

REVISIÓN Y SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL IMPACTO
SOCIO ECONÓMICO Y DE CALIDAD EN LA MOVILIDAD, EN EL PROCESO DE
IMPLANTACIÓN DE UNA PARADA FERROVIARIA PARA EL CASO PARTICULAR DE
LA CIUDAD DE BOGOTÁ

ANGIE TATIANA ÁNGEL CHAPARRO

NATHALY RODRÍGUEZ USSA

TRABAJO DE GRADO DIRIGIDO POR:

MÓNICA MARCELA SUAREZ PRADILLA

INGENIERA CIVIL

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2020

AGRADECIMIENTOS

II

Ante todo, agradecer a nuestros padres por su apoyo incondicional, su guía, su amor y su confianza en nuestras capacidades. Ustedes son el principal motor para salir adelante y esforzarnos día a día para tener un crecimiento profesional y personal. Agradecer a nuestras familias quienes incondicionalmente han estado pendientes de nuestro proceso y nos han brindado su apoyo. A Diego y Adriana por ser una parte fundamental en nuestras vidas, gracias a la amistad que nos brindaron, nuestro paso por la universidad fue más ameno.

A la Escuela, al decano de la facultad, a los directores de las áreas de investigación, al semillero de movilidad, a los profesores y compañeros de clase que con su conocimiento y colaboración aportaron en nuestra formación dentro y fuera de las aulas de clase. A la ingeniera Mónica Suarez, nuestra tutora, porque sin ella no hubiera sido posible culminar este proyecto de manera exitosa.

De manera especial, a la ingeniera María Fernanda Ramírez Bernal por ser nuestra guía desde el inicio de nuestras carreras hasta el momento de nuestra graduación y principalmente por orientarnos desde el inicio en el desarrollo de este proyecto. Por inspirarnos para en el futuro lograr la excelencia tanto profesionalmente como personalmente, puesto que gracias a su ejemplo tuvimos el primer acercamiento a la definición de nuestra línea de profundización. Gracias por brindarnos una amistad más allá de lo académico.

A Dios, porque sin él nada de esto hubiese sido posible.

Over time, it has been demonstrated how rail transport systems have contributed to the economic and social development of cities around the world; offering different advantages over other modes of transport such as reducing user travel times, low accident rates and lower operating costs. Also contributing to the connection between the urban center and its periphery; Several studies on transport coincide in pointing to the railroad as the most sustainable.

In Latin America in terms of passenger transport, suburban railways become a priority in large cities, as a feeder arm for other modes of transport, to discourage car use on long trips and optimize the environmental impacts generated by the individual motorization. The lack of access to affordable and efficient transportation generates social exclusion and prevents accessibility to employment and education, health services and markets for low-income groups.

Therefore, our motivation is social and environmental. In this project, the decision criteria in the definition of stops were analyzed and compared, regarding methodologies used in cities with similar characteristics to the city of Bogotá. In some cases, various limitations prevent the successful introduction of the mode into the city.

For the particular case of Bogotá, its existing stops did not have any type of planning or design, the existing infrastructure was used, and only some road safety and demand parameters were contemplated for its definition. On the other hand, in cities like Tokyo in Japan, Campania Region and Bologna in Italy, the density and distances of the routes are comparable with the case study. In these cities, methodologies have been developed for the implementation of rail stops contemplating economic, social and environmental variables. These methodologies analyze the variables together, aiming to establish the most efficient stopping point option for the city.

With the bibliographic compilation obtained, a comparison and selection of variables was carried out, taking into account urban, economic, social, and transport characteristics, typical of Latin American cities. The objective of this project is to develop a series of recommendations that, if applied, are estimated to contribute favorably to the implementation of the railway mode in the city of Bogotá. In conclusion, these recommendations hope to facilitate decision-making, by the competent authorities, to make of the train an additional alternative as a mode of suburban transport, and also improve the quality of life of citizens.

Keywords: Railway systems, methodologies, accessibility, multimodality degree, railway stations, urban transport.

TABLA DE CONTENIDOS

V

CAPÍTULO 1 PANORAMA ACTUAL DEL SISTEMA FÉRREO	1
PANORAMA NACIONAL.....	1
CASO DE ESTUDIO “TURISTREN”	5
CASO TRANVIA CORREDOR AYACUCHO, MEDELLIN	13
PANORAMA LATINOAMERICANO	20
CASO PARTICULAR RÍO DE JANEIRO	23
CAPÍTULO 2 ESTUDIO DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA LOCALIZACIÓN DE PARADAS DE UN SISTEMA FÉRREO.....	25
METODOLOGÍA NODO - LUGAR.....	26
TOKIO, JAPÓN	29
METODOLOGÍA DE MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE VIAJES	33
PERTH, AUSTRALIA	34
METODOLOGÍA “TRANSIT ORIENTED DEVELOPMENT”	40
CAMPANIA, ITALIA.....	43
SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA APLICADA A LA SELECCIÓN DE PARADAS..	50
CAPÍTULO 3 ESTUDIO Y SELECCIÓN DE VARIABLES	51
SELECCIÓN DE VARIABLES APLICADAS A CIUDADES CON CARACTERÍSTICAS SIMILARES A BOGOTÁ.....	52
DEFINICION DE VARIABLES APLICABLES AL CASO DE ESTUDIO DE BOGOTÁ...53	
CAPÍTULO 4.....	55

SELECCIÓN ESTACIÓN PARA LA APLICACIÓN: ESTACIÓN CALLE 92	VI
CON CARRERA 30, BOGOTÁ	55
EVALUACIÓN SOCIO-ECONOMICA DE LAS ESTACIONES QUE INTERVIENEN EN EL CASO DE ESTUDIO	59
CAPÍTULO 5	67
APLICACIÓN CASO DE ESTUDIO: ESTACIÓN CALLE 92 CON CARRERA 30, BOGOTÁ	67
ASIGNACIÓN DE VALORES PARA CADA VARIABLE POR ESTACIÓN	68
VALOR NODO-LUGAR PARA CADA ESTACIÓN.....	70
ASGINACIÓN DE CADA ESTACIÓN AL DIAGRAMA DE LA METODOLOGIA NODO- LUGAR	73
CAPÍTULO 6.....	76
RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE VARIABLES SELECCIONADAS EN LA ESTACIÓN DE ESTUDIO.....	76
CAPÍTULO 7	79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	83

LISTA DE TABLAS

VII

- Tabla 1. Horarios del servicio turístico del tren de la Sabana 10
- Tabla 2. Resumen de las metodologías 49
- Tabla 3. Variables encontradas en cada caso 52
- Tabla 4. Variables aplicables al caso de Bogotá 53
- Tabla 5. Variables categorizadas 54
- Tabla 6. Características de las UPZ's que incluyen las estaciones estudiadas 66
- Tabla 7. Valores cualitativos de las variables a aplicar 68
- Tabla 8. Valores cualitativos para las variables a aplicar 69
- Tabla 9. Valores de variables asignados a cada estación de estudio 69
- Tabla 10. Clasificación de variables por influencia 71
- Tabla 11. Valor de lugar de cada estación 72
- Tabla 12. Valor de nodo de cada estación 72
- Tabla 13. Valores de Nodo-Lugar para cada estación 73
- Tabla 14. Valores de Nodo-Lugar para cada estación 76
- Tabla 15. Valores de Nodo-Lugar para cada estación 81

- Figura 1. Red Ferroviaria de Colombia al año 2015 2
- Figura 2. Red Ferroviaria de Colombia activa 3
- Figura 3. Ruta del tren para la Universidad de la Sabana 7
- Figura 4. Ruta del tren para la Universidad Militar Nueva Granada 8
- Figura 5. Ruta del tren para la Universidad del Bosque 9
- Figura 6. Recorrido turístico Turistren 10
- Figura 7. Esquema tranvía eléctrico rutas "Sucre" y "Buenos Aires" 16
- Figura 8. Diagrama del método Nodo-Lugar 27
- Figura 9. Radios de captación por modo de transporte 42
- Figura 10. Análisis nodo-lugar 46
- Figura 11. Análisis detallado nodo-lugar 47
- Figura 12. Análisis de gráficos de radar 48
- Figura 13. Localización Estación caso de estudio 55
- Figura 14. Localización estación de mínimo valor S 57
- Figura 15. Localización Estación de mínimo valor U 57
- Figura 16. Localización Estación de máximo valor GE 58
- Figura 17. Estadística de población para cada estación de estudio 60
- Figura 18. Estadística promedio de hogares por estrato 61
- Figura 19. Estadísticas entorno de viviendas 63
- Figura 20. Estadística actividad física 64
- Figura 21. Diagrama Nodo-Lugar caso Bogotá 73
- Figura 22. Diagrama de referencia Nodo-Lugar 75

Figura 23. Diagrama Nodo-Lugar para cada estación 77

CAPÍTULO 1

PANORAMA ACTUAL DEL SISTEMA FÉRREO

En este capítulo se presenta la situación al año 2019 del sistema férreo en Colombia y en algunos países de Latinoamérica, en los cuales la red ferroviaria desempeña un rol importante dentro del sistema de transporte urbano.

PANORAMA NACIONAL

Antes de hablar de metodologías para la definición de paradas férreas, es importante conocer la situación actual del modo ferroviario en el país. El sistema de transporte urbano en Colombia, a comparación de otros países de Latino América y el resto del mundo, no ha logrado optimizarse debido a que no se ha implementado un sistema multimodal con el alcance adecuado y que logre satisfacer las necesidades de los ciudadanos.

En cuanto al sistema férreo, la topografía de Colombia ha sido uno de los principales desafíos que impidió el desarrollo del modo férreo en el país. Teniendo en cuenta que el principal uso de este modo siempre fue el transporte de carga y que aún opera en algunas zonas del país. Gran parte de la infraestructura férrea histórica del país aún se conserva, aunque en algunas zonas de una forma precaria.

En seguida se presenta el mapa de la red ferroviaria de Colombia para el año 2015.

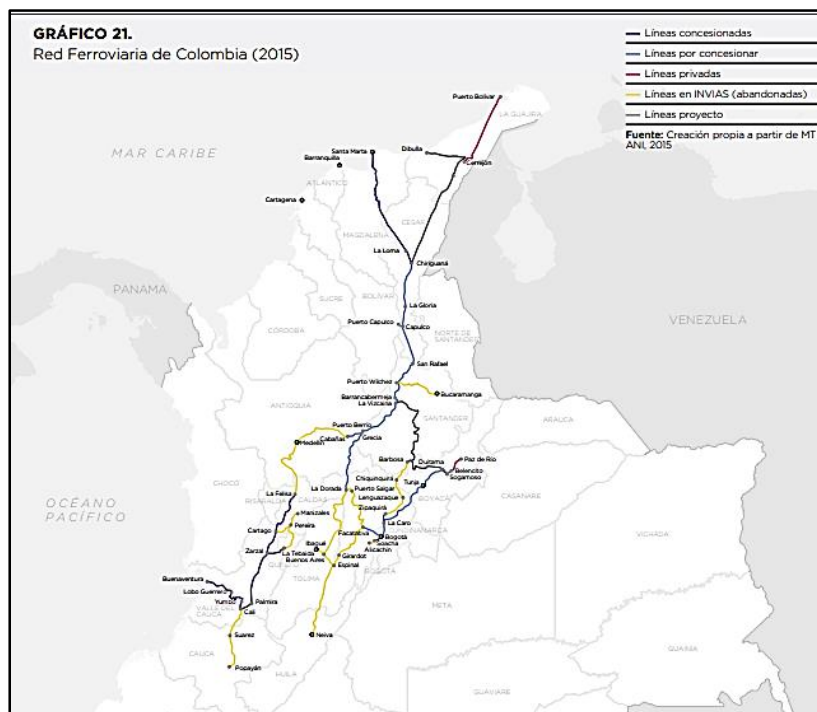


Figura 1. Red Ferroviaria de Colombia al año 2015

Fuente: Desafíos del transporte ferroviario de carga en Colombia (2016) [Figura]

A comienzos del siglo XX, la red ferroviaria del país se centraba en las zonas de mayor población y logró alcanzar una extensión de 3.300 kilómetros. Sin embargo, con el desarrollo de las carreteras, la red vial logró posesionarse por encima de la red ferroviaria, posición que actualmente se mantiene, una muestra de esto es que sólo 777 kilómetros de la red ferroviaria construida se encuentran en operación. Estos kilómetros de red férrea se distribuyen de la siguiente manera: 344 kilómetros corresponden a la Concesión del Pacífico, 245 kilómetros a la Concesión del Atlántico, 150 kilómetros a la línea privada de El Cerrejón y 38 kilómetros a la línea privada de Paz de Río. Según la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), para el año 2015 los corredores potencialmente activos corresponden a los tramos de La Dorada-Chiriguana y Bogotá-Belencito.

En la *Figura 2* se observa la red ferroviaria activa y potencialmente activa de Colombia.



Figura 2. Red Ferroviaria de Colombia activa
Fuente: Desafíos del transporte ferroviario de carga en Colombia (2016) [Figura]

De los archivos de la ANI (2015), se conoce que la red ferroviaria activa, actualmente se encuentra dividida en cuatro grandes bloques: Un bloque corresponde a los concesionados por la ANI, el segundo a los que están bajo la administración de la ANI para su futuro concesionamiento, el tercero incluye dos tramos de carácter privado y el último bloque corresponde a los tramos administrados por el INVIAS (Instituto Nacional de Vías).

Algunas de las limitaciones que presenta el sistema férreo en nuestro país corresponden a las políticas ferroviarias, el costo del multimodalismo, la topografía de la región y algunas problemáticas referentes al transporte de carga.

Entendiendo que el aspecto multimodal se refiere a la utilización de dos o más modos de transporte en un solo viaje. Según el Banco Interamericano de Desarrollo (2016), para el transporte de carga, los principales desafíos del multimodalismo son:

- Costos de operaciones de transbordo
- Aumento de ciclos de rotación
- Costos de stock

- Mermas en stock y manipulación de cargas
- Riesgos operacionales
- Accesibilidad directa a otros generadores de transporte

En cuanto a las estaciones de los corredores férreos nacionales, no se encuentra mucha información en cuanto a datos de demanda, operación; además en Colombia no se encuentran metodologías para definir los puntos de parada de estaciones férreas.

En este sentido, en los corredores ubicados en la zona central del país, los puntos de parada eran ubicados solamente teniendo en cuenta los lugares en donde se tenía la necesidad de transportar la carga y en algunas zonas de alta densidad poblacional. Es por esto, por lo que actualmente se observan estaciones de tren en las periferias de la zona urbana de algunos municipios del país.

Según una entrevista realizada al gerente de Turistren (2019), en la actualidad en la ciudad de Bogotá el transporte de pasajeros por la red ferroviaria se ha convertido principalmente en un modo de transporte turístico, utilizado para conectar el centro de la ciudad con municipios cercanos a Bogotá los fines de semana; y por otro lado presta servicio privado a algunas universidades que cuentan con campus ubicados en la zona norte de la ciudad y en municipios cercanos como Chía, Cundinamarca.

Es importante resaltar que el ferrocarril es un sistema seguro, de menor costo de operación en comparación a otros modos y más amigable con el ambiente, así que implementarlo adecuadamente tanto en el transporte de carga como de pasajeros causaría un impacto positivo en la movilidad de la ciudad y en la economía del país. Estas afirmaciones se abordarán más adelante en el documento.

CASO DE ESTUDIO “TURISTREN”

Turistren, es una empresa privada que utiliza parte del corredor férreo que hay en la capital del país. Llamaremos “Metodología Turistren” al conjunto de criterios y procedimientos logísticos que aplica esta empresa en la selección de sus estaciones de parada.

Actualmente, Turistren ofrece un servicio de transporte a diferentes campus y sedes universitarias en Bogotá, como lo son la Universidad de la Sabana, Universidad Militar Nueva Granada, Universidad del Bosque.

Según información obtenida de la página web oficial de El Tren Turístico de la Sabana funciona desde el año 1992 y según un estudio realizado en el año 2016, se movilizaron un total de 380.000 pasajeros, 180.000 turistas y 200.000 estudiantes. De acuerdo con los datos obtenidos, entre la Universidad de la Sabana y la Universidad Militar Nueva Granada se transportaron a más de 1.000 estudiantes diariamente.

Según el gerente de Turistren, estas cifras referentes al número de usuarios han aumentado en los últimos años, ya que más universidades han integrado este modo de transporte a los servicios que ofrecen para sus comunidades, debido a las importantes ventajas que presenta este modo, como lo son:

- El transporte privado de estudiantes y empleados de la universidad.
- Manejo de una tarifa competitiva frente a los otros modos de transporte de la ciudad.
- Los tiempos de recorrido son exactos todos los días y no dependen del tráfico vehicular.
- Es posible ajustar la frecuencia, el número de vagones y la capacidad de usuarios de acuerdo con la demanda de pasajeros.
- Disminución de tiempos de desplazamiento.

- Es una alternativa de transporte atractiva y segura para los usuarios.
- Es un modo que contamina menos que los demás presentes en la ciudad.
- Las universidades contribuyen positivamente a la movilidad dentro de la ciudad al hacer uso de este modo de transporte, al desincentivar el uso del vehículo particular y descongestionar el sistema de transporte público. Además, se ubican como referente para otras organizaciones e instituciones académicas.

El tren es de servicio particular especial para uso exclusivo de cada comunidad universitaria, por lo que cada institución cuenta con horarios exclusivos de servicio. Sin embargo, es importante incentivar el uso de este sistema férreo como un modo de transporte masivo, que permita mejor conectividad e intercambiador modal dentro de la ciudad y a su vez genere economía entre los municipios aledaños de la ciudad de Bogotá.

Las Universidades que actualmente cuentan con este servicio son la Universidad de la Sabana, Universidad Militar Nueva Granada y Universidad del Bosque. En seguida se describe el servicio para cada una, la ruta en cada caso, los puntos de parada y los horarios que maneja cada universidad, para el 2019.

Universidad de la Sabana

Según la información obtenida de la página oficial de la Universidad de la Sabana. Esta universidad cuenta con el servicio de tren de lunes a viernes en los horarios que se observan en la *Figura 3*, con una tarifa única de \$3.600 lo cual le permite destacarse económicamente de manera favorable frente a otros modos de transporte empleados por la comunidad universitaria.

El servicio de tren contratado consta de 2 auto férreos, cada uno de 3 vagones con una capacidad de 330 personas (100 de pie y 230 sentadas) para una capacidad total de 660 personas.



Figura 3. Ruta del tren para la Universidad de la Sabana
 Fuente: Universidad de la Sabana [Figura]
 Recuperado de: <https://www.unisabana.edu.co>

Universidad Militar Nueva Granada

Según la información obtenida de la página oficial de la Universidad Militar Nueva Granada, la universidad también ofrece convenios con algunas flotas de buses para llegar al campus universitario, cuyos precios varían entre \$2.300 y \$4.000.

Por otro lado, el servicio de tren se destaca por ser gratuito, la comunidad universitaria sólo necesita presentar el carné vigente de la institución en la estación de origen. El servicio de tren se ofrece de lunes a viernes en los horarios que se observan en la *Figura 4*.

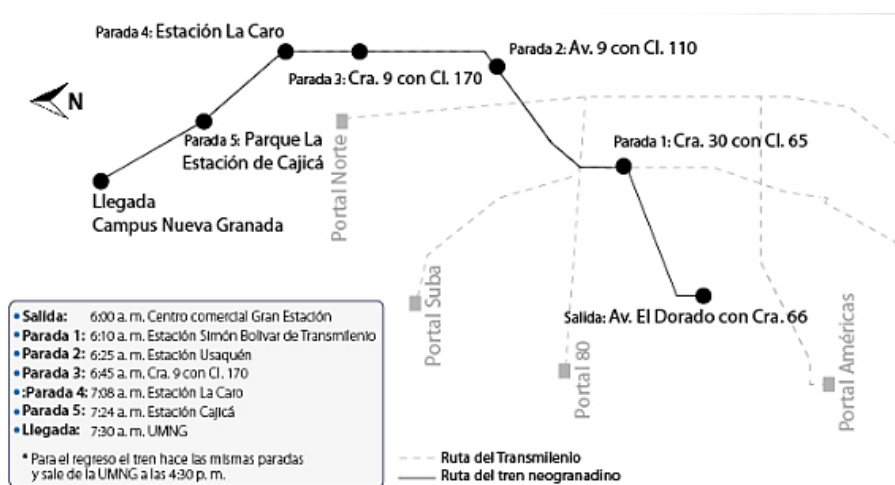


Figura 4. Ruta del tren para la Universidad Militar Nueva Granada

Fuente: Universidad Militar Nueva Granada [Figura]

Recuperado de: <https://www.umng.edu.co>

Universidad del Bosque

Según la información obtenida de la página oficial de la Universidad del Bosque, el servicio de tren se brinda para la sede universitaria ubicada en la Calle 134 por un costo de \$1.000 y para el campus en Chía sin costo, para acceder solo es necesario presentar el carné de la institución. En cuanto al campus ubicado en Chía, para desplazarse desde la última estación de tren hasta el campus, se debe pagar el costo de un bus alimentador.

El servicio de tren tiene una capacidad de 400 personas (112 de pie y 288 sentadas) y se ofrece de lunes a viernes. En seguida en la *Figura 5* se observa la ruta del tren para la Universidad del Bosque con sus respectivos horarios de servicio.



Figura 5. Ruta del tren para la Universidad del Bosque

Fuente: Universidad del Bosque [Figura]

Recuperado de: <https://www.uelbosque.edu.co>

No sólo se presta un servicio a la comunidad universitaria, en fin, de aprovechar el atractivo turístico que tiene el tren en la ciudad, los fines de semana y festivos se realizan

trayectos de interés turístico. Salen de la Estación de la Sabana o desde la Estación de Usaquéen llegando a Zipaquirá, Adicional, se puede visitar la Catedral de Sal de Zipaquirá, la Mina de Nemocón o recorrer Cajicá. El itinerario de este recorrido se observa en la Figura 6. Esta información se obtuvo de la página oficial de Turistren.

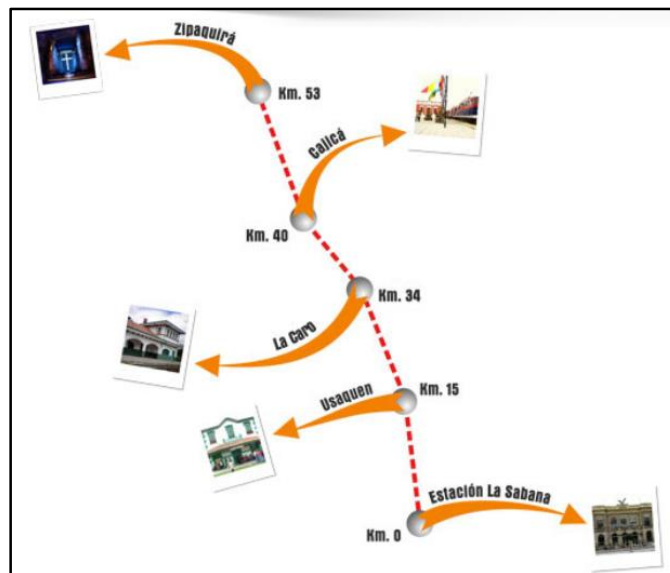


Figura 6. Recorrido turístico Turistren

Fuente: Turistren [Figura]

Recuperado de: <https://www.turistren.com.co>

Los horarios en los que se presta este servicio turístico se observan en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Horarios del servicio turístico del tren de la Sabana

Estación	Llega	Parada	Sale
Estación de la sabana			8:15 am
Estación Usaquéen	9:05 am	10'	9:15 am
La caro	10:05 am	10'	10:15 am
Zipaquirá	11:05 am	1h,30'	12:35 pm
Cajicá	1:05 pm	2h,10'	3:15 pm
La caro	3:30 pm	10'	3:40 pm
Estación Usaquéen	4:30 pm	10'	4:40 pm
Estación de la Sabana	5:30 pm		

Fuente: Turistren [Tabla]

Recuperado de: <https://www.turistren.com.co>

De la información que se encuentra en la página oficial de Turistren, se sabe que el tren consta de antiguas locomotoras a vapor que traccionan entre diez y catorce coches incluido un

coche cafetería; tiene una capacidad total de 580 pasajeros sentados. Las tarifas varían de acuerdo con el sitio de interés, nacionalidad y edad del usuario.

CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE PUNTOS DE PARADA

Durante muchos años en Colombia la planeación del transporte estuvo enfocada a los vehículos particulares, en los últimos años se ha tomado consciencia de la necesidad de enfocar esta planeación a otros modos de transporte más eficientes y a promover la multimodalidad en la movilidad de la ciudad. Sin embargo, los trenes aún no forman parte de esta discusión, debido a que el sector férreo en el país se encuentra estancado y no se cuenta con un sistema público intermodal que lo incluya.

Según una entrevista realizada al gerente de Turistren, Eduardo Rodríguez, en el primer semestre del 2019, se sabe que el servicio que ofrece Turistren a las universidades, se originó al observar la necesidad de éstas de brindar un servicio más económico, eficiente y seguro a sus comunidades universitarias, ya que muchas universidades de Bogotá cuentan con campus ubicados en las periferias de la ciudad. Además, Turistren tendría la oportunidad de utilizar la maquinaria e infraestructura que se encontraba en desuso durante los días hábiles de la semana. Así que la implementación de este servicio no contó con una planeación de puntos de parada detallada, solamente se utilizó la infraestructura ferroviaria existente y se contemplaron algunos parámetros básicos para decidir las estaciones, como lo son:

1. Paso peatonal seguro: Se aseguró que los puntos de parada contaran con un acceso peatonal seguro, puente peatonal o semáforo. La única estación que no cumple este parámetro es la estación de Usaquén (parada que cuenta con la mínima demanda de servicio universitario, aunque es una de las más demandantes del servicio turístico).

2. Demanda en el sector: Se busca que las paradas estén ubicadas estratégicamente en sectores de la ciudad donde la población estudiantil es amplia, teniendo en cuenta las universidades con las que se realizará el convenio.
3. Estaciones equidistantes: Esto hace referencia a que la distancia entre una parada y otra se mantenga constante durante toda la ruta trazada.
4. Accesibilidad: Aunque la población no viva cerca de las estaciones, se espera que se ofrezca la posibilidad de llegar a ellas utilizando otros modos de transporte público de la ciudad.

La variable que más se considera es la correspondiente al análisis de la demanda en el sector. Generalmente, junto con las universidades que deciden contratar el servicio del tren, se realiza un estudio de la población estudiantil que se puede beneficiar del uso de este modo y por ende podrían ser usuarios del sistema. La estación de la calle 147, es un claro ejemplo de ese análisis, debido a que este punto atrae aproximadamente a la mitad de los estudiantes que hacen uso del servicio de tren, ya que este es un sector residencial y estudiantil.

Por otro lado, la estación ubicada cerca al Centro Comercial Gran Estación es un buen ejemplo de una parada intermodal de este sistema, debido a que se puede llegar a la estación haciendo uso del sistema de transporte público de la ciudad, Transmilenio y buses del SITP, en esta estación el tren empieza a ser competitivo debido a que su tiempo de viaje desde allí es menor al de los demás modos de transporte presentes en la ciudad. Otras estaciones que cuentan con posibilidad de ser intermodal son: Calle 66 donde se cruza este sistema con Transmilenio, y la Calle 170 en donde se ubica una pequeña troncal de buses urbanos.

Los sistemas de transporte público en Bogotá como el Transmilenio y el SITP no han logrado desincentivar el uso del vehículo particular dentro de la ciudad, principalmente porque

fallan a la hora de ofrecer comodidad y seguridad a los usuarios. Es por lo que la transición de los usuarios del vehículo particular al tren es uno de los grandes desafíos del sistema férreo en la ciudad, han transcurrido dos años desde que se implementó el servicio estudiantil del tren y aunque se ha evidenciado el aumento en el número de usuarios, muchas personas siguen prefiriendo el automóvil incluso si eso implica tiempos de viaje prolongados, debido a la gran congestión de vehículos que se evidencia día tras día en Bogotá.

CASO TRANVIA CORREDOR AYACUCHO, MEDELLIN

Medellín es sin duda la ciudad que más le apuesta al transporte sostenible en el país. A lo largo de los últimos años ha logrado un desarrollo importante en cuanto a sus modos de transporte, lo que la convierten en ciudad pionera en temas de movilidad en Latinoamérica. “El factor diferencial con respecto a otros sistemas es que en Medellín su autoridad de transporte empezó a concebir toda la movilidad de forma integrada”, explica Manuel Rodríguez, especialista en transporte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Actualmente, Medellín cuenta con una red de transporte compuesta por autobuses, tranvía, metro, Metrocable y Metroplus, estando estos tres últimos completamente integrados en el mismo sistema “Metro” de la ciudad.

De la página web oficial del sistema Metro de Medellín, se sabe que esta red se encuentra compuesta por: Dos líneas de Metro, una que recorre la ciudad de Norte a Sur y otra que va de Centro a Oeste. Su horario de funcionamiento es de 04:00 a 23:00 todos los días, y es uno de los modos de transporte más utilizados en la ciudad.

El sistema Metrocable, actualmente cuenta con tres líneas en funcionamiento que ofrecen su servicio en algunos de los barrios más desfavorecidos de la ciudad. Integrándose a la red de transporte urbano de la ciudad.

El Metroplus se trata de un sistema de transporte que consta de autobuses articulados que viajan por carriles de dedicación exclusiva, y está compuesto por dos líneas y 43 estaciones, aunque actualmente existen proyectos para ampliar la cobertura de este servicio.

El tranvía se compone de nueve paradas, que a su vez hacen parte de una línea única, conectando el centro de Medellín con la zona Este, el que llamaremos “Tranvía Ayacucho”, siendo este el modo de transporte a explicar relacionándolo como sistema férreo. Los autobuses tienen como destino el Centro de la ciudad, habiendo algunos pocos que recorren los principales centros universitarios y el área al sur de la urbe.

Por otro lado, el SITVA (Sistema Integrado de Transporte Masivo del Valle de Aburrá), ofrece a los viajeros la posibilidad de realizar transbordos entre los distintos modos de transporte y permite el pago del servicio por medio de una tarjeta monedero personal, tarjeta Cívica, esta también da acceso al uso de bicicletas del sistema público de alquiler *EnCicla*, este sistema de bicicletas cuenta con 18 estaciones y se pueden utilizar múltiples veces, siempre que los viajes sean inferiores a una hora.

Los datos que se presentarán a lo largo de este capítulo fueron obtenidos del informe *Nuestro tranvía, para quienes vivimos la ciudad metro a metro*. Publicado por la revista Metro de Medellín para el periodo 2014-2015.

Así, en el caso específico del Tranvía Ayacucho. Contemplado en el Plan Maestro 2006 - 2030 *Confianza en el Futuro*, de donde se obtuvo esta información, el cual, a través del Corredor de Ayacucho con el tranvía y sus dos cables, genera un avance regional al conectar los valles

Aburrá y San Nicolás con tecnología ferroviaria, idea centenaria que se frustró por las disputas políticas de principio del siglo XX en el oriente antioqueño.

El primer tranvía de Medellín se inauguró el 23 de enero de 1887. Los coches eran tirados por mulas y rodaban sobre rieles insertados en las calles aún sin pavimentar, coloquialmente llamado ‘tranvía de sangre’, este servicio estaba destinado a atender el creciente dinamismo industrial y comercial que impulsaba el Ferrocarril de Antioquia. Al inicio se logró satisfacer la necesidad de movilidad en sectores entre La plazuela de la Veracruz y La casa de baños de El Edén, hoy en día conocido como Jardín Botánico. Más adelante se amplió el sistema por la carrera Bolívar, subiendo por Ayacucho hasta la actual iglesia de Buenos Aires. Sin embargo, la empresa encargada nunca pudo con el manejo de las mulas que halaban los coches, de esta manera el tranvía de sangre dejó de funcionar en el año 1893. En los años siguientes se realizaron varios intentos de poner en marcha un nuevo tranvía, estos proyectos fracasaron debido a distintas disputas.

El tranvía electro llegó a la ciudad en los años 20. En 1919 con la creación de la Empresa de Tranvías Eléctricos, llegaron doce carros eléctricos de línea Birney Safety Cars. Con ellos se inició el servicio comercial el 12 de octubre de 1921 para atender inicialmente la demanda del tramo Plaza de Berrío - La América. Posteriormente, con la compra de 52 carros adicionales, se crearon diez líneas más entre los que se contaron dos coches de cuatro ejes; los coches tenían una capacidad aproximada de 30 pasajeros sentados y 20 de pie. Tres tipos de vagones atendían la demanda: Los de color verde correspondían a pasajeros y carga; Los rojos, eran sólo para pasajeros y sus sillas eran de madera; y los amarillos, tenían una mayor capacidad de usuarios y sillas de mimbre.

Para 1925 casi una tercera parte de la población de la ciudad hacía uso del tranvía, hasta 18.923 pasajeros diarios se reportaron para ese momento. Los sectores de mayor demanda correspondían a Aranjuez (20%), Manrique (18%), Buenos Aires (18%) y La América (10%).

Sin embargo, el hecho de que el tranvía se construyera de manera unidireccional, que transitara por vías estrechas de pocos metros de ancho, lo que no permitía su ampliación por espacio y costos, y que no tuviera los suficientes vagones para atender la demanda, hicieron que este modo perdiera popularidad y sus viajes disminuyeron considerablemente.

En 1951 y con una demanda diaria de más de 61 mil pasajeros/día, el tranvía realizó su último viaje. Y en noviembre del mismo año se retiraron los rieles de las rutas del tranvía.

En la *Figura 7* se observa la red ferroviaria del Tranvía entre Sucre y Buenos Aires.

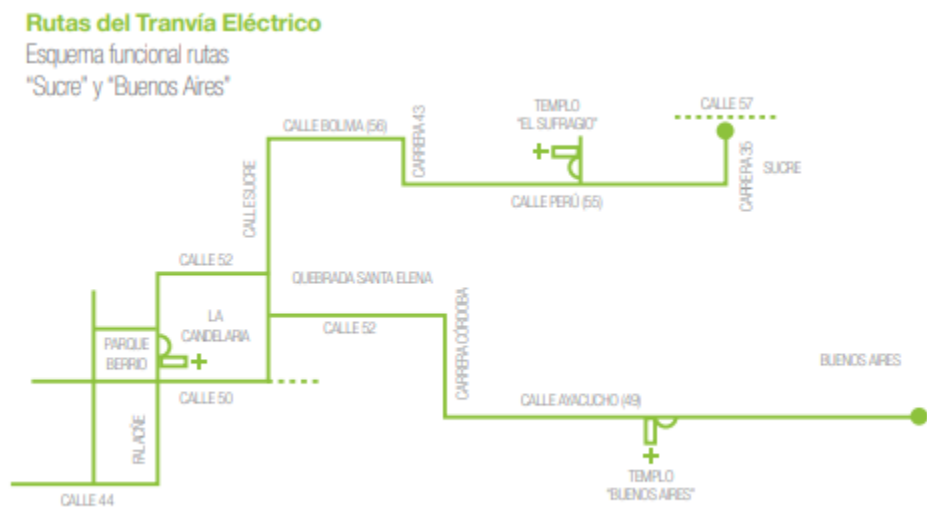


Figura 7. Esquema tranvía eléctrico rutas "Sucre" y "Buenos Aires"
Fuente: Revista Nuestro Tranvía, 2015 [Figura]
Recuperado de: <https://www.metrodemedellin.gov.co>

En el año 2015, el Tranvía vuelve con tecnología moderna para integrar y conectar el centro de la ciudad, este cuenta con un tranvía (línea T-A) y dos nuevos metro cables (línea M y línea H). “Es una obra muy importante no solo porque se suma al sistema intermodal de transporte generando economía para la gente y mayor rapidez en sus desplazamientos a través del territorio, sino porque es ejemplo de movilidad sostenible, un concepto que debemos interiorizar en todas las ciudades y poner en práctica porque pone al ser humano como centro de todas las obras de transporte, y le devuelve espacio público y aire limpio para respirar.” Explica Claudia Restrepo Montoya, gerente de la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá Ltda. (2019).

El Tranvía de Ayacucho tuvo un costo de USD 300 millones, donde la Agencia Francesa de Desarrollo otorgó un crédito por USD 250 millones para su construcción El tranvía contará con riel central y neumáticos y su pendiente máxima es del 12%.

Algunas ventajas de este proyecto son:

- Es eléctrico, no genera directamente emisiones y es muy silencioso. Cerca de 7.356 toneladas de CO₂ se dejarán de emitir anualmente gracias al proyecto.
- Diseño de las estaciones que permitan la reducción de consumo energético.
- Accesibilidad y facilidad en las estaciones y paradas.
- La construcción de su infraestructura es económica y liviana comparada con la de otros medios de transporte.
- Reduce el número de accidentes al eliminar la circulación de vehículos privados en la vía, lo cual genera una mayor sensación de seguridad en los centros urbanos.
- Marcha suave y cómoda.

- Mejora el atractivo de los centros urbanos y de las zonas conectadas con el Tranvía, haciéndolas más llamativas e interesantes a nivel económico.
- Impacto visual bajo.
- Capacidad de transporte mayor que su equivalente en autobuses.
- Genera una fácil convivencia con el ciudadano o peatón dado que éste puede caminar muy cerca del tranvía y apropiarse del corredor que se genera teniendo precaución.
- Se integra a otros medios de transporte, lo cual genera economía en sus desplazamientos diarios.
- Proyecto social, ambiental y económicamente sostenible.
- Disminución en los tiempos de viaje.
- Tarifas diferenciales con la tarjeta Cívica para adultos mayores, estudiantes y personas en situación de discapacidad.

CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DEL TRANVIA COMO MODO MÁS APROPIADO Y DE SUS PUNTOS DE PARADA

En 2009, la firma consultora *Advanced Logistics Group* (ALG) realizó los estudios de selección tecnológica que debía implementarse sobre el corredor Avenida Ayacucho. Por medio de una metodología de matriz multicriterio, en la cual se consideraron distintos medios o tecnologías de transporte como el trolebús, el metro, el metro ligero y los buses, entre otros; se llegó a la conclusión de que el tranvía ofrecía las mejores condiciones para este proyecto.

Por su modo de tracción, a través de ruedas neumáticas, el tranvía es perfecto para superar las pendientes de Ayacucho. Al comparar el tranvía con el metro, se encontró que era

una mejor opción si se comparaban características de rigidez, peso e impacto social y económico; o un bus, que requieren demasiada infraestructura además de poseer menos capacidad de pasajeros y dejarían menos oportunidades de convivencia entre el entorno y las personas, y si se compara el consumo energético es mayor que en el tranvía.

En cuanto a las estaciones y puntos de parada, se contempló el criterio “Estaciones y paradas para la vida”, concepto de calidad de vida que no puede estar más fortalecido con la llegada a estos 48 barrios de estos nuevos modos de transporte. Se garantizó que la población contara con una manera rápida, segura y eficiente para desplazarse a sus destinos. Para esto se contemplaron las siguientes especificaciones:

- En las plataformas se ubicaron puertas que se abren solo cuando llega el tranvía para el ingreso y salida del tranvía.
- El acceso al tranvía es solo con tarjeta Cívica.
- Es de fácil acceso, ya que son a nivel del piso, lo cual permite accesibilidad práctica para personas con movilidad reducida, mujeres embarazadas o adultos mayores.
- La construcción de su infraestructura es económica y liviana comparada con la de otros modos de transporte.
- Mejora del atractivo de las zonas donde se localizan las estaciones y paradas.
- Impacto visual bajo.
- Generar una fácil convivencia con el peatón, ya que es posible caminar muy cerca del tranvía y apropiarse del corredor que se genera con precaución.
- Integración con otros modos de transporte, lo cual genera continuidad en el viaje.
- Siembra de cerca de 1.400 árboles a lo largo del Tranvía y sus dos cables.

- Creación de 113.174 m^2 de nuevos espacios públicos y zonas verdes.
- Bajo consumo de energía eléctrica, ya que en accesos de estaciones y paradas se optimiza la luz natural con el diseño arquitectónico.

Es evidente que este proyecto contó con criterios intermodales para la definición de sus puntos de parada. Sin embargo, no se encontraron referencias acerca de una metodología particular utilizada.

PANORAMA LATINOAMERICANO

El contenido de este capítulo se obtuvo del Boletín, “La Facilitación del Transporte y el Comercio en América Latina y El Caribe”, edición N° 326, número 10 de 2013.

Actualmente, la industria ferroviaria en Latinoamérica está enfocada en la reactivación de las redes del sistema ferroviario, debido que en los años anteriores la actividad férrea se paralizó en su mayoría. En cuanto al transporte de pasajeros, los ferrocarriles suburbanos pasan a ser prioritarios en las grandes ciudades, como brazo alimentador de las redes de metro, con el fin de desincentivar el uso del automóvil en largos recorridos y reducir los impactos ambientales que genera la motorización individual. En adición a esto, la mayoría de las ciudades no cuentan con espacios físicos para poder aumentar la capacidad de las vías y en la mayoría de los casos existen zonas de vía de ferrocarril.

En Argentina, existen planes de modernización que se están ejecutando en la red de cargas del Ferrocarril Belgrano y en las zonas de demanda alta de pasajeros suburbanos e interurbanos. En el caso de los suburbanos la prioridad es incrementar la seguridad ferroviaria, planeando la renovación y mejora de los sistemas de seguridad y de señalización, e incorporando trenes nuevos comprados a China. Actualmente, las vías del ferrocarril Belgrano Cargas se

encuentra en renovación, logrando que por primera vez y de forma directa entre a 5 terminales agroexportadoras del país.

Brasil, el país más destacado en Latinoamérica en el desarrollo ferroviario por sus seis empresas de carga activa por ferrocarriles. 6 empresas que se posesionan entre las 10 más activas de la región. Impulsado por su crecimiento económico, ha gestionado una serie de proyectos de infraestructura ferroviaria, entre los que se destaca en cuanto a pasajeros interurbanos, el tren de alta velocidad Río de Janeiro-São Paulo. Particularmente en Brasil hay mucho espacio para una mayor expansión del transporte por ferrocarril, debido a que existe una alta demanda de pasajeros y a que las distancias a recorrer son importantes a medida que se llega al interior del país.

En Bolivia, se encuentra en marcha un estudio de trazados del Corredor Ferroviario Bioceánico Central, que permitirá conectar sus dos redes ferroviarias, la Andina de 2.274 km y la Occidental de 1.423 km,

En Chile, el tren a Rancagua ha logrado mantener un buen servicio y en la actualidad se planea integrar trenes nuevos para mejorar la calidad. En los últimos años, se han realizado distintas iniciativas para establecer una red de ferrocarriles suburbanos en las cercanías de Santiago, pero los altos costos de inversión hicieron fracasar estas propuestas.

En Ecuador, la empresa Ferrocarriles del Ecuador ha puesto en marcha un Plan de Recuperación del Sistema Ferroviario, que contempla la renovación de la infraestructura ferroviaria de vías y estaciones con el fin de operar el sistema ferroviario turístico-patrimonial. Este proyecto actuará como una alternativa importante de transporte de norte a sur, vinculando la costa del Pacífico y cubriendo un recorrido de aproximadamente 500 km, lo cual mejorará la situación actual de conectividad entre algunos sitios turísticos en el país.

En Centroamérica, los gobiernos se han convencido de la importancia que tienen las infraestructuras y el transporte para la economía, la movilidad de las personas y mercancías. Entre los principales proyectos se encuentran, el Corredor Interoceánico de Guatemala (CIG) y el Proyecto Ferroviario México-Panamá.

En Guatemala, se está viviendo un proceso de recuperación del ferrocarril, estudiando alternativas para el transporte de pasajeros y de carga. Respecto al transporte de pasajeros, se está contemplando la posibilidad de habilitar un servicio en la Ciudad de Guatemala.

En México, el plan del gobierno para el quinquenio 2013-2018 contempló, entre otros proyectos los siguientes:

- Proyecto Ciudad de México – Querétaro: Tren de alta velocidad que consta de 583 kilómetros de ferrocarril.
- Ferrocarril Matamoros-Brownsville: Tendrá 30 kilómetros y permitirá cruzar a Estados Unidos.
- Proyecto ciudad de México-Toluca.
- Conexión transpeninsular entre Yucatán y Quintana Roo.

En Panamá, se anunció la idea de recuperar el viejo proyecto de crear un eje ferroviario que conecte al país con México.

Paraguay, por su lado tiene en estudio proyectos de reactivación.

En Perú, se planeó la vinculación con el Corredor Ferroviario Bioceánico Central que atraviesa Bolivia.

Uruguay ha iniciado un proceso de reestructuración de su sistema ferroviario y ha anunciado la realización de inversiones para la rehabilitación de la red ferroviaria.

CASO PARTICULAR RÍO DE JANEIRO

Para el desarrollo de este capítulo, se obtuvo la información del informe *VLT Carioca – Tranvía de Río (Brasil)* publicado en marzo del 2018. Se quiere hacer énfasis en el caso de Río de Janeiro ya que es de las pocas ciudades en Latinoamérica que cuenta con características muy parecidas a las de Bogotá; las características observadas son por un lado Río cuenta con 1.182km^2 , una población aproximada de 6.476.631 habitantes y una densidad poblacional de $4.531\text{hab}/\text{km}^2$; mientras Bogotá tiene una superficie de 1.775km^2 , con una población de aproximada de 7.150.000 habitantes y una densidad poblacional de $4.531\text{ hab}/\text{km}^2$. De esta manera, es evidente la similitud entre las dos ciudades y es importante considerar los antecedentes presentes en el proyecto VLT Carioca que incluye la construcción de un tranvía en la ciudad de Río de Janeiro.

El proyecto VLT Carioca incluía la construcción del tranvía con tres líneas, con el fin de comunicar el centro de la ciudad con la región portuaria; Así como, la conexión con los diferentes modos de transporte presentes en la ciudad como estaciones de tren, metro, autobús y con el aeropuerto. Este proyecto se diseñó con la capacidad de transportar 300.000 pasajeros cada día y la proyección de demanda correspondía a 245.000 pasajeros para el primer año; según los encargados del proyecto, este dependía del desarrollo urbanístico de Porto Maravilha el cual pretendía causar un aumento importante de la población. A pesar de contar con un diseño enfocado a un sistema multimodal en la ciudad, conectando el tranvía con el transporte público colectivo, el tranvía no alcanzó sus objetivos iniciales ya que para el primer año de funcionamiento, solamente se transportaron 60.000 pasajeros diarios; todo esto a causa de la poca efectividad del desarrollo urbanístico de Porto Maravilha y la falta de integración tarifaria

con los demás sistemas de transporte, según el informe desarrollado por el *IESE Business School* (2018).

El proyecto VLT Carioca se compone de tres líneas, de las cuales dos se encuentran en funcionamiento (para marzo del 2018) y la última, iniciaba construcción en el segundo semestre del 2018. Las características de las tres líneas son:

- Línea 1: Compuesta por 19 estaciones y 12 kilómetros, fue inaugurada el 5 de junio de 2016 y estaba totalmente en operación hasta el 4 de junio de 2017.
- Línea 2: Cuenta con 12 estaciones y 9,7 kilómetros, entró en funcionamiento el 6 de febrero de 2017, abriéndose al tráfico la segunda parte el 21 de octubre de 2017.
- Línea 3: Tendría 10 estaciones (seis compartidas con la línea 1 y una con la línea 2) y 8,1 kilómetros, se planeó iniciar su construcción en marzo de 2018.

A pesar de los claros objetivos del proyecto, de conectar a la ciudad, ofrecer un sistema de transporte multimodal, con un impacto ambiental positivo y accesible para los habitantes. El tranvía no logró cumplir con lo establecido, y aunque se entiende que este era un proyecto ambicioso, el fracaso de este estuvo provocado por varios factores, entre estos se encuentra la situación económica de Brasil en el momento de la construcción del proyecto; y problemas en la planificación y ejecución del VLT Carioca.

Es importante considerar situaciones de proyectos como éste en la región, ya que resultan relevantes a la hora de comprender la situación de transporte en Colombia y la región, las cuales se convierten en referencias para investigar, proponer y aplicar ideas que nos acerquen a mejorar la calidad de vida de todos los habitantes de nuestras ciudades. Proyectos y situaciones como estas son la motivación de esta investigación, y es importante reconocer de igual manera los

resultados positivos y negativos, a la hora de buscar referencias de modos de transporte públicos alternativos.

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE LAS METODOLOGÍAS PARA LA LOCALIZACIÓN DE PARADAS DE UN SISTEMA FÉRREO

Debido a que en el país no se cuenta con una metodología que defina ciertos parámetros para la definición de paradas del sistema férreo, es importante establecer una metodología que se ajuste a las particularidades de la ciudad de Bogotá, esto con el fin de establecer un punto de partida para la implementación del modo férreo en la ciudad.

En este capítulo se presentan tres metodologías utilizadas en ciudades alrededor del mundo para la definición de paradas férreas, para la selección de estas ciudades se tuvieron en cuenta dos criterios: el primero es que éstas sean similares a Bogotá en cuanto a densidad y distancias de recorrido de la red férrea, y por otro lado que las variables que consideran las metodologías sean medibles en Bogotá.

Las metodologías analizadas en el capítulo son: Nodo-Lugar aplicada en Tokio, Japón; la metodología de modelos de distribución de viajes aplicada en Perth, Australia; y la metodología “*Transit Oriented Development*” aplicada en Campania, Italia.

A partir la información obtenida, se escogerá entre estas una metodología que pueda ajustarse a las particularidades de Bogotá y a las necesidades de su población.

METODOLOGÍA NODO - LUGAR

En la actualidad, muchas áreas metropolitanas del mundo intentan brindarles a los ferrocarriles un papel central en el desarrollo urbano. Es fundamental, entender la relación entre el uso de la tierra y los sistemas de transporte. Ilustrar el impacto que este modo de transporte genera, especialmente en las áreas aledañas a las estaciones.

El modelo de nodo-lugar de Bertolini sigue el razonamiento del ciclo de retroalimentación del uso del suelo en el transporte y tiene como objetivo explorar más a fondo las relaciones que entre estos se presentan, con un enfoque en las zonas próximas a la estación. Este modelo se basa en la idea que al mejorar la oferta de transporte (o el valor del nodo) de una ubicación, se mejora la accesibilidad, creando así condiciones favorables para el desarrollo futuro de la ubicación. A su vez, el desarrollo de una ubicación (o un aumento en su valor de lugar), debido a la creciente demanda de transporte, creará condiciones favorables para un mayor desarrollo del sistema de transporte.

El énfasis del modelo "nodo-lugar" expone el potencial de desarrollo en la zona de estudio. En primer lugar, es esencial aclarar los conceptos de nodo y lugar; El "nodo" mide la oferta de servicios de transporte, y el "lugar" mide el volumen de los usuarios en un área (habitantes, trabajadores, estudiantes, etc.) y el grado de combinaciones de modos de transporte funcionales, los cuales son factores decisivos al determinar el potencial de demanda para los servicios de transporte.

En seguida, se dará a grandes rasgos una explicación del modelo de nodo-lugar. Dicho modelo se sintetiza en la gráfica observada en la *Figura 8*.

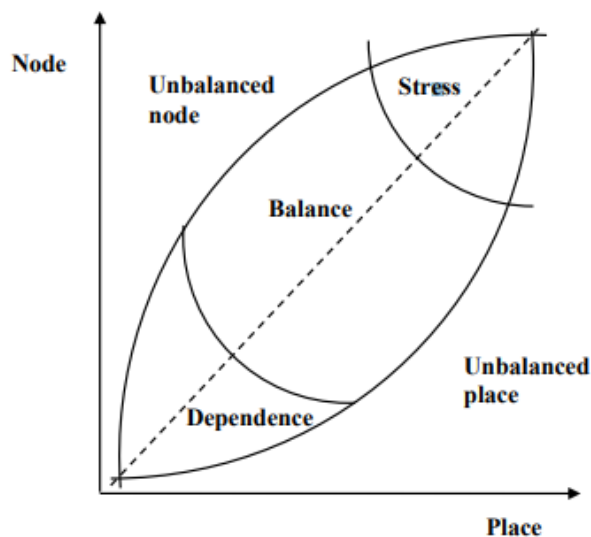


Figura 8. Diagrama del método Nodo-Lugar
 Fuente: Chorus, P (2011). *An application of the node place model*. [Figura]
 Recuperado de: <https://sciencedirect.org>

El modelo de nodo-lugar distingue cuatro situaciones para un área de estación, cada situación refleja su posición en el nodo o lugar de una región urbana. Estas cuatro situaciones corresponden a:

1. *Áreas equilibradas*: Se encuentran a lo largo de la línea media, sus posiciones relativas tanto en el nodo como en las escalas de lugar son aproximadamente iguales. Se espera que, debido a las interacciones de transporte y uso del suelo, estas posiciones relativas sean comparables en la mayoría de los casos.
2. *Áreas esforzadas*: Están ubicadas en la parte superior de la línea y corresponden a ubicaciones donde el nodo y el lugar se han utilizado al máximo. Las áreas de las estaciones "esforzadas" tienen una posición relativamente fuerte tanto en el nodo como en las escalas de lugar, así que un mayor desarrollo en estas áreas puede ser problemático.
3. *Áreas dependientes*: Áreas donde la lucha por el espacio es mínima. Tanto el nodo como los valores de lugar son relativamente tan débiles que otros factores, además de la

dinámica interna del lugar-nodo (por ejemplo, subsidios), deben intervenir para que la zona sea sostenida.

4. *Áreas desequilibradas*: Encima de la línea media están los "nodos desequilibrados", lugares donde los sistemas de transporte están relativamente más desarrollados que las actividades urbanas. Y debajo de la línea central están los "lugares desequilibrados" donde, por el contrario, las actividades urbanas están más desarrolladas que los sistemas de transporte. Por lo tanto, un área de estación "desequilibrada" tiene una posición relativa significativamente más fuerte en el nodo o en la escala del lugar.

En consecuencia, se espera que ambos tipos de ubicación desequilibrada se muevan hacia un estado más equilibrado con el tiempo. Por ejemplo, un nodo desequilibrado puede, en principio, aumentar su valor de lugar a largo plazo al atraer el desarrollo de propiedades, o disminuir su valor del nodo al reducir los servicios de transporte. Contrario a lo que sucede en un lugar desequilibrado, este puede presentar una mejora en la conectividad que aumente su valor de nodo, o un desarrollo a una densidad relativamente menor que disminuye su valor de posición.

Para poder clasificar la zona urbana en una de las áreas mencionadas anteriormente, es necesario como primera medida, determinar el valor del nodo y el valor del lugar que allí se presenta.

El valor del nodo: Para determinar el valor del nodo o la oferta de transporte de una ubicación, se analizan ciertos criterios determinados, que se consideran relevantes y acordes a las particularidades de la zona y que permitan cuantificar características de los modos de transporte allí presentes.

El valor del lugar: Para determinar el valor del lugar, se analizan los criterios que se consideran más útiles a la hora de representar la cantidad y diversidad de actividades humanas de un área de la estación.

En seguida, se presenta el caso de estudio en el cual se aplicó esta metodología.

TOKIO, JAPÓN

Tokio es la capital de Japón., es además el centro de la política, economía, educación, comunicación y cultura popular del país. Cuenta también con la mayor concentración de sedes corporativas, instituciones financieras, universidades, colegios, museos, teatros, establecimientos comerciales y de entretenimiento de todo Japón. Tokio tiene una población de alrededor de 13.784.212 habitantes donde más de 37 millones de habitantes viven en su área metropolitana, su superficie es de 2.187 km². Tokio tiene la mayor aglomeración urbana del mundo.

Si hablamos del transporte público interurbano, se destacan el metro y la red ferroviaria. Combinados, reúnen más de 70 líneas, formando la red ferroviaria urbana más extensa del mundo, esta forma de transporte es la más utilizada por los habitantes de Tokio con un estimado de 20 millones de pasajeros diarios, y más de un millar de estaciones. Como apoyo al metro, la ciudad dispone de siete estaciones de tren que reciben a millones de personas que se desplazan desde todo Japón hasta la capital, a través de trenes operados por seis compañías privadas.

Debido a la gran densidad poblacional de Tokio y al éxito conseguido en su sistema férreo, se ha decidido estudiar la metodología utilizada en un caso de estación de tren particular en la ciudad.

El número de estaciones en el área metropolitana de Tokio es considerable, la distancia promedio entre estaciones es de 1,2 kilómetros, y es común encontrar más de 20 estaciones en una sola línea de cercanías suburbana. Más de 60 líneas de trenes de pasajeros prestan servicio a aproximadamente 1.200 estaciones en el área metropolitana de Tokio, sin embargo, la mayoría de las estaciones cumplen una función local en la red y funcionan como centros locales para la comunidad residencial circundante. Manejan pequeñas cantidades de pasajeros (para los estándares japoneses), y esto se refleja en la relativamente baja intensidad y diversidad de actividades en y alrededor de estas estaciones.

Para la aplicación del modelo nodo-lugar, se seleccionaron las estaciones que cumplen un rol regional en la red, esta función regional se ilustra al tener al menos una opción de transferencia a otra línea de ferrocarril o metro. Finalmente, 99 estaciones coincidieron con este criterio. Las estaciones se seleccionaron dentro de un radio de 30 kilómetros de “La estación de Tokio” utilizando GIS (Sistemas de información geográfica). La Estación de Tokio es considerada el centro oficial de la ciudad; por lo tanto, en las estadísticas ferroviarias, la dirección de un viaje siempre se traza en relación con esta estación.

El valor del nodo: Para determinar el valor del nodo de una ubicación, se analizaron cuatro criterios, con base en las aplicaciones anteriores del modelo y entrevistas con expertos en Tokio:

1. Número de conexiones de trenes
2. Tipo de conexiones de tren
3. Proximidad al CBD por ferrocarril
4. Número de líneas de autobuses que salen de una estación.

Bertolini (1999) utilizó siete criterios y Reusser (2008) utilizó 10 criterios para determinar los valores de nodo, por razones prácticas, solo se utilizaron cuatro criterios en esta ocasión.

En contraste con la aplicación original del modelo de lugar de nodo en los Países Bajos (Bertolini 1999), el número de espacios de estacionamiento y el número de bicicletas no se analizaron en este estudio, ya que la mayoría de las personas (60.6%) que viajan a una estación en el área metropolitana de Tokio lo hacen a pie.

El valor del lugar: Para determinar el valor de posición (la cantidad y diversidad de actividades humanas) de un área de la estación, se analizaron seis criterios:

1. Población alrededor de la estación
2. Grupo económico 1: Servicios y administración
3. Grupo económico 2: Comercio, hotelería y servicio de comidas
4. Grupo económico 3: Industria y distribución
5. Grupo económico 4: Educación, salud y cultura
6. Grado de multifuncionalidad: Las estaciones pueden tener un rol local, regional o nacional, lo que a su vez tiene consecuencias en la cantidad y diversidad de funciones que se encuentran en sus áreas. Determinar el grado de multifuncionalidad puede proporcionar información sobre este doble papel. Para calcular el grado de multifuncionalidad, los datos sobre los trabajadores agrupados en los cuatro grupos económicos descritos anteriormente se procesaron de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$x_1 = \text{Población}$$

$$x_2 \dots x_5 = \text{Trabajadores/grupos económicos}$$

$$x_6 = 1 - \frac{\left(a - \frac{b}{d}\right) - \left(a - \frac{c}{d}\right)}{2}$$

Ecuación 1. Nodo-Lugar

Donde:

$$a = \text{máximo entre } (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$$

$$b = \text{mínimo entre } (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$$

$$c = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)/5$$

$$d = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)$$

METODOLOGÍA DE MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE VIAJES

Debido a algunos problemas presentes en el uso de un modelo de regresión lineal múltiple (MLR) para estimar la generación y distribución de viajes en un área de estudio, se desarrolló un modelo conocido como la regresión de Poisson. Este modelo toma la forma:

$$P(Y_i) = \frac{\mu^Y e^{-\mu}}{Y!}$$

Ecuación 2. Regresión de Poisson

La regresión de Poisson supone que cada variable dependiente Y_i se extrae de una distribución discreta de tipo Poisson con la distribución parámetro μ_i de, que consta de una combinación lineal de variables explicativas, es decir:

$$\ln(\mu_i) = \beta_1 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \beta_k X_{ki}$$

Ecuación 3. Distribución discreta de tipo Poisson

Donde: β_k = Parámetros a ser estimados

X_{ki} = Variables independientes

Las variables que se introducirán en el modelo variarán según el problema que se esté abordando. Un modelo de distribución de viajes estimado utilizando una regresión de Poisson se compone usualmente de tres variables: una variable de los viajes producidos por el origen, una variable de viajes atraídos por el destino y una variable de costo de viaje entre ambas zonas.

La regresión de Poisson también se puede especificar con restricciones en los orígenes o destinos, estimando un parámetro diferente para cada zona. El caso de un modelo doblemente restringido con una variable de costo de viaje conduce al conocido modelo de distribución por gravedad:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j e^{-\beta C_{ij}}$$

Ecuación 4. Modelo de distribución por gravedad

Donde: T_{ij} = Viajes entre zonas i y j

O_i = Viajes producidos por la zona i

D_j = Viajes atraídos por la zona j

C_{ij} = Costos entre la zona i y la zona j

B_j = Parámetro para estimado

En este modelo es posible introducir nuevas variables en el modelo para considerar otros efectos espaciales y obtener resultados que se ajusten más precisamente a cada caso particular.

En seguida, se presenta el caso de estudio en el cual se aplicó esta metodología.

PERTH, AUSTRALIA

Perth es una ciudad del oeste de Australia, capital del estado de Australia Occidental. Tiene 2 039 200 habitantes, lo que la convierte en la cuarta ciudad más poblada de Australia y la mayor del estado, ya que en ella residen casi tres cuartos de la población total del mismo. El sistema de transporte público en Perth incluye trenes, buses y ferris, Transperth es la empresa encargada de su operación, conectando la zona urbana con las zonas rurales de Transwa. Cuenta con 70 estaciones de tren.

A través del tiempo se han propuesto varias medidas para determinar la accesibilidad, en seguida se resumen las más importantes:

Medidas de red: Dependen de la topología de la red de vías y son las primeras y más simples medidas de accesibilidad. Hay un gran número de índices utilizados para medir redes.

Por ejemplo: K_i (Grado de nodo), L_m (número de estaciones), L_t (número de segmentos de ruta), E_g (la eficiencia global), y E_l (la eficiencia local son algunas de las medidas de red propuestas por Porta (2006). Por otro lado, El-Geneidy y Levinson (2006) utilizan el tamaño de la red como un índice, y Dill (2004) aplica la densidad de la red de calles conectadas al radio de nodo, la densidad de intersección y la relación de enlaces de nodo como índices de red. Sin embargo, los índices gamma y alfa desarrollados por Garrison y Marble (1965) se consideran populares medidas de conectividad de red.

Medidas de separación espacial: Se centran en el impedimento del viaje, el cual se puede medir de varias maneras, como por ejemplo la distancia de viaje más corta y/o el tiempo de viaje. La separación espacial es un método ampliamente aceptado, debido a que:

1. Las medidas son simples y solo tienen en cuenta la separación espacial geográfica, lo que excluye otras consideraciones como el estado socioeconómico, las diferencias de comportamiento de los viajeros y las diferencias de ubicación.
2. Tiene un concepto claro y es comparable en el tiempo.

Por ejemplo, el ABS (Despacho Australiano de estadísticas) utiliza los índices de la Accesibilidad metropolitana/Distancia, como un índice para indicar la separación espacial

Medidas de contorno: También conocidas como medidas de oportunidad isocrónicas o acumulativas, son contornos basados en el costo de viaje (distancia/tiempo) y cuentan el número de oportunidades dentro de cada contorno. El Departamento de Transporte y Carreteras Principales de Queensland, ha desarrollado el Índice de Accesibilidad para el Uso del Suelo y el Transporte Público (LUPTAI) basado en este enfoque, donde el umbral del destino es de 400 m para las paradas de autobús y 800 m para las estaciones de tren, mientras que para el origen utiliza umbrales de 350 m para paradas de autobús y 750 m para estaciones de tren.

Medidas de gravedad: Se basan en el equivalente social de la ley de gravedad de Newton (Hansen, 1959). Incluye dos componentes básicos:

1. El atractivo de una ubicación (el numerador en la fracción)
2. El costo del viaje (como el tiempo de viaje o la distancia de viaje), que representa la impedancia y es el denominador en la fracción. Generalmente se considera una función de potencia, con parámetros calibrados a partir de los datos.

Modelos de utilidad aleatorios (RUM): Representan la cantidad de "beneficios" que los viajeros obtienen de los viajes. El supuesto básico es que cada individuo es un tomador de decisiones racional y elige una alternativa que proporciona el nivel más alto de utilidad. La utilidad tiene un componente determinista, que puede calcularse en función de las características observadas y un error estocástico componente/desapercibido (Golob y Beckmann, 1971).

La competencia o medidas basadas en restricciones: Incorporan las restricciones de las actividades en las medidas de accesibilidad desde una perspectiva regional. Para incorporar los efectos de la competencia, Genurs y Wee (2004) resumieron tres enfoques diferentes:

1. Dividir las oportunidades por la demanda potencial para incorporar los efectos de la competencia.
2. Utilizar el cociente de oportunidades.
3. Utilizar factores de equilibrio.

Las medidas compuestas: No solo combinan dos o más de las medidas mencionadas con anterioridad, sino también son medidas que van más allá de la escala de las seis categorías anteriores. La ventaja de este método es su flexibilidad y consistencia, utiliza reglas simples de combinación lineal para combinar variables con diferentes ponderaciones.

Este caso se enfoca en las medidas compuestas, así se procede con el siguiente paso.

Factores que afectan la accesibilidad: En general se considera que la proximidad a las estaciones de tren es uno de los factores principal para calificar la accesibilidad, sin embargo, algunas encuestas (Debrezion, 2007) indican que solamente la mitad de los pasajeros elige la estación por su cercanía. Los factores que se tuvieron en cuenta en este caso de estudio en Perth se presentan a continuación.

- Variedad de usos del suelo (Frank, 2006): Se puede cuantificar utilizando las siguientes expresiones.

$$H = -A/\ln(N)$$

Ecuación 5. Índice de la variedad del uso del suelo

$$A = \sum_{i=1}^n (b_i/a) \times \ln(b_i/a)$$

Donde:

b_i = Áreas ocupadas por los diferentes usos del suelo (educación, entretenimiento, saluda, comercio, etc.).

a = Total de metros cuadrados del suelo usado para todos los usos del suelo presentes en 800m.

N = Número de los usos del suelo presentes.

- Calidad del servicio (velocidad, frecuencia, comodidad) (Q): Esta se mide por medio de encuestas, en las cuales se determinan los parámetros y se pide que el usuario califique de

1 a 7 la importancia de dichos parámetros, donde 1=Nada importante y 7=Lo más importante. Luego se hace uso de la siguiente expresión:

$$Q_i = \frac{\sum_{k=1}^m (\sum_{j=1}^n (q_{jki} \times w_{jki}))}{m \times n \times 7 \times 7}$$

Ecuación 6. Medida de calidad del servicio

Donde:

q_{jki} = Valor del ítem evaluado a través de encuestas, por la persona k en la estación i.

w_{jki} = Calificación del ítem j, evaluado por la persona k en la estación i.

m= Número de encuestados.

n= Número de ítems evaluados.

- **Conexión Intermodal:** Es la conexión entre diferentes modos de transporte en una estación, algunas conexiones comunes en las estaciones de tren son PnR (Park and Ride), WnR (Walk and Ride) y BnR (Bus and Ride). La información que se utiliza para evaluar cada una de estas conexiones es:
 - **BnR:** Frecuencias de buses, número de líneas de buses con servicio a la estación, tiempo que se tarda de pasar de bus a tren. El área de captación es de 800 metros alrededor de las paradas de buses, la accesibilidad a la estación j desde cada punto censado i entre el área de captación A_{ijBnR} se estima mediante la siguiente ecuación:

$$A_{ijBnR} = W_{Q_{jBnR}} Q_{jBnR} + W_{H_j} H_j + W_{F(b)_{ij}} F(b)_{ij} + W_{D_{ikwalk}} D_{ikwalk} + W_{D_{kjbus}} D_{kjbus}$$

Ecuación 7. Área de captación

Donde:

Q_{jBnR} : Es calculado con base en todos los ítems encuestados, a excepción de los ítems relacionados con parqueo.

D_{ikwalk} = Distancia entre un punto de censo i y una parada de bus k.

D_{kjbus} = Distancia entre una parada de bus k y una estación de tren j.

- PnR: Disponibilidad de parqueaderos, el área de captación es delineada al cubrir el 90% de los accesos a una estación j por medio de modos que requieren parqueadero. La accesibilidad a la estación j desde cada punto de censo i dentro del área de captación es estimada con la siguiente ecuación:

$$A_{ijPnR} = W_{N(p)_j} N(p)_j + W_{NO(p)_j} NO(p)_j + W_{Q_{jPnR}} Q_{jPnR} + W_{H_j} H_j + W_{d(r)_g} d(r)_g + W_{D_{ij}} D_{ij}$$

Ecuación 8. Accesibilidad a una estación

Donde:

Q_{jPnR} : Es calculado con base en todos los ítems encuestados.

- WnR: Con base en la literatura, el área de cobertura es de aproximadamente 800 metros. El área de captación es luego dividida en manzanas, así que la accesibilidad A_{ijwalk} a una estación de tren j desde una manzana i contenida en los 800 m es estimada usando la siguiente ecuación:

$$A_{ijwalk} = W_{Q_{jwalk}} Q_{jwalk} + W_{H_j} H_j + W_{d(r)_{ij}} d(r)_{ij} + W_{D_{ij}} D_{ij}$$

Ecuación 9. Accesibilidad a la estación caminando

Donde:

W = Representa las cantidades obtenidas de cada variable utilizada.

Q_{jwalk} = Se calcula en base a todos los ítems encuestados, relacionados con facilidad y calidad del servicio, exceptuando los factores relacionados con parqueaderos. Como todos los factores analizados se encuentran en diferentes unidades, para poder relacionarlos, estos se clasifican en cinco niveles que los hacen comparables, estos niveles son: Muy Bueno, Bueno, Medio, Pobre, Muy Pobre. Y a cada factor que se decida medir, se le asigna un rango.

METODOLOGÍA “TRANSIT ORIENTED DEVELOPMENT”

TOD (Transit Oriented Development) es un término que se refiere a la planeación y desarrollo de las ciudades orientado al tránsito. Es un modelo de desarrollo urbano cuyo principal objetivo es maximizar la cantidad de espacio residencial, industrial, empresarial, recreacional y cultural a distancias cortas del transporte público. Con esto, se pretende aumentar el número de usuarios del transporte público al reducir el uso de automóviles privados y al promover el crecimiento urbano sostenible. Debido a la magnitud de este concepto, existe una gran cantidad de adaptaciones y estudios de esta metodología, sin embargo, para el caso de esta investigación se tendrá en cuenta la realizada por Antonio Nigro (2019).

Esta metodología incluye el estudio nodo-lugar, el cual se explicó anteriormente y comprende las siguientes etapas:

1. Área extendida de captación de la estación:

En esta etapa se utiliza el análisis nodo-lugar como una herramienta para definir las características de los nodos en términos de calidad e intensidad del transporte, y la diversidad en los usos del suelo que rodean las áreas de captación de la estación. En este caso se considera el acceso y egreso a pie, en bus u otro alimentador de transporte público, bicicleta y automóvil particular; expandiendo así el área de captación, para determinar la extensión de las áreas se utilizó el concepto de “Radio de Interconectividad” definido por Krygsman (2004), como se muestra en la *Figura 9*, éste es definido como la proporción de tiempo de acceso y egreso con respecto al tiempo total del viaje. De acuerdo con este concepto, los tiempos aceptables de acceso/egreso están influenciados por la duración total del viaje, la cual varía dependiendo del contexto. Los valores de tiempo de viaje, tiempos de acceso/egreso y velocidad son específicos de cada caso de estudio.

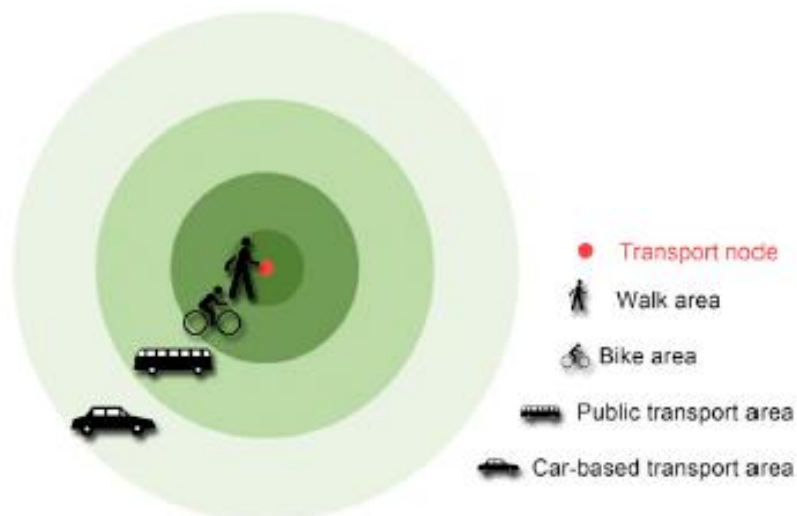


Figura 9. Radios de captación por modo de transporte
 Fuente: Nigro, A (2019). *Land use and public transport integration in small cities. Assessment methodology and application. [Figura]*
 Recuperado de: <https://sciencedirect.org>

2. Indicadores: Los indicadores perteneces a tres familias:

- Indicadores de nodo: Describen las cualidades principales del transporte, al considerar el número de direcciones, frecuencia y presencia de servicios de tiquetes.
- Indicadores de lugar (diferenciados por áreas de captación): Son determinados por la diversidad y concentración del uso del suelo. Por ejemplo: densidad residencial y laboral, lugares de educación, número de estudiantes.
- Indicadores de transporte alimentador (diferenciados por modos de transporte). Por ejemplo: accesos peatonales, carriles para bicicletas, intensidad de tráfico esperada, tamaño de la vía, pendiente de la vía, transporte alimentador, líneas alimentadoras, accesibilidad a las estaciones de bus, frecuencia, instalaciones para pasajeros, accesibilidad a parqueaderos públicos.

3. Análisis de los indicadores

En seguida, se presentan los casos de estudio en los cuales se aplicó esta metodología.

CAMPANIA, ITALIA

Campania es una de las veinte regiones que conforman la República Italiana, con 5.820.268 habitantes en 2018, es la tercera región más poblada del país, cuenta con una superficie de 13.670,95 km. Por otro lado, la capital regional, Nápoles es una de las ciudades más pobladas de Italia. La región tiene una red densa de ferrocarriles, carreteras y autopistas, un sistema de conexiones marítimas y ocho aeropuertos civiles y militares

Se ha decidido estudiar este caso ya que, Bogotá y la región de Campania cuentan con importantes similitudes en cuanto a población y a las distancias de recorridos que deben realizar sus respectivos sistemas férreos.

El área de estudio está dividida por una línea ferroviaria que se extiende a lo largo de 17,6 km y une las ciudades de Salerno y Mercato San Severino, ubicada en la región de Campania, en el sur de Italia. La línea cruza un territorio montañoso descubierto por varios centros urbanos, industriales, comerciales e instituciones educativas. A pesar de que el ferrocarril analizado es de vía única y no está electrificado, es importante para la movilidad en el área de estudio, ya que enlaza muchos pueblos pequeños y asentamientos con Salerno, el centro urbano más poblado y atractivo de la zona.

La metodología que utiliza Campania consiste en definir áreas de captación usando isócronas basadas en las distancias de la red. En la definición de áreas isócronas para peatones, bicicletas y automóviles particulares, se considera la red vial existente, ya que se puede suponer

que cada nodo de transporte puede hacer uso de ella. En el caso del autobús y otro transporte público de alimentación, sólo se consideran vías cubiertas por líneas de autobús conectadas a un nodo de transporte.

Para estimar el tiempo de viaje entre estaciones, se utilizó la información de los tiempos promedios de viaje del 2011 del censo nacional italiano, administrado por el ISTAT (Instituto Nacional de Estadística), estas estadísticas están diferenciadas por modo de transporte y propósito de viaje. Se obtuvo un promedio de 54,2 minutos de tiempo de viaje de casa-trabajo y casa-estudio.

Luego, se determinaron los siguientes indicadores para este caso:

Indicadores de nodo:

- Direcciones
- Frecuencia en días de trabajo
- Frecuencia en festivos
- Compra de tiquetes

Indicadores de lugar:

- Densidad laboral
- Densidad residencial
- Densidad educacional

Uno de los problemas de movilidad tiene que ver con el acceso a las instalaciones educativas, ya que en los municipios se encuentran cuatro colegios y dos universidades con cerca de 1.600 estudiantes de bachillerato y 34.000 estudiantes universitarios. En total se registraron 65.000 residentes de la zona.

Indicadores de alimentadores de transporte:

- Andenes
- Carriles para ciclistas
- Intensidad de tráfico esperada
- Tamaño de la vía
- Pendiente de la vía
- Accesibilidad a las paradas de bus
- Frecuencia
- Parqueaderos públicos

Por otro lado, considerando la gran cantidad de información que los indicadores utilizados en esta metodología implican, se dividió en tres etapas el análisis de nodo-lugar, de manera que cada una presenta diferentes revelaciones; dichas etapas son:

1. Etapa de análisis general nodo-lugar:

El análisis general de la ubicación de los nodos se basa en el Índice de nodos y en el Índice general de lugar. Los resultados se muestran mediante un diagrama xy (*Figura 10*), donde cada nodo de transporte está representado por un punto; Sin embargo, en este caso, el Índice General de Lugar no solo está influenciado por las características de uso del suelo, sino también por la calidad de los modos de transporte de alimentación: caminar, bicicleta, transporte público y transporte basado en automóviles. Por lo tanto, puede ocurrir que un alto valor del Índice General de Lugar sea determinado por la alta densidad urbana y la diversidad en algunas áreas de captación o, a la inversa, alta accesibilidad proporcionada por

algún transporte de alimentación (es decir, un área de captación más grande).

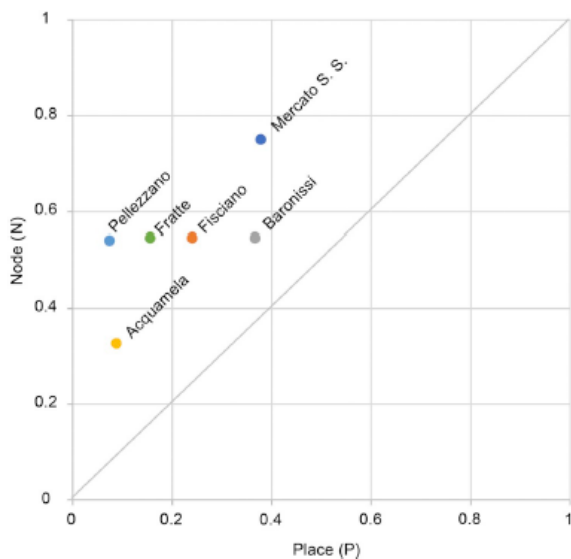


Figura 10. Análisis nodo-lugar

Fuente: Nigro, A. Bertolini, L. Moccia F (2018). *Land use and public transport integration in small cities and towns: Assessment methodology and application*. [Figura] Recuperado de: <https://sciencedirect.org>

2. Análisis detallado nodo-lugar, diferenciado por modo de transporte:

La segunda etapa es un análisis de cuatro partes del lugar y nodo, teniendo como principales características del transporte alimentador y las áreas de captación. En este caso, los ejes horizontales de los diagramas muestran los Índices de Lugares, mientras que los ejes verticales muestran los valores del Índice de Nodos (Figura 11). El análisis detallado de los lugares y nodos es una herramienta, para comprender de manera más efectiva, las diferencias entre las cuatro áreas de captación en términos de las características del lugar.

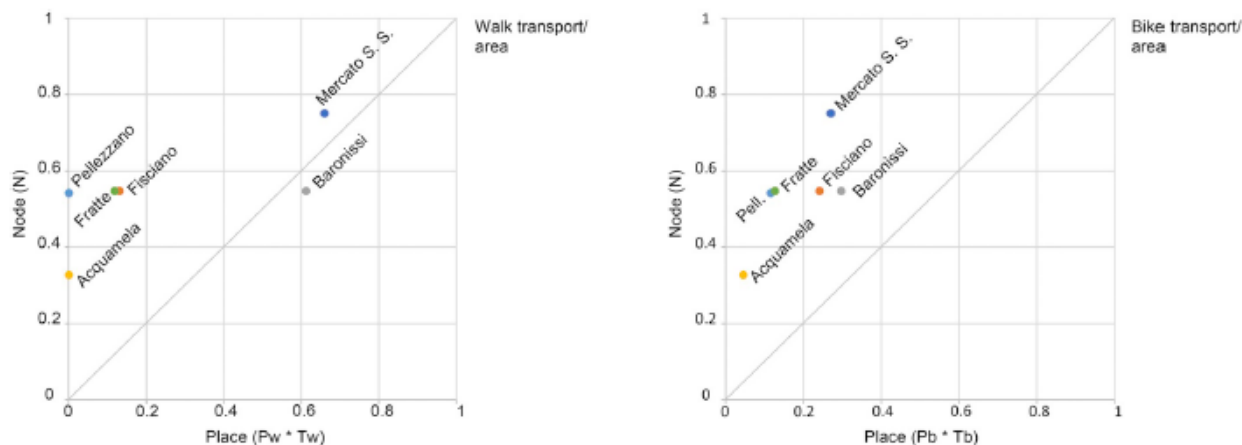


Figura 11. Análisis detallado nodo-lugar
 Fuente: Nigro, A. Bertolini, L. Moccia F (2018). *Land use and public transport integration in small cities and towns: Assessment methodology and application*. [Figura] Recuperado de: <https://sciencedirect.org>

3. Análisis de “gráficos de radar”:

La tercera etapa se compone de gráficos triangulares de radar, representando áreas de captación de pasajeros individuales (un gráfico también conocido como gráfico de araña, de estrellas o diagrama de Kiviat) es un diagrama que muestra datos multivariados de tres o más variables mediante el uso de una representación bidimensional (Chen et al., 2007), como se observa en la *Figura 12*. Las puntuaciones del Índice de nodo (N), los valores medios de lugar (Pw, Pb, Pp, Pc) y los valores medios de transporte del alimentador (Tw, Tb, Tp, Tc) se registran en un eje. Esta etapa tiene como objetivo resaltar los "desequilibrios" potenciales (Bertolini, 1999, 2005) y sugerir políticas que puedan considerar simultáneamente aspectos relacionados con el uso de la tierra, la

accesibilidad del nodo por el transporte principal y la accesibilidad del nodo por los transportes de alimentación.

Es importante subrayar que el análisis por radar debe verse como una herramienta que apunta a "tomar una imagen" de la situación real en el terreno e identificar posibles estrategias integradas de transporte de uso del suelo, pero no determinarlas. Por lo tanto, los triángulos irregulares no significan que una transformación profunda sea inevitable o que la situación real sea insostenible. Por el contrario, resaltan áreas donde es posible aumentar la población y el empleo, debido a la accesibilidad relativamente alta o, a la inversa, donde la oferta de transporte principal o alimentador podría ser insuficiente para respaldar las actividades y la población existentes disponible para exponer el área de atracción que podría representar más desarrollo urbano.

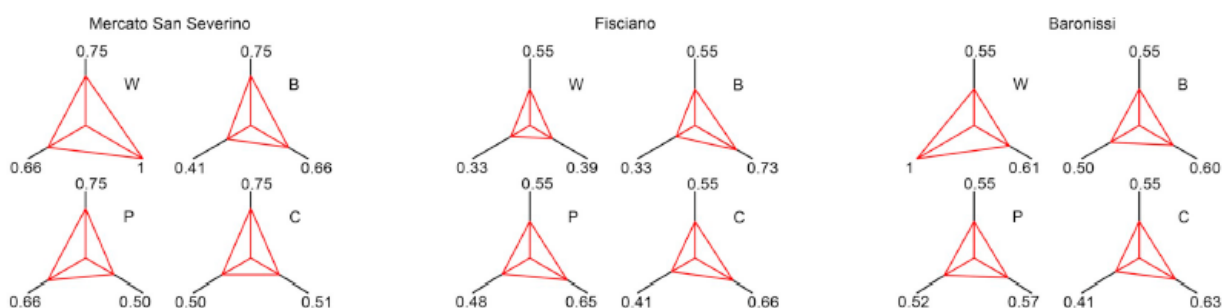


Figura 12. Análisis de gráficos de radar
Fuente: Nigro, A. Bertolini, L. Moccia F (2018). Land use and public transport integration in small cities and towns: Assessment methodology and application. [Figura]
Recuperado de: <https://sciencedirect.org>

A modo de síntesis, se presenta la *Tabla 2* donde se presenta la descripción de las metodologías analizadas en este capítulo

Tabla 2. Resumen de las metodologías

Metodología	Nombre del artículo	Autor	Año	Ciudad de aplicación	Descripción
Nodo-Lugar	An application of the node place model to explore the spatial development dynamics of station areas in Tokyo	Paul Chorus, Luca Bertolini	2011	Tokio	Utilizan un modelo de lugar de nodo para determinar qué factores de transporte y uso del suelo son responsables de la reestructuración del área de la estación en Tokio. Variables aplicadas: Numero de conexiones con otras líneas y que llegan a la estación, proximidad al CBD, valorización del sector (popularidad de la zona, grupos economicos, trabajadores). Esta es una metodología más flexible, convirtiendola para cada caso de aplicación en un estudio particular.
Modelos de distribución de viajes	Trip distribution model for regional railway services considering spatial effects between stations	Ting Lin, Jianhong Xia, Todd P. Robinson, Konstadinos G. Coullias, Richard L. Church, Doina Olaru, John Tapin, Renlong Han.	2014	Australia	Considera modelaciones con regresiones de Poisson utilizando variables de viajes producidas por el origen, variables de viajes producidas por el destino y costo de los viajes entre ambas zonas. Modelo extraído del libro Handbook of transportation science de R Hall, 2012.
Transit Oriented Development	Land use and public transport integration in small cities and towns: Assessment methodology and application	Antonio Nigro, Luca Bertolini, Francesco Domenico	2019	Italia	Se propone extender la conceptualización e implementación de la integración del uso del suelo y el transporte público en áreas donde el desarrollo urbano de baja densidad ya ha ocurrido. El enfoque se basa en el modelo Nodo-Lugar al incluir evaluaciones de calidad de redes alimentadoras. Esta metodología abarca más campos al estar orientada al TOD.

SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA APLICADA A LA SELECCIÓN DE PARADAS

Se seleccionó la metodología Nodo-Lugar para la aplicación, debido a la flexibilidad en la selección de las variables aplicables del modelo. De esta manera, es posible integrar las variables que utilizan las otras metodologías encontradas para de esta manera lograr una optimización del modelo aplicado a nuestro caso de estudio en Bogotá.

Por otro lado, la metodología TOD se descartó debido a que ésta es utilizada como una forma de planeación de ciudad, su alcance es mucho más amplio al alcance de esta investigación. Mientras que la metodología de modelos de distribución de viajes es más rígida en cuanto a las variables analizadas, lo cual presenta ciertas desventajas a la hora de ser aplicada en Bogotá.

Para la aplicación del modelo Nodo-Lugar, es importante comparar las ciudades en las que se aplicaron las distintas metodologías, para encontrar aquellas que son similares a Bogotá y sintetizar las variables utilizadas en estas ciudades y aplicables a nuestro caso, con el fin de seleccionar aquellas que no han sido contempladas en la Metodología Turistren.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO Y SELECCIÓN DE VARIABLES

A partir de las metodologías mencionadas anteriormente y de sus respectivos casos de estudio, en este capítulo se estudiarán las variables consideradas en cada caso, que pueden ser aplicables al método Nodo-Lugar. Para esto es necesario conocer algunas características particulares de la ciudad.

Bogotá, capital de Colombia, se encuentra ubicada en la Cordillera Oriental en el Departamento de Cundinamarca, en la región centro del país.

Según el censo nacional de población y vivienda realizado por el DANE en el 2018, la ciudad cuenta con una población estimada de 7.181.469 personas, presentando equidad de género con 46% y 54% de mujeres y hombres respectivamente. En un área de 1.636 km^2 presenta una densidad poblacional aproximada de 4.390 hab/km^2 .

Bogotá se subdivide en 20 localidades y 112 Unidades de Planeación Zonal (UPZ), en las que predominan los estratos socioeconómicos 2 y 3.

En cuanto a sistemas de transporte, la ciudad cuenta con un Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) que se subdivide en Troncales de Transmilenio y servicio urbano, complementario y alimentador. Siendo el Transmilenio el principal modo de transporte público, movilizandando alrededor de 1.900.000 personas al día, según la Alcaldía Mayor de Bogotá.

SELECCIÓN DE VARIABLES APLICADAS A CIUDADES CON CARACTERÍSTICAS SIMILARES A BOGOTÁ

A partir de las metodologías mencionadas en el capítulo anterior, en la *Tabla 3* se observan las variables identificadas en cada caso de estudio.

Tabla 3. Variables encontradas en cada caso

Variable	Bogotá	Campania	Tokio	Perth	Río de Janeiro
Proximidad al CBD					
Número de conexiones de trenes					
Tipo de conexiones de trenes					
Número de líneas de autobuses que salen de una estación					
Población alrededor de la estación					
Servicios y Administración					
Comercio, hotelería y servicio de comida					
Industria					
Educación, salud y cultura					
Grado de intermodalidad					
Grado de multifuncionalidad					
Viajes producidos por el origen					
Viajes producidos por el destino					
Costo de viaje					
Calidad: Atractivo del área y del sistema de transporte					
Demanda: Volumen de usuarios en el área					
Diseño de la red vial					
Acceso peatonal					
Tiempo de viaje					
Frecuencias					
Venta de pasajes					
Presencia y calidad de ciclorrutas					
Intensidad del tráfico					
Parqueaderos					
Congestión					
Proximidad a la estación					
Impacto ambiental positivo					
Seguridad del viaje					

DEFINICION DE VARIABLES APLICABLES AL CASO DE ESTUDIO DE BOGOTÁ

De acuerdo con las variables de la tabla anterior, se realizó una agrupación de aquellas variables que consideramos se pueden analizar como una sola para cada caso de estudios. Las variables finales se presentan en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Variables aplicables al caso de Bogotá

Variable	Bogotá	Campania	Tokio	Perth	Río de Janeiro
Grado de multifuncionalidad					
Viajes producidos por el origen (demanda)					
Costo de viaje					
Calidad: Atractivo del área y del sistema de transporte					
Diseño de la red vial					
Tiempo de viaje					
Intensidad del tráfico					
Proximidad a la estación					
Impacto ambiental positivo					
Accesibilidad					

Además, definimos cinco categorías para clasificar las variables anteriormente seleccionadas y así hacer un análisis del impacto socioeconómico y de calidad en la movilidad, basado en la implementación de una parada férrea. Estas categorías corresponden a:

- Movilidad efectiva
- Ciudad eficiente
- Economía
- Ambiente
- Equidad

Donde, *Movilidad efectiva* hace referencia a la efectividad del transporte y la movilidad en la ciudad, *Ciudad eficiente* a la eficiencia y la idoneidad del uso del suelo (desarrollo urbano),

Economía a la prosperidad y bienestar en la ciudad, *Ambiente* a la disminución de la huella de carbón y en general una ciudad sostenible. Por último, *Equidad* hace referencia a ciudades socialmente inclusivas.

Las cinco categorías mencionadas, son esenciales de acuerdo con la investigación de los sistemas férreos alrededor del mundo que se encuentra en el libro *Light Rail Transit Systems de Eslevier* (2018). Estas se tuvieron en cuenta debido a que son producto de una investigación que contó con 61 casos de estudio de sistemas férreos alrededor del mundo, que además incluye unos casos de sistemas que fracasaron.

Finalmente, a las variables seleccionadas se les asigno una categoría, como se observa en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Variables categorizadas

Variable	Categoría
Grado de multifuncionalidad	Ciudad Eficiente
Viajes producidos por el origen (demanda)	Movilidad efectiva
Costo de viaje	Economía
Calidad: Atractivo del área y del sistema de transporte	Equidad
Diseño de la red vial	Ciudad Eficiente
Tiempo de viaje	Movilidad efectiva
Intensidad del tráfico	Movilidad efectiva
Proximidad a la estación	Movilidad efectiva
Impacto ambiental positivo	Ambiente
Accesibilidad	Equidad

CAPÍTULO 4

SELECCIÓN ESTACIÓN PARA LA APLICACIÓN: ESTACIÓN CALLE 92 CON CARRERA 30, BOGOTÁ

La estación seleccionada para la aplicación de la metodología Nodo-Lugar, se localiza en la Diagonal 92 con Carrea 30. Este es un corredor importante en Bogotá que permite conectar el lado norte y oriental con el resto de la ciudad; además cuenta con un alto grado de intermodalidad que permite un análisis más detallado y real a la situación actual de la ciudad.

En la *Figura 13* se muestra la localización de la estación que llamaremos “Estación caso de estudio”.

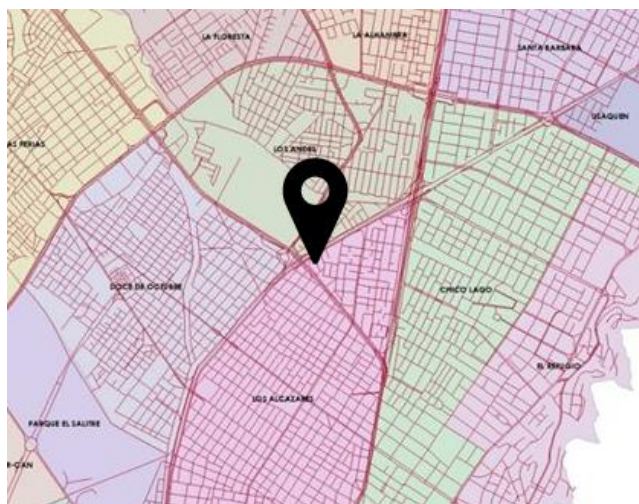


Figura 13. Localización Estación caso de estudio
Fuente: Propia [Figura]

Se ha seleccionado este punto como la estación de estudio por su centralidad, grado de multimodalidad, movimiento económico y además porque se está trabajando actualmente en los estudios para la implementación de este punto de parada para el servicio de tren que se les presta a algunas universidades de Bogotá, información proporcionada por el Gerente de Turistren.

Para efectos de calibración de la metodología Nodo-Lugar se ha decidido aplicar el método a las que consideramos las estaciones con el mínimo y máximo valor de nodo.

Para el mínimo valor de nodo, se seleccionaron las estaciones de la Sabana y Usaquéen.

La estación de la Sabana, estación principal y donde se encuentran los talleres de los ferrocarriles, se encuentra ubicada en la Calle 13 con carrera 18; este punto fue seleccionado por su ubicación y entorno, donde se presentan problemáticas de contaminación e inseguridad que se detallarán más adelante.

La estación de Usaquéen, estación de carácter turístico y donde se ubican las oficinas de Turistren, ubicada en la carrera 19 con 110, fue seleccionada por su problema de accesibilidad, ya que aunque no presenta índices muy altos en cuanto a su calidad en el entorno, el problema radica en que no existe accesibilidad segura para los usuarios que desean ingresar a la estación; en el sector no se cuenta con un semáforo peatonal o un puente con acceso a la estación, de este modo, aunque es un punto llamativo, si los usuarios no cuentan con los requerimientos mínimos de seguridad para acceder, finalmente optan por otra opción para moverse.

En las *Figuras 14 y 15*, se observa la localización de las estaciones de valor mínimo de nodo, que llamaremos “Estación de mínimo valor S” para el caso de la estación de la Sabana y “Estación de mínimo valor U” para el caso de la estación de Usaquéen.

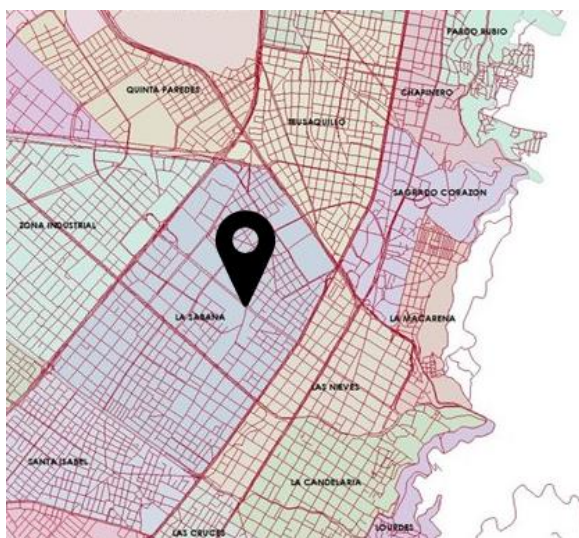


Figura 14. Localización estación de mínimo valor S
Fuente: Propia [Figura]

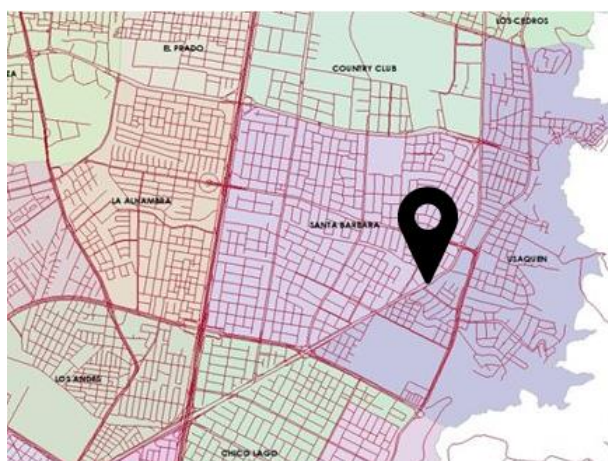


Figura 15. Localización Estación de mínimo valor U
Fuente: Propia [Figura]

Por último, para el máximo valor de nodo, elegimos la estación de Gran Estación, esta con una alta afluencia de pasajeros, está ubicada en la Avenida 68 con 22 y es seleccionada por su ubicación estratégica, alta demanda de pasajeros, accesibilidad y grado de intermodalidad.

En la *Figura 16* se muestra la localización de la estación de valor máximo de nodo, que llamaremos “Estación de máximo valor GE”.



Figura 16. Localización Estación de máximo valor GE
Fuente: Propia [Figura]

La selección de estas estaciones se realizó con criterios propios, teniendo en cuenta el panorama actual del transporte masivo en la ciudad, y observando a diario el comportamiento de la ciudad frente a los distintos modos de transporte. Con el fin de adaptar la metodología escogida al entorno de Bogotá y generar resultados confiables para una futura implementación de la metodología.

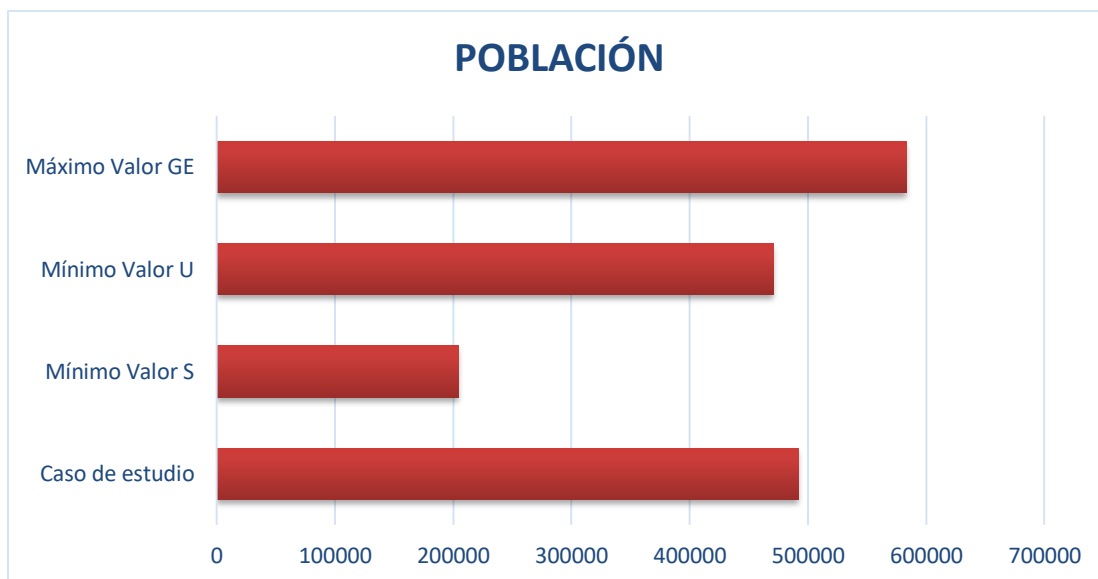
EVALUACIÓN SOCIO-ECONOMICA DE LAS ESTACIONES QUE INTERVIENEN EN EL CASO DE ESTUDIO

Para asignar un valor de nodo apropiado a cada una de las estaciones definidas anteriormente, se realizó un análisis socioeconómico. En este se analizó el uso del suelo, las áreas de actividad, la población y las variables que se relacionan con las categorías del Capítulo 3 de este documento. De esta manera, se analizaron las Unidades de Planeamiento Zonal que tienen influencia en cada una de las estaciones.

Para la estación caso de estudio, se analizaron las UPZ's 21-Andes, 98-Alcazares y 97-Chico lago. Para la estación de máximo valor GE, se analizaron las UPZ's 109-Ciudad Salitre Oriental, 106-La Esmeralda, 110-Ciudad Salitre Occidental y 105-Jardín Botánico. Para la estación de mínimo valor S, se analizaron las UPZ's 102-La Sabana, 93-Las Nieves y 108-Puente Aranda. Y finalmente, para la estación de mínimo valor U, se analizaron las UPZ's 15-Country Club y 20-La Alhambra.

Los nombres y códigos descritos anteriormente y la información estadística que se presentará en este capítulo fueron obtenidos de la encuesta multipropósito realizada en 2017 para Bogotá por la Secretaria Distrital de Planeación. Cuando se habla del valor de atributo para cada estación, se hace referencia al promedio obtenido del análisis de todas las UPZ's que intervienen para cada caso.

En seguida, se presenta la *Figura 17*, en la cual se observa la comparación de población entre las estaciones estudiadas.



*Figura 17. Estadística de población para cada estación de estudio
Fuente: Propia [Figura]*

En términos de población, la estación de máximo valor GE presenta aproximadamente 584 mil habitantes; sin embargo, hay que tener en cuenta que es la estación donde intervienen más UPZ's respecto al resto. A pesar de que en la estación de mínimo valor U intervienen únicamente 2 UPZ's, la estación de mínimo valor S es la que presenta menor población, aproximadamente 205 mil personas. Esto se le puede atribuir a que esta es la estación que tiene más cercanía a áreas de actividad industrial, respecto a las otras que se encuentran en zonas más residenciales y comerciales. En promedio, para todas las UPZ's analizadas, se presenta un promedio de 2 a 3 personas por hogar.

A Diciembre de 2019, según el documento resumen del Plan de Ordenamiento Territorial de la Alcaldía Mayor de Bogotá, se presentan dos áreas de actividad para las zonas analizadas: Áreas de actividad residencial en mayor porcentaje para la estación de mínimo valor U y Áreas de actividad múltiple, es decir áreas más comerciales y en algunos caso con puntos de industria, donde el mayor porcentaje para este último se presenta en la estación de mínimo valor S; la

estación caso de estudio y la de máximo valor GE presentan áreas de tipo residencial y comercial equitativas.

En la *Figura 18* se observa el promedio de hogares por estrato socioeconómico de cada estación.

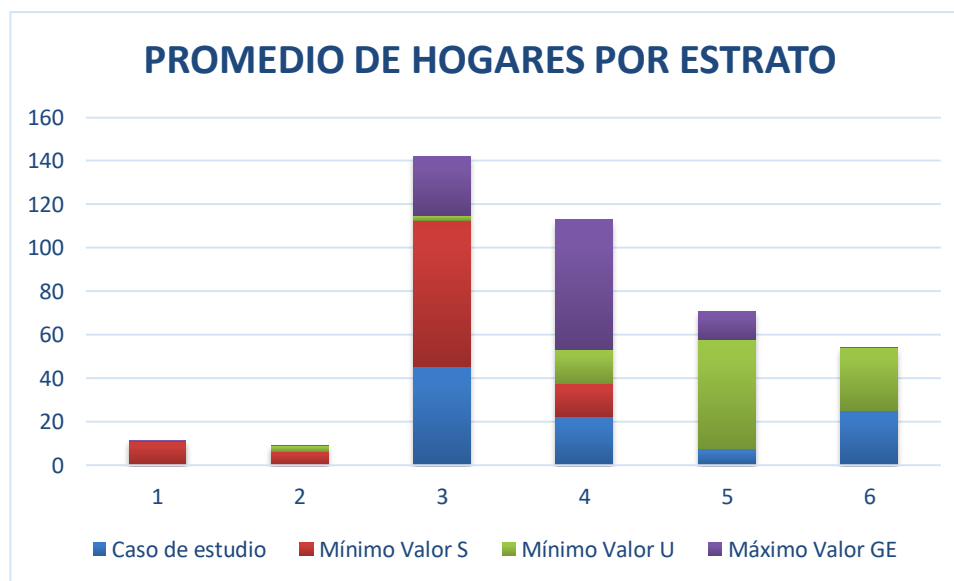


Figura 18. Estadística promedio de hogares por estrato
Fuente: Propia [Figura]

Se observa que los estratos que predominan son 3 y 4, siendo el primero el de más presencia en estos puntos de Bogotá. En la estación donde se presentan los estratos más bajos es en la estación de mínimo valor S, mientras que en la estación de mínimo valor U es donde se presentan los estratos más altos. Esto demuestra que las estaciones no fueron consideradas como el mínimo valor de nodo por su estratificación, si no por otras problemáticas de entorno.

En cuanto a la tasa de asistencia escolar, en todas las UPZ's analizadas se presentan porcentajes mayores del 95% de 5 a 17 años, sin embargo, para el rango de 18 a 23 años este porcentaje disminuye a un 80% para las estaciones de máximo valor GE y mínimo valor U,

mientras que, para el caso de estudio, este porcentaje disminuyó a un 77% y para la estación de mínimo valor S disminuyó considerablemente a un 49%.

En cuanto a la relación entre la población económicamente activa y la población en edad de trabajar, es decir la tasa global de participación, se presentan porcentajes de 58% a 68%; siendo la estación de mínimo valor S la de mayor porcentaje, esto relacionado a que se encuentra en un área de actividad industrial y comercial, como se explicó anteriormente.

En cuanto a la percepción de mejora en calidad de vida, se presentan dos situaciones con los mayores porcentajes: sigue igual que el año anterior o mejoró. La última tiene porcentajes un poco mayores, sin embargo, no se presenta una diferencia considerable en la mayoría de los casos. En la estación de máximo valor GE se presenta el mayor porcentaje de mejora en la calidad de vida de los hogares con un 63%. Por otro lado, en general la percepción de pobreza es muy baja, con excepción de la estación de valor mínimo S donde se presentan porcentajes de hasta 21%.

Pare efectos propios del proyecto se analizaron atributos de actividad física y del entorno de las viviendas en cuanto a contaminación del aire, auditiva, invasión del espacio público e inseguridad. En la *Figura 19* se observan estos atributos gráficamente.

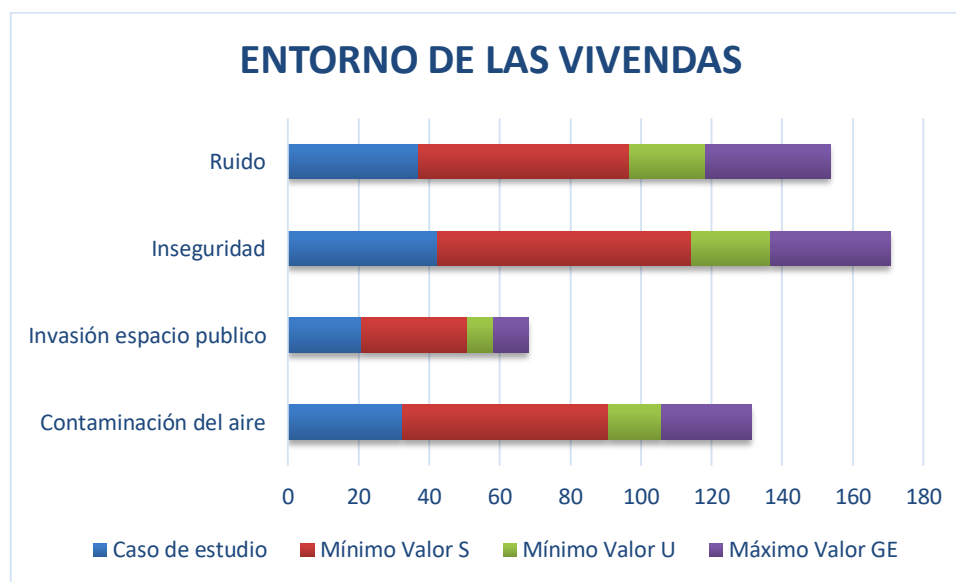


Figura 19. Estadísticas entorno de viviendas
Fuente: Propia [Figura]

En general, los problemas que más se registran son los relacionados con el ruido y la inseguridad, le sigue la contaminación del aire y por último la invasión de espacio público. Se observa que la estación de mínimo valor S es la que presenta porcentajes mayores en todas las problemáticas expuestas. Esto relacionado a la sensación de inseguridad que se presenta en el sector, en cuanto a contaminación por ser zona industrial, hay una presencia importante de transporte de carga y a su vez, al combinarlo con los otros modos motorizados se genera una sensación pesada del ambiente; al ser también una zona comercial, se evidencia una alta presencia de vendedores informales, que hacen uso del espacio público para desarrollar sus actividades.

En seguida, se encuentra la estación caso de estudio, donde se presentan las mismas problemáticas, las cuales se pretende mitigar con la implementación de una parada férrea en el sector. Las otras dos estaciones presentan porcentajes menores, sobresaliendo problemas de ruido y de inseguridad.

A continuación, en la *Figura 20* se observan los datos correspondientes a el desarrollo de actividades físicas por parte de la población.

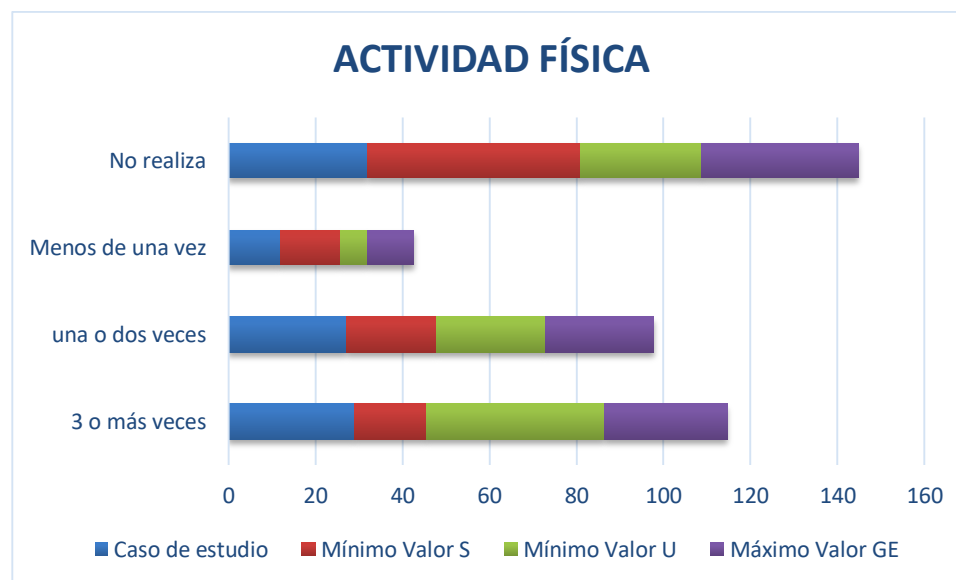


Figura 20. Estadística actividad física
Fuente: Propia [Figura]

¿Por qué analizar la actividad física de las personas en la zona? Para proyectos de movilidad, donde se quiere incentivar al uso de modos no motorizados de transporte, como intercambiador multimodal o donde se realizan proyecciones de demanda en base a unos radios de acuerdo con el modo en el que llegan a las estaciones; este tipo de estadísticas son el principio de un indicio de viabilidad de estas propuestas.

En nuestro caso, donde queremos implementar paradas con alto grado de multimodalidad observamos que, aunque los porcentajes de las personas que no realizan actividad física son mayores, en los casos donde sí se realiza se habla de más de 2 veces por semana. Lo cual nos hace pensar que, al plantear un radio medianamente extenso para atracción de peatones a la estación, una importante cantidad de usuarios estarían dispuestos a llegar a la estación caminando.

Consideramos muy importante realizar este tipo de estudio, debido a que los proyectos de infraestructura de transporte tienen un impacto inmediato en la calidad de vida de los usuarios y de las poblaciones cercanas. Además, por medio del análisis estadístico para los atributos elegidos se puede observar la situación de los ciudadanos de manera más detallada, lo que deja en evidencia sus necesidades; En este tipo de proyectos, los datos arrojados muestran las oportunidades presentes para tomar acciones que mejoren la calidad de vida de los ciudadanos.

Como nuestro proyecto analiza las metodologías para la definición de puntos de paradas ferroviarias, también es importante analizar en qué sectores de la ciudad es más viable la implementación de estos puntos. Análisis que se realizó en base a la información descrita anteriormente. A modo de síntesis se presenta la *Tabla 6*, donde se observa de manera más detallada las UPZ's que intervienen en cada estación.

Tabla 6. Características de las UPZ's que incluyen las estaciones estudiadas

Estación Codigo UPZ	Caso de estudio Diagnostico 192-Antomonte				Maximo valor GE Gran Estación				Mínimo valor S De la Sabana				Mínimo valor U Usuguan				OBSERVACIONES	
	21 Años	98 Alezares	97 Chico Lago	99 Total / Promedio	109 Ciudad Salitre Oriental	106 La Escamada Occidental	110 Ciudad Salitre Jardín Botánico	105 Total / Promedio	100 La Escamada Occidental	101 Ciudad Salitre Oriental	93 La Sabana	99 Pocate Amada Nieves	108 Total / Promedio	102 County Club	15 La Altamirina	20 Total / Promedio		
ENCUESTA MULTIPORPOSITO 2017 SIMUT Estimado de : https://dphogua.mps.uegls.com/pps/Maplomafkx.html?appId=98465880764cbb4246c2207656f6#																		
Puente																		
Afribito																		
Total viviendas por Upz	18894	32438	26115	77967	18537	10333	20570	21070	70010	19498	9818	6558	36254	52233	38372	90605	NA	NA
Total hogares por UPZ	54214	90912	52951	198077	51289	26685	49700	90943	218117	50379	17226	18183	85788	115124	91513	206637	NA	NA
Promedio personas por hogar	2.77	2.58	2.03	2.5	2.76	2.56	2.39	2.82	2.6	2.55	1.7	2.58	2.3	2.2	2.38	1.5	NA	NA
Población UPZ	150173	234853	107491	492166	141558	68314	117588	254459	583919	128466	29284	46912	204663	252275	217801	471074	NA	NA
Comunicación del área	3917	3487	2292	32	5695	2389	2517	1528	25	679	5425	5316	58	2193	806	15	6.77 a 67.90	VIVIENDA
Presencia escuela pública	5738	2845	1571	31	1213	3521	2119	3045	0	8924	4687	2821	20	2195	284	22	11.4 a 43.49	VIVIENDA
Presencia escuela privada	5738	2845	1571	31	1213	3521	2119	3045	0	8924	4687	2821	20	2195	284	22	11.4 a 43.49	VIVIENDA
Religión	3582	43707	3208	37	3016	2692	4596	3811	35	6918	562	6241	60	2489	1793	21	5.83 a 80.32	VIVIENDA
Mejor	4738	394	4508	44	6758	639	5603	6594	63	4371	5042	5778	51	5076	5316	52	35.21 a 67.58	VIVIENDA
Peor	4738	394	4508	44	6758	639	5603	6594	63	4371	5042	5778	51	5076	5316	52	35.21 a 67.58	VIVIENDA
Hogares que se consideran pobres	5.35	9.66	5.84	7	5.08	3.53	2.97	3.95	4	6.03	7.02	6.59	7	5.52	2.17	44	24.34 a 60.80	HOGARES
Percepción	4.85	8.53	0.99	5	2.3	2.15	2.62	9.64	4	21.19	8.9	21.35	17	1.87	1.46	2	2.17 a 13.49	HOGARES
Estado	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0.37	3.18	29.56	11	0.13	0	0	0.99 a 36.14	HOGARES
3	4569	9008	0	45	0.73	0.26	2356	8397	27	72.25	65.31	66.04	67	6.93	4.23	3	0.4 a 97.59	HOGARES
4	5117	932	468	22	8610	7629	6017	1587	60	15.72	30.71	0	15	1.93	2911	16	0.4 a 91.23	HOGARES
5	284	0	0	0	1319	232	1569	0	3	0	0.17	0.05	0	3392	6666	30	0.4 a 66.66	HOGARES
3 o más	1875	1847	4021	29	3478	3837	2115	1883	28	1247	26.65	10.22	16	45.62	36.69	41	3.44 a 45.42	PERSONAS
Menos de una	1171	1619	753	12	589	632	1828	122	11	23.55	10.22	7.92	14	5.24	7.31	6	4.01 a 26.51	PERSONAS
5 a 17 años	4142	3366	2097	32	3174	3202	3932	4117	36	47.51	42.14	57.29	49	27.64	28.04	28	20.96 a 71.02	PERSONAS
18 a 23 años	6575	7866	8741	77	9961	9845	9913	9889	99	96.11	95.57	94.73	95	98.82	96.87	98	90.85 a 100	PERSONAS DE ACUERDO A LA EDAD
Tasa Global de Participación	59.63	60.84	62.04	61	67.37	53.88	58.67	52.78	58	64.5	69.68	70.06	68	66.96	63.17	65	25.75 a 87.41	PERSONAS

Se muestran porcentajes respecto a los datos propios de cada tabla de viviendas, hogares por UPZ, personas por UPZ en el resto de atributos se muestran promedios.

CAPÍTULO 5

APLICACIÓN CASO DE ESTUDIO: ESTACIÓN CALLE 92 CON CARRERA 30, BOGOTÁ

Nuestro proyecto analiza las metodologías para la definición de puntos de paradas ferroviarias, por lo que es importante analizar en qué sector es más viable la implementación de estos puntos. Análisis que se realizó en base a la información descrita anteriormente, para obtener resultados de satisfacción y productividad de las estaciones existentes y a modo de comparación, para así observar lo óptima que podría ser la implementación de la estación de caso de estudio.

En primer lugar, se le dio un valor a cada variable que se considerará dentro de la metodología Nodo-Lugar, de acuerdo con el entorno descrito para cada estación en el capítulo anterior. Posteriormente, para cada categoría definida, con el método descrito en la metodología, se obtendrá el valor final de Nodo-Lugar, valor con el cual se modelarán las estaciones para poder realizar una comparación.

ASIGNACIÓN DE VALORES PARA CADA VARIABLE POR ESTACIÓN

Para asignar los primeros valores se realizó una calificación de tipo cuantitativo o cualitativo de acuerdo con el requerimiento de cada variable, se definieron rangos de 1 a 5. Para 8 de las 10 variables se definieron los valores cualitativos que se presentan en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Valores cualitativos de las variables a aplicar

Valor para asignar	
1	Pésimo
2	Malo
3	Aceptable
4	Bueno
5	Excelente

Fuente: Propia

Las variables que se asocian a estos rangos son: *Grado de multifuncionalidad*, de acuerdo con la intermodalidad que se presenta en la zona. *Viajes producidos por el origen*, de acuerdo con la demanda del sector. *Costo de viaje*, de acuerdo con el costo que tiene el pasaje del tren respecto a los otros modos de transporte del sector. *Calidad*, de acuerdo con el atractivo de la zona, de la estación y del tren respecto a otros modos de transporte del sector. *Diseño de la red vial*, de acuerdo con el diseño y adaptación de las vías férreas a la estación, incluyendo infraestructura de entrada y salida de pasajeros. *Tiempos de Viaje*, de acuerdo con el tiempo de espera que genera un viaje en tren respecto a un viaje en otro modo de transporte del sector. *Proximidad a la estación*, de acuerdo con la cercanía con centros de negocios (CB's) o sectores comerciales. *Accesibilidad*, de acuerdo con lo relacionado a la seguridad y la accesibilidad a la estación, incluyendo zonas para discapacitados, que es uno de los parámetros que muchas veces se pasa por alto cuando se plantean este tipo de infraestructuras, no hay que olvidar que si hablamos de accesibilidad se deben tener en cuenta todo tipo de usuario.

Para las dos variables faltantes, se definieron los valores cuantitativos que se presentan en la *Tabla 8*.

Tabla 8. Valores cualitativos para las variables a aplicar

Valor Por Asignar	
1	Casi nada
2	Poco
3	Regular
4	Mucho
5	Demasiado

Fuente: Propia

Las variables que se asocian a estos rangos son: *Intensidad del tráfico*, de acuerdo con la congestión vehicular que se presenta en el sector. *Impacto ambiental positivo*, de acuerdo con la percepción de calidad del aire en el sector, lo que se asociaría a las emisiones de CO₂ en estas.

Finalmente, en la *Tabla 9*. Se presentan los valores que fueron asignados a cada estación.

Tabla 9. Valores de variables asignados a cada estación de estudio

Variable	Categoría	Caso de Estudio	Máximo Valor GE	Mínimo Valor U	Mínimo Valor S
Grado de multifuncionalidad	Ciudad Eficiente	5	5	2	2
Viajes producidos por el origen (demanda)	Movilidad efectiva	5	5	4	1
Costo de viaje	Economía	4	4	4	4
Calidad: Atractivo del área y del sistema de	Equidad	4	4	3	1
Diseño de la red vial	Ciudad Eficiente	4	4	2	3
Tiempo de viaje	Movilidad efectiva	4	4	4	3
Intensidad del tráfico	Movilidad efectiva	5	5	5	3
Proximidad a la estación	Movilidad efectiva	5	5	4	2
Impacto ambiental positivo	Ambiente	3	4	3	5
Accesibilidad	Equidad	3	4	1	2

Fuente: Propia

VALOR NODO-LUGAR PARA CADA ESTACIÓN

Luego de la asignación previa de valores, se clasificaron las variables de acuerdo con la influencia en determinado aspecto; es decir, aquellas que son propias del entorno se les da un valor de lugar mientras que las que son propias de la estación se les da un valor de nodo.

El valor del nodo: Para determinar el valor del nodo de las estaciones, se analizaron cinco criterios, con base en la recopilación bibliográfica realizada, el análisis socioeconómico y criterio propio.

1. Viajes producidos por el origen (demanda)
2. Costo de viaje
3. Tiempo de viaje
4. Proximidad a la estación
5. Accesibilidad

El valor del lugar: Para determinar el valor de posición (calidad del entorno e infraestructura) del área de la estación, se analizaron cinco criterios:

1. Grado de multifuncionalidad
2. Calidad: Atractivo del área y del sistema de transporte
3. Diseño de la red vial
4. Intensidad del tráfico
5. Impacto ambiental positivo

En forma de síntesis, se presenta la *Tabla 10* con la clasificación para cada variable.

Tabla 10. Clasificación de variables por influencia

Variable	Nodo/Lugar
Grado de multifuncionalidad	L
Viajes producidos por el origen (demanda)	N
Costo de viaje	N
Calidad: Atractivo del área y del sistema de transporte	L
Diseño de la red vial	L
Tiempo de viaje	N
Intensidad del tráfico	L
Proximidad a la estación	N
Impacto ambiental positivo	L
Accesibilidad	N

Fuente: Propia

Para determinar el valor de nodo o lugar para cada una de las variables, se utilizó la siguiente fórmula:

$x_1 \dots x_5 =$ Valor asignado a cada variable por estación

$$\text{Valor del nodo o lugar} = 1 - \frac{\left(a - \frac{b}{d}\right) - \left(a - \frac{c}{d}\right)}{2}$$

Ecuación 10 Valor del nodo o lugar

Donde:

$$a = \text{máximo entre } (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$$

$$b = \text{mínimo entre } (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$$

$$c = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)/5$$

$$d = (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5)$$

Calculado el valor de lugar para cada estación, se obtuvieron los resultados que se muestran en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Valor de lugar de cada estación

Estación	a	b	c	d	Valor Lugar
Caso de Estudio	5	3	4.2	21	0.971
Máximo Valor GE	5	4	4.4	22	0.991
Mínimo Valor U	5	2	3	15	0.967
Mínimo Valor S	5	1	2.8	14	0.936

Fuente: Propia

Los valores obtenidos, corresponden al planteamiento inicial de clasificación de mínimo y máximo valor para las estaciones. En este caso, se observa que el valor de lugar correspondiente a la estación de Mínimo Valor S que corresponde a la estación de la Sabana, como se esperaba, presenta el mínimo valor, lo cual se complementa con el análisis de entorno y ubicación que arrojó un resultado desfavorable en esos aspectos.

Por otro lado, al calcular el valor de nodo para cada estación, se obtuvieron los resultados que se presentan en la *Tabla 12*.

Tabla 12. Valor de nodo de cada estación

Estación	a	b	c	d	Valor Nodo
Caso de Estudio	5	3	4.2	21	0.971
Máximo Valor GE	5	4	4.4	22	0.991
Mínimo Valor U	4	1	3.4	17	0.929
Mínimo Valor S	4	1	2.4	12	0.942

Fuente: Propia

Los valores obtenidos, corresponden al planteamiento inicial de clasificación de mínimo y máximo valor para las estaciones. En este caso, como se está evaluando el valor de nodo, la estación de Mínimo Valor U que corresponde a la estación de Usaquén presenta el mínimo valor, lo cual se complementa con el análisis de accesibilidad y conectividad propia de la estación que arrojó un resultado desfavorable en esos aspectos.

ASGINACIÓN DE CADA ESTACIÓN AL DIAGRAMA DE LA METODOLOGIA NODO-LUGAR

Para poder asignar cada estación al diagrama Nodo-Lugar, se recopilaron los valores obtenidos anteriormente como se muestra en la *Tabla 13*.

Tabla 13. Valores de Nodo-Lugar para cada estación

Estación	Valor Lugar	Valor Nodo
Caso de Estudio	0.971	0.971
Máximo Valor GE	0.991	0.991
Mínimo Valor U	0.967	0.929
Mínimo Valor S	0.936	0.942

Fuente: Propia

Al graficar los valores calculados de Nodo y Lugar para cada estación, se obtiene el diagrama Nodo-Lugar para el caso particular de Bogotá. El diagrama se presenta a continuación en la *Figura 21*.

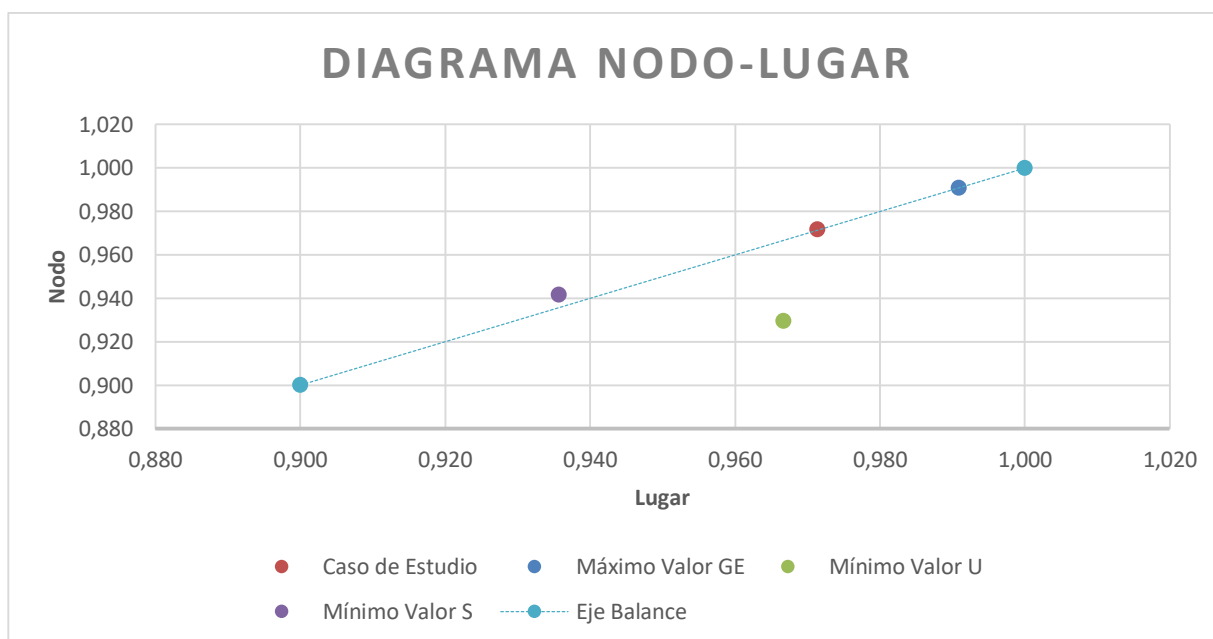


Figura 21. Diagrama Nodo-Lugar caso Bogotá
Fuente: Propia [Figura]

El modelo de Nodo-Lugar distingue cuatro situaciones para cada estación. Para el caso particular de Bogotá se redefinieron estas áreas de la siguiente manera:

- a) *Áreas equilibradas*: Se encuentran a lo largo del Eje de Balance, sus posiciones relativas tanto en el nodo como en las escalas de lugar son aproximadamente iguales. Se espera que, debido a las interacciones de transporte, infraestructura, uso del suelo y población, estas posiciones relativas sean comparables en la mayoría de los casos.
- b) *Áreas esforzadas*: Están ubicadas en la parte superior del Eje de Balance y corresponden a ubicaciones donde el nodo y el lugar presentan valores máximos. Las áreas de las estaciones "esforzadas" tienen una posición relativamente fuerte tanto en el nodo como en las escalas de lugar, así que un mayor desarrollo en estas áreas puede sobrepasar su capacidad lo cual a futuro podría desencadenar una problemática.
- c) *Áreas dependientes*: Áreas donde tanto los valores de nodo como los de lugar son tan débiles que otros factores, además de la dinámica interna del lugar-nodo, deben intervenir para promover el uso de la estación y así lograr que la zona sea sostenible.
- d) *Áreas desbalanceadas*: Encima del Eje de Balance están los "nodos desequilibrados", lugares donde los sistemas de transporte están relativamente más desarrollados que las actividades urbanas. Y debajo del Eje de Balance están los "lugares desequilibrados" donde, por el contrario, las actividades urbanas están más desarrolladas que los sistemas de transporte. Por lo tanto, un área de estación "desequilibrada" deberá tener un análisis dependiendo del valor mínimo de nodo, para lograr que se conviertan en áreas equilibradas.

En conclusión, para el caso particular de Bogotá, se busca que las estaciones se encuentren en áreas equilibrada para obtener una dinámica óptima entre transporte,

infraestructura, usos del suelo y la población. De manera, que las estaciones se encuentren en áreas sostenibles. En seguida se observa el Diagrama Nodo-Lugar

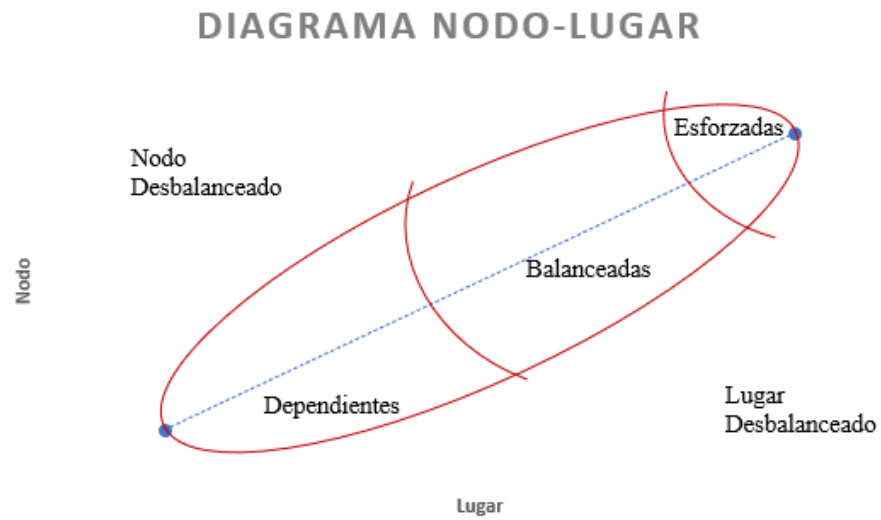


Figura 22. Diagrama de referencia Nodo-Lugar
Fuente: Propia [Figura]

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE VARIABLES SELECCIONADAS EN LA ESTACIÓN DE ESTUDIO

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología Nodo-Lugar a la estación férrea de caso de estudio para el caso particular Bogotá.

Los resultados de parejas de valor de nodo y lugar para las estaciones de calibración y la estación de caso de estudio se presentan en la *Tabla 14*.

Tabla 14 Valores de Nodo-Lugar para cada estación

Estación	Valor Lugar	Valor Nodo
Caso de Estudio	0.971	0.971
Máximo Valor GE	0.991	0.991
Mínimo Valor U	0.967	0.929
Mínimo Valor S	0.936	0.942

Fuente: Propia

Las parejas obtenidas anteriormente se grafican en el diagrama de referencia Nodo-Lugar, como se muestra en la *Figura 22*, para determinar la situación que se presenta en cada una de las estaciones estudiadas y así poder realizar un análisis más detallado, confirmando que la situación real se represente en el modelo para el caso particular de la ciudad de Bogotá.

En la *Figura 23*, se presenta el diagrama Nodo-Lugar obtenido para las estaciones estudiadas en el cual se observan las áreas en las que se encuentra cada una.

DIAGRAMA NODO-LUGAR

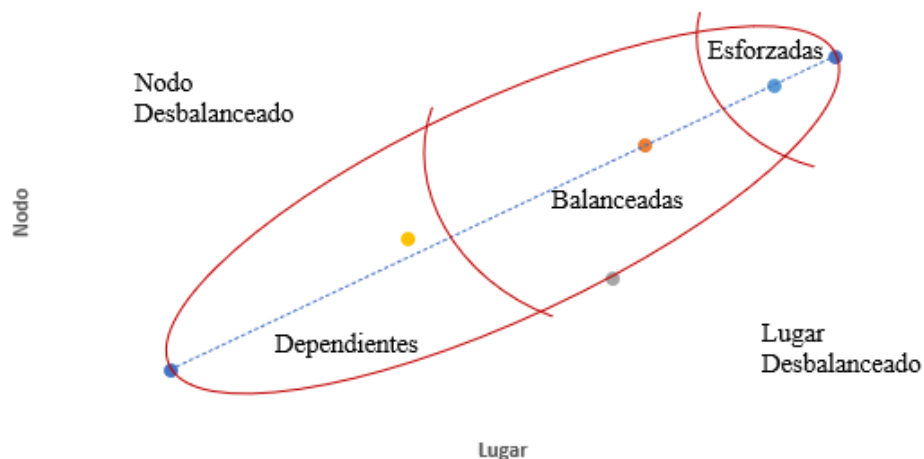


Figura 23. Diagrama Nodo-Lugar para cada estación
Fuente: Propia [Figura]

Como se observa en el diagrama, la situación más crítica se presenta en las estaciones de la Sabana y Usaquén. Por un lado, la estación de la Sabana se encuentra en el área dependiente por esta razón se deben tomar medidas para promover el uso de la estación, teniendo en cuenta los análisis de la estación planteados anteriormente, estas intervenciones deben ser para disminuir los factores de inseguridad y de contaminación. Al corregir estos factores la estación de la Sabana puede entrar muy fácilmente al área balanceada ya que se encuentra en una zona de alta captación de pasajeros, ubicada muy cerca de la zona centro turística y comercial de Bogotá.

La otra situación que sobresale es la de la estación de Usaquén, esta se encuentra en el área de lugar desbalanceado, aunque no por mucho, lo cual se esperaba al tener en cuenta el análisis en el que se observa que su principal problema está relacionado directamente con la accesibilidad a la estación. Además, una característica de esta área es que la zona de la estación se encuentra más desarrollada que el sistema de transporte, lo cual concuerda con la situación en este punto; ya que, a pesar de contar con estaciones de SITP cercanas, su frecuencia no es la

apropiada, no se cuenta con puntos de encuentro multimodal y es una zona con alta congestión vehicular.

El punto de Gran Estación se encuentra en el área esforzada, es decir que presenta un valor alto tanto en nodo como en lugar, esto debido a que es la estación en la que el modo férreo de la ciudad empieza a ser competitivo frente a otros modos de transporte, debido a que se encuentra en una zona muy diversa en cuanto a usos del suelo, cuenta con estaciones de Transmilenio, SITP, buses complementarios, carriles de bicicletas y con una de las mejores infraestructuras viales presentes en la ciudad. Es por esto por lo que se debe mantener el equilibrio entre el valor del nodo y de lugar, fortaleciendo las variables que influyen en el nodo a medida que varía el comportamiento del lugar para evitar problemáticas en este punto.

Por último, la estación de caso de estudio se encuentra en el área balanceada, que es lo que se esperaba desde el principio del planteamiento de esta investigación. Implementar un punto de parada férrea con valores similares en el nodo y en las escalas de lugar, en donde la estación satisfaga las necesidades particulares de la población del lugar, teniendo en cuenta las interacciones de transporte, infraestructura, uso del suelo y población.

A modo de conclusión, se observa que los resultados arrojados son consecuentes con la situación actual para cada una de las estaciones estudiadas, lo cual genera confiabilidad en el modelo planteado para la ciudad de Bogotá. Aunque la metodología Turistren se caracteriza por ser más empírica que científica, los parámetros que se tuvieron en cuenta no están muy alejados de los que se consideran en el modelo planteado. Sin embargo, se debe profundizar en cada variable para obtener estaciones que tengan un balance entre el Nodo y el Lugar, como se planteó en la estación Caso de Estudio.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el estudio realizado, se encontró que para la definición de puntos de parada del Sistema Férreo a nivel Nacional no se tuvo en cuenta una metodología determinada, estas paradas se establecieron a criterio del personal encargado. Además, se evidencia que a través de los años el modo férreo ha perdido protagonismo dentro del transporte de carga y de pasajeros en el país, tanto así, que hoy en día se encuentran vías férreas obsoletas y estaciones de tren abandonadas.

En el caso particular de Bogotá, no se encontró metodología alguna para la definición de las paradas del Tren de la Sabana, a cargo de Turistren. Empresa que actualmente ejerce la administración del tren turístico y del servicio de transporte privado en convenio con algunas universidades. Estos proyectos, no contaron con una planeación de los puntos de paradas para sus servicios; para esto se hizo uso de la infraestructura ferroviaria existente y se tuvieron en cuenta parámetros de accesos peatonales seguros, estaciones equidistantes y demanda de pasajeros en el sector.

La falta de un desarrollo de metodologías en la implementación de modos férreos no es una problemática particular de Colombia. En la mayoría de los países de Latinoamérica no se han considerado estudios de esta índole a la hora de implementar paradas de estaciones férreas. Las metodologías revisadas para el desarrollo de este proyecto se encontraron principalmente en países de Europa, Asia y Oceanía, en donde los modos de transporte férreo tienen un rol principal en la movilidad rural y urbana, siendo pioneros en esa última a nivel mundial. Gracias a estos desarrollos hoy en día en países menos desarrollados se están empezando a fortalecer modos alternativos de transporte.

Para el desarrollo de este proyecto, se tuvo como referencia la metodología Nodo-Lugar, particularmente el modo de transporte férreo en Tokio, pero estudiada y aplicada en diferentes contextos alrededor del mundo. Esta metodología ha sido adoptada para modos de transporte en ciudades de diversas características, ya que presenta una estructura muy flexible que puede ser ajustada a los objetivos de cada proyecto, teniendo en cuenta características particulares del lugar de aplicación

En la aplicación de la metodología, se definieron tres estaciones de calibración del modelo. Estas estaciones se escogieron considerando el máximo y mínimo valor que pudiera encontrarse en cada una de las estaciones que hoy en día operan en la ciudad. Se escogió la estación de Gran Estación como máximo valor por su demanda, ubicación estratégica, accesibilidad y por ser un punto de intercambio multimodal. Se escogieron las estaciones de Usaquéen y de la Sabana, como aquellas de mínimo valor, la primera por sus problemas de accesibilidad y la segunda por sus problemas en calidad el aire y seguridad. Finalmente, se eligió la estación de estudio, localizada en la Diagonal 92 con Carrera 30, por su centralidad, grado de multimodalidad, movimiento económico; además, este punto se encuentra en estudio de implementación por parte de la empresa Turistren.

Se asignaron valores cuantitativos y cualitativos, de acuerdo con las características asignadas a cada variable, estos primeros valores se asignaron de acuerdo con el análisis de la situación actual de cada estación, el análisis estadístico y con criterio propio. Las parejas de valores obtenidos para cada estación se presentan en la *Tabla 15*.

Tabla 15. Valores de Nodo-Lugar para cada estación

Estación	Valor Lugar	Valor Nodo
Caso de Estudio	0.971	0.971
Máximo Valor GE	0.991	0.991
Mínimo Valor U	0.967	0.929
Mínimo Valor S	0.936	0.942

Fuente: Propia

Al realizar el diagrama Nodo-Lugar para los resultados obtenidos en cada una de las estaciones, se encontró que la estación de la Sabana se encuentra en un área dependiente, es decir, tanto los valores de nodo como de lugar, son débiles frente a otros factores que influyen en la zona de la estación; por lo cual se recomienda promover el uso de la estación realizando intervenciones que permitan disminuir la inseguridad y contaminación del sector. La estación de Usaquén se encuentra en un área de lugar desbalanceado, es decir, las actividades urbanas están más desarrolladas que los sistemas de transporte; por lo cual se recomienda mejorar la accesibilidad de la estación, y a su vez convertirla en un intercambiador multimodal que genere mayor conectividad entre los modos de transporte que allí operan. El punto de Gran Estación se encuentra en un área esforzada, es decir, presenta valores máximos de nodo y de lugar; así que se recomienda controlar de manera periódica el crecimiento de las actividades urbanas y de los sistemas de transporte que allí operan, para mantener un equilibrio. Por último, la estación de estudio se encuentra en un área balanceada, es decir, las interacciones de transporte, infraestructura, uso del suelo y población son comparables en la mayoría de los casos.

Finalmente, se concluye que el modelo adoptado para el caso particular de Bogotá arrojó resultados comparables a la situación real de las estaciones del sistema férreo en la ciudad, y la estación analizada se podría convertir en una estación referente al momento de definir otras paradas férreas, contemplando las variables y su interacción como se planteó para este caso.

A modo de recomendación, se debe realizar un análisis más profundo al definir una parada férrea en la ciudad de Bogotá, con el fin de construir estaciones que le aporten al desarrollo económico y a la movilidad de la ciudad. Es importante recordar que el modelo se puede ampliar, analizando otro tipo de variables o realizando un estudio más específico. Ya que la principal dificultad que se presentó durante la realización de este proyecto fue la obtención de información, debido al acceso limitado de metodologías nacionales, a la desactualización de las bases de datos de la ciudad y en general a la poca información sobre transporte férreo en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Nacional de Infraestructura. (2017). *El tren de Bogotá-Zipaquirá moviliza más de 456 mil pasajeros al año, la mayoría estudiantes*. Bogotá.
- Akiyama, T., & Okushima, M. (2009). Analysis of Railway User Travel Behaviour Patterns of Different Age Groups. *IATSS Research*, 1-12.
- Chorus, P., & Bertolini, L. (2011). An application of the node place model to explore the spatial development dynamics. *The Journal of Transport and Land Use*, 45-58.
- Conticelli, E. (2011). Assessing the potential of railway station redevelopment in urban regeneration policies: an Italian case study. *Procedia Engineering*, 1096-1103.
- Cordera, R., Sañudo, R., dell'Olio, L., & Ibeas, Á. (2018). Trip distribution model for regional railway services considering spatial effects between stations. *Transport Policy*, 77-84.
- Duarte, F., & Rojas, F. (2012). Intermodal Connectivity to BRT: A Comparative Analysis of Bogotá and Curitiba. *Journal of Public Transportation*, 1-18.
- Fegan, O. (2003). Cost-Benefit Analysis of the Dublin Luas Light Rail. *Student Economic Review*, 213-224.
- Fernández Herráiz, H., Sánchez Galiano, J. C., & Fernández Aracil, P. O. (2016). Implementación del Modelo Transit-Oriented Development (T.O.D.) en la Ciudad de Alicante. *CIT2016 – XII Congreso de Ingeniería del Transporte Valencia*.
- Galelo, A., Ribeiro, A., & Martínez, L. M. (2014). Measuring and evaluating the impacts of TOD measures -Searching for Evidence of TOD characteristics in Azambuja train line. *Procedia - Social and Behavioral Science*, 899-908.
- Giacomo, D. R., Enrico, S., & Pierfrancesco, F. E. (2016). Sustainable reuse of disused railway. *Procedia Engineering*, 1643-1652.

- Hayton, Joe. (2018). *Light Rail Transit System*. Elsevier Inc.
- Lee, K. S., Eom, J. K., You, S. Y., Min, J. H., & Yang, K. Y. (2015). Assessing the potential of railway station redevelopment in urban regeneration policies: an Italian case study. *Procedia Computer Science*, 106-112.
- Mateos, M. (2005). *Mobilitat obligada*. Barcelona: Diputació de Barcelona Àrea de Medi Ambient.
- Metro de Medellín. (2015). Metro de Medellín. Calidad de Vida. *Nuestro tranvía. Para quienes vivimos la ciudad metro a metro*, 2-72.
- Nigro, A., Luca, B., & Moccia Domenico, F. (2019). Land use and public transport integration in small cities and towns: Assessment methodology and application. *Journal of Transport Geography*, 110-124.
- O'Connor, H. (2012). Measuring Rail Station Catchment Areas In The Greater Dublin Area. *Proceedings of the ITRN 2012*, 1-8.
- Prieto Moreno, J. C. (2000). Bogotá y su Región: Perspectiva de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Económico. *Sociedad Geográfica De Colombia Academia de Ciencias Geográficas*, 1-11.
- Salvador, J., Ricart, J. E., Fageda, X., & Rodríguez, M. (2018). VLT CARIOCA - Tranvía de Río (Brasil). *PPP For Cities*, 1-40.
- Ting, (. L., Jianhong, (. X., Todd P., R., & Konstadinos, G. G. (2014). Spatial analysis of access to and accessibility surrounding train stations: a case study of accessibility for the elderly in Perth, Western Australia. *Journal of Transport Geography*, 111-120.
- Yoongho, A., Tomoya, K., Hiroshi, T., & Upali, V. (2017). Estimation of Passenger Flow for Planning and Management of Railway. *Transportations Research Procedia*, 315-330.

YumaTsumuraa, Dai, N., Ryoji, M., & Tetsuharu, O. (2019). A study on the timing of Asian metropolitan railway development with motorization and its effect on CO2 emissions from transportation. *IATSS Research*.