

Gelves, Óscar, Patarroyo, Estefanía, Nicolás Borrero Puentes, Salgado, Karen (2021). Cal como factor influyente en la resistencia a compresión diagonal de la mampostería. Una revisión. Cuaderno Activa, 13, 73-80.



Diseño de una red de ciclorrutas para la ciudad de Bogotá D. C. por medio del método de árbol de mínima expansión (1)

Óscar Mauricio Gelves Alarcón,¹ Estefanía Patarroyo Alarcón,² Nicolás Borrero Puentes,³ Karen Angélica Salgado Turmequé⁴

Recibido: 5 diciembre 2020. Aprobado: 9 marzo 2021.

Resumen: Una de las necesidades más importantes que tiene la ciudad de Bogotá D. C. actualmente es optimizar sus sistemas de transporte. En los últimos años, los gobiernos distritales han buscado alternativas de movilidad para la ciudad que de alguna manera complementen y despejen los medios tradicionales, es así que se ha incentivado el uso de la bicicleta para mejorar la movilidad y la calidad del aire. Teniendo en cuenta estas necesidades, el Distrito ha construido ciclorrutas dentro de la ciudad y se propone realizar un estudio con el objetivo de diseñar una red de ciclorrutas que tenga la capacidad de unir todas las localidades de Bogotá —a excepción de la localidad de Sumapaz— y con ello establecer trayectos con la mínima distancia posible. Para el diseño de la red se aplica el método del árbol de mínima expansión, el cual

consiste en conectar los nodos de una red y a la vez disminuir la distancia entre ellos, este modelo es utilizado para las conexiones eléctricas o redes de acueducto. Para la aplicación del método del árbol de mínima expansión se determinó que cada localidad tuviera un nodo, el cual se definió como el punto geográfico representativo de cada una, además, se determinaron las distancias entre los nodos representadas en arcos y se definió la red correspondiente. A partir de la red generada, se aplicó el método del árbol de mínima expansión para determinar la conexión de todos los nodos o localidades, teniendo en cuenta la mínima distancia, lo que genera una red conexa, la cual establece la red de la ciclorruta y el trayecto correspondientes para la conexión entre las diferentes localidades.

1 Autor correspondiente: Óscar Mauricio Gelves Alarcón, magíster en Ingeniería de Dirección Industrial. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: oscar.gelves@unimilitar.edu.co ORCID: 0000-0003-0557-775X

2 Autor correspondiente: Estefanía Patarroyo Alarcón. Ingeniera industrial. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: estefaniapatarroyo@usantotomas.edu.co ORCID: 0000-0002-4483-925X

3 Autor correspondiente: Nicolás Borrero Puentes. Ingeniero industrial. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: nicolasborrero@usantotomas.edu.co ORCID: 0000-0003-3825-018X

4 Autor correspondiente: Karen Angélica Salgado Turmequé. Ingeniera industrial. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: karenalagado@usantotomas.edu.co ORCID:

Palabras clave: Problemas de redes, árbol de mínima expansión, ciclorrutas, transporte, algoritmo ruta más corta.

Abstract: One of the most important needs that the city of Bogota D.C. currently has is to optimize its transport systems. In recent years, the district governments have sought mobility alternatives in the city that in some way complement and clear the traditional means of transportation. In this way, the use of bicycles has been encouraged to improve mobility and air quality, taking into account these needs the District has built cycling routes within the city and for this it is proposed to carry out a study with the aim of designing a network of cycling routes that has the capacity to link all the towns of Bogota with the exception of the town of Sumapaz and thus establish a route with the minimum possible distance. For the design of the network, the method of the minimum spanning tree is applied, which consists of connecting the nodes of a network and at the same time reducing the distance between them, in this way, it is used for electrical connections or aqueduct networks. For the application of the minimum expansion tree method, it was determined that each locality had a node, which was defined as the representative geographic point of each one, in addition, the distances between the nodes represented in arcs were determined and the corresponding network was defined. From the generated network, the least-spanning tree method was applied to determine the connection of all nodes or locations taking into account the minimum distance, which generates a connected network that establishes the network of the cycle routes and the corresponding path for the connection between the different localities.

Keywords: Network problems, minimum expansion tree, bike routes, transportation, shortest path algorithm.

Introducción

La ciudad de Bogotá D. C. en la actualidad cuenta con una red de ciclorrutas de 550 km [1], las cuales se encuentran de forma dispersa y algo desordenada, por lo que se han presentado inconvenientes con las conexiones, ya que la construcción de las ciclo rutas se ha determinado en función de las avenidas principales, mas no en el sentido de conectividad (Figura 1).



Figura 1. Mapa de red de ciclorrutas en Bogotá.

Fuente: Tomado de [2].

En la actualidad, se han realizado diferentes estudios para mejorar la movilidad en las ciudades, por ejemplo, en la detección de los modos de transporte más utilizados y su velocidad, según Adarme, la velocidad promedio de una bicicleta se encuentra entre 6 y 20 km/h [3].

Por ser la bicicleta una forma económica y rápida de moverse dentro de las ciudades, se propone como objetivo definir una ciclorruta principal que tenga la capacidad de comunicar todas las

localidades de Bogotá con un mínimo de distancia, para lo cual se decidió utilizar la modelación de redes y, en específico, el algoritmo de árbol de mínima expansión.

Se determinaron entonces puntos representativos de cada localidad para establecer la distancia entre los diferentes puntos geográficos, con el fin de construir una red de puntos y proceder a utilizar el algoritmo de árbol de mínima expansión para definir la red de nodos que genere la menor distancia y pueda conectar todas las localidades, y realizar un análisis sobre la ruta de ciclorruta propuesta por el algoritmo.

Marco teórico

Redes

Las redes surgieron de diversas situaciones de la vida real, por ejemplo, el transporte, las comunicaciones, la electricidad y en la actualidad las redes sociales. La investigación de operaciones se ha dedicado en los últimos años al diseño de modelos de optimización de redes, y entre los tipos de problemas más relevantes se encuentran el árbol de mínima expansión, la ruta más corta y el flujo máximo [18].

La modelación de redes permite resolver múltiples problemas de programación matemática mediante la implementación de algoritmos especiales creados para tal fin, conocidos como algoritmos de optimización de redes, los principales son: Árbol de mínima expansión, Ruta más corta y Flujo máximo.

Una red consiste en una serie de nodos enlazados con arcos (o ramas). La notación para describir una red es (N, A) , donde N es el conjunto de nodos y A , el conjunto de arcos [4].

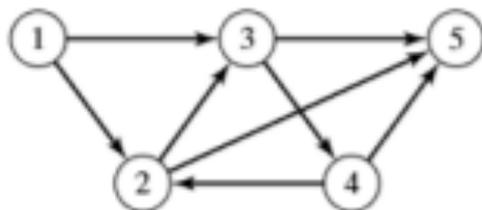


Figura 2. Ejemplo de una red (N, A) .

Fuente: tomado de [4].

Árbol de mínima expansión: Con este algoritmo se busca determinar una trayectoria a través de la red que conecte todos los nodos de forma que se minimice la distancia [4].

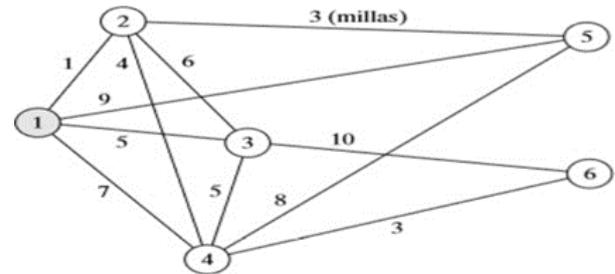


Figura 3. Ejemplo de un árbol de mínima expansión.

Fuente: tomado de [4].

El árbol de mínima expansión (MST, por sus siglas en inglés) fue formulado por primera vez en 1926 por Boruvka para la electrificación de la región de Moravia, con lo cual logró una reducción de costos en la distribución de energía [5]. Los algoritmos se componen de los siguientes pasos:

1. Diseñar una red que conecte todos los posibles nodos.
2. Seleccionar cualquier nodo de la red.
3. Conectar este nodo al nodo más cercano que disminuya la distancia.
4. Buscar el nodo más cercano que no esté conectado. Si hay empate para el nodo más cercano, seleccione cualquiera. Un empate permite una solución óptima múltiple.
5. Repetir el cuarto paso hasta conectar todos los nodos. [4]

La aplicación de los árboles de mínima expansión se puede observar también en el diseño de redes de acueductos, por ejemplo, en la red de servicio de acueducto de la ciudad de San Luis Rio Colorado [6].

Técnica de la ruta más corta: En este método se define la trayectoria más corta a través de una red. Entre los algoritmos relevantes para la puesta en ejecución de la técnica, está el método de la fuerza bruta y el algoritmo de Dijkstra [4]

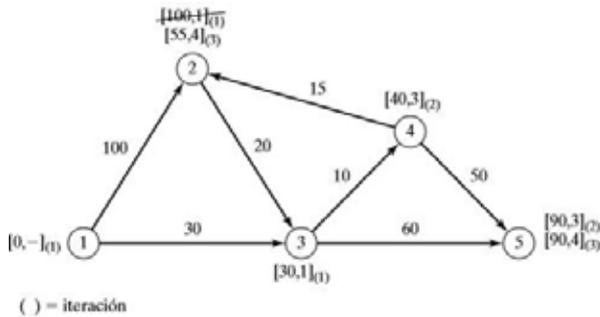


Figura 4. Ejemplo de la red aplicada al algoritmo de Dijkstra.

Fuente: tomado de [4].

El algoritmo de la ruta más corta consiste en analizar toda la red a partir de un origen y un destino, y se busca la ruta más corta entre los diferentes nodos de forma sucesiva y ascendente hasta llegar al nodo destino, donde se puede dar por resuelto el problema [7].

Técnica del flujo máximo: Por medio de este método, se puede hallar el flujo o cantidad máxima de objetos que pueden pasar a través de una red (Figura 5) [4].

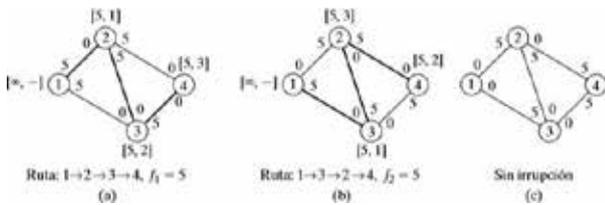


Figura 5. Ejemplo del flujo máximo.

Fuente: tomado de [4].

La técnica del flujo máximo se utiliza la mayoría de las veces en redes dirigidas, o sea en una sola dirección, por tanto, debe tener en cuenta un origen y un destino, los demás nodos se consideran de transbordo. El problema de flujo máximo se utiliza para maximizar el flujo de una red de distribución, el flujo de vehículos por una red vial, el flujo de agua en una red de acueductos, etc. [7].

Antecedentes

Parabuscartabajosdeinvestigaciónquecontengan información relacionada con la optimización de redes aplicadas al diseño de ciclovías o ciclorrutas, se hizo una revisión bibliográfica con base en las siguientes ecuaciones de búsqueda:

Optimización de redes and ciclorrutas and Latinoamérica (1)

Problemas de redes and ciclorrutas and Investigación de operaciones (2)

La mayoría de las investigaciones en la base de datos de Google Scholar fueron llevadas a cabo en Brasil y Perú. Entre los documentos de investigación encontrados con relación al diseño de ciclovías, algunos hacen referencia a su diseño geométrico. de estas cabe resaltar el trabajo de Guevara y Rodríguez [8], en el cual se busca diseñar una ciclovía en la ciudad de Lima a partir de la optimización de flujo de redes utilizando el algoritmo de Floyd-Marschall.

Otro trabajo interesante es el de Tejada et al. [9], quienes utilizan la microsimulación por medio del software Synchro 8.0, el cual genera una propuesta para el mejoramiento de la movilidad urbana en el entorno de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa.

Ordínez y Barry [10] presentan un modelo para definir el tránsito del ciclista, aplicado a la ciudad de Puerto Madryn en Argentina. El modelo se orienta a los trayectos más adecuados teniendo en cuenta, para los trayectos realizados, parámetros como la longitud, la frecuencia y el peso.

Metodología

Para el desarrollo de la metodología se tuvieron en cuenta los pasos propuestos para el algoritmo de árbol de mínima expansión mencionados más arriba. Inicialmente, se establecieron puntos referentes para 17 de las 18 localidades de la ciudad de Bogotá (ver Tabla 1) y sus ubicaciones correspondientes (Figura 5).

Tabla 1. Puntos referentes por localidad de la ciudad de Bogotá.

Puntos referentes por localidad					
N.º	Localidad	Punto referente	N.º	Localidad	Punto referente
1	Bosa	P. Central Bosa	10	Engativá	Unicentro Occidente
2	Usme	Portal Usme	11	Ciudad Bolívar	Facultad Tecnológica U. D.
3	R. Uribe	H. San Carlos	12	Antonio Nariño	P. Mercado Restrepo
4	Teusaquillo	C. C. Galerías	13	Mártires	P. Los Mártires
5	P. Aranda	B. Caldas	14	Fontibón	Zona Franca
6	San Cristóbal	Iglesia 20 de Julio	15	Candelaria	P. de Bolívar
7	Santa Fe	P. Nieves	16	Chapinero	P. Lourdes
8	Usaquén	Portal Norte	17	Tunjuelito	Parque Tunal
9	Suba	Portal Suba	18	Kennedy	Portal Américas

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 se observan las ubicaciones referentes por localidad de la ciudad de Bogotá, según la Tabla 1.

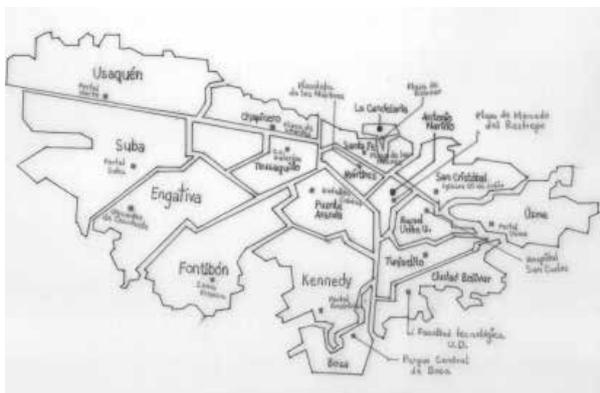


Figura 5. Puntos referentes por cada localidad de la ciudad de Bogotá.

Fuente: elaboración propia.

Luego, se calcularon las distancias entre puntos empleando todas las conexiones posibles con ayuda de la plataforma Google Maps, y se seleccionó la opción "A pie" para obtener resultados de las rutas más cortas. Hay que tener en cuenta que para algunas uniones de puntos no se les calculó la distancia por ser ubicaciones bastante alejadas, como ocurre entre "Portal Norte" y "Portal Usme", de esta manera, se quiere determinar una red de ciclorruta que incluya las rutas más cortas. A continuación, se muestran los resultados, entendiendo que el cálculo de la distancia desde "Portal Norte" hasta "Plaza Lourdes", será el mismo si es desde "Plaza Lourdes" hasta "Portal Norte".

Tabla 2. Distancias del origen "Portal Norte".

Origen	Destinos	Distancia (km)
Portal Norte	Plaza de Lourdes	13,10
	C. C. Galerías	14,60
	Portal Suba	8,00
	Unicentro de Occidente	12,20

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Distancias del origen "Parque central de Bosa".

Origen	Destino	Distancia (km)
Parque de Bosa	Facultad Tecnológica U. D.	5,40
	Parque Tunal	8,90
	Portal Usme	13,70
	Plaza Mercado Restrepo	11,30
	Iglesia 20 de Julio	12,90

Fuente: elaboración propia

A partir de las distancias anteriormente calculadas, se obtuvo la red que se observa en la Figura 6.

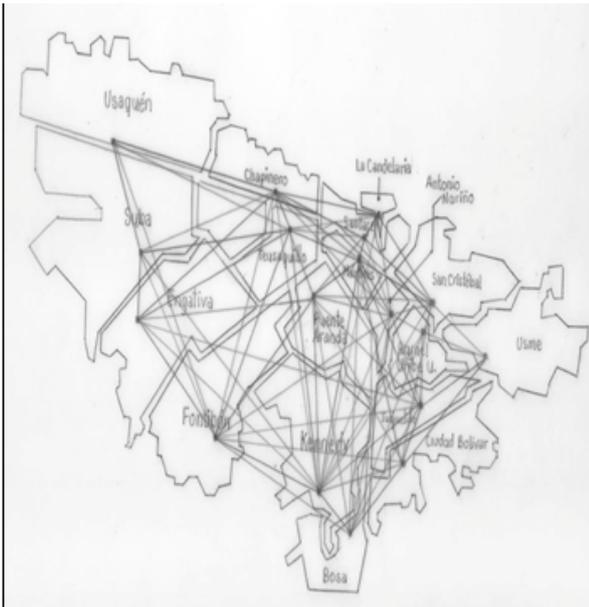


Figura 6. Red para los puntos referenciales para cada localidad de la ciudad de Bogotá.
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se obtuvo la ruta óptima tomando como nodo inicial el Portal del Norte y se conectaron los nodos teniendo en cuenta la técnica del árbol de mínima expansión.

Resultados

Como se puede observar, la ruta que se trazó comienza en el Portal Norte, pasa por el Portal de Suba, Unicentro de Occidente, llega a la Zona Franca, donde la ruta más corta desde este punto es el Portal de las Américas en Kennedy, es decir en el sur, seguidamente, la ruta pasa por las localidades ubicadas en el sur de la ciudad, hasta llegar nuevamente al norte en Chapinero (Plaza de Lourdes). Esto demuestra que esta ruta no es completamente óptima y que el método utilizado para calcularla no es el más efectivo: por ejemplo, si se desea ir de Unicentro de Occidente a la Plaza de Lourdes, la ruta sugiere recorrer la ciudad por los diferentes puntos referenciales del sector sur y el centro, cuando se podría utilizar una ruta más directa entre los nodos anteriormente nombrados; otro ejemplo es el recorrido desde el Portal Américas hasta Puente Aranda o Batallón Caldas, puesto que, a pesar de

ser una ruta extensa (10,60 km), es más óptimo que trasladarse por las demás localidades del sur como se plantea en la Figura 6; además, esta zona en particular presenta una gran demanda de bicisuarios que usualmente desean dirigirse por esta ruta para llegar a las zonas del Centro y Chapinero, por eso es importante tener en cuenta la conexión entre Kennedy y Puente Aranda a la hora de diseñar una red de ciclorruta.

Por otro lado, el nodo "Portal Tunal" tiene tres conexiones, porque el Portal Usme queda "por fuera" de la red y tuvo que unirse con este punto que era el más cercano. De acuerdo con lo anterior, se diseñó otra ruta, iniciando esta vez en la "Iglesia 20 de Julio", para poder realizar una comparación y determinar cuál de las dos opciones sería la ruta más coherente o correcta. La ruta se muestra en la Figura 7.

La distancia total para esta ruta es de 81,30 km. Teniendo en cuenta esta nueva ruta, se construye el trayecto que debe realizar el bicisuario, trasladándose por los puntos geográficos que se relacionan en la Tabla 4.

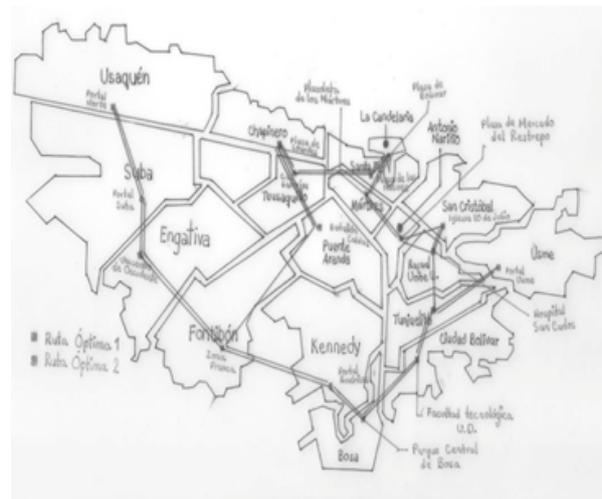


Figura 7. Ruta óptima N.º 02, iniciando en la Iglesia 20 de Julio.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Trayecto a realizar según la ruta óptima N.º 02 obtenida.

N.º de arco	Origen	Destino
1	Iglesia 20 de Julio	Hospital San Carlos
2	Hospital San Carlos	Plaza de Mercado del Restrepo
3	Plaza de Mercado del Restrepo	Plazoleta de los Mártires
4	Plazoleta de los Mártires	Plaza de Bolívar
5	Plaza de Bolívar	Plaza de las Nieves
6	Plaza de las Nieves	C. C. Galerías
7	C. C. Galerías	Plaza de Lourdes
8	Plaza de Lourdes	Batallón Caldas
9	Batallón Caldas	Zona Franca
10	Zona Franca	Portal Américas
11	Portal Américas	Parque Central de Bosa
12	Parque Central de Bosa	Facultad Tecnológica U. D.
13	Facultad Tecnológica U. D.	Parque El Tunal
14	Parque El Tunal	Portal Usme
15	Zona Franca	Unicentro de Occidente
16	Unicentro de Occidente	Portal Suba
17	Portal Suba	Portal Norte

Fuente: elaboración propia.

Como se pudo observar, esta nueva ruta empieza en la Iglesia 20 de Julio y recorre seguidamente la Plaza de Mercado del Restrepo, la Plazoleta de los Mártires, la Plaza de Bolívar, la Plaza de las Nieves, el C. C. Galerías, la Plaza de Lourdes y el Batallón Caldas, y luego, en este nodo, se conecta con La Zona Franca, donde se tienen dos opciones: la ruta más corta es ir hacia el Portal Américas donde el último nodo a través de esta opción es el Portal Usme; el otro vínculo es con Unicentro de Occidente, pasando por el Portal Suba y finalizando el recorrido en el Portal Norte. El nodo de Zona Franca tiene tres conexiones, las cuales permiten tener vínculos organizados e importantes que representan la unión con el norte, con el centro y con el sur de la ciudad.

En comparación con la ruta óptima N.º 01, esta nueva ruta abarca una mayor distancia, pero se evidencia que su cobertura comprende también la conexión entre Portal Américas y Puente Aranda, situación que no sucede en la primera propuesta, y adicionalmente, citando el ejemplo que se dio en la conclusión de la ruta óptima N.º 01, si se desea ir de Unicentro de Occidente a la Plaza de Lourdes, esta ruta sugiere un camino directo sin la necesidad de recorrer toda la ciudad. Con base en lo expuesto, se podría concluir que la red de ciclorruta propuesta podría ser más efectiva con respecto al primer resultado obtenido. Sin embargo, por el método del árbol de la Mínima Expansión no arroja una ruta totalmente óptima, porque para la ruta N.º 02, iniciando en la Iglesia 20 de Julio, si se quiere ir del Portal Norte a la Plaza de Lourdes, la ruta sugiere para poder llegar ir primero hacia el Portal Suba, Unicentro de Occidente, Zona Franca, pasar por la localidad de Puente Aranda y Teusaquillo, lo cual hace que la distancia sea mucho más extensa pudiendo hacer un recorrido más directo; este caso ocurre con otras conexiones entre nodos, por ejemplo: la Plazoleta de los Mártires y Batallón Caldas, Kennedy y Plaza de Mercado del Restrepo.

Conclusiones

Mediante el empleo de la técnica de árbol de mínima distancia o expansión, se define una ciclorruta con capacidad de conectar todas las localidades de Bogotá a una mínima distancia de 77 km.

La ruta que determina la utilización de la técnica de árbol de mínima expansión es de tipo circunvalar, lo cual puede dificultar la comunicación con puntos geográficos del interior de la ciudad.

Por medio de la utilización del árbol de mínima expansión se podría realizar una planificación de forma ordenada y a menor costo de las ciclorrutas, teniendo una ruta principal y unas rutas secundarias.

Esta metodología se puede desarrollar en municipios que en la actualidad no cuenten

con red de ciclorrutas para planificar de forma adecuada estos tipos de proyectos y se generen menos costos por construcción y conexión.

De acuerdo con los nodos propuestos, esta misma metodología se puede establecer al interior de las localidades de Bogotá D. C., con el fin de conectar estos nodos principales con nodos secundarios y con ello formar una red de ciclorrutas secundarias dentro de las localidades.

El diseño de la red de ciclorruta no solo utilizó el algoritmo del árbol de mínima expansión, también tuvo en cuenta el principio de la ruta más corta para determinar la distancia mínima entre los diferentes nodos geográficos de las diferentes localidades de la ciudad, la cual se determinó por medio de aplicaciones como Google Maps y Moovit.

Trabajos futuros

Se espera profundizar en la investigación aplicando la metodología del árbol de mínima expansión para municipios que en la actualidad no tengan red de ciclorrutas, con el fin de definir una propuesta para socializarla con alcaldías y secretarías de planeación.

Con base en el algoritmo de árbol de mínima expansión y ruta más corta se pretende crear una aplicación de programación que permita diseñar rutas basadas en los algoritmos anteriormente mencionados.

Referencias

- [1] "Bogotá alcanza los 80 kilómetros de ciclovías temporales", [En línea]. Instituto Distrital de Recreación y Deporte", 2020. Disponible en: <https://www.idrd.gov.co/noticias/bogota-alcanza-los-80-kilometros-ciclovias-temporales> [Acceso: 12 de julio de 2021].
- [2] "Movilidad Uniandes", *Manual de Movilidad. Universidad de los Andes*, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://movilidad.uniandes.edu.co/index.php/bici> [Acceso: 12 de julio de 2021].

- [3] M. Adarme, D. Heredia, E. Puerto Cuadros, "Detección de modos de transporte usando datos GPS", *Revista Cuaderno Activa*, n.º 9, pp. 13-29, 2017.
- [4] H. Taha y V. González Pozo, *Investigación de operaciones*. México: Pearson Educación, 2004.
- [5] H. Mayta, "Algoritmo evolutivo para el problema de árbol de expansión mínima (MST)", *Revista Industrial Data*, vol. 5, n.º 2, pp. 64-67, 2002.
- [6] G. Tzatchkov y V. Alcocer, "Implementación de algoritmos basados en la teoría de grafos en proyectos de sectorización de redes de agua potable", *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 2, n.º 3, pp. 97-114, 2011.
- [7] F. Hillier y G. Lieberman, *Fundamentos de la Investigación de operaciones*, México: Pearson Educación, 2014.
- [8] R. Guevara y M. Rodríguez, "Propuesta de diseño de ciclovías en Lima metropolitana mediante la optimización de flujo de redes", 2018, Congreso Latinoamericano-Iberoamericano de Investigación de operaciones CLAIO XIX.
- [9] J. Tejada, L. Villalba, L. Huaco y P. Gonzales, "Modelo de optimización del tráfico y mejora de la movilidad urbana en el entorno de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa", *Revista Veritas Journal*, vol. 15, n.º 1, pp. 67-79, 2017.
- [10] L. Ordinez y D. Barry, "Modelo de análisis para el dominio de tránsito Ciclista", *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación CACIC*, 2017, pp. 1010-1019. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/63863>.