL

Teniendo en cuenta la distribución de los estudiantes actuales, sus preferencias de ubicación y la capacidad utilizada de las sedes candidatas; el escenario inicial, en donde se decide mantener abierta la sede actual ubicada en la localidad de Mártires y se opta por abrir una nueva sede en la localidad de Usaquén; es la respuesta al objetivo actual de las directivas de la Academia. A pesar de que, con el funcionamiento de esta nueva sede, la capacidad utilizada sea del 16.1%; tener una utilización de la nueva sede baja no necesariamente es algo negativo, ya que se espera que la apertura de una nueva sede atraiga nuevos clientes (alumnos potenciales de otros sectores de la ciudad, estudiantes inactivos, entre otros), y que sumados a la población actual incrementaría la capacidad utilizada. La Academia tendría una nueva y mayor posibilidad para seguir cubriendo parte de la totalidad de los alumnos actuales (21.1% de los 95 activos), y de generar que los estudiantes que tienen como preferencia esta nueva sede, tomen más horas adicionales.

Aun cuando la utilización de la capacidad instalada de mártires sea baja (34,72%), para las directivas de la academia, es importante poder mantener el número de alumnos actuales y poder ofrecer alternativas de tener un mayor ingreso por horas adicionales en una nueva sede, y reducir el número de deserciones de alumnos, que en el pasado se ha identificado que ha venido en aumento por motivos de distancia e inseguridad; y como se evidenció en la problemática planteada en este trabajo (figura 1), se pudo observar que, en el año 2013 el nivel de deserción fue del 14,5% y en el año 2017 del 61,43% del total de la población estudiantil que existía en cada año respectivamente.

Es importante mencionar que los 95 estudiantes que a la fecha de la realización de este trabajo representan el 100% de la población estudiantil (activos), en promedio están utilizando el 50,82% de la capacidad total de la sede actual mártires, y se

aclara de esta forma, puesto que durante las semanas, no todos los días se está empleando al máximo la capacidad de la instalación, a excepción por ejemplo de los días sábados, en donde la academia sí ocupa el total su capacidad, por la gran demanda de horas de clase que existe en este día.

3.2 RESULTADOS PROPUESTA ESCENARIO 2

- ✓ En este escenario se realizaron 3 pruebas. Se decidió que la actual ubicación de la localidad de Mártires no esté habilitada y sólo se puede abrir una sede de las ubicaciones disponibles. Esta decisión se tomó en consenso con las directivas de la Academia, teniendo como alternativa únicamente evaluar la opción de cambiar la sede actual y observar cual sería el resultado final.

El radio de cobertura en cada una de las pruebas varía en tres rangos diferentes, equivalentes a la cantidad de minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá (ver tabla 7). Se realiza una modificación al modelo en la restricción (10) en la que no se garantiza la asignación de cada alumno a una sede, ya que los alumnos que estén a más de la cantidad de kilómetros de distancia (definidos en cada prueba) de la sede seleccionada no podrán ser asignados. Veamos:

Tabla 7 Datos empleados en las pruebas del Escenario 2.

PRUEBA	RADIO (KM)	CANTIDAD MÁXIMA DE SEDES A ABRIR (P)
1	8 km (Corresponden a 45 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)	1
2	10 km (Corresponden a 55 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)	1
3	15 km (Corresponden a 68 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)	1

- ✓ **Restricción Cobertura de los Clientes (Ecuación 16):** Permite que el alumno sea atendido o no, en una Academia.

$$\sum_{u \in Ubica(al)} x_{al,u} \leq 1 \quad \forall al \in Alumnos \quad (16)$$

3.2.1 RESULTADOS PRUEBAS ESCENARIO 2

El porcentaje de asignación de estudiantes a cada sede y la capacidad utilizada en cada una se detalla a continuación:

Tabla 8 Distribución de estudiantes por sede escenario 2

PRUEBA	MÁXIMO DE SEDES A ABRIR	RADIO DE COBERTURA (KM)	SEDE ABIERTA	% ESTUDIANTES ATENDIDOS EN LA SEDE	% CAPACIDAD UTILIZADA DE LA SEDE
1	1	8	USAQUÉN	52.63%	30.00%
2	1	10	USAQUÉN	56.84%	31.80%
3	1	15	TEUSAQUILLO	93.68%	42.50%

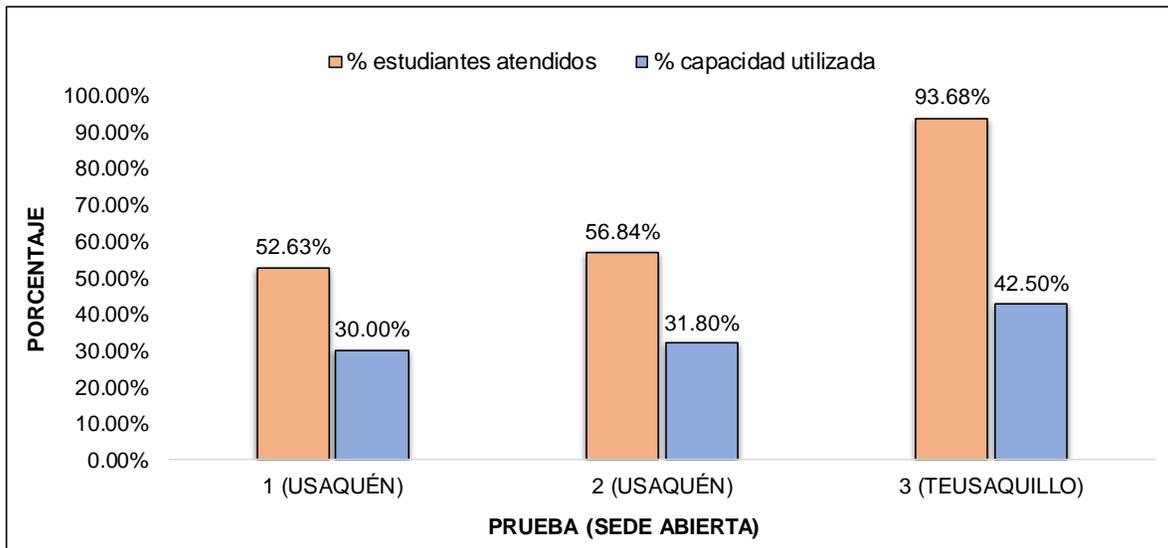


Figura 8 Resultados del escenario 2 (Elaboración Propia).

De este escenario de pruebas podemos observar que:

- ✓ En la prueba 1 y 2, se decide abrir la nueva sede en la localidad de **USAQUÉN**, pero se evidencian en los dos casos una reducción en la atención y como consecuencia en la cobertura de la demanda, representados en un 52,63% y en un 56,84% respectivamente del total de alumnos a los que se les debe dar cobertura. Es decir, en la prueba 1 solo se estarían atendiendo 50 estudiantes y en la prueba 2 únicamente 54.

- ✓ En la prueba 3 se decide abrir la nueva sede en la localidad de **TEUSAQUILLO**, en donde la cobertura con respecto a las dos primeras pruebas aumenta significativamente, representando un 93,68% que corresponde a 89 estudiantes, pero de igual forma no logra atender la totalidad de la población estudiantil. En esta prueba se utilizaría el 42,5% de la capacidad, lo que representa 734 horas mensuales trabajadas; de las cuales 712 horas corresponden a las horas básicas tomadas y 22 horas corresponden a las horas adicionales por la selección de la sede en esta localidad.

- ✓ Finalmente, se puede observar que en las pruebas 1 y 2 sólo se emplearía el 30% y 31,8% respectivamente, de la capacidad total. Es decir, en la prueba 1 se estarían trabajando 518 horas, de las cuales 400 horas corresponden a las horas básicas que los alumnos asignados tomarían y 118 horas corresponden a las horas adicionales. En la prueba 2 se estarían trabajando 550 horas, de las cuales 432 horas corresponden a las horas básicas tomadas, y 118 a horas adicionales.

3.2.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESCENARIO 2

El escenario 2, en donde se realizaron pruebas con distintos radios de cobertura, obteniendo resultados particulares, se observa que, al decidir cerrar la sede actual en la localidad de Mártires y moverla a un nuevo punto, se correría el riesgo de no atender el total de estudiantes activos con los que cuenta la academia a la fecha. Por ejemplo, en la prueba 3, la decisión es la de ubicar la sede en la localidad de Teusaquillo, maximizando la cantidad de horas adicionales y dando cobertura a la mayor cantidad de estudiantes activos de la Academia (93.9%), pero se debe tener en cuenta que el radio de cobertura aquí empleado es del 15 km, y esto representa que en promedio el tiempo de viaje de los estudiantes hacia la sede sea el más alto de todos (ver tabla 7).

Lo que evidencian los niveles de atención de estudiantes en las pruebas 1 y 2 (52,63% y 56,84% respectivamente), es que hay un grupo de estudiantes de la academia mayor distribuidos hacia la zona norte de la ciudad de Bogotá, es decir, cerca de la zona de Usaquén y localidades aledañas, y otro grupo que está distribuido en la zona centro y sur de la ciudad; por tal razón, al emplearse en estas pruebas radios de cobertura mucho menores, la decisión finalmente es que, al ubicar la sede en localidad de Usaquén, se estaría maximizando de mejor manera la cantidad de horas atendidas, pero hay un grupo de estudiantes a los que no se alcanza a dar cobertura, y que también representan una cantidad significativa, por esto los niveles de atención tan bajos.

3.3 RESULTADOS PROPUESTA ESCENARIO 3

- ✓ En este escenario de igual manera se realizan tres pruebas: en cada una se decide que la actual ubicación de Mártires No está disponible y se pueden abrir hasta un máximo de P sedes de las ubicaciones disponibles. El radio de cobertura para cada una de las pruebas se describe en la tabla 9, con su respectiva equivalencia en referencia a los minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá. Este escenario fue planteado a consideración propia, con el objetivo de observar otra variante a la situación actual de la Academia.

De igual forma en este escenario la restricción (10) sí garantiza la asignación de cada alumno a una sede, pero tengamos en cuenta que, al ejecutar el modelo, éste nos indica la infactibilidad de la asignación de alumnos al tener un número menor de p sedes disponibles para atender a los 95 alumnos (ver tabla 9). Revisando las relaciones del modelo, éstas indican que se debe aumentar el número máximo de sedes (p) para que el resultado sea factible y de esta forma se pueda definir la cantidad de sedes.

Tabla 9 Datos empleados en las pruebas del Escenario 3.

PRUEBA	RADIO (KM)	(P) NO RESTRINGIDO
1	8 km (Corresponden a 45 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)	6
2	10 km (Corresponden a 55 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)	3
3	15 km (Corresponden a 68 minutos de viaje en hora pico en la ciudad de Bogotá D.C.)	2

- ✓ **Restricción Cobertura de los Clientes (Ecuación 17):** Sí asegura que cada alumno es asignado a una sola academia.

$$\sum_{u \in U} \text{Ubica}(al) x_{al,u} = 1 \quad \forall al \in \text{Alumnos} \quad (17)$$

3.3.1 RESULTADOS PRUEBAS ESCENARIO 3

Tabla 10 Distribución de estudiantes por sede escenario 3

MÁXIMO DE SEDES A ABRIR	RADIO DE COBERTURA (KM)	SEDES ABIERTAS	% DE ESTUDIANTES ATENDIDOS EN LA SEDE	% DE CAPACIDAD UTILIZADA DE LA SEDE
p (no restringido)	15	USAQUÉN	71.58%	38.31%
		RAFAEL URIBE	28.42%	14.47%

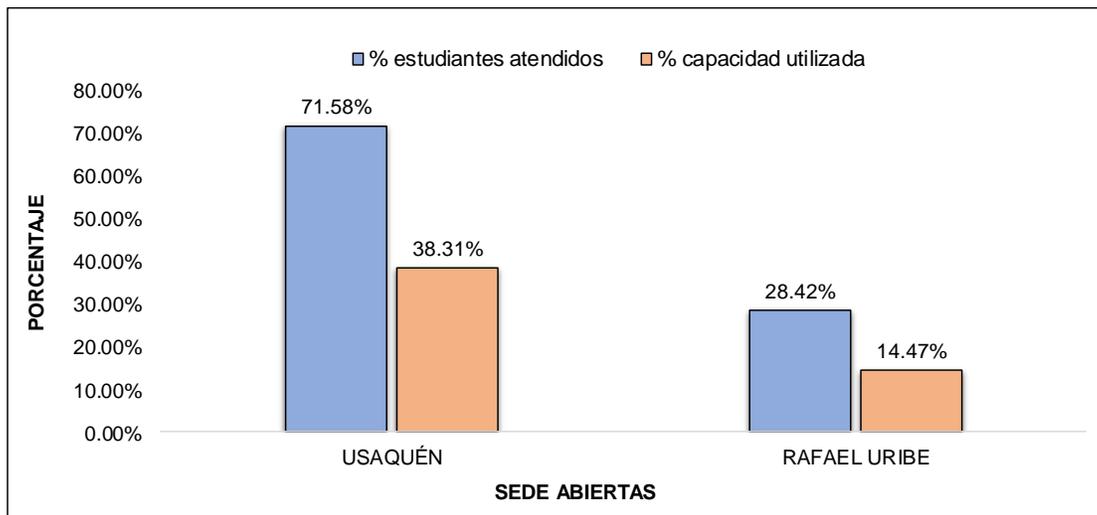


Figura 9 Resultados del escenario 2 (Elaboración Propia).

De este escenario de pruebas podemos observar que:

- ✓ En la prueba 3, se deciden abrir nuevas sedes en la localidad de **USAQUÉN Y RAFAEL URIBE**. Con estas dos sedes se estaría atendiendo la totalidad de la población estudiantil actual de la Academia, atendiendo Usaquén el 71.58% y

Rafael Uribe el 28.42%; es decir, 68 y 27 estudiantes respectivamente.

- ✓ En cuanto a la capacidad utilizada, se puede observar que en la prueba 3, la sede de Usaquén usa el 38.31% y Rafael Uribe del 14.47% del total de su capacidad, es decir, se estarían trabajando 662 y 250 horas respectivamente. Vale la pena aclarar que, las sedes ya incluyen las horas adicionales por la preferencia de los estudiantes al asistir a este nuevo punto, que para el caso de Usaquén es de 118 horas y 34 horas para la sede de Rafael Uribe.
- ✓ En las pruebas 1 y 2, la apertura de sedes debería ser de 6 y 3 sedes respectivamente. Las capacidades de utilización son muy bajas, al tener esta cantidad de sedes abiertas; por lo cual se no se considera relevante tenerlas en cuenta.

3.3.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS ESCENARIO 3

El escenario 3, nos muestra una opción menos viable actualmente para las pretensiones de las directivas de la academia, pero que, a futuro, puede llegar a servir para tomar decisiones de ampliar la cobertura del mercado a través de la asignación de nuevas sedes en la ciudad de Bogotá. En este escenario únicamente se muestra el resultado de la prueba 3, en donde se decide abrir dos (2) sedes; una en la localidad de Usaquén y otra en Rafael Uribe, cubriendo con éstas, el 100% del mercado actual de la Academia, y por supuesto teniendo la posibilidad de tener una mayor cobertura para dar atención a un posible mercado potencial de otras zonas de la ciudad.

Las pruebas 1 y 2, representan capacidades de utilización demasiado bajas, por la cantidad de sedes que se deberían abrir para cubrir el total de la demanda de los estudiantes actuales. Durante el proceso de desarrollo de este escenario,

encontramos que el modelo realiza una relajación, en donde finalmente arroja el resultado indicado anteriormente; asimismo para la prueba 1 se determina que la cantidad de sedes a abrir deberían ser mínimo 6 y para la prueba 2 deberían ser de 3 sedes. Por lo anterior, es importante resaltar que, después de presentar estos resultados a las directivas de la Academia, se considera que no es una opción viable tomar la decisión de contemplar las pruebas 1 y 2. Finalmente, a continuación, se presenta un ejemplo de los resultados de la prueba 1:

Tabla 11 Distribución prueba 1 del escenario 3

NO. SEDES ABIERTAS	RADIO DE COBERTURA (KM)	SEDES ABIERTAS	% CAPACIDAD UTILIZADA DE LA SEDE
6	8	USAQUÉN	21,30%
		CHAPINERO	3,70%
		TEUSAQUILLO	2,30%
		RAFAEL URIBE	4,60%
		KENEDY	9,30%
		BOSA	2,80%

4 Conclusiones y Recomendaciones

Este trabajo permitió determinar la ubicación para una nueva sede de la Academia Vallenata “Francisco El Hombre” en la ciudad de Bogotá, a través de la implementación de un modelo matemático de optimización de Cobertura Máxima con Capacidad; que le brindará a la Academia la posibilidad de atender una mayor cantidad de horas de clase y tener una nueva opción para dar una mayor cobertura a su mercado.

Inicialmente, la preocupación de las directivas de la Academia por el retiro de sus estudiantes se debía a la lejanía de la sede con respecto al sitio de ubicación de estos, y que con el paso del tiempo fue creciendo acompañada de un tema de inseguridad del sector, derivada de toda la problemática social que, durante los últimos 5 años, ha golpeado fuertemente la zona en donde se encuentra ubicada la sede actual.

Todas las intenciones y acciones que las directivas de la academia emprendieron en su momento por tratar de reducir y/o solucionar el problema a su manera, y que al final no dieron resultado, permitieron la creación y ejecución de este trabajo; que con la ayuda de las herramientas que brinda la optimización de operaciones, ayudó a plantear distintos escenarios de solución y así responder las inquietudes de las directivas de la Academia con respecto a la fase inicial de su proyecto, que tenía como objetivo analizar las opciones de ubicación para una nueva sede.

Durante el proceso de caracterización y diagnóstico del funcionamiento de la Academia, correspondiente a la fase inicial de la ejecución de este trabajo, se lograron conocer algunos de los factores que para los estudiantes son los más relevantes en cuanto a la posibilidad de dar apertura de una nueva sede. Por ejemplo, la cercanía de ésta con su lugar de residencia y/o trabajo, y la seguridad

de la zona, son factores que influyen positivamente en el cliente al momento de tomar la decisión de estudiar o no en la Academia, mantenerse activo durante todo el desarrollo del curso y mirar la opción de dedicarle tiempo adicional al mismo, aparte del tiempo básico que deben tomar. Lo anterior se logró conocer a través de los resultados obtenidos por medio de las encuestas aplicadas, en donde se encontró un alto número de estudiantes que estarían dispuestos a tomar entre 2 y 8 horas adicionales, y que respalda la decisión de buscar una nueva sede para atender los clientes. Por lo cual, el planteamiento del modelo en la formulación del problema no solo contempló el radio de cobertura existente entre el punto de ubicación del cliente con respecto a las posibles nuevas sedes, sino que tuvo en cuenta las horas adicionales que los estudiantes estarían dispuestos a tomar, si la nueva ubicación de la academia fuese asignada en el lugar de su preferencia.

Los casos reales que la literatura presenta y que emplean modelos de cobertura máxima con capacidad, por lo general están enfocados en solucionar problemáticas públicas de la sociedad (asignación de hospitales, escuelas, estaciones de policías, entre otros), y en otros casos en desarrollar y/o mejorar algoritmos matemáticos de optimización, que tienen como objetivo la asignación de plantas o centros de distribución de negocios de gran magnitud. El presente caso de estudio en particular no ha sido analizado desde la visión planteada en este trabajo, lo que lo convierte en una opción para que microempresas, compañías y negocios similares que desean tomar este tipo de decisiones, tengan una herramienta de estudio que, al ser utilizada, pueda ofrecerles un valor agregado y competitivo en el sector en el que se manejan.

Ahora bien, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el escenario inicial de este proyecto, que fue el caso que las Directivas de la Academia querían conocer y evaluar inicialmente; se logró concluir que, ubicar la nueva sede en la localidad de Usaqué, sería actualmente lo más conveniente y por supuesto les brindaría una

ventaja competitiva mayor con respecto a la cobertura que tendrían de su mercado actual y futuro en la ciudad de Bogotá, e influenciará positivamente para que el nivel de deserción estudiantil sea menor.

El modelo de optimización formulado para el desarrollo de este trabajo permitió evaluar distintos escenarios de ubicación, variando radios de cobertura y limitando el número de sedes a abrir. Uno de los objetivos en los que se trabajó en esta fase del proyecto, fue la propuesta y posterior evaluación de distintos escenarios posibles; que pudiesen brindar a las directivas de la Academia otra visión con respecto a las opciones de decisión con las que podrían contar.

Es fundamental resaltar que una de las limitantes en este trabajo, es que no se contemplaron ningún tipo de costos, puesto que este trabajo de investigación responde a una necesidad puntual de la academia, y dentro de los supuestos o condiciones que se establecieron en esta fase inicial, fue la de no incluir costos. Con la información y resultados obtenidos en este trabajo, la academia posteriormente realizará el análisis respectivo. Tampoco se logró tener acceso a la información de los estudiantes que ya no se encuentran activos en la institución, y que inicialmente se querían contemplar como el mercado potencial del negocio y poder desde allí plantear otras pruebas de análisis.

Este trabajo de investigación responde a una necesidad puntual de la academia, y dentro de los supuestos o condiciones que se establecieron en esta fase inicial, fue la de no incluir costos. Con la información y resultados obtenidos en este trabajo, la academia posteriormente realizará el análisis respectivo.

Por lo anterior y como recomendación final, para el trabajo futuro de este proyecto, es importante además de incluir y analizar variables económicas, también se puedan contemplar otras posibles variables de tipo social, de crecimiento de la

demanda, entre otras; con el objetivo de soportar la decisión final de ubicación de la nueva sede de la Academia.

5 Bibliografía

- Andrade, P. A., Morejón, J. L., & Inga, E. M. (2016). Cobertura máxima de redes de sensores inalámbricos para un sistema de gestión de energía en hogares inteligentes. *INGE CUC*, 12, 68-78.
- Arakaki, R., & Lorena, L. (2006). A Location-Allocation Heuristic (LAH) for Facility Location Problems. *Production*, 16, 319-328.
- Bagherinejad, J., Bashiri, M., & Nikzad, H. (2017). General form of a cooperative gradual maximal covering location problem. *Journal of Industrial Engineering International*, 14, 241-253.
- BBC. (2018). *Noticias BBC Mundo*. Obtenido de http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/12/151201_colombia_unesco_vallenato_patrimonio_nc
- Berman, O., Krass, D., & Kalcsics, J. (2015). On covering location problems on networks with edge demand. *Computers & Operations Research*, 74, 214–227.
- Berman, O., & Krass, D. (2002). The generalized maximal covering location problem. *Computers & Operations Research*, 29, 563-581.
- Berman, O., Drezner, Z., & Krass, D. (2010). Generalized coverage: New developments in covering location models. *Computers & Operations Research*, 37, 1675-1687.
- Bogotá, A. M. (2018). *Alcaldía Mayor de Bogotá*. Obtenido de <http://www.bogota.gov.co/ciudad/ubicacion>

- Broseghini, F., Pizzolato, N., & Nogueira, L. (2004). Localização de escolas do ensino fundamental com modelos capacitado e não capacitado: caso de vitória/es. *Pesquisa Operacional*, 24, 133-149.
- Buzai, G. D. (2011). Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos: análisis espacial de Centros de Atención Primaria de Salud (CAPS) en la ciudad de Luján, Argentina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 20, 111-123.
- Church, R., & Murray, A. (2018). Location Covering Models: History, Applications and Advancements. En *Location Covering Models: History, Applications and Advancements* (pág. 158). Springer.
- Church, R., & Reville, C. (1974). The Maximal Covering Problem. *Papers Of The Regional Science Association*, 32, 101-118.
- COMERCIO, C. D. (8 de 10 de 2018). *Registro Único Social y Empresarial (Cámara de Comercio)*. Obtenido de http://versionanterior.rues.org.co/RUES_Web/Consultas
- Current, J., Daskin, M., & Schilling, D. (2001). Discrete Network Location Models. In: *Facility Location. Berlin: Z. Drezner and H. Hamacher Eds*, 85-112.
- Curtin, M., Hayslett-McCall, K., & Qiu, F. (2007). Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models. *Network and Spatial Economics*, 10, 125-145.
- DANE. (2018). *Censo General 2005 Bogotá D.C.* Obtenido de <http://www.dane.gov.co>
- Drakulić, D., Takači, A., & Marić, M. (2016). New Model of Maximal Covering Location Problem with Computing and Informatics. 35, 635–652.

- Farahani, R., Asgari, N., Heidari, N., Hosseini, M., & Goh, M. (2011). Covering problems in facility location: a review. *Computers e Industrial Engineering*, 62, 368-407.
- Francisco El Hombre. (2018). *Base de Datos "Academia Folclórica Vallenata Francisco El Hombre"*. Bogotá.
- Gac, I., Martínez, F., & Weintraub, A. (2006). Modelo de Optimización lineal determinístico para la localización de colegios. *Revista Ingeniería de Sistemas*, 20, 25-43.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (2006). The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles. *Journal of the Operational Research Society*, 57, 22-28.
- Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet, F. (2001). A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. *Parallel computing*, 27, 1641-1653.
- Guarín, A., Ramírez, A., & Villegas, J. (2015). Fast reaction police units in Medellín: A budget-constrained maximal homicide covering location. *Borradores de Economía - Banco de la República*.
- Karatas, M., Razi, N., & Tozan, H. (2016). A comparison of p-median and maximal coverage location models with Q- coverage requirement. *Procedia Engineering*, 149, 169-176.
- López, C. (2005). *Propuesta Algorítmica para el problema de máxima cobertura capacitado*. Puebla: Universidad de las Américas Puebla - Tesis Digitales.

- Maharjana, R., & Hanaokaa, S. (2017). Warehouse location determination for humanitarian relief distribution in Nepal. *Transportation Research Procedia*, 25, 1151-1163.
- Marianov, V., & Taborga, P. (2001). Optimal location of public health centres which provide free and paid services. *Journal of the Operational Research Society*, 52, 391-400.
- Máximo, V., Nascimento, M., & Carvalho, A. (2016). Intelligent-guided adaptive search for the maximum covering location problem. *Computers & Operations Research*, 78, 129-137.
- MEN. (2018). SNIES. Obtenido de SNIES: <http://www.mineducacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/w3-article-212400.html>
- Menezes, R., & Domingues Pizzolato, N. (2014). Locating Public Schools in Fast Expanding Areas: Application of the Capacitated P-Median and Maximal Covering Location Models. *Pesquisa Operacional*, 34.
- Noridayu Mah, H., Sarifah Radiah, S., & Sayang Mohd, D. (2017). Capacitated Maximal Covering Location Allocation Problem During Flood Disaster. *Advanced Science Letters*, 23.
- Owen, S., & Daskin, M. (1998). *Strategic facility location: A review* (Vol. 111). European Journal of Operational Research.
- Ramirez, L., & Bosque Sendra, J. (2001). Localización de Hospitales: Analogías y diferencias del uso del modelo P-mediano en SIG raster y vectorial. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense de Madrid*, 21, 53-79.

- Ramshani, M., Huang, Y., & Li, X. (2018). Cooperative maximal covering models for humanitarian relief chain management. *Computers & Industrial Engineering*, 119, 301-308.
- ReVelle, C., & Eiselt, H. (2005). Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, 165, 1-19.
- ReVelle, C., & Swain, R. (1970). *Central facilities location* (Vol. 1). Geographical Analysis.
- RUES. (8 de 10 de 2018). *Registro Único Empresarial y Social (Cámara de Comercio)*. Obtenido de http://versionanterior.rues.org.co/RUES_Web/Consultas
- Schilling, D. (1980). Dynamic location modeling for public-sector facilities: A multi-criteria approach. . *Decision Sciences*, 11, 714-724.
- Schilling, D., Jayaraman, V., & Barkhi, R. (1993). A review of covering problems in facility location. *Location Science*, 1, 25-55.
- Serra, D., & Marianov, V. (1998). The p-median problem in a changing network: the case of Barcelona. *Location Science*, 6, 383-394.
- Toregas, R., Swain, C., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). The Location of Emergency Service Facilities. *Operations Research*, 19,1363-1373.
- van den Berg, P., Kommer, G., & Zuzáková, B. (2015). Linear formulation for the Maximum Expected Coverage Location Model with fractional coverage. *Operations Research for Health Care*, 8, 33-41.

Abreviaciones

MCLP: Problema del Modelo de Cobertura Máxima

CMCLP: Modelo de Cobertura Máxima Capacitado

CGMCLP: Modelo de cobertura máxima gradual cooperativo

MECRP: Maximal Expected Coverage Relocation Problem

Anexos

ANEXO 1: FORMULACIÓN DEL ALGORITMO EN ILOG CPLEX ESCENARIO INICIAL

```
/******  
  
* OPL 12.6.3.0 Model  
  
* Author: SmartBP  
  
* Creation Date: 01/12/2018 at 20:03:17  
  
*****/  
  
{string} Ubicaciones=...; //Conjunto de Ubicaciones posibles de la academia  
  
{string} Alumnos = ...; // Conjunto de Alumnos actuales  
  
tuple cobertura { // Declaración de la tupla  
  
    string al; //Alumno  
  
    string r; //Localidad de residencia del alumno  
  
    string u; // Localidad donde prefieren la ubicación de la Academia  
  
string ac; // Localidad donde actualmente está ubicada la Academia  
  
}  
  
{cobertura} Cobertura=...;  
  
tuple MatrizDistancia {  
  
    string al; //Alumno  
  
    string r; //Localidad de residencia del alumno  
  
    string u; // Ubicación de las Academias  
  
    float dist; // Distancia de la ubicación del Alumno hasta la Ubicación  
de la Nueva Academia
```

```

}

{MatrizDistancia} Matriz=...;

tuple ubicacion{
    string al;
    string u;
}

{ubicacion} adiciona = {<al,u> | <al,r,u,ac> in Cobertura };

float radio = 8; //Radio de Cobertura de las academias

radio = Radio de Cobertura de las Academias

{ubicacion} Radio = { <al,u> | <al,r,u,dist> in Matriz : dist<= radio };

Radio = Conjunto de Alumnos al atendidos por la Academia u dentro del radio de cobertura

{ubicacion} Actual = { <al,ac> | <al,r,u,ac> in Cobertura };

{ubicacion} Preferencias = Radio union Actual union adiciona;

float ar[Preferencias];

execute pre {
    for (var w in Preferencias) {
        ar[w] = 1;
    }
}

```

$$ar_{al,u} \begin{cases} 1 & \text{si el alumno } al \in \text{Alumnos se encuentra dentro del radio de cobertura de la academia } u \in \text{Ubicaciones} \\ & dist_{al,u} \leq \text{Radio} \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

```
float hij[Preferencias]=...; //demanda de horas adicionales de servicio de
cada alumno en su ubicación de preferencia (0 a 8 horas por mes)
```

```
//adiciona
```

hij_{al,u} = Horas adicionales de clase por cada alumno al en la academia u

```
{string} Ubica [al in Alumnos] = { u | <al,u> in Preferencias }; //conjunto
de preferencia de ubicación de la academia según el alumno
```

```
{string} Alum [u in Ubicaciones] = { al | <al,u> in Preferencias };
//conjunto de preferencia de ubicación de la academia según el alumno
```

```
int p = 2; // máximo ubicaciones de academia para abrir
```

p = Máximo número de academias que atenderan alumnos

```
float h[Alumnos]=...; //demanda de horas de servicio de cada alumno (8
horas por mes)
```

h_{al} = Demanda de horas de clase por cada alumno mensual al ∈ Alumnos

```
float b[Ubicaciones]=...; // Capacidad en horas mensuales de cada posible
academia Academia
```

b_u = Capacidad de horas mensual por academica u ∈ Ubicaciones

```
dvar boolean Xij[Preferencias];
```

$$X_{ij,al,u} \begin{cases} 1 & \text{si el alumno } al \in \text{Alumnos es atendido por la academia } u \in \text{Ubicaciones} \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

```
dvar boolean Y[Ubicaciones] in 0..1;
```

$$Y_u \begin{cases} 1 & \text{si se abre la academia } u \in \text{Ubicaciones} \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

```
dexpr float Asignados = sum (al in Alumnos, u in Ubica [al]) ar[< al,u >]*h[al]*Xij[<al,u>];
```

```
dexpr float horaAdicional = sum (al in Alumnos, u in Ubica [al]) Xij[<al,u>]*hij[<al,u>];
```

```
//Función Objetivo
```

```
maximize (Asignados + horaAdicional);
```

$$\text{Asignados} = \sum_{al \in \text{Alumnos}} \sum_{u \in \text{Ubica}(al)} ar_{al,u} * h_{al} * X_{al,u}$$

$$\text{horaAdicional} = \sum_{al \in \text{Alumnos}} \sum_{u \in \text{Ubica}(al)} hij_{al,u} * X_{al,u}$$

Maximizar (*Asignados* + *horaAdicional*)

```
//Restricciones
```

```
subject to{
```

Sujeto a:

```
forall (al in Alumnos)
```

```
Restriccion1: // asegura que cada alumno es asignado a una sola academia
```

```
sum(u in Ubica [al]) Xij[< al,u >]==1;
```

$$\sum_{u \in Ubica(al)} X_{ij_{al,u}} = 1 \quad \forall al \in Alumnos$$

```
forall (u in Ubicaciones)
```

```
Restriccion2: // Garantiza que se respeta la capacidad de horas que ofrece la academia y prohíbe la asignación a academias cerradas
```

```
sum(al in Alum[u]) ar[< al,u >]*h[al]*Xij[< al,u >] - b[u]*Y[u] <= 0;
```

$$\sum_{al \in Alum(u)} ar_{al,u} * h_{al} * X_{ij_{al,u}} \leq b_u * Y_u \quad \forall u \in Ubicaciones$$

```
Restriccion3: //Limita el número máximo p de instalaciones a abrir
```

```
sum(u in Ubicaciones)Y[u] <= p;
```

$$\sum_{u \in Ubicaciones} Y_u \leq p$$

Restriccion4: //La academia actual de los MARTIRES se mantiene abierta

`Y["MARTIRES"] == 1;`

$Y_{Martires} = 1$

ANEXO 2: MATRIZ DE DISTANCIAS DE VÍAS PRINCIPALES UBICACIÓN ALUMNO VS. LOCALIDAD DE PREFERENCIA

No.	DIRECCIÓN RESIDENCIA	COORDENADAS RESIDENCIA\SEDE ACADEMIA	Usaquen	Teusaquillo	Suba	Engativa	Fontibón	Puente Aranda	Kennedy	Bosa	Chapinero	Barrios unidos	Rafael Uribe	Mártires
			4.7051847,-74.0549991	4.6534444,-74.100494	4.727336,-74.062697	4.698174,-74.094008	4.652934,-74.110207	4.6125,-74.106667	4.630158,-74.129348	4.596296,-74.164356	4.643392,-74.061991	4.683731,-74.058943	4.591714,-74.127060	4.604858,-74.097578
1	Kr 68D # 40 - 53 Sur	4.598536,-74.141164	0,0	9,0	19,0	13,6	8,3	5,3	4,8	3,3	11,9	15,6	2,9	6,0
2	Calle 64 A # 52- 53 Int 801	4.661693,-74.081386	6,8	4,2	9,3	5,3	6,0	8,3	9,4	15,1	3,8	4,3	11,5	7,8
3	Calle 8A sur # 5 - 57	4.579863,-74.084231	15,7	10,6	18,8	15,7	10,7	5,3	8,8	10,9	7,7	12,9	5,8	3,9
4	Kr 8 # 46 - 66	4.633796,-74.06465	9,3	5,7	12,3	9,7	7,1	6,9	9,5	14,2	1,2	6,4	10,0	6,0
5	Kr 57 # 138 - 66	4.729949,-74.062197	4,0	10,8	0,7	7,0	12,3	17,1	15,6	21,3	11,3	6,5	20,0	16,3
6	Kennedy	4.631313,-74.149561	16,0	7,6	17,7	12,7	6,8	6,5	2,6	7,3	12,4	14,5	8,2	7,7
7	Kr 18B # 57 - 57 sur	4.565462,-74.133993	20,0	13,1	22,6	18,2	12,3	7,6	9,3	5,5	13,4	17,4	3,9	7,2
8	Kr 33 # 25 f 10	4.63004,-74.083415	9,9	3,6	12,6	9,0	4,7	4,3	6,9	11,3	3,7	7,4	7,9	4,0
9	Calle 44D # 45-80	4.643966,-74.087492	9,2	2,5	11,5	7,5	3,8	5,8	6,9	12,1	3,5	6,6	8,8	6,0
10	Calle 66 #6 - 2	4.650066,-74.058118	7,6	5,6	10,7	8,0	7,4	8,8	10,6	16,1	0,9	4,8	11,9	8,0
11	Calle 128 Bis # 98a - 47	4.722073,-74.092298	5,9	9,7	4,7	3,3	10,1	16,0	13,9	18,8	11,2	7,6	18,7	15,6
12	Calle 8A Bis A # 80 - 63	4.642536,-74.144569	14,1	7,1	15,2	9,8	5,7	7,3	3,1	7,0	11,9	13,1	7,8	8,5
13	Calle 8 A Bis A 80 - 63	4.642536,-74.144569	14,1	7,1	15,2	9,8	5,7	7,3	3,1	7,0	11,9	13,1	7,8	8,5
14	Kr 1 # 2 - 43	4.586576,-74.074373	15,0	9,7	18,0	14,8	10,0	5,3	8,8	11,4	6,9	12,1	6,8	3,9
15	Calle 92 #15-62	4.676072,-74.052858	4,5	8,0	7,7	6,5	10,1	11,3	13,0	18,6	4,2	2,2	14,3	10,6
16	Kr 79 # 57 f 15 sur	4.610234,-74.175743	19,6	11,6	20,7	15,3	10,9	9,2	6,6	2,9	15,8	18,6	7,5	10,4
17	Calle 52 sur # 97 - 36	4.640309,-74.186707	19,7	13,0	20,4	14,6	11,6	12,0	8,2	6,7	17,8	18,7	10,6	13,2
18	Kr 27 b # 5 - 19	4.603637,-74.09733	13,5	7,5	16,2	13,0	7,4	2,0	5,5	8,6	7,2	11,0	4,3	0,2
19	Kr 19 # 64 - 38 sur	4.559144,-74.144358	21,4	13,6	23,8	18,7	12,9	9,1	9,8	5,2	15,3	18,9	5,1	8,6
20	Kr 19 # 26 - 51 sur	4.603768,-74.122574	15,9	7,7	17,9	13,5	6,9	2,7	3,8	5,7	9,6	13,4	2,3	3,5
21	Kr 85 # 52 - 05 sur	4.623381,-74.177449	19,3	11,9	20,4	14,4	10,9	10,0	6,9	4,3	16,7	18,3	8,2	11,1
22	Kr 93B # 34 - 15 sur	4.646512,-74.168541	17,4	10,6	17,9	12,2	9,2	9,7	5,8	7,0	15,5	16,4	9,6	10,8
23	Calle 68 A # 68 B - 29	4.675858,-74.08913	5,8	3,3	7,5	3,4	4,8	10,2	8,2	14,1	6,0	4,3	12,8	10,2
24	Calle 13 sur # 6A - 33	4.575385,-74.084406	16,3	11,1	19,3	16,2	11,2	6,0	9,5	10,8	8,2	13,4	5,7	4,5
25	Calle 6A # 94 A - 26 (casa 30)	4.652952,-74.162949	16,7	10,0	17,1	11,3	8,6	9,4	5,6	7,8	14,8	15,7	9,8	10,6

No.	DIRECCIÓN RESIDENCIA	COORDENADAS RESIDENCIA\SEDE ACADEMIA	Usaquen	Teusaquillo	Suba	Engativa	Fontibón	Puente Aranda	Kennedy	Bosa	Chapinero	Barrios unidos	Rafael Uribe	Mártires
			4.7051847,-74.0549991	4.6534444,-74.100494	4.727336,-74.062697	4.698174,-74.094008	4.652934,-74.110207	4.6125,-74.106667	4.630158,-74.129348	4.596296,-74.164356	4.643392,-74.061991	4.6683731,-74.058943	4.591714,-74.127060	4.604858,-74.097578
26	Av Kr 30 # 1 - 63	4.599241,-74.106118	14,0	7,9	16,7	13,5	7,9	2,1	5,4	7,3	8,0	11,5	3,1	1,3
27	Kr 86g # 72 A - 18 sur	4.635739,-74.164512	17,5	10,0	18,6	12,6	9,3	8,9	5,1	5,4	14,8	16,5	8,1	10,1
28	Calle 39 Bis # 68 - 80 Carvajal	4.607651,-74.140903	16,4	7,9	18,0	12,6	7,2	5,2	3,8	3,6	11,8	14,9	3,2	6,2
29	Kr 90B # 56- 09 sur	4.632173,-74.188855	20,1	13,3	21,2	15,2	11,9	12,2	8,4	6,1	18,1	19,1	10,1	13,4
30	Calle 51B # 26 - 46 sur	4.588428,-74.139208	18,1	9,6	19,8	15,1	8,8	5,7	5,7	3,9	12,5	16,1	2,1	5,8
31	Kr 108 A # 142 - 05	4.746092,-74.099084	8,0	12,8	4,9	6,4	13,3	19,2	17,0	22,0	14,4	9,4	21,9	18,8
32	Sopó Cundinamarca	4.90869,-73.941457	35,3	44,0	33,9	40,2	45,5	48,1	48,9	54,6	40,7	37,6	51,9	48,2
33	Kr 33 # 50 - 13 sur	4.585635,-74.13501	18,1	10,1	20,2	15,6	9,3	5,8	6,1	4,4	12,0	15,6	1,4	5,3
34	Cáqueza Cundinamarca	4.404767,-73.946709	59,1	52,6	61,8	58,1	51,8	46,8	48,8	46,2	50,0	56,6	43,1	46,3
35	Kr 10 # 90 - 13	4.674056,-74.052197	4,7	7,9	7,9	6,5	9,7	11,1	12,9	18,4	4,0	2,3	14,2	10,5
36	Calle 109 # 17 A - 30	4.694065,-74.04823	2,0	9,0	5,3	6,5	10,5	13,7	13,9	19,8	6,6	2,6	16,9	13,2
37	Calle 104 # 14 A - 47	4.688591,-74.04642	2,9	9,4	6,1	7,1	10,9	12,9	14,2	20,1	5,8	2,3	16,0	12,3
38	Diagonal 82 #77 - 36	4.701524,-74.094198	5,8	7,0	6,9	0,4	7,4	13,7	11,2	16,1	9,0	5,5	16,0	13,2
39	Kr 14 # 127 - 69	4.705166,-74.040925	1,8	10,6	4,8	7,4	12,2	15,0	15,5	21,4	7,9	4,3	18,1	14,4
40	Carrera 68 # 3-51	4.624805,-74.123935	13,4	4,9	15,1	10,7	4,1	2,9	1,5	6,3	9,0	11,8	4,9	4,1
41	Carrera 7 # 193 - 47	4.769787,-74.027463	9,9	18,5	8,4	14,7	20,0	23,4	23,3	29,0	16,0	12,6	26,3	22,6
42	Calle 154 # 87 A - 19	4.748423,-74.078967	7,6	13,2	4,5	6,8	13,7	19,6	17,5	22,4	14,8	9,3	22,3	19,2
43	Calle 56 # 3 - 22	4.641084,-74.059579	8,7	5,8	11,7	9,0	7,6	8,0	10,6	15,3	0,6	5,8	11,1	7,1
44	Kr 20 # 55 Esquina	4.642415,-74.071133	8,4	4,2	11,2	8,1	6,0	6,8	9,1	14,1	1,3	5,5	9,9	6,2
45	Calle 63 B # 85 i - 43	4.683904,-74.113031	8,6	5,0	9,7	3,3	4,9	11,3	8,7	13,6	8,5	8,1	13,4	11,6
46	Calle 162 # 17 A - 72	4.742109,-74.041753	5,0	13,8	4,1	10,6	15,4	19,2	18,7	24,6	12,2	7,7	22,1	18,4
47	Usaquén	4.6940002,-74.032921	3,4	11,2	6,4	8,3	12,7	14,5	16,0	21,8	7,1	4,0	17,6	13,9
48	Calle 8 Sur # 70 - 80	4.617805,-74.133093	14,9	6,4	16,6	11,8	5,7	3,8	2,0	5,0	10,3	13,3	4,5	5,0
49	Calle 104 A # 11 B - 45	4.687373,-74.043094	3,9	9,8	7,1	7,6	11,3	13,1	14,7	20,4	6,0	2,6	16,2	12,5
50	Carrera 53 A # 127 - 70	4.709344,-74.061536	1,1	8,6	3,0	5,1	10,1	14,6	13,5	19,4	8,7	3,6	17,5	13,8

No.	DIRECCIÓN RESIDENCIA	COORDENADAS RESIDENCIA\SEDE ACADEMIA													
			Usaquen	Teusaquillo	Suba	Engativa	Fontibón	Puente Aranda	Kennedy	Bosa	Chapinero	Barrios unidos	Rafael Uribe	Mártires	
			4.7051847,-74.0549991	4.6534444,-74.1004941	4.727336,-74.062697	4.698174,-74.094008	4.652934,-74.110207	4.6125,-74.106667	4.630158,-74.129348	4.596296,-74.164356	4.643392,-74.061991	4.683731,-74.058943	4.591714,-74.127060	4.604858,-74.097578	
51	Calle 174a #49B-29	4.75542275,-74.05009234	0,0	14,7	4,5	10,9	16,2	20,3	19,6	25,3	14,4	9,6	23,2	19,5	
52	Calle 1c #54-2 a 54-98	4.6159282,-74.1221048	14,5	6,0	16,2	11,8	5,2	2,4	2,5	6,2	8,9	12,6	3,8	3,5	
53	Kr 72m Bis #43-76	4.6060088,-74.15243	17,7	9,2	19,1	13,7	8,5	6,5	4,9	2,5	13,1	16,1	4,2	7,7	
54	Kr 13 #113-2 a 113-98	4.69400174,-74.04020066	2,7	10,1	5,9	7,4	11,6	13,9	15,0	20,9	6,8	3,3	17,0	13,3	
55	Kr 12 #144-1 a 144-99	4.72369529,-74.03629477	4,1	13,0	3,4	9,7	14,5	18,0	17,8	23,7	10,7	6,9	21,2	17,5	
56	Kr 71b #99a-99	4.69948059,-74.07903351	3,4	6,8	4,8	2,3	7,7	13,0	11,6	16,6	8,1	3,4	16,3	12,6	
57	Kr 58 #17-2 a 17-98	4.6334232,-74.1090685	12,0	3,3	13,7	9,8	3,2	4,4	3,3	8,8	7,2	10,3	6,8	4,9	
58	Kr 11b Bis #125-1 a 125-93	4.70293588,-74.03520576	2,4	11,2	5,5	8,0	12,8	15,3	16,1	22,0	8,1	4,7	18,4	14,6	
59	Calle 163 #7-24 a 7-98	4.7380805,-74.0236542	7,1	15,9	6,2	12,7	17,4	19,8	20,8	26,7	12,5	9,3	22,8	19,1	
60	Calle 1g #25-37	4.5968991,-74.0982089	14,3	8,3	17,0	13,8	8,2	2,5	6,1	8,3	7,8	11,8	3,8	1,2	
61	Calle 155 #14-2 a 14-52	4.7352495,-74.0373374	5,1	13,9	4,2	10,7	15,5	19,3	18,8	24,7	12,1	7,8	22,2	18,5	
62	Kr 20 #32 Sur-1 a 32 Sur-73	4.5785442,-74.1146443	17,2	11,0	19,9	16,6	10,3	5,0	7,6	7,3	10,7	14,6	2,6	4,4	
63	Kr 53c #134-59 a 134-99	4.72194101,-74.05934529	2,8	10,7	1,2	6,9	12,2	16,3	15,6	21,3	10,4	5,2	19,2	15,4	
64	Kr 20 #17-24	4.61139593,-74.08304335	12,6	6,3	15,3	12,1	6,2	4,0	7,2	10,8	5,3	10,1	6,5	2,3	
65	Calle 79a #63-12	4.67925809,-74.07754616	5,2	4,8	7,2	3,5	6,3	10,1	9,7	15,6	5,3	3,2	13,4	9,7	
66	Calle 141 #47-48	4.72525373,-74.05322685	3,1	11,0	1,2	7,5	12,5	16,6	15,9	21,8	10,8	5,5	19,5	15,8	
67	Calle 167b Bis #16d-1 a 16d-85	4.7471438,-74.0397301	5,8	14,6	4,9	11,4	16,1	19,9	19,5	25,4	12,9	8,5	22,8	19,0	
68	Calle 166 #8f-1 a 8f-99	4.74354684,-74.02924113	6,8	15,7	5,9	12,5	17,2	20,2	20,5	26,4	13,0	9,6	23,3	19,6	
69	Kr 10d #26b Sur-1 a 26b Sur-75	4.5737822,-74.0997159	17,3	11,5	20,4	17,1	11,1	5,6	8,4	8,9	9,3	14,4	4,0	4,6	
70	Kr 19a #6-22 a 6-68	4.60132835,-74.08984427	13,8	7,7	16,5	13,3	7,6	3,1	6,6	9,6	6,6	11,3	5,2	1,1	
71	Kr 10 Bis #3 Sur-1 a 3 Sur-99	4.5863462,-74.0879697	15,2	9,9	18,3	15,1	9,8	4,3	7,8	9,9	7,2	12,3	5,0	2,9	
72	Calle 99 #68b-2 a 68b-90	4.6906718,-74.073748	3,6	5,7	5,2	3,3	7,2	12,3	10,6	16,5	6,6	2,2	15,3	11,6	
73	Calle 128b #58d-1 a 58d-63	4.71717437,-74.07205916	2,8	9,0	2,0	5,0	10,5	15,4	13,9	19,4	9,6	4,6	18,3	14,6	
74	Calle 90 #59-1 a 59-99	4.6786347,-74.0678615	3,8	6,6	6,4	4,4	8,1	10,7	11,5	17,4	4,9	1,3	13,6	9,9	
75	Kr 43b #4-1 a 4-65	4.61770252,-74.11163133	13,9	5,8	16,2	12,1	5,6	1,8	3,4	7,5	7,6	11,3	4,3	3,0	

No.	DIRECCIÓN RESIDENCIA	COORDENADAS RESIDENCIA\SEDE ACADEMIA	Usaquen	Teusaquillo	Suba	Engativa	Fontibón	Puente Aranda	Kennedy	Bosa	Chapinero	Barrios unidos	Rafael Uribe	Mártires
			4.7051847,-74.054999	4.6534444,-74.100494	4.727336,-74.062697	4.698174,-74.094008	4.652934,-74.110207	4.6125,-74.106667	4.630158,-74.129348	4.596296,-74.164356	4.643392,-74.061991	4.683731,-74.058943	4.591714,-74.127060	4.604858,-74.097578
76	Kr 50 #102-2 a 102-90	4.68931112,-74.06147856	2,3	6,8	5,2	4,8	8,4	12,0	11,7	17,6	6,1	0,9	14,9	11,1
77	Kr 51 #118-1 a 118-85	4.70123422,-74.06049958	1,1	7,9	4,0	4,6	9,4	13,4	12,7	18,6	7,5	2,4	16,3	12,6
78	Kr 80f #11d-1 a 11d-99	4.65015383,-74.13955992	13,5	6,5	14,6	9,2	5,1	7,7	3,6	8,1	11,3	12,5	8,6	8,9
79	Calle 37a Sur #52-65	4.60311141,-74.1306366	16,2	7,7	17,9	13,5	6,9	3,7	3,8	4,7	10,5	14,3	2,2	4,7
80	Kr 17 #134-2 a 134-44	4.7173101,-74.0448161	2,4	11,3	2,7	8,1	12,8	16,7	16,1	22,0	9,6	5,2	19,5	15,8
81	Calle 30b Sur #0 Este-2 a 0 Este-98	4.5629785,-74.0922624	18,0	12,9	21,0	18,0	12,7	7,2	9,9	10,5	10,0	15,1	5,6	6,1
82	Kr 25 #63f-1 a 63f-99	4.65610057,-74.07224873	6,9	4,3	9,8	6,4	6,1	8,1	9,3	15,5	2,2	4,0	11,3	7,5
83	Kr 22 #75a-27	4.66552101,-74.06370023	5,6	5,9	8,3	5,8	7,7	9,4	10,9	16,7	2,8	2,7	12,5	8,8
84	Kr 80a Bis #22d-53	4.66222,-74.1250395	10,8	4,6	11,9	6,2	2,8	9,0	5,9	10,8	9,7	9,8	10,9	10,1
85	Kr 50 #166-2 a 166-98	4.74826462,-74.05062424	6,3	13,8	3,7	10,0	15,3	19,3	18,7	24,3	13,4	8,7	22,2	18,5
86	Conjunto Sol de San Carlos 2 Bis Sur #12	4.5648345,-74.1129232	19,0	13,0	21,7	18,5	12,2	6,9	9,4	8,2	11,3	16,4	4,1	6,3
87	Calle 142 #7b-1 a 7b-61	4.718989,-74.030081	4,6	13,4	4,6	10,2	14,9	17,3	18,3	24,2	10,1	6,8	20,4	16,7
88	Calle 69a #9-56 a 9-98	4.65378517,-74.05911329	7,2	5,7	10,2	7,6	7,5	8,9	10,7	16,2	1,4	4,3	12,0	8,3
89	Kr 71d #6B-30	4.63237932,-74.13553989	14,2	6,1	15,2	9,8	5,4	5,1	0,9	6,2	11,0	13,1	6,3	6,3
90	Calle 6b #79a-2 a 79a-56	4.63225341,-74.14602043	15,0	8,0	16,1	10,7	6,6	6,6	3,2	5,6	12,8	14,0	7,0	7,7
91	Kr 26a #39a Sur-1 a 39a Sur-77	4.5833753,-74.123324	17,3	10,8	20,0	16,8	10,1	5,0	7,1	5,8	11,2	14,8	1,4	4,5
92	Calle 103 #70b-1 a 70b-99	4.69713859,-74.07442985	3,0	6,7	4,4	2,9	7,9	13,0	11,6	17,3	8,0	2,9	16,3	12,5
93	Kr 8a Bis #156-1 a 156-99	4.7336079,-74.02976568	5,8	14,6	5,2	11,4	16,2	18,9	19,5	25,4	11,6	8,4	21,9	18,2
94	Calle 2 #37b-1 a 37b-55	4.60704079,-74.11000753	14,5	7,1	17,2	13,3	7,0	0,9	4,3	7,7	8,0	12,0	4,0	1,8
95	Kr 17 #15 Sur-1 a 15 Sur-67	4.5857766,-74.0993324	15,8	9,7	18,5	15,3	9,7	4,0	7,3	8,7	8,7	13,3	3,6	2,8