



Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito Programa de Ingeniería Civil

Análisis de la accesibilidad de ciclo infraestructura de la localidad de Suba

Andrés Felipe Forero Martin

Bogotá, D.C., septiembre 2020







Análisis de la accesibilidad de ciclo infraestructura de la localidad de Suba

Para optar el énfasis de ingeniería civil en tránsito y transporte

Ing. Luz Mery Valencia Carvajal Directora

Bogotá, D.C., septiembre 2020







Agradecimientos





Resumen

La presente investigación tiene como objetivo analizar la accesibilidad existente en la ciclo-infraestructura de la localidad de Suba y evaluar dicha accesibilidad mediante el uso de sistemas de información geográfica y teoría de grafos. El objetivo principal es verificar que la infraestructura que se tiene para los usuarios de la bicicleta cumple con los términos de accesibilidad. Adicionalmente, se verifica si la relación entre oferta y demanda de infraestructura vial para este medio de transporte es óptima y se elabora la red de ciclo-infraestructura considerando todas las tipologías de vía. En cuanto a la metodología se usó la teoría de grafos, la cual a través de diferentes indicadores (φ , α , μ , β , entre otros), permite analizar de manera objetiva la accesibilidad de la ciclo-infraestructura. Los resultados obtenidos se presentan como mapas temáticos y con el objetivo de ser utilizados como una herramienta para el análisis y gestión de directrices para la mejora de tramos de conexión de la infraestructura.

Palabras claves: teoría de grafos; accesibilidad; análisis de redes; bicicletas; suba





Abstract

The present investigation aims to analyze the existing accessibility in the cycle-infrastructure of the town of Suba and to evaluate this accessibility by means of the use of geographic information systems and graph theory. The main objective is to verify that the infrastructure for bicycle users complies with the terms of accessibility. Additionally, it is verified if the relation between supply and demand of road infrastructure for this means of transport is optimal and the cycle-infrastructure network is elaborated considering all the typologies of roads. Regarding the methodology, the graph theory was used, which through different indicators (φ , α , μ , β , among others), allows to objectively analyze the accessibility of the cyclo-infrastructure. The results obtained are presented as thematic maps and with the objective of being used as a tool for the analysis and management of guidelines for the improvement of infrastructure connection sections.

Keywords: graphs theory; accessibility; network analysis; bicycle; Suba





Índice general

INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS:	11
SECUENCIA Y TIPO DE ACTIVIDADES QUE SE DESARROLLARÁN	N:11
MARCO TEÓRICO	12
Objeto de estudio: localidad de Suba	13
Unidades de planeamiento zonal (UPZ):	13
Usos del suelo en Suba:	16
Estratificación de la localidad:	18
Distribución de población por UPZ:	19
Uso de la bicicleta como medio de transporte:	21
METODOLOGÍA:	25
Índices de la teoría de grafos:	26
RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	29
CONSTRUCCIÓN DEL GRAFO	32
ANALISIS DE INDICADORES	34
ELABORACIÓN DE MATRICES	37



Conectividad:	37
Accesibilidad:	38
Índice Shimbel	39
Índice de dispersión y accesibilidad media	39
CONCLUSIONES	41
REFERENCIAS	43
ANEXO 1: Matriz de conectividad	45
ANEXO 2: Matriz de accesibilidad	46





Índice de tablas

Tabla 1:Superficie según UPZ Fuente: SDP, 2012. Elaboración UAECD	15
Tabla 2: Metros de ciclorruta por localidad. Fuente: propia	30
Tabla 3: Datos iniciales para índices. Fuente: propia	34
Tabla 4: Nodos con mayor cantidad de conexiones. Fuente: propia	38
Tabla 5: Síntesis de indicadores. Fuente: propia	40





Índice de figuras

Ilustración 1: mapa UPZ de la localidad de Suba. Fuente: catastro Bogotá 14
Ilustración 2: Superficie UPZ de Suba16
Ilustración 3: mapa usos del suelo de la localidad de Suba. Fuente: secretaria distrital de planeación (2017)
Ilustración 4: uso del suelo de Suba18
Ilustración 5: Estratificación localidad de Suba
Ilustración 6: Proyecciones de población localidad de Suba
Ilustración 7: mapa densidad poblacional de la localidad de Suba. Fuente: secretaria distrital de planeación (2017)
Ilustración 8: Uso de medios de transporte según el sexo.:
Ilustración 9: mapa de ciclovía en Bogotá. Fuente: IDRD (2020)23
Ilustración 10: mapa de ciclorrutas en Bogotá. Fuente: IDRD (2019)24
Ilustración 11: Elaboración del mapa de ciclo infraestructura en Bogotá. Fuente Google maps (2020)
Ilustración 12: Porcentaje de ciclorrutas por localidad
Ilustración 13: nodos y enlaces de la red de la localidad de Suba. Fuente: propia 32
Ilustración 14: grafo de la red de la localidad de Suba. Fuente: propia
Ilustración 15: Síntesis de índices normalizados





INTRODUCCIÓN

En Bogotá la capital de Colombia se realiza cerca de 13,3 millones de viajes diarios, estos varían en función de las condiciones económicas, tiempo y motivo del viaje, al trabajo, de estudio, ocio o por requerir un servicio. Estos desplazamientos se llevan a cabo caminando, en vehículos no motorizados (bicicletas, patinetas, triciclos) o en vehículos motorizados (automóviles y medios de transporte masivo). Como en la mayoría de los países latinoamericanos existe un problema de inequidad social en cuanto al acceso y desplazamiento en servicios de transporte y adicional a esto, aumentan los problemas medio ambientales por contaminación en cuanto al uso del vehículo particular como preferencia sobre los medios de transporte alternativos. En Bogotá se estima que un 85% de su población utiliza medios de transporte motorizados y esto genera a su vez un estimado de 500 toneladas de CO₂ al día. (IDEAM, 2018).

Teniendo en cuenta estos niveles de CO₂ y la alerta amarilla por contaminación que hubo en 2019 en toda la ciudad de Bogotá, es necesario implementar nuevas medidas de transporte sostenible. El uso de la bicicleta como medio de transporte alternativo a ido creciendo a lo largo de los años, actualmente se denomina a Bogotá como "la capital mundial de la bicicleta". Debido a esto, las condiciones de accesibilidad, estado de ciclorrutas y carriles prioritarios para la bicicleta y como esto afecta su optimo desarrollo e implementación es de vital importancia en los temas de investigación y estudio revisarlos.





OBJETIVOS:

Objetivo principal

Analizar la accesibilidad de la ciclo-infraestructura de la localidad de suba.

Objetivos específicos

- Elaborar la red de ciclo infraestructura considerando todas las tipologías de las vías.
- Evaluar la accesibilidad utilizando la teoría de grafos.
- Identificar unas directrices para la mejora de unos tramos especifico utilizando tráfico calmado.

Proceso metodológico y tipo de actividades que se desarrollarán:

Recolección de información

- Revisión de cantidad de ciclo-infraestructura.
- Comprobación de datos zonales de la localidad.
- Búsqueda de información sobre la implementación de nueva infraestructura.
- Comparación de datos con estudios similares en la zona.

Construcción del grafo

- Identificar cada ruta y ciclo-infraestructura.
- Identificar el número de nodos y arcos en la zona.

Análisis de indicadores

• Calcular los indicadores necesarios para el desarrollo de la teoría de grafos (φ , α , μ , β , etc.).

• Elaboración de matrices

- Construir la matriz de conectividad.
- Construir la matriz de accesibilidad.
- Determinar el número de Shimbel, el índice G y el índice de accesibilidad

Conclusiones

 Concluir sí la ciclo-infraestructura de la localidad de Suba tiene buena accesibilidad.





 Analizar que nodos son los más concurridos y como mejorar estos puntos con implicaciones de tráfico calmado.

MARCO TEÓRICO

La conectividad de una red de transporte facilita la comunicación entre carreteras, autovías o ferrocarriles. Estas conexiones permiten que el territorio consiga un crecimiento económico y cultural, ya que el impulsa crecimiento del producto interno bruto (PIB), debido a que; al tener mayor facilidad de transporte baja el precio del movimiento de carga y la economía se mueve más y de maneras diversas. Toda esta conectividad está ligada a qué tan accesible es una vía o una red, ya que de esto depende si un recorrido es más o menos largo.

El estudio de la accesibilidad de una red involucra una amplia gama de datos que son importantes en la planificación y la ordenación del territorio. Un estudio de accesibilidad generalmente tiene en cuenta la ubicación de los servicios públicos o privados, como aeropuertos, estaciones, hospitales o centros comerciales, es decir sitios de interés de una sociedad. Además, el concepto implica las centralidades, porque es entre los centros y la ubicación de los grandes equipamientos que generalmente se evalúa la facilidad de acceso, para obtener una proyección real de cómo es el comportamiento de los flujos. Para esclarecer como definimos la accesibilidad de un punto optamos por el uso de los diferentes índices que aquí se exponen, esto nos permite conocer otros datos como la centralidad y la densidad, que permiten una mejor planificación territorial y la reducción de distancias, de tiempos de viaje en el transporte, lo que mejora la productividad, la conexión y en gran manera como se mueve la ciudad.





Objeto de estudio: localidad de Suba

La localidad de Suba es una de las 20 localidades que comprende el distrito. Siendo esta la numero 11 en Bogotá, con un aproximado de 1,16 millones de habitantes. Está ubicada en el extremo noroccidental de la ciudad, limitando por el norte con el municipio de chía, por el sur con la localidad de Engativá, por el oriente con la localidad de Usaquén y por el occidente con el municipio de Cota. Suba se extiende a lo largo de 10.056 hectáreas, divididas: 5.800,7 Ha suelo urbano de acuerdo con el plan de ordenamiento territorial (POT). Estos deben contar con infraestructura vial, acueducto, alcantarillado y redes de energía primaria., 3.762,7 Ha suelo rural y 492,7 Ha como suelo de expansión. Esta localidad representa un 15,27% de la superficie total del distrito, el porcentaje más alto en comparación al resto de localidades. Luego de verificar mediante el uso de Google maps se afirma que Suba es la localidad con la topografía más variada debido a que en ella se encuentran montañas, planadas y llanuras.

Unidades de planeamiento zonal (UPZ):

Las unidades de planeamiento zonal o UPZ de la localidad de Suba están distribuidos en 12 partes de los cuales las más importantes como: Niza, Suba, El rincón y Tibabuyes, ya que son las más representativas de la localidad. Estas UPZ sirven para establecer la reglamentación de la urbanización, complementar y precisar la información de los usos y actividades de esa zona.



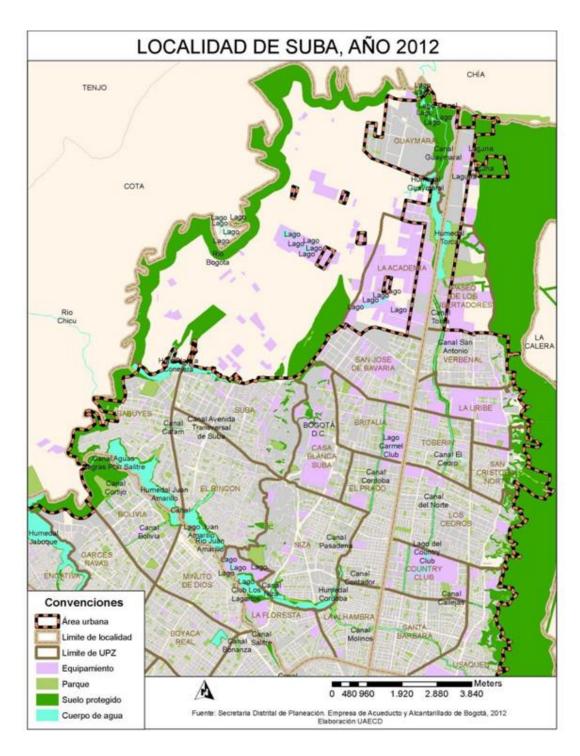


Ilustración 1: mapa UPZ de la localidad de Suba. Fuente: catastro Bogotá.





LOCALIDAD DE SUBA				
Numero	UPZ	Clasificación	Superficie Ha	Superficie %
2	LA ACADEMIA	Desarrollo	672,1	10,72%
3	GUAYMARAL	Desarrollo	453,6	7,23%
17	SAN JOSÉ DE BAVARIA	Residencial cualificado	438,3	6,99%
18	BRITALIA	Residencial consolidado	328,7	5,24%
19	EL PRADO	Residencial consolidado	433,4	6,91%
20	LA ALHAMBRA	Residencial consolidado	284,8	4,54%
23	CASA BLANCA SUBA	Desarrollo	420,5	6,71%
24	NIZA	Residencial cualificado	756,6	12,07%
25	LA FLORESTA	Residencial cualificado	393,5	6,28%
27	SUBA	Residencial de urbanización incompleta	652,9	10,41%
28	EL RINCON	Residencial de urbanización incompleta	710,1	11,32%
71	TIBABUYES	Residencial de urbanización incompleta	726,4	11,58%
	Total, Suba:		6270,9	100,00%

Tabla 1:Superficie según UPZ Fuente: SDP, 2012. Elaboración UAECD

De acuerdo con el planeamiento zonal en Suba encontramos cuatro categorías urbanas claramente definidas: sector de desarrollo (sector poco desarrollado con un predio ampliamente desocupado), residencial cualificado (estratos medios y altos con uso residencial y que cuenta con todos los servicios), residencial consolidado (uso predominante residencial donde se presenta actualmente un cambio de uso) y residencial de urbanización incompleta (estrato 1 y 2 de sector periférico no consolidado con uso residencial predominante y todos los servicios). (monografía por localidades – N11 Suba, 2018).

Estas UPZ se encuentran en su totalidad en suelo urbano con una superficie de 6.270,9 Ha (ver figura 2).



SUPERFICIE UPZ DE SUBA (%) LA ACADEMIA; 10,72% **TIBABUYES; 11,58% GUAYMARAL**; 7,23% **EL RINCON; 11,32% SAN JOSÉ DE BAVARIA**; 6,99% **BRITALIA; 5,24%** SUBA; 10,41% **EL PRADO; 6,91%** LA FLORESTA; 6,28% LA ALHAMBRA; CASA BLANCA 4,54% NIZA; 12,07% **SUBA; 6,71%**

Ilustración 2: Superficie UPZ de Suba

Usos del suelo en Suba:

El uso del suelo se define como la actividad que se desarrolla en un espacio geográfico determinado. La normativa catastral muestra que, en la localidad de Suba el uso predominante es de tipo residencial, ya que este cuenta con un 59,7% del total de la superficie de la localidad. Luego le sigue el uso dotacional con un porcentaje del 14,5% y por último el uso comercial con un 13,0%.



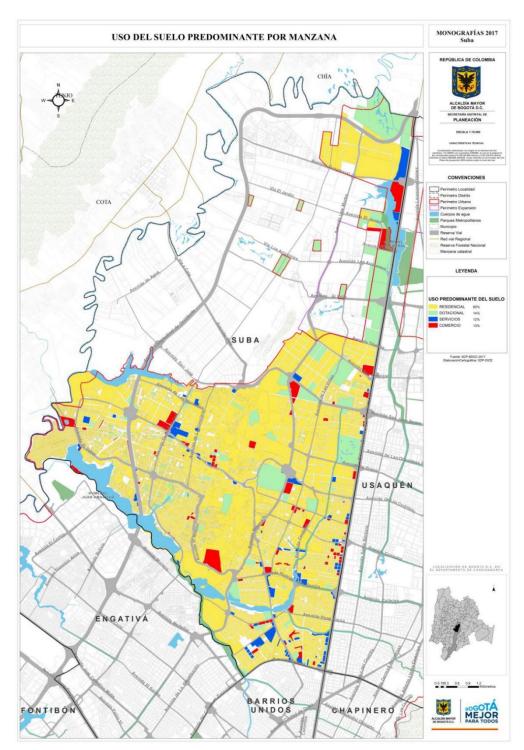


Ilustración 3: mapa usos del suelo de la localidad de Suba. Fuente: secretaria distrital de planeación (2017).





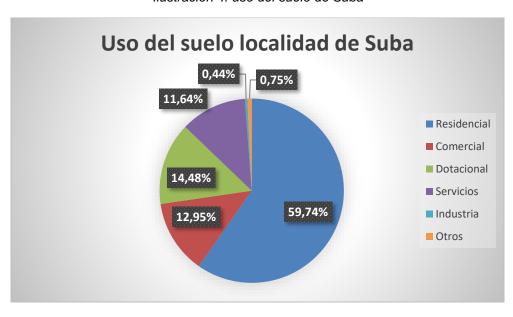


Ilustración 4: uso del suelo de Suba

Estratificación de la localidad:

Un aspecto de gran importancia para determinar los aspectos socio económicos de una región o zona es la clasificación que esta tiene frente al valor de los inmuebles residenciales de acuerdo con la metodología del DANE. La estratificación se mide en manzanas ya que abarca unidades más grandes de vivienda y adicional a esto variables de tipo urbano, como lo son: tipo de vías, andenes, etc.

El distrito cuenta con 45.051 manzanas de las cuales la localidad de Suba se representa 4.874, lo cual corresponde a un 10,8% del total de manzanas de Bogotá. estas se dividen en: sin estrato (501), estrato 1 (25), estrato 2 (2.148), estrato 3 (1.102), estrato 4 (441), estrato 5 (523) y estrato 6 (134). (monografía por localidades – N11 Suba, 2018).

Ilustración 5: Estratificación localidad de Suba





Como primera hipótesis se analiza el hecho de que la población mayoritaria es de estrato 2, lo que puede potenciar el uso de nuevos modos de transporte alternativos como bicicleta para realizar viajes funcionales y no funcionales a diferentes destinos.

Distribución de población por UPZ:

En cada una de las UPZ se tiene una distribución distinta de población, esto se debe a que las condiciones de vida en cada una son distintas en función de su localización, estratificación, consumo, accesibilidad, etc. Debido a estas condiciones se encuentra que a través del tiempo el crecimiento de la población tiende a disminuir. Con base en las proyecciones de población para la localidad de Suba de los años 2014, 2015, 2016 y 2017 se optó por realizar la proyección de población del año 2020 y obtener así valores más reales. Realizando métodos de





proyección lineal, geométrico y logarítmico promediamos un valor que sea el más apto para la estimación de la proyección de la población de 2020.



Ilustración 6: Proyecciones de población localidad de Suba

Fuente: elaboración propia

Gracias a esto obtenemos que la población tiende a incrementarse en aproximadamente 171361 habitantes. Gracias a este valor podemos obtener la densidad poblacional en la localidad. Ya que esta es definida como la cantidad de personas que residen en un territorio, por lo cual es habitantes sobre área. Esto nos da un valor de densidad poblacional de: 273 hab /ha para el año 2020. Lo que nos da a entender que existen 273 personas habitando una hectárea de la localidad.



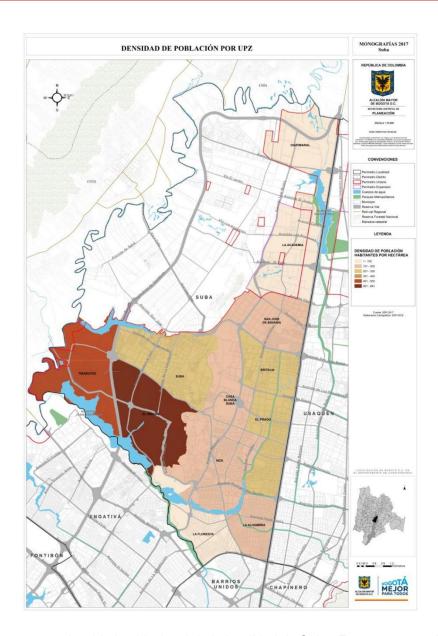


Ilustración 7: mapa densidad poblacional de la localidad de Suba. Fuente: secretaria distrital de planeación (2017)

Uso de la bicicleta como medio de transporte:

En Bogotá, aunque se haya implementado planes de transporte alternativo para el uso de medios de transporte no motorizados y de transporte masivo aún se perciben grandes problemas en la movilización urbana. Se evidencia que cerca de un 10,4%





de los hombres y un 7,8% de mujeres de la localidad de Suba se transportan diariamente en bicicleta.

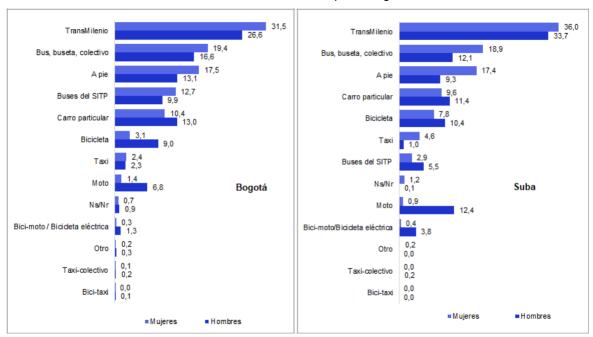


Ilustración 8: Uso de medios de transporte según el sexo.:

Fuente: Encuesta Bienal de Culturas (EBC), 2015.

Se estima que cerca de un 43,5% de las familias en Suba cuenta con al menos una bicicleta por familia. Este porcentaje fue sacado de la encuesta multipropósito de 2014 y al compararlo con el porcentaje obtenido en el año 2017 que fue de 42,4% vemos que disminuyo en un periodo de tres años en 1.1%. Esto se puede deber a muchos factores medioambientales y de inseguridad. En la localidad de Suba se estima que el transporte principal es de tipo público como el Transmilenio que actualmente moviliza un 35,1%, le sigue el vehículo particular con 19,1% y los buses SITP con un 15,4%.

En la localidad de Suba se han implementado varios tipos de iniciativas para mejorar la movilidad y la seguridad de los usuarios. Esto se debe a que Suba es la segunda





localidad con más viajes en bicicleta (73.397) solo después de Kennedy que cuenta con 92.570 viajes en bicicleta diarios. Una de estas iniciativas es "al colegio en bici" donde se analizaron 11 rutas que representan las líneas de deseo de mayor tránsito en el territorio y que benefician a 454 estudiantes que realizaban cerca de 36.697 viajes (2018). Adicional a esto se estima que hay cerca de 82 km de ciclo rutas en Suba de un total de 540 km que se ubican en el distrito lo que es cerca de un 15,185% del total de ciclorrutas del distrito. Estos sistemas de ciclo-infraestructura deben ser planeados de la misma manera que cualquier otro sistema por lo que se debe optar por la eficiencia en diseño y operación. (secretaria distrital de movilidad, 2019).



Ilustración 9: mapa de ciclovía en Bogotá. Fuente: IDRD (2020)

La infraestructura del transporte de bici usuarios se clasifica de tres formas: ciclorrutas, ciclovía y ciclo carriles que son complementarios entre sí. Este último es el que menos se incentivaba, pero debido a la pandemia por covid-19 se optó por mejorar la calidad de dichas rutas e implementar más kilómetros de bici carriles. Los domingos en Bogotá desde el 15 de diciembre de 1974 se implementó una manera





de incentivar el uso de la bicicleta de una manera recreativa que consistía en cerrar carriles de vehículos para darle paso a usuarios que fueran en medios de transporte no motorizados y a pie, esto se llamó la ciclovía. Por ultimo las ciclorrutas son las estructuras de transporte de bicicleta que más son usadas en Bogotá, esto se debe a que son permanentes y tienen un carril exclusivo por el cual el usuario puede andar tranquilamente.

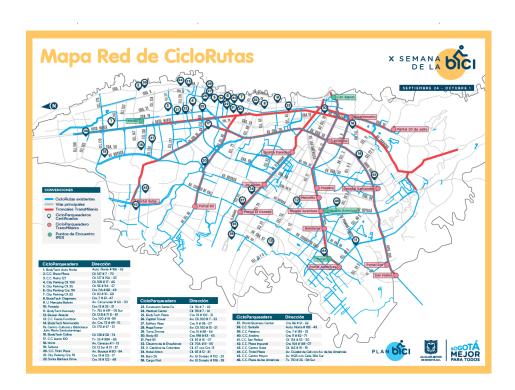


Ilustración 10: mapa de ciclorrutas en Bogotá. Fuente: IDRD (2019)

Bogotá cuenta con 550 km de ciclorrutas y hoy en día se añadieron 117 km de ciclorrutas temporales para el uso y seguridad de la población en tiempo de pandemia. (IDRD, 2019).

Como en cualquier tipo de estudio vial existen varios tipos de herramientas que nos permiten analizar la estructura de dicha vía y como esta conecta con otras. Para





nuestro caso de evaluación en esta localidad se tienen en cuenta dos aspectos importantes: redes viales de la infraestructura (ciclorrutas, ciclo carriles y carriles prioritarios) y la accesibilidad que tienen dichas redes entre sí. En este trabajo se pretende analizar la accesibilidad que tiene la ciclo infraestructura en la localidad de Suba mediante el uso de la teoría de grafos e identificar directrices de mejora para tramos con conflicto o de mucha demanda, solucionando estos tramos con el uso de medidas de tráfico calmado.

METODOLOGÍA:

El uso de redes de transporte logra facilitar la visualización y entendimiento de los límites, la conexión e interacción en un territorio (flujo), la cohesión, etc. Una manera de estudiar estas redes es mediante el uso de grafos para comprensión analítica del territorio. Un grafo se puede determinar como el conjunto de puntos unidos entre sí que forman segmentos representativos de una relación funcional cualquiera, en general centrada en relaciones topológicas.

Se utilizará la teoría de grafos para el desarrollo de dicho análisis de ciclo infraestructura. Esta teoría permite realizar un análisis descriptivo-explicativo que enfatiza las propiedades topológicas del terreno sobre las dimensiones reales de este. Estos grafos se componen por dos conjuntos, uno de nodos y otro de enlaces o arcos, donde cada enlace está determinado por dos vértices. Los nodos pueden tener tres tipologías:

- Intersección: ubicado en el cruce de dos o más enlaces.
- **Terminal:** ubicado al final del enlace.
- **Ficticio**: se determina cuando existe un cambio de sentido en el enlace, o cuando es usado para conservar la geografía de la red.





Para poder evaluar la conexión entre las redes de cada sistema se realiza una serie de operaciones y parámetros o indicadores que se utilizan para conocer el comportamiento de la red en relación con la conectividad. Siendo (a) el número de arcos, (n) el número de nodos y (L) la longitud de la red. (Cardozo, Gómez, parras, 2009).

Índices de la teoría de grafos:

Indicador de conexión (β): mide la complejidad entre los nodos de la red como un grado de conexión. Se obtiene del cociente entre el número de arcos y el número de nodos en la red. Valores menores a 1.0, nos indican que es una red inconexa, valores mayores a 1.0 nos indica que es una red compleja y valor de 1.0 en indicador β es una red con circuito único.

$$\beta = \frac{a}{n} \quad (1) \qquad \beta_{max} = \frac{n(n-1)}{2} \qquad (2)$$

la aplicación del índice de conexión es muy variada, pero cabe resaltar que se puede mejorar el análisis de está utilizando la fórmula de conexión máxima posible, ya que es la mayor conexión que puede tener la red, la cual equivale a un 100% de conexión, lo que es un poco fuera de lo real.

Numero Ciclomático o índice (u): indica el número máximo de ciclos o circuitos que posee la red. Surge de la diferencia entre el total de arcos de la red y el número total de nodos menos 1.0.

$$u = a - (n - 1) \tag{3}$$

Índice (α): indica el porcentaje de circuitos que tiene dicha red. Se calcula como: el cociente entre el numero Ciclomático y el máximo posible de circuitos (2n-5). Expresado en porcentaje para comparar.





$$\alpha = \frac{u}{2n - 5} * 100\% \tag{4}$$

Índice Gamma (φ): denota el porcentaje de arcos que tiene la red. Se calcula como: el cociente entre el número de arcos y el máximo posible de redes 3(n-2). Expresado en porcentaje para comparar.

$$\varphi = \frac{a}{3(n-2)} * 100\% \tag{5}$$

la teoría de grafos también nos ayuda a comprender la accesibilidad topológica que tiene cada nodo en su red. Esto lo logra teniendo en cuenta la cantidad de arcos que atraviesa la partícula (usuario), hasta llegar a un nodo de referencia. La forma de describir la forma de la red es mediante el uso de un índice de grado de cohesión (Cst), densidad de la red (ND) y el indicador de cobertura (s).

Grado de cohesión (Cst): identifica el costo de la red o la longitud total de la misma. Si el valor de Cst se acerca a (n/2) se aproxima a cohesión mínima, si se acerca a 1.0 tiende a presentar cohesión máxima.

$$C_{st} = \frac{n(n-1)}{2a} \tag{6}$$

Densidad de la red (ND): mide la cantidad de espacio que ocupa una red, teniendo en cuenta la longitud de los enlaces y la superficie (Rodrigue, et al, 2013).

$$ND = \frac{L}{superficie} \tag{7}$$

Indicador de cobertura (s): calcula la cobertura total de la red, en función de la longitud, el número de estaciones y la distancia entre estas. Entre menor sea el indicador, mayor será la cobertura. Donde n_t es el total de nodos de la red.





$$s = \frac{L}{n_t} \tag{8}$$

Calculados los valores anteriores se debe obtener una matriz de conectividad la cual es una tabla binaria con doble entrada en la que se introducen el número de arcos y nodos en filas y columnas. "De esta matriz se logra conocer la favorabilidad en términos de conexión entre nodos. A partir de ésta, se construye la matriz de accesibilidad topológica, en la que se remplazan los 0 y 1 por las distancias entre nodos de la red, expresada por el número de arcos que se deben recorrer para llegar de un nodo a otro, tomando el camino más corto. Para cada nodo, el valor más alto representa la mayor cantidad de enlaces que necesita recorrer para llegar al nodo más lejano, y el valor más alto de toda la matriz representa los nodos más alejados de toda la red, que equivale también al diámetro de ésta".

Numero de Shimbel: es un número obtenido mediante la suma de los valores de cada fila en la matriz de accesibilidad o conectividad y representa el número de arcos que se deben atravesar desde un nodo a los demás por el tramo más corto. El nodo que tenga el número más bajo es sencillamente el más accesible de la red.

Shimbel =
$$\sum dxy$$
 (9)

Donde el valor "d" es el número de arcos que separa los nodos "x" y "y" en el tramo más corto. Por último, con este valor es posible encontrar los índices evaluadores de accesibilidad global de la red: índice G y IAM.

Índice G: mide el nivel de accesibilidad de la red completa, se calcula como la suma de todos los índices Shimbel del grafo.

Índice
$$G = \sum$$
 Shimbel (10)





Índice de accesibilidad (IAM): determina un valor promedio de la accesibilidad en la red, se calcula como el cociente entre el índice G y el número de nodos existentes. (Cardozo, Gómez, parras, 2009).

$$IAM = \frac{\text{Índice } G}{n} \tag{11}$$

RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

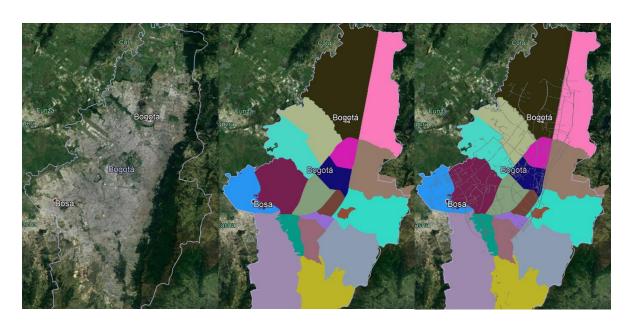


Ilustración 11: Elaboración del mapa de ciclo infraestructura en Bogotá. Fuente: Google maps (2020)

Para la construcción del grafo se realizó una recolección de información mediante el uso de datos libres en cuanto a las ciclorrutas de la ciudad; se delimitaron las localidades y se sectorizó la zona de estudio, posterior a esto se halló la longitud y localización de toda la ciclo-infraestructura en la ciudad para así tener una comparativa entre localidades y obtener un análisis más representativo. En nuestro





caso de estudio vamos a analizar solo a la localidad de Suba, la cual se identifica en la "imagen 6: Elaboración del mapa de ciclo infraestructura en Bogotá" de color marrón oscuro en el norte de la ciudad.

Localidad	metros de ciclorruta	% de ciclorrutas
Antonio Nariño	6610	1,20%
Tunjuelito	18095	3,29%
Usaquén	52941	9,61%
Los Mártires	10789	1,96%
Chapinero	17872	3,25%
Ciudad Bolívar	11211	2,04%
Engativá	56434	10,25%
Rafael Uribe Uribe	4510	0,82%
San Cristóbal	3331	0,60%
Puente Aranda	29770	5,41%
Barrios Unidos	34475	6,26%
Bosa	35112	6,38%
La Candelaria	1297	0,24%
Santa Fe	15072	2,74%
Fontibón	26114	4,74%
Kennedy	84416	15,33%
Suba	87864	15,96%
Teusaquillo	47693	8,66%
Usme	7051	1,28%
Total	550657	100,00%

Tabla 2: Metros de ciclorruta por localidad. Fuente: propia

Todo este proceso se llevó a cabo a mano en el programa "Google Earth Pro" y capas de información obtenidas en datos libres Bogotá. Se realizo una sumatoria de la longitud total de la ciclorruta por localidad (Tabla 2: metros de ciclorruta por localidad).





Con estos datos se puede confirmar lo anteriormente dicho: la localidad de Suba es la que tiene más kilómetros de ciclorruta en toda la ciudad ocupando cerca de 87 km de ciclorruta, aproximadamente el 15,96%. Todo esto a fecha del 31 de octubre del 2020, día de publicación de "Instituto de Desarrollo Urbano (2020). Cicloruta. Bogotá D.C. recuperado de: https://www.datos.gov.co/dataset/Cicloruta-Bogot-D-C/svxr-tw9f". también se hace énfasis en que no se tomaron las ciclorrutas temporales que se tienen expresas en el 2020 debido a que no se van a mantener constantes con el tiempo y esto va a generar un error en cuanto al análisis de los datos.



Ilustración 12: Porcentaje de ciclorrutas por localidad

Fuente: elaboración propia





CONSTRUCCIÓN DEL GRAFO

Para hallar los valores de nodos y arcos se hace la construcción del grafo, determinando de forma específica los puntos de conexión, puntos finales y ficticios de la red. Primero seleccionamos la localidad para manejar de mejor manera la red y de esta forma marcamos los nodos y puntos desconectados.

Un punto desconectado o final es el que se encuentra al final del enlace y no tiene una secuencia o camino hacia otro enlace o nodo. Esto sucede cuando existe algún tipo de problema en la infraestructura del andén, puede ser que el tamaño no sea adecuado para la construcción de la ciclorruta y entonces optan por no hacerla y que los ciclistas arriesguen su vida por las calles o, por ende, transiten por el andén junto a los peatones con los problemas que esto puede representar.



Ilustración 13: nodos y enlaces de la red de la localidad de Suba. Fuente: propia





Como se puede observar se tomaron en cuenta dos tipos de nodos, los finales (verde) y los nodos de intersección (amarillo), esto con el fin de diferenciarlos y así poder mejorar el análisis.

Posterior al reconocimiento de datos se optó por realizar un grafo configuracional que es similar a la red, y permite visualizar de manera más fácil los tramos y nodos donde existen mayor movimiento de usuarios, y, facilita reconocer su posición y dirección en el mapa. Este grafo no es más que la simplificación grafica de la red, aunque se asemeja a la red real no se tiene en cuenta el recorrido de los enlaces ni el área que cubren estos.

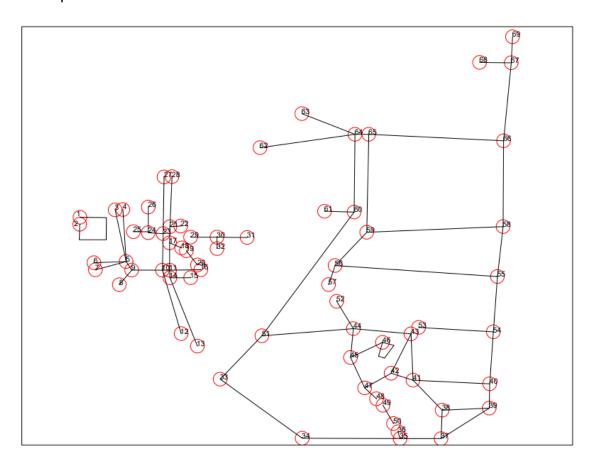


Ilustración 14: grafo de la red de la localidad de Suba. Fuente: propia





Con dichos datos de nodos y arcos se realiza la siguiente tabla resultado:

Parámetro	Tipología	Valor
Número de arcos	а	71
Número de nodos	n	69
Número nodos desconectados	n (desconectados)	35
Longitud de la red (m)	L	87864

Tabla 3: Datos iniciales para índices. Fuente: propia

ANALISIS DE INDICADORES

A partir de los datos que se consignan en la tabla 3 y que representan los valores iniciales para el cálculo de los índices expuestos en la primera parte de la metodología procedemos a evaluarlos de acuerdo con el trabajo de Parras,2008¹. Luego de hallados los índices se procede con su análisis individual.

Índice de conexión (β):

$$\beta = \frac{a}{n} = \frac{71}{69} = 1,029$$

$$\beta_{max} = \frac{n(n-1)}{2} = \frac{69(69-1)}{2} = 2346$$
 % conectividad actual =
$$1 - \frac{\beta_{max} - \beta}{\beta_{max}} = 1 - \frac{2346 - 1,029}{2346} = 0,044\%$$

Respecto a los valores del índice de conexión se puede deducir que el grado de conexión de la red es complejo debido a que $\beta > 1,0$, aunque al ser el valor tan cercano a 1,0 podemos decir que la red es circuito único. Al comparar este valor

¹ Revista Transporte y Territorio, Universidad de Buenos aires N1, 2009 =ISSN 1852-7175





con el máximo de conexión posible se puede evidenciar que el porcentaje de conexión actual que existe en la red de ciclorrutas de la localidad de suba es muy bajo, ya que no llega ni al 1% de la conexión del sistema.

• Número Ciclomático (u):

$$u = a - (n - 1) = 71 - (69 - 1) = 3$$

Entre mayor sea este número Ciclomático nos da a entender que la red es más compleja o está mejor conectada, una comparativa con otras ciudades nos indica que en promedio tiene un valor más bajo de lo normal por lo que se considera como una red con bajo nivel de desarrollo.

Índice alfa:

$$\alpha = \frac{u}{2n-5} * 100\% = \frac{3}{2(69)-5} * 100\% = 2,256\%$$

al ser el índice que indica el porcentaje de circuitos que tiene la red con respecto al máximo posible se puede verificar que solo se tiene un 2,256% del 100% total de circuitos posibles. Al ser un porcentaje tan bajo en función del total se puede definir que es una red con bajo nivel de desarrollo.

Índice Gamma:

$$\varphi = \frac{a}{3(n-2)} * 100\% = \frac{71}{3(69-2)} * 100\% = 35{,}323\%$$

al ser el índice que relaciona el porcentaje de arcos que tiene la red con respecto a su máximo posible se puede verificar que tiene un 35,323% del 100% total de circuitos posibles. Para completar ese 100% de conexión sería necesario que la red tuviera 201 arcos o enlaces, por lo que le harían falta





132 enlaces entre nodos para poder completar la red, debido a esto decimos que tiene un bajo nivel de conexión.

• Grado de cohesión:

$$C_{st} = \frac{n(n-1)}{2a} = \frac{69(69-1)}{2(71)} = 33,042$$

Este número en sí mismo no logra determinar ningún tipo de parámetro, por lo que es necesario normalizar dicho valor y así determinar un grado de cohesión entre cero y uno que nos ayude a analizar dicho valor.

limite
$$C_{st} = \frac{n}{2} = \frac{69}{2} = 34,5$$

$$C_{st\ normalizado} = \frac{33,042}{34,50} = 0,9577$$

El grado de cohesión normalizado se interpreta como: un valor cercano a cero es mayor cohesión y más cercano a uno es la mínima cohesión. Teniendo en cuenta esto podemos concluir que la red tiene un grado de cohesión bajo, ya que este es más cercano a 1,0.

Indicador de cobertura (s):

$$s = \frac{L}{n_t} = \frac{87,864 \, Km}{69} = 1,2734 \, Km$$

al dividir la longitud total de la red sobre el número de nodos se determina el valor promedio de la longitud de los enlaces o la distancia entre nodos, donde a menor distancia entre nodos mayor va a ser la cobertura de la red. Un valor de casi kilómetro y medio entre puntos de conexión es demasiado grande para una red, ya que se debe movilizar una gran distancia entre un nodo y otro, gracias a esto decimos que la red tiene poca cobertura. La distancia





mínima entre dos nodos es de 125 m por lo que se toma este como el valor más efectivo.

Densidad de la red (ND):

$$ND = \frac{L}{superficie} = \frac{87,864 \ Km}{627,09 \ Km^2} = 0,1401$$

Una red tiene una mayor densidad si ocupa una gran parte de la superficie en términos de los enlaces de la red. Si el parámetro ND se acerca a 1,0 es que la red es muy densa y entre más cercano a cero este es que la red es inconexa o poco densa. Vemos que se encuentra un valor cercano a cero por lo que concluimos que la red es de baja densidad.

ELABORACIÓN DE MATRICES

Conectividad:

La matriz de conectividad pretende dar a conocer la capacidad que tienen los puntos de una red para comunicarse en un recorrido mínimo. Para esto no se tiene en cuenta la longitud entre nodos si no la facilidad que tienen para su comunicación. La comunicación entre nodos se considera optima cuando se realiza mediante un solo enlace, ya que, si se necesita atravesar más de un solo enlace para poder llegar de un nodo a otro la comunicación será menor.

Para construir la matriz de conectividad se realiza una matriz con entrada doble con el nombre de cada uno de los nodos y se señalará con un valor unitario si existe comunicación directa y valor cero si no es directa (más de un enlace).

Obtenida la matriz de conectividad se logran realizar las siguientes consideraciones previas: el nodo que tiene la mayor cantidad de enlaces es el número 5, este nodo





colinda con los nodos 3, 4, 6, 7 y 9, el nodo está ubicado territorialmente en la carrera 127D71 diagonal 139ª Bis. Esta zona al ser observada en Street View se puede evidenciar que es un punto en común de intersección entre 4 ciclorrutas de ambos sentidos y adicionalmente a 40 m del nodo se encuentra otra ciclorruta adicional, por lo que contamos las 5 en un radio de 50m. los demás nodos solo tienen conexiones o enlaces a los 4 nodos cercanos.

Nodo	Número de conexiones	
5	5	
10	4	
11	4	
41	4	
44	4	
64	4	

Tabla 4: Nodos con mayor cantidad de conexiones. Fuente: propia

Accesibilidad:

Con la matriz de accesibilidad que puede llegar a comprender de una manera más sencilla la facilidad que existe para llegar desde un nodo de la red a otro en concreto. Para esta matriz de accesibilidad se necesita realizar el mismo proceso de la matriz de conectividad, diferenciándolas con respecto a que se deben contar todos los enlaces necesarios para llegar al nodo especifico, siempre por el camino más corto posible.

Posterior a eso se calculará el número de Shimbel para cada uno de los nodos y el índice de centralidad de cada uno. Este índice de centralidad se entiende como el índice de Shimbel sobre la cantidad de nodos menos 1. Los nodos que tengan los índices más bajos serán considerados como los nodos con mayor accesibilidad.





En este caso de estudio es evidente que no existe una única malla que una toda la red, esta se distribuye en aproximadamente 6 mallas independientes, de las cuales solo dos tienen las características suficientes para determinar un análisis. Las otras tres solo son dos nodos y un enlace que los conecta y la última es de 4 nodos y tres enlaces, pero están separados de las mallas principales, por lo que no se van a tener en cuenta dentro del análisis de nodos más accesibles, pero si en Shimbel, estos nodos son: 1, 2, 19, 20, 29, 30, 31, 32, 49 y 50.

Índice Shimbel

El índice de Shimbel más grande de la matriz de accesibilidad es de 209 y este corresponde a dos nodos, el nodo 68 y el nodo 69 que se encuentran en el borde de la ciudad, saliendo por el norte sobre la autopista y el otro en Mirandela, este valor tan grande simboliza que son los nodos en concreto a lo que se debe hacer un mayor recorrido hasta llegar a ellos. En el Anexo 2 se encuentra toda la información de la tabla de Shimbel.

Según el análisis del índice de Shimbel podemos concluir que la red de la izquierda o la que está más cerca de la localidad de Engativá tiene una mejor accesibilidad que la que es colindante a la localidad de Usaquén. Esto se puede deber a que la densidad de la red está mejor concentrada en la parte izquierda de Suba.

Índice de dispersión y accesibilidad media

Al sumar todos los índices de Shimbel que a la vez son representados por la sumatoria de arcos que son necesarios atravesar para llegar de un nodo a otro cualquiera. Esto mide que tan accesible es el conjunto de la red. Al realizar este análisis obtenemos un valor de 7823, esta es la cantidad de enlaces y movimientos para moverse de un nodo a otro cualquiera.





Luego de obtener el índice de dispersión calculamos el índice de accesibilidad media o IAM, el cual determina el valor promedio de accesibilidad de la red o que tan complejo es llegar en promedio entre nodos específicos. El valor IAM= 113,37 nos da entender que para moverse en promedio se atraviesan aproximadamente 114 enlaces.

Se realiza la síntesis de resultados de los índices para identificar de mejor manera como es el comportamiento de la red y su distribución. Todos los datos se dejaron normalizados para así verificar de mejor manera los valores en función de los máximos de la misma red.

SINTESIS DE ÍNDICADORES NORMALIZADOS		
Índice Betta (IB)	0,044%	
Número Ciclomático (NC)	8,271%	
Índice Alfa (IA)	2,256%	
Índice Gamma (IG)	35,323%	
Grado de cohesión (GC)	95,774%	
Indicador de cobertura (IC)	11,088%	
Densidad de la red (DS)	14,010%	

Tabla 5: Síntesis de indicadores. Fuente: propia

Se grafican los resultados de la tabla 4 para evidenciar gráficamente el comportamiento en función del total posible o del ambiente 100% óptimo.





Ilustración 15: Síntesis de índices normalizados

CONCLUSIONES

Al evaluar los indicadores para el análisis de la accesibilidad podemos concluir que de su mayoría se obtiene un resultado de poca accesibilidad o que es una red de bajo desarrollo en comparación al área asignada, en este caso la localidad de Suba. Vemos que tiene un grado de conexión muy bajo ya que no cumple con las condiciones de conexión suficientes para poder facilitar el transporte entre nudos o intersecciones.

Al observar la gráfica de índices normalizados podemos concluir que aún le falta mucho camino para llegar a ser una red que este 100% optimizada, ya que tiene demasiadas falencias en cuanto a longitud de la red, conexiones entre nodos y sobre todo el cómo se conecta la red completa, porque la red no es unitaria, se





subdivide en 5 redes distintas de las cuales solo se puede generar un análisis de accesibilidad óptimo de dos de ellas, la de zona oriente y la de zona occidente ya que cumplen con las condiciones de conectividad suficientes para considerarse una red completa.

Mediante el índice de Shimbel podemos concluir que los nodos de mayor accesibilidad son los que están en el centro de la red y los nodos con menor accesibilidad son los que se encuentran en la periferia de esta, como ejemplo se tiene el nodo 69 que es el último que se encuentra por la autopista norte con 191 y el nodo más central es el nodo 10 que queda ubicado en calle 139 con avenida Cali.

La ciclorruta que tiene la localidad de Suba en este momento es insuficiente e inaccesible en varios puntos, aunque esta tenga la mayor longitud en comparación con otras localidades también se debe tener en cuenta que no esta tan bien conectada como para considerarla una buena red de ciclorrutas.

Adicional a lo anterior dicho se debe considerar que el uso del suelo en la localidad de Suba es mayoritariamente residencial por lo que la implementación y construcción de nueva ciclo infraestructura podría generar un mejoramiento en la calidad de vida de las personas ya que esta zona tiene continuas congestiones vehiculares por la alta demanda de viajes que existen, una buena forma de incentivar el uso de la bicicleta puede ser arreglando las intersecciones o cruces que existen en la ciclorruta ya que esto molesta a los usuarios por el constante "sube y baja" que se debe realizar para atravesar de un andén a otro; lo que se puede hacer es implementar pasos a nivel para los biciusuarios y así puedan mantener una velocidad constante a lo largo de su recorrido, esto siempre en vías principales y en secundarias el uso que se está dando a los ciclo carriles demuestra que fue un buen aporte para la movilidad.





REFERENCIAS

Secretaria de movilidad de Bogotá (2020).

Secretaria distrital de salud de Bogotá (2020).

BRAVO, H. (2018). Análisis de redes de sistemas de bicicletas públicas en ciudades latinoamericanas usando teoría de grafos, *Espacios 39(50)*. Recuperado desde: www.revistaespacios.com/a18v39n50/a18v39n50p18.pdf

CARDOZO, O. Gómez, E. Parras, M. (2009). Teoría de grafos y sistemas de información geográfica aplicados al transporte público de pasajeros en resistencia (Argentina). *Transporte y territorio (01)*. Recuperado desde: www.redalyc.org/pdf/3330/333027079005.pdf.

Monografía 2017. Diagnóstico de los principales aspectos territoriales, de infraestructura, demográficos y socioeconómicos. (2017) Bogotá D.C. Monografía de localidades-No 11 SUBA. Recuperado de: http://www.sdp.gov.co/gestion-estudios-estrategicos/informacion-cartografía-y-estadistica/repositorio-estadistico/monografía-localidad-de-suba-2017%5D

CATILLO, A. Alcaldía mayor de Bogotá. (2013). Dinámica de la construcción por usos localidad de Suba en los años 2002 y 2012. Recuperado de: www.catastrobogota.gov.co/sites/default/files/archivos/suba.pdf

ENCUESTA MULTIPROPÓSITO 2014. (2015). 1st ed. [e-book] Bogotá D.C. Recuperado de: http://www.sdp.gov.co/gestion-estudios-estrategicos/estudios-macro/encuesta-multiproposito/encuesta-multiproposito-2014.





Alcaldía mayor de Bogotá. (2019). Informe de rendición de cuentas, localidad de suba.

Recuperado de:

www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/26-09-2019/informe_preliminar_de_rendicion_de_cuentas_localidad_suba.pdf

Análisis demográfico y proyecciones poblaciones de Bogotá (2018). (2014). 1st ed. [e-book] Bogotá D.C. Recuperado de: http://www.sdp.gov.co/gestion-estudios-estrategicos/estudios-macro/proyecciones-de-poblacion.

PINEDA, (2020). Cicloruta. Bogotá D.C. Calzada destinada de manera permanente a la circulación de bicicletas, ubicada en el andén, el separador o segregada de la calzada vehicular o en otros lugares autorizados, debidamente señalizada y delimitada. Recuperado de: https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/fe3b2925-3e76-4928-9a01-91cbd2e02f3b?_external=True

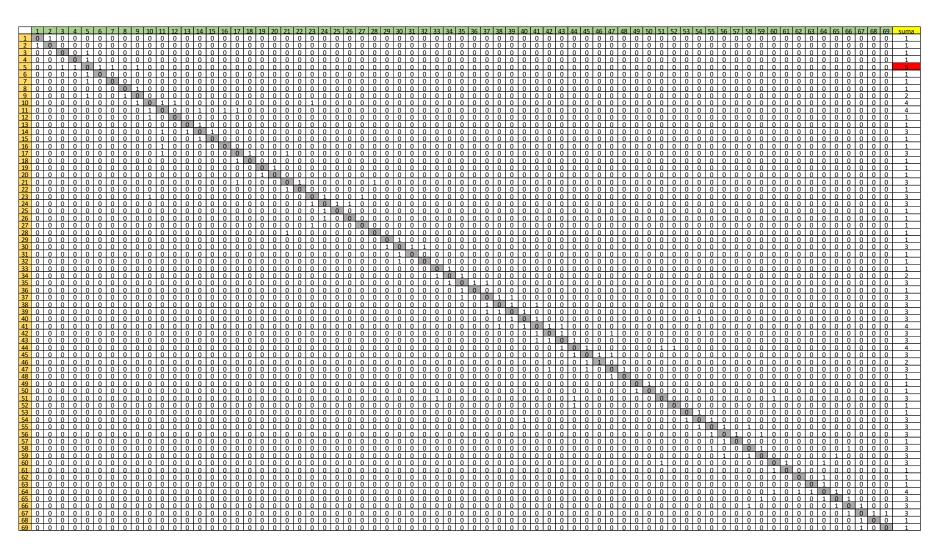
RODRIGUE, Jean-Paul; COMTOIS, Claude and SLACK, Brian. The Geography of Transport Systems. New York: Routledge, 2006. Recuperado de: https://transportgeography.org/wp-content/uploads/GTS_Third_Edition.pdf

BAUTISTA (2018), ANALISIS DE ACCESIBILIDAD Y CONECTIVIDAD DE LA RED VIAL INTERMUNICIPAL EN MICROSISTEMA REGIONAL DE LA PROVINCIA CENTRO EN BOYACÁ, COLOMBIA. Revista UPTC (80), Recuperado de: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/perspectiva/article/view/8058/8178#citations





ANEXO 1: Matriz de conectividad.







ANEXO 2: Matriz de accesibilidad.

