

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EVALUACIÓN EX ANTE ENTRE TREN LIGERO, TRANVÍA Y BRT ELÉCTRICO EN PAÍSES EN VÍA DE DESARROLLO

ANDREY JULIAN FONSECA SOLER
Ingeniero en Transporte y Vías

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia

2022

EVALUACIÓN EX ANTE ENTRE TREN LIGERO, TRANVÍA Y BRT ELÉCTRICO EN PAÍSES EN VÍA DE DESARROLLO

ANDREY JULIAN FONSECA SOLER
Ingeniero en Transporte y Vías

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería con énfasis en Infraestructura y Sistemas de Transporte
Modalidad de investigación

Director:

Ph.D. en Ingeniería - Transporte; Iván Reinaldo Sarmiento Ordosgoitia

Línea de Investigación:

Planeación de transporte

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en vías y transporte - VITRA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil
Medellín, Colombia

2022

Dedicatoria

A Dios, por permitirme vivir y aprovechar cada día de mi existencia.

A mis padres Inés y Gustavo y hermanos Marlon y Daniel por el tiempo que no les dedique para compartir las historias, dificultades y éxitos de su vida diaria y aun así, me dieron fortaleza y comprensión en el transcurso de esta meta de mi proyecto de vida. A ellos, toda mi gratitud y esfuerzo.

El secreto de la felicidad no es hacer siempre lo que se quiere, si no querer siempre lo que se hace.

Tolstói

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Andrey Julian Fonseca Soler

Fecha: 13 de octubre de 2022

Agradecimientos

A mis familiares paternos y maternos, por su apoyo en cada instante desde que tengo memoria porque ven en mí una persona con un gran futuro.

Arq.(C) Ivon Puerto, por sus consejos, compañía y sincero amor en cada instante que me encontraba cansado y desconcertado en la construcción de esta investigación, gestos que se quedan en mi corazón.

A mis amigos de infancia, de colegio, de pregrado y posgrado que me han compartido sus experiencias, su compañía y buena energía en el transcurso de la maestría.

Ph.D. Iván Sarmiento, por su asesoramiento y guía como director de tesis.

Psicól. Cristhian Hurtado, por su asesoramiento en redacción y consistencia de investigación.

Esp. Ricardo Prada, por su apoyo y consejos desde el principio de mi posgrado, amistad de hermandad y profesión que se quedan en la memoria.

MSc. Juan Guillermo Ruiz, en las últimas instancias por apoyarme, asesorarme y compartirme información en transporte de pasajeros.

Ph.D.(C) Yerly Fabián Martínez, gracias a su asesoramiento e información compartida, encontré solución sobre criterios de selección de sistemas de transporte en una etapa crítica de mi tesis de posgrado.

Ph.D.(C) Paul Basnak, gracias a su gentil asesoramiento y retroalimentación de los temas tratados en esta investigación.

Resumen

Esta investigación diseñó una metodología para ser implementada en las etapas iniciales de un proyecto o en la planificación del transporte de las ciudades de países en vía de desarrollo, ya que, este tipo de economías demanda mayor número de pasajeros para que un sistema de transporte público sea económicamente viable. La metodología se desarrolló a partir de un proceso de jerarquía analítica teniendo en cuenta variables que influyen en la decisión de un sistema de transporte como: la demanda de pasajeros, la forma de la ciudad, el tipo de ruta de transporte público y los usos del suelo, para ejecutarla, se deben seguir dos pasos: 1. determinar cuál es el máximo sistema al cual puede acceder un grupo poblacional de una ciudad y 2. la evaluación de las 3 alternativas de transporte de mediana capacidad, como el son bus rápido eléctrico, tren ligero y tranvía

La metodología se aplicó en un corredor de tres ciudades principales como: Medellín, Bogotá - Colombia y Guadalajara – México, los dos primeros pertenecen a proyectos en proceso de desarrollo y el último en operación. A través de los resultados obtenidos de la metodología aplicada se concluyó que, 1. la metodología propuesta tiene proximidad en cuanto a la decisión de elección de un sistema de transporte de mediana capacidad tipo BRT (Bus Rápido), LRT (Tren Ligero) y TRAM (Tranvía) y 2. las variables establecidas: demanda de pasajeros, forma de la ciudad, tipo de ruta de transporte público y usos del suelo tienen influencia en la selección de un sistema de transporte de estas características.

Palabras clave: Planificación, Transporte, Jerarquía analítica, Bus rápido, Tren ligero, Tranvía, Países en desarrollo.

Abstract

This research designed a methodology to be implemented in the initial stages of a project or in the transport planning of cities of developing countries, since this type of economies demands a greater number of passengers for system be economically viable. The methodology was developed from a process of analytical hierarchy process (AHP) taking into account variables that influence the decision of a transport system such as: the demand for passengers, the shape of the city, the transit route type and the land uses; to execute the methodology, two steps must be followed: 1. determine which is the maximum system that a population group of a city can access and 2. evaluate the 3 medium-capacity transportation alternatives such as the electric bus rapid transit, light rail transit and tram transit.

The methodology was applied in a corridor of three main cities such as: Medellín, Bogotá - Colombia and Guadalajara - Mexico, the first two belong to projects under development and the last one in operation. Through the results obtained from the applied methodology, it was concluded that, 1. the proposed methodology is close in terms of the decision to choose a medium-capacity transport system such as the bus rapid transit (BRT), light rail transit (LRT) and tram transit (TRAM) and 2. the selected variables as: demand for passengers, shape of the city, the transit route type and the land uses influence the selection of a transport system with these characteristics.

Keywords: Planification, Transport, AHP, BRT, LRT, Tram, Developing countries.

Contenido

	Pág.
Resumen	VI
Abstract.....	VII
Lista de figuras.....	X
Lista de tablas.....	XII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XV
Introducción	XVIII
1. Objetivos.....	15
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. Antecedentes.....	14
3. Marco Teórico.....	33
3.1. Ciclo de vida del proyecto	33
3.2. Países en vía de desarrollo	37
3.3. El Tren urbano de pasajeros	41
3.4. El BRT (Bus Rapid Transit)	43
3.5. Sistemas de transporte de mediana capacidad	46
3.6. Espacio Urbano en Transporte.....	50
3.6.1. Orografía de la ciudad.....	50
3.6.2. Escala de ciudad.....	51
3.6.3. El transporte y su influencia en la estructura urbana	53
3.6.4. Formas de las rutas de transporte.....	54
3.7. Usos del suelo en Transporte.....	58
3.7.1. Patrones de desarrollo espacial	59
3.7.2. Accesibilidad al uso del suelo mediante transporte	62
3.7.3. Influencia del transporte público en el desarrollo del suelo.....	63
3.8. Densidad de la demanda.....	64
3.9. Sincronización entre viajes, forma urbana y usos del suelo.....	68
3.10. Evaluación Multicriterio.....	74

	Pág.
4. Metodología	35
4.1. Transporte de pasajeros en países en vía de desarrollo	78
4.2. Selección de variables de decisión	89
4.2.1. Densidad en transporte de pasajeros	90
4.2.2. Escala de la ciudad en transporte de pasajeros.....	92
4.2.3. Forma de la ruta en transporte de pasajeros	94
4.2.4. Usos del suelo en transporte de pasajeros	99
4.3. Cálculo de ponderadores mediante AHP (Proceso de Jerarquía Analítica)..	107
4.3.1. Análisis de sensibilidad de los pesos de las variables de decisión.....	116
4.4. Síntesis de Evaluación.....	123
5. Evaluación casos estudio	76
5.1. Corredores de análisis	132
5.1.1. Corredor en Medellín (Colombia).....	132
5.1.2. Corredor en Bogotá D.C. (Colombia)	151
5.1.3. Corredor en Guadalajara (México).....	156
6. Discusión.....	163
7. Conclusiones y Recomendaciones.....	170
7.1. Conclusiones	171
7.2. Recomendaciones	175
A. Anexo: Cálculos de ponderadores mediante metodología AHP	179
B. Anexo: Análisis geoespaciales de las ciudades caso estudio.....	180
Bibliografía	181

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Representación mediante pintura del viaje inaugural con ferrocarril de Liverpool hasta Mánchester (Inglaterra)	24
Figura 2-2: La Catalana de Ripperts.	25
Figura 2-3: Tranvía urbano en Nueva York (EE.UU.), finales siglo XIX.	26
Figura 2-4: Tren Ligero de Guadalajara (México).....	28
Figura 2-5: Tranvía moderno de TRAMBAIX, Barcelona (España).....	28
Figura 2-6: Sistema de Bus rápido - 1980, Curitiba (Brasil).....	30
Figura 2-7: TransMilenio Bogotá D.C. (Colombia).....	31
Figura 2-8: Buses Eléctricos, Medellín (Colombia).....	32
Figura 3-1: Ciclo de Vida de un Proyecto.	34
Figura 3-2: Clasificación de los países según su ingreso.	38
Figura 3-3: ICG Global 2019.	39
Figura 3-4: IDH Global, 2017.	41
Figura 3-5: Tren ligero de DOCKLANDS, Londres (Inglaterra).....	43
Figura 3-6: Ejemplos típicos de trazados urbanos.....	51
Figura 3-7: Formas de rutas urbanas.	55
Figura 3-8: Regresión lineal de la densidad potencial de demanda vs población (figura superior), densidad potencial de demanda vs puntaje urbano (figura inferior).....	72
Figura 3-9: Etapas del proceso de Jerarquía Analítica.	76
Figura 4-1: Esquema metodológico.....	78
Figura 4-2: Perfil transversal del terreno Natural.	84
Figura 4-3: Proceso general para determinar los pesos de las variables de decisión....	109
Figura 5-1: Etapas de la metodología para la selección de un modo de transporte tipo BRT eléctrico o TRAM o LRT en corredores de mediana capacidad en ciudades de países en desarrollo.	131
Figura 5-2: Corredor de análisis Medellín (Colombia).	133
Figura 5-3: Distancia entre centroides municipios valle de Aburrá, Medellín (Colombia).....	135
Figura 5-4: Área envolvente mínima zona urbana valle de Aburrá, Medellín (Colombia).....	142

	Pág.
Figura 5-5: Corredor de la avenida 80, Medellín (Colombia).....	143
Figura 5-6: Área de cobertura del servicio de transporte de pasajeros por sistema, Medellín (Colombia).	145
Figura 5-7: Corredor Norte, Bogotá D.C. (Colombia).....	152
Figura 5-8: Distancia entre centroides municipios Sabana de Bogotá, Bogotá D.C. (Colombia).	152
Figura 5-9: Línea 3, Guadalajara (México).	157
Figura 5-10: Distancia entre centroides municipios zona metropolitana de Guadalajara, Guadalajara (México).	158

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Diferencias entre BRT High-End (Alto rendimiento) y BRT Lite (Ligero).....	44
Tabla 3-2: Diferencias entre TRAM, LRT y BRT.....	48
Tabla 3-3: Indicadores para evaluar requerimientos de un modelo urbano.	59
Tabla 3-4: Demanda mínima para justificar un BRT en corredores.	67
Tabla 3-5: Valores límite entre categorías.....	71
Tabla 4-1: Número de países en vía de desarrollo a partir de índice de desarrollo Humano.	79
Tabla 4-2: Número de países con ingreso medio alto y medio bajo.	80
Tabla 4-3: Número de países en vía de desarrollo a partir de índice de competitividad global.	81
Tabla 4-4: Número de países con orografía montañosa.....	81
Tabla 4-5: Número de países en vía de desarrollo y con orografía montañosa.	82
Tabla 4-6: Países en vía de desarrollo y con orografía Montañosa.....	82
Tabla 4-7: Clasificación del terreno según la orografía predominante, países en vía de desarrollo, continente América.....	85
Tabla 4-8: Clasificación de la orografía.	88
Tabla 4-9: Rangos de Densidad Máxima Potencial para considerar la implementación de un sistema de transporte de pasajeros de mediana capacidad.....	92
Tabla 4-10: Clasificación genérica de la escala de la ciudad.....	94
Tabla 4-11: Diferencias entre corredores mixtos y segregados.....	96
Tabla 4-12: Pesos de metodología AHP para establecer el sistema idóneo dependiendo del tipo de ruta de transporte	97
Tabla 4-13: Tipo de sistema de transporte según la tipología de ruta.	98
Tabla 4-14: Medición de superficie de infraestructura.	101
Tabla 4-15: Clasificación de la accesibilidad al suelo mediante sistemas de transporte.....	105
Tabla 4-16: Escala de preferencias según el Proceso de Análisis Jerárquico	109
Tabla 4-17: Índice aleatorio (IA)	110
Tabla 4-18: Matriz de comparaciones a pares para el ámbito general (variables de decisión)	111
Tabla 4-19: Matriz normalizada y asignación de puntaje para el ámbito general.....	112

	Pág.
Tabla 4-20: Pesos de los criterios a partir de la densidad potencial de la demanda.	113
Tabla 4-21: Pesos de los criterios en el ámbito densidad en transporte de pasajeros. ...	114
Tabla 4-22: Ajuste del peso del ámbito densidad de demanda de transporte de pasajeros a partir de los pesos de los criterios y los rangos de la densidad potencial de la demanda.	114
Tabla 4-23: Pesos criterios a partir de la escala de la ciudad en transporte de pasajeros. .	114
Tabla 4-24: Pesos criterios a partir de la forma de la ruta en transporte de pasajeros...	115
Tabla 4-25: Pesos del ámbito usos del suelo en transporte de pasajeros, a partir de los subámbitos.	115
Tabla 4-26: Pesos de los criterios a partir de los subámbitos	116
Tabla 4-27: Análisis de sensibilidad en la elección del modo de transporte, Escala Cuadrícula.	118
Tabla 4-28: Análisis de sensibilidad en la elección del modo de transporte, Escala Lineal.	119
Tabla 4-29: Análisis de sensibilidad en la elección del modo de transporte, Escala Lineal - Irregular.	120
Tabla 4-30: Análisis de sensibilidad en la elección del modo de transporte, Escala Irregular.	121
Tabla 4-31: Selección del modo de transporte cumpliendo cada uno de los ítems de las variables de decisión.	122
Tabla 4-32: Primer paso, determinación del máximo sistema de transporte al cual puede acceder una ciudad.	124
Tabla 4-33: Segundo Paso, Evaluación del sistema de transporte para corredores de mediana capacidad en países en vía de desarrollo.	125
Tabla 5-1: Información socio-demográfica de Medellín (Colombia).	134
Tabla 5-2: Datos atracción valle de Aburrá, Medellín (Colombia).	136
Tabla 5-3: Datos compacidad valle de Aburrá, Medellín (Colombia).	137
Tabla 5-4: Datos para calcular el puntaje urbano de Medellín (Colombia).	138
Tabla 5-5: Resumen metodología multicriterio a nivel ex ante, para valorar los sistemas de transporte tipo BRT eléctrico, TRAM y LRT en la ciudad de Medellín (Colombia).	150
Tabla 5-6: Datos cálculos compacidad y atractividad.	153

	Pág.
Tabla 5-7: Datos para calcular el puntaje urbano de Bogotá D.C. (Colombia).....	153
Tabla 5-8: Área envolvente mínima zona urbana Sabana de Bogotá, Bogotá D.C. (Colombia).	154
Tabla 5-9: Área de cobertura del servicio de transporte de pasajeros por sistema, Bogotá D.C. (Colombia).	154
Tabla 5-10: Resumen metodología multicriterio a nivel ex ante, para valorar los sistemas de transporte tipo BRT eléctrico, TRAM y LRT en la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia).	155
Tabla 5-11: Datos cálculos compacidad y atractividad.....	158
Tabla 5-12: Datos para calcular el puntaje urbano de Guadalajara (México).	159
Tabla 5-13: Área envolvente mínima zona urbana Guadalajara, Guadalajara (México).160	
Tabla 5-14: Área de cobertura del servicio de transporte de pasajeros por sistema, Guadalajara (México).....	160
Tabla 5-15: Resumen metodología multicriterio a nivel ex ante, para valorar los sistemas de transporte tipo BRT eléctrico, TRAM y LRT en la ciudad de Guadalajara (México)..	161

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
\$	Moneda	1	Unidad representativa del precio de las cosas.
%	Porcentaje	%	Cantidad que representa la proporcionalidad de una parte respecto a un total que se considera dividido en cien unidades.
A	Área de cobertura de las estaciones	Km^2	Área que puede ser recorrida a pie en cinco minutos desde cualquier estación.
A_i	Atractivo	1	Indicador que permite identificar la proximidad de una ciudad con otras localidades
B	Franja de cobertura del corredor	Km^2	Área que cubre un corredor de transporte público, es una franja a lado y lado de la línea central.
Co	Compacidad	1	Es un factor de forma estandarizada, mide en términos prácticos qué tan similar es una forma a un círculo
Es	Esbeltez	1	Identifica la relación entre los semiejes mayor y menor de una forma dada.
IA	Índice Aleatorio	1	Es un valor de la desviación a partir del tamaño de la matriz a pares.
IC	Índice de consistencia	1	Medida de la desviación de la consistencia de la matriz de comparaciones a pares

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
Km	Kilómetros	Km	Es una unidad de longitud, que equivale a mil metros.
Km ²	Kilómetros cuadrados	Km ²	Es una unidad de superficie que equivale a un millón de metros cuadrados.
<i>m</i>	Metros	m	Mínima unidad de la longitud.
<i>max_i</i>	Máximo	1	Máximo valor de un conjunto de datos
<i>R</i> ²	Coeficiente de determinación	%	medida estadística de qué tan cerca están los datos de la línea de regresión ajustada.
<i>RST</i>	Requerimiento de superficie de transporte	1	Es el área servida a la población por el sistema de transporte público
<i>Sc</i>	Área del círculo envolvente mínimo	Km ²	Es la mínima área que se circunscribe a una superficie
<i>Sf</i>	Superficie de la ciudad	Km ²	Área conformada por la zona urbana – construida de una ciudad.
<i>US</i>	Dólar	\$	Unidad representativa de la Moneda de Estados Unidos.

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
π	Pi	3,1416	Relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro
λ	Lambda	1	Delta máximo, es el valor propio de la matriz de comparaciones en pares
η	Valor n	1	Es el número total de datos

Subíndices

Subíndice	Término
i	Primer dato, de un conjunto de datos.
j	Último dato, de un conjunto de datos.

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>AHP</i>	Analytic Hierarchy Process – Proceso de Jerarquía analítica.
<i>BRT</i>	Bus Rapid Transit – Bus Rápido
<i>EE.UU.</i>	Estados Unidos
<i>Hab</i>	Habitantes
<i>LRT</i>	Light Rail Transit – Tren Ligero
<i>Pax</i>	Pasajeros
<i>PIB</i>	Producto Interno Bruto
<i>Prom_pend</i>	Pendiente promedio
<i>TRAM</i>	Tranvía

Introducción

La implementación de sistemas de transporte públicos tipo tren ligero y tranvía no cuentan con muchas herramientas estandarizadas para su planeación, de manera que se pueda tener una guía de cómo proyectar un sistema de transporte de este tipo (Quintero, 2017, p. 215), además, existe una brecha cada vez mayor entre los investigadores y los responsables de la toma de decisiones sobre qué modos de transporte público recomendar en las ciudades; por lo general, las partes interesadas que toman decisiones estratégicas se basan en recomendaciones generales (Chen, 2017 citado por Basnak et al., 2020, p.1) y estudios de casos limitados, como la guía de buses rápidos (The BRT Planning Guide, 2003 citado por Basnak et al., 2020, p.1) o el CONPES 3167 de 2002 Política de Transporte Urbano para Colombia; un sistema de transporte bien planificado ofrece lineamientos congruentes para evaluar las características del sistema y su posible afectación en la ciudad, ya que, este genera focos de desarrollo promoviendo dinámicas económicas y permitiendo a los ciudadanos tener acceso a las diferentes actividades que se producen en un territorio.

En ocasiones, se planea los proyectos de transporte esperando obtener resultados basados en estudios previos y experiencias de otras ciudades, sin embargo, las dinámicas culturales, sociales, psicológicas, económicas, entre otras, propias de una región hacen que dichos proyectos no muestren los beneficios y el impacto que puede ofrecer un sistema de transporte de pasajeros.

Es importante evaluar sistemas de transporte que puedan atender la demanda de pasajeros para una ciudad, es decir, evaluar las alternativas disponibles en el caso que compete a un corredor de mediana capacidad (con menos de 20 mil pasajeros por hora por sentido) las alternativas consideradas son el tren ligero (*Light Rail Transit - LRT*), tranvía (TRAM) y buses rápidos (*Bus Rapid Transit - BRT*) para el caso de América latina, uno de los principales discusiones que tienen estos sistemas es que crean controversia entre los propios planificadores de transporte, ya que, algunos son defensores de uno de los tres sistemas y detractores de los otros (Caipa, 2007, p. 11).

Para (Díez, 2021) los planes que definen intervenciones físicas en las ciudades, como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de Colombia ley 388 de 1997 (Congreso de Colombia , 1997), dan una definición concreta de la relación entre factores como la superficie total, la densidad de la zona, la forma urbana en general, la planificación de los usos de la tierra, los medios de transporte y los proyectos a desarrollar, lo cual, tiene un impacto en las tasas de los movimientos individuales de las personas entre sus lugares de trabajo, de residencia y de servicios (p. 18)

Por otra parte, estos documentos no establecen lineamientos estandarizados en cuanto a los beneficios, criterios de elección y planeación de sistemas de transporte público tipo tren ligero y tranvía, además, la política de transporte urbano plasmada en el CONPES 3167 de 2002 a la cual podría acogerse, se enfoca en el sistema tipo BRT el cual se basa en la demanda mínima requerida para justificar este sistema y cuyo cálculo no se detalla claramente en el mismo documento (Basnak et al., 2021, p. 2).

Dada la falta de métodos técnicos se observa una clara falencia en la identificación del sistema de transporte de pasajeros, además, del desconocimiento de la idónea y limitada información en etapas ex ante (etapa de prefactibilidad) que retrasan los procesos, una parte importante de la definición de la metodología propuesta es recolectar información de entidades administrativas del municipio y de acceso al público (secretarías de movilidad, planeación, infraestructura, etc.), como los datos sobre densidades poblacionales, la composición del suelo, forma de la ciudad, PIB per cápita, tarifas y accesibilidad a los sistemas de transporte existente, motorización, etc., datos que estén acordes a los lineamientos del POT y la ley 388 de Colombia.

El uso del suelo y el transporte se pueden sincronizar construyendo áreas de uso mixto y de alta densidad (van Wee et al., 2014, p. 3), la morfología urbana influye en la forma de la ciudad y actúa como una limitante del trazado del corredor urbano y la tecnología a implementar, es por ello, necesario desarrollar una metodología que relacione la influencia de variables de decisión como: la demanda, las características morfológicas de la ciudad y los usos del suelo, con el fin de evaluar un sistema de transporte tipo tren ligero, tranvía o BRT eléctrico de una manera técnica y con información de acceso al público.

Esta investigación está organizada en seis capítulos; en el primer capítulo se presentan los Objetivos general y específicos; en el segundo, se exponen los antecedentes; en el tercer capítulo se desarrolla el marco teórico; en el cuarto capítulo se construye la metodología que es el núcleo del aporte de esta investigación; en el quinto capítulo se realiza la evaluación de casos de estudio; en el sexto capítulo se discuten los hallazgos encontrados a partir de la aplicación de la metodología propuesta y finalmente, en el capítulo 7 se extraen las principales conclusiones y se ofrecen recomendaciones de trabajos futuros.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología de evaluación multicriterio para decidir entre tren ligero, tranvía y BRT eléctrico para corredores de mediana capacidad en países en vía de desarrollo.

1.2. Objetivos específicos

1. Determinar la influencia de variables de decisión, para la elección del modo en un corredor de mediana capacidad en países en vía de desarrollo.
2. Proponer una metodología multicriterio a nivel ex ante, para valorar los pesos de las variables de decisión del mejor modo en un corredor de mediana capacidad en países en vía de desarrollo.

2. Antecedentes

La planificación de un sistema de transporte debe responder a objetivos y necesidades de la comunidad, puesto que, el derecho a la movilización debe ser un servicio básico que toda persona debe alcanzar; la necesidad de movilizar masas no es un problema reciente viene desde siglos atrás, hacia el siglo XVII en la ciudad de Paris – Francia vivía el matemático francés Blaise Pascal (1623-1662), el cual, identificó que en la ciudad habitaban aproximadamente medio millón de habitantes, pero la mayoría de estas personas no contaban con un medio de transporte propio, Pascal formulo un sistema pionero de transporte urbano de pasajeros con carruajes, itinerarios fijos, tarifas planas y horarios regulares, el intelectual sugirió al duque de Roaunez que solicitara al rey Luis XIV un permiso para poder explotar el servicio de transporte de pasajeros, el cual fue aprobado. Hubo 3 líneas de transporte: la primera línea, servía entre la puerta de Saint-Antoine y la puerta de Luxemburgo, la segunda línea, iba desde la calle Saint-Antoine hasta la calle Saint Honoré y la última línea conectaba el barrio Montmartre con Luxemburgo; el pasaje costaba cinco "sols" moneda que circulaba en ese entonces (Marcus, 2018, p. 2).

Es por lo anterior, que (Galhardi, 2017 citado por Marcus, 2018) dice: *"Pascal fue un gran pensador que podía ver, incluso en esa época, que para el progreso de una ciudad era necesario resolver el problema de la movilidad urbana"* (p. 3); según Galhardi (2017), presidente de la directiva de la Asociación Nacional de Empresas de Transporte Urbano (NTU) de Brasil, tras el cierre del proyecto de Pascal, el transporte público de pasajeros sobre ruedas renacería lejos de Europa, específicamente en Brasil (América del Sur), creando el segundo proyecto de transporte colectivo en el mundo llamado Besamanos.

(Marcus, 2018) describe que *la llegada de la Familia Real a Brasil en 1808, instituyó la ceremonia del Besamanos, en la que, las personas iban a la corte para complacer al rey de Portugal, pero el problema eran las distancias a recorrer para llegar a la ceremonia en el palacio donde también iban a pedir algunos favores, perdones o incluso beneficios reales, para resolver esto el 18 de agosto de 1817 el rey João VI firmó un decreto que autorizaba a uno de los empleados de la corte Sebastián Surigué, a explotar un servicio de carruajes, el cual, se estableció entre el palacio imperial en el centro de Río de Janeiro (hacienda Santa Cruz) a unos 50 kilómetros y una de las residencias oficiales de la familia real, para este trayecto los vehículos eran tirados por cuatro animales y los pasajes costaban ocho reales, una segunda línea de carruajes para facilitar el Besamanos conectaba el palacio imperial a la Quinta da Boa Vista (p. 4).*

En 1802 la humanidad seguía buscando nuevas formas y tecnologías para transportarse, es aquí, cuando el ingeniero e inventor inglés Richard Trevithick diseñó y desarrolló la primera locomotora a vapor de la historia, la cual, podía arrastrar un convoy de 5 toneladas y recorrer 15 km de distancia a 20 km/h, su principal uso para esta época tuvo lugar en las minas, con el objetivo de transportar minerales pero no funcionó como se esperaba y fue rechazado el proyecto; se pensó también como medio de transporte de pasajeros pero ese modelo no funcionó para tal fin dada la poca velocidad desarrollada (Marino, 2018, p. 1).

Para 1825, George Stephenson ingeniero de origen británico lleva la utilización del ferrocarril a un nivel superior, ya que, desarrollo la primera línea de ferrocarriles a vapor (ver Figura 2-1) para el transporte de pasajeros, este tren logró llevar 450 personas a una velocidad de 15 millas por hora (25 km/h); hacia el año 1830 se da inicio a la era del ferrocarril, ya que, se comenzó a utilizar esta máquina como medio de transporte de objetos y pasajeros en distancias más largas, para este mismo año se conecta la ciudad de Liverpool y Manchester con la primera línea de tren de pasajeros (Marino, 2018, p. 1).

Figura 2-1: Representación mediante pintura del viaje inaugural con ferrocarril de Liverpool hasta Mánchester (Inglaterra)



Fuente: Página Web “HISTORIANDO”, Historia del Ferrocarril, recuperado el 25 de agosto de 2020 de <https://www.historiando.org/ferrocarril/>

Sin embargo, con el paso del siglo XVIII estos ferrocarriles de superficie ya no eran adecuados para el entorno urbano y por lo tanto, se establecen nuevos espacios para la circulación de este medio de transporte; inicialmente fueron los túneles excavados a principios del siglo XIX utilizados principalmente para el transporte de mercancías industriales (carbón, hierro y otros materiales); posteriormente el desarrollo y la expansión de las urbes originó la visión sobre la utilización de estas infraestructuras como un espacio exclusivo para el transporte ferroviario. El 10 de enero de 1863 en Londres surge el primer túnel de línea férrea de pasajeros, este día 40.000 pasajeros utilizaron el novedoso medio de transporte, el cual, contaba con un intervalo de trenes cada 10 minutos (AFERIOJA, 2018, p.1)

(AFERIOJA, 2018) *El ferrocarril se convirtió en la primera parte del famoso sistema de transporte público “London Underground”, pronto seguido por el Metropolitan District Railway y otras ampliaciones que se han dado, la desventaja de estos primeros sistemas subterráneos fue la falta de ventilación, y aunque se construyeron con conductos de ventilación, el humo y el vapor de las locomotoras eran un problema para la salud de los pasajeros y los operadores de trenes, pero, la popularidad de estas líneas de metro las hizo rentables (p.1).*

Continuando con lo anterior, estos problemas desaparecieron en 1890 con la implementación de la tracción eléctrica en el ferrocarril City & South London, liberando el transporte subterráneo de humo y convirtiéndose en el mejor ejemplo de cómo se puede moderar el transporte subterráneo; en los próximos 15 años aparecerán metros subterráneos similares en las principales ciudades del mundo como: París, Berlín, Nueva York, Glasgow, Budapest y Liverpool (que recibió en 1893 el primer metro elevado) (AFERIOJA, 2018, p.1).

La configuración de la urbe urbana y la disposición del espacio son aspectos claves en la tipología de un modo, tanto el metro como el tranvía son sistemas férreos, pero con características diferentes, los tranvías tienen su inicio a mediados del siglo XVIII; los ripperts o hipomóviles (vehículos parecidos al tranvía, con tracción animal y más maniobrables) (ver Figura 2-2)) y el ómnibus (vehículos tirados por caballos de gran capacidad de pasajeros y precursor de los modernos autobuses) fueron antecesores de los sistemas de transporte urbano, pero estuvieron en servicio poco tiempo; el rippert de sangre apareció en Gales en 1807 y el ómnibus de sangre apareció en Francia en 1825; mientras que los tranvías de sangre tenían más versatilidad para implementarse en calles estrechas los de tracción mecánica eran más rápidos, este medio de locomoción supuso una variación y rápidamente comenzó a implantarse (Viana, 2015, p. 5)

Figura 2-2: La Catalana de Ripperts.



Fuente: Barcelona Rutas recuperado el 16 de agosto de 2020 de <http://www.barcelonarutas.com/la-catalana-de-ripperts/>

Los tranvías se instalaban en ciudades de más de 40.000 habitantes, por lo que la viabilidad del tranvía era poco probable, la expansión de las ciudades se realizó generalmente desde el centro hacia las periferias, aunque los asentamientos periféricos más próximos también adoptaron este innovador medio de locomoción, los tranvías eléctricos, por lo general, continuaron con los trayectos de los tranvías de tracción mecánica o animal, sin embargo, no siempre se siguieron pautas de trazado lógicas. (Viana, 2015, p. 5).

Con el paso del tiempo el tranvía fue evolucionando e implementando líneas eléctricas (ver Figura 2-3), los lugares donde se ubicaban las estaciones eran puntos de afluencia pública tales como mercados o teatros, en las áreas suburbanas se escogieron los lugares de mayor densidad poblacional para ubicar las estaciones. El tranvía incentivó la transformación de las ciudades, se habilitaron nuevas manzanas para facilitar el cambio de sentido de los tranvías y modificó el valor del suelo y de los inmuebles al alza sí se mejoraba la accesibilidad y a la baja sí los riesgos de siniestros viales, el ruido y la congestión eran elevados, lo cual, sucedía en las calles más estrechas; el tranvía y el desarrollo urbano iban a la par, de hecho, el tranvía se adecuaba a la expansión urbana y en otros casos era lo contrario (Viana, 2015, p. 6).

Figura 2-3: Tranvía urbano en Nueva York (EE.UU.), finales siglo XIX.



Fuente: ¿Cuál es el origen de los tranvías?, recuperado el 16 de agosto de 2020 de <https://blogs.20minutos.es/yaestaellistoquetodolosabe/cual-es-el-origen-de-los-tranvias/>

Las ciudades se expandían y el tranvía con ella, el número de pasajeros ascendía y las vías férreas en crecimiento suponían un obstáculo para otros medios de transporte, por esto se procuró limitar el trazado del tranvía sobre avenidas más amplias, en este contexto, el tranvía se convirtió en uno de los principales modos de transporte urbana y comenzó a competir y complementarse con el resto de los modos del territorio, a su vez, se convertía en la elección preferida por varias ciudades, pero tuvo un inconveniente: el trazado era fijo lo cual constituía una fuente de siniestros viales porque el tranvía no podía maniobrar, debido a esto surgió un híbrido entre el tranvía y el autobús: el trolebús, el cual podía esquivar obstáculos por no estar fijo a un carril, pero un trolebús averiado era un obstáculo de ocupación de espacio en la calle y al estar el cable de alimentación ocupado por éste, otros trolebuses no podían pasar y adelantarlo (CurioSfera, 2016, p. 1).

Debido a los frecuentes siniestros con personas y automóviles, junto al auge del metro pesado poco a poco el tranvía cayó en desuso en prácticamente todas las ciudades del mundo. A partir de 1940 se comenzó a reducir considerablemente el número de nuevas líneas de tranvía y muchas de las existentes fueron remplazadas poco a poco por el metropolitano, que no interfería ni complicaba el tráfico en las calles (CurioSfera, 2016, p. 1) y en lo suburbano por el bus.

Aun así, no todo estaría acabado para el tranvía su resurgimiento se daría a partir de 1990, dado por el auge sobre la concientización del respeto del medioambiente y como solución a la alta contaminación de las ciudades producto de vehículos equipados con motor carburado; es por esto que el tranvía regresa de forma diferente, siendo un medio de transporte urbano eléctrico que no contamina el aire de las urbes, además, los semáforos dan absoluta prioridad al tranvía y así evitar siniestros viales con otros modos (CurioSfera, 2016, p. 1), a lo que actualmente se le denominaría el “tranvía moderno”.

Posteriormente, apareció en el último cuarto del siglo XX un nuevo sistema de transporte, en el cual, los rieles se instalan en un carril por el que solo pueden circular ellos, es decir un carril segregado, por lo que el número de siniestros viales se redujo en mayor proporción (CurioSfera, 2016, p. 1), a este nuevo sistema se le denominó tren ligero (ver Figura 2-4); este modo ha sido descrito como la resurrección del tranvía en las ciudades occidentales, cuando en realidad, es una categoría entre un tranvía y un metro convencional.

Figura 2-4: Tren Ligero de Guadalajara (México).

Fuente: elEconomistaAmerica.com, recuperado el 15 de marzo de 2021 de <https://images.app.goo.gl/adrT864ikqB8WoBX8>

Continuando con lo anterior, el tren ligero se instaló en algunas ciudades que ya habían albergado al tranvía tradicional (ver Figura 2-5); en ciudades cuyo medio fundamental de transporte era el autobús se acordó establecer el tranvía en los recorridos de mayor afluencia de pasajeros y en las que disponían de una red infrautilizada de metro o de ferrocarril, además, se optó por implementar el metro ligero en áreas con densidad poblacional baja que no habrían permitido el establecimiento de una línea de metro convencional; otras ciudades como Barcelona implantaron un tranvía en rutas por donde antes circulaban buses articulados; por ello, optar por la implantación del metro ligero y/o tranvía fue una solución eficaz y rentable (Viana, 2015, p. 7).

Figura 2-5: Tranvía moderno de TRAMBAIX, Barcelona (España).

Fuente: PROYECTOS DE TRANSPORTE EN TODO EL MUNDO, recuperado el 16 de agosto de 2020 de <https://www.acciona-construccion.com/es/proyectos/ferrocarriles-y-tuneles/tren-ligero-de-trambaix/>

Es por lo anterior que, el metro ligero o el tranvía mejoraban la accesibilidad de una urbe sobre todo en las áreas más céntricas, también disminuían los contaminantes expulsados al medio ambiente e impulsaban el desarrollo y renovación de nuevas áreas urbanas, llegando hacer viable incluso en densidades poblacionales de 1.250 habitantes por km²; estos están presentes en ciudades de población dispares que van desde algunos miles de habitantes hasta varios millones porque lo importante es el corredor a servir; el tren ligero reduce los siniestros viales derivados del desplazamiento, es accesible a todo el mundo (en especial para personas con movilidad reducida como los ancianos o los discapacitados) y posee una gran capacidad de transporte (2.000 a 20.000 pasajeros/hora/sentido) con un costo en tiempo de desplazamiento reducido (Dirección General de Actuaciones Concertadas en las Ciudades, 1994 citado por Viana, 2015, p. 8).

A comienzos del siglo XX, el bus urbano toma gran fuerza tras la caída repentina del tranvía, debido a sus características de versatilidad en calles estrechas, maniobrabilidad en las rutas, capacidad de superar pendientes mayores a las de los sistemas ferroviarios y sus menores costos de implementación respecto a los sistemas sobre rieles (3% para metros y 6% para tranvías), pero trae consigo un problema, el cual, es su alto grado de contaminación debido a la necesidad de utilizar flotas grandes para abastecer la demanda de las ciudades y sus motores de combustión. El concepto de carril bus o carriles destinados solo para autobuses de transporte público se aplicó por primera vez en Chicago (Illinois, E.E.U.U.) en 1939, otro caso fue en 1971 cuando se destinó un solo carril para buses de transporte regional sobre la autovía Henry G. Shirley Memorial entre Washington y Woodbridge (Virginia, E.E.U.U.) (Grava, 2003, p. 470), el objetivo de estas medidas era poder aislar el transporte público de la congestión.

El concepto de BRT (*Bus Rapid Transit* - Bus Rápido) se desarrolló en los años 70 en Sudamérica en la ciudad de Curitiba (Brasil) el cual fue inspirado del sistema de carriles exclusivos para buses de transporte público de la ciudad Lima (Perú); en Curitiba, se mejoró la propuesta hecha en Lima (ver Figura 2-6) al considerar rutas completas de buses con carriles exclusivos, estaciones con pago, validación fuera de los buses y por tener estaciones con andén; posteriormente en Essen (Alemania) y Adelaida (Australia) se crearon sistemas de autobuses guiados, estos sistemas lograron velocidades promedio más altas, sin embargo, la capacidad de pasajeros de estos sistemas era limitada cuando no había estaciones y el pago era realizado dentro del vehículo generando como resultado que siguieran considerándose como de baja capacidad (Deng y Nelson, 2011, p. 73).

Figura 2-6: Sistema de Bus rápido - 1980, Curitiba (Brasil).



Fuente: BUS ON THE ROAD, recuperado el 16 de agosto de 2020 de <https://www.busontheroad.net/2014/05/expreso-de-curitiba.html>

Avanzando en el tema, el aporte que hizo el sistema masivo de transporte urbano de buses (BRT) al sistema de buses con derecho de vía segregada fue el acceso al sistema de buses de gran capacidad a través de estaciones con plataforma y realizar el pago de la tarifa en taquillas ubicadas antes de entrar a la estación, con estas mejoras en un bus podía abordar y descender hasta 200 personas en una parada en pocos segundos de forma ágil (al estilo tranviario de pasajeros), (Deng y Nelson, 2011) *proceso que no se podía lograr en un sistema tradicional de buses (con paradas frecuentes, pago y validación en el bus y pocas puertas), esto llevo a que: La frecuencia de los buses fuera alta, reduciendo los tiempos de espera y generando capacidades de más de 10.000 pasajeros por hora en un sentido (p. 85).*

Para el año 2.000 en Bogotá D.C. (Colombia) (ver Figura 2-7), se implementa el sistema de transporte masivo Transmilenio agregando un componente que permitió multiplicar la capacidad de los sistemas BRT a niveles similares a los de un sistema masivo de transporte sobre rieles tipo metro pesado, el cual fue la inclusión de carriles de sobrepaso en las estaciones, lo que facilitó rutas expresas (que no se detienen en todas las estaciones) y permitió alcanzar capacidades de más de 40.000 pasajeros por hora en un sentido (Deng y Nelson, 2011, p. 85)

Figura 2-7: TransMilenio Bogotá D.C. (Colombia).

Fuente: Revista Web EL TIEMPO recuperado el 15 de marzo de 2021 de <https://images.app.goo.gl/AjX32noFq3VSK7k38>

Si bien, la configuración de estos sistemas de transporte responden a la necesidad del transporte de personas implementando tecnologías de tracción a base de combustibles fósiles, los impactos negativos producidos (gases de efecto invernadero) se suman a las problemáticas de cambio climático que se presentan en el siglo XXI, por ende, los gobiernos locales y nacionales están adoptando la movilidad eléctrica principalmente para afrontar estos problemas (ver Figura 2-8), mediante el fortalecimiento de la seguridad energética, la reducción de las importaciones de combustibles fósiles, la mejora de competitividad de las flotas de vehículos, sin embargo, el costo total de propiedad de un bus eléctrico se está reduciendo (a 2020 estaba por encima de los 500 mil dólares) y en algunos casos los buses eléctricos pueden tener costos más bajos en su ciclo de vida, los elevados costos iniciales siguen siendo un obstáculo para cambiar de tecnologías de combustión a tecnologías eléctricas (Mojica y Lefevre, 2018, p. 1).

Continuando con lo anterior, el sector del transporte en América Latina y el Caribe es el de más rápido crecimiento en la elección de alternativas con energía eléctrica, los formuladores de políticas públicas quieren acelerar la electrificación pues la región tiene una creciente tasa de motorización de automóviles y motocicletas, implicando esto un escenario de mayores emisiones, uso de combustible y peor calidad del aire, también conlleva una mayor congestión vial que debilita la productividad y el crecimiento económico de un territorio (Mojica y Lefevre, 2018, p. 1), por lo que gobiernos están impulsando buses de transporte público eléctricos; por esta tendencia hacia la implementación de energías

más limpias en el transporte público de pasajeros, en esta investigación sólo se contemplan alternativas con tracción eléctrica.

Figura 2-8: Buses Eléctricos, Medellín (Colombia).



Fuente: Revista Web Moviliblog, recuperado el 16 de agosto de 2020 de <https://blogs.iadb.org/transporte/es/los-autobuses-electricos-pueden-transformar-el-transporte-publico-de-america-latina/>

A partir de los antecedentes, en una línea de tiempo se evidenció las consideraciones que se tuvieron en cuenta para establecer un sistema de transporte; en el Siglo XIX las consideraciones claves para establecer un sistema de transporte fueron los tipos de tecnologías (eléctricas y carburadas) y la limitación del espacio urbano debido a la expansión de las ciudades. Desde el siglo XX en adelante se tiene en cuenta consideraciones sobre: las externalidades que produce un sistema de transporte como contaminación y congestión, y aspectos operacionales del sistema como la capacidad producto de la demanda y el costo de implementación de un modo; se evidencia que la población y la morfología urbana son variables que se desarrollan de manera directa o indirecta en la implantación de un determinado sistema de transporte.

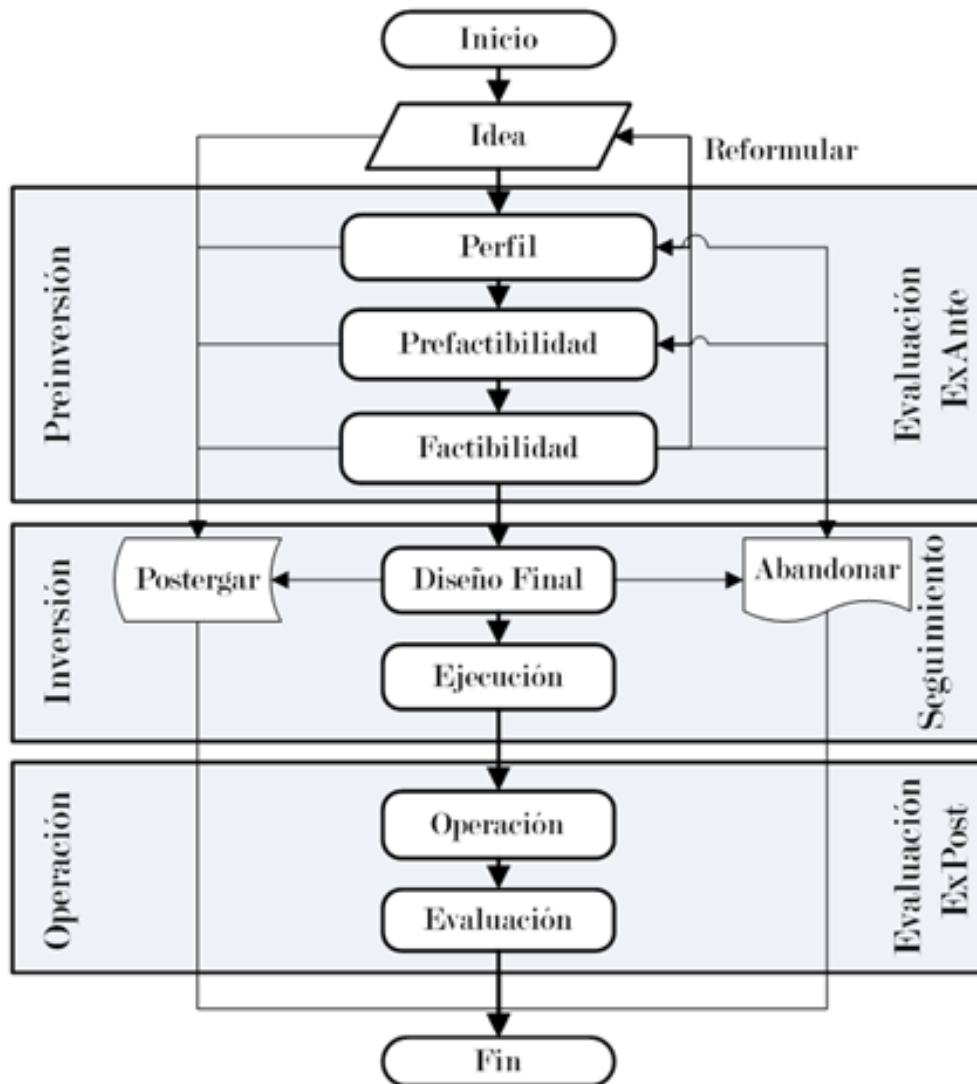
Las consideraciones establecidas en el acápite anterior, son la base para determinar las variables desarrolladas en el marco teórico.

3.Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos que serán importantes a la hora de plantear una metodología para elegir una tecnología en un corredor de mediana capacidad. Esos conceptos inician con el ciclo de vida del proyecto, seguido de la definición de países en vía de desarrollo que es donde se va a aplicar la metodología, posteriormente se definen las características de un tren urbano de pasajero, el BRT y los sistemas de transporte de mediana capacidad, después se tratan la importancia del espacio urbano y los usos del suelo para el transporte y la densidad de la demanda, seguidamente se pasa a analizar la relación entre viajes, forma urbana y usos de suelo, para terminar con conceptos de evaluación multicriterio.

3.1. Ciclo de vida del proyecto

Para facilitar la gestión y control de proyectos de inversión estos se dividen en secuencias de trabajo, dado el grado de incertidumbre en tiempos y costos de eventos no contralados, el conjunto de estas secuencias de trabajo desde que se inicia hasta que concluye se denomina “Ciclo de Vida del Proyecto” (ver Figura 3-1) el cual proporciona el marco de referencia básico para gestionar y dirigir un proyecto (Apaza, 2013, p. 31).

Figura 3-1: Ciclo de Vida de un Proyecto.

Fuente: Ciclo de vida de un proyecto, recuperado el 18 de noviembre de 2020 de <https://www.rubenapaza.com/2013/07/ciclo-vida-proyecto.html#:~:text=En el proceso%2C desde la,%2C económica%2C social%2C financiera%2C>

Según Apaza (2013, p. 32), el ciclo de los proyectos depende de la calidad y confiabilidad de la información para elegir una buena decisión de inversión, asignación de recursos, preparación y evaluación; el ciclo de los proyectos se divide en las siguientes etapas: idea, perfil, prefactibilidad, factibilidad, diseño, ejecución, operación y evaluación ex post, agrupados en fases en las cuales se evalúa el desempeño del proyecto y la viabilidad técnica, económica, social, financiera, institucional y ambiental.

Apaza (2013) indica:

Idea

Generalmente el ciclo inicia con la generación de una idea, la cual, surge de una oportunidad o necesidad no planificada, es decir, no requiere consumo de recurso, sin embargo, actualmente los planificadores tienden a crear la idea desde un departamento o dirección de innovación y desarrollo en los cuales requieren una reinversión (p. 32)

La idea es un elemento de entrada de datos primarios del proyecto, puede iniciarse por las siguientes razones:

- *Existen necesidades insatisfechas actuales o futuras.*
- *Existen potencialidades o recursos no aprovechados que pueden optimizarse y mejorar.*
- *Es necesario complementar o reforzar otras actividades o proyectos.*

Preinversión

En esta fase se realiza una evaluación ex ante, según la información valedera, recursos disponibles, necesidad, importancia, trascendencia, monto de inversión o experiencia del proyectista, esta fase puede comprender los siguientes niveles: Perfil, Prefactibilidad y Factibilidad (p. 32).

Perfil

Es un proceso de identificación de la idea en la que se dimensiona el proyecto, se realiza el primer estudio donde se estima la viabilidad antes de seguir con la siguiente fase o nivel, este estudio se elabora utilizando información secundaria (generada para otros fines) o generales, es decir sin realizar gastos en investigaciones de mercado, de campo y de laboratorio (p. 33).

Prefactibilidad

Es un proceso de estudio detallado llamado también anteproyecto preliminar, esta fase permite conocer la viabilidad comercial, técnica, legal, administrativa y económica financiera; se realiza un análisis detallado de las alternativas generadas en la fase de perfil, permitiendo tomar decisión de elaborar el estudio de factibilidad lo cual implica mayores costos por los requisitos de mayor profundidad (p. 33).

Para preparar este estudio de prefactibilidad se requiere información secundaria y primaria (especifico de estudio de mercado, de campo o de laboratorio) su contenido se centra en estudios relativamente profundos en lo referente a mercado, tamaño, localización, técnico, administración, precios, ingresos, costos de inversiones, operación y financiamiento, lo anterior, para descartar las alternativas no factibles o seleccionar alternativas factibles y decidir pasar a la siguiente etapa, reformular, postergar o abandonar (p. 33).

Factibilidad

Es el proceso de estudio de perfeccionamiento y precisión de la mejor alternativa identificada en las fases precedentes llamado también anteproyecto definitivo, se realiza un análisis detallado y profundo en función de información primaria de propósito específico con estudios concretos de mercado, tamaño, localización, técnico, ingeniería, legal, ambiental, administración, gestión, precios, ingresos, costos de inversiones, operación y financiamiento, el objetivo principal de esta fase es aumentar la certidumbre, recabando información suficiente y necesaria para tomar la mejor decisión de inversión (p. 33).

Inversión

Se programan los recursos y se asigna un presupuesto para el proyecto, se procede a desembolsar los gastos necesarios requeridos por el proyecto para la adquisición de equipos, materiales, contratación del talento humano, entre otros, con el propósito de asegurar el éxito (p. 34).

Diseño Final

Es la etapa de elaboración del diseño definitivo de acciones y actividades que garanticen la ejecución y operación del proyecto, se preparan los documentos técnicos correspondientes para la construcción, montaje y puesta en marcha, correspondiente al diseño de arquitectura, ingeniería o especialidades requeridas y presupuesto detallado de las obras, en algunos casos será necesario realizar una revisión al estudio de factibilidad y hacer reajustes y recálculos (p. 34).

Ejecución

Es la etapa de montaje o ejecución propiamente dicha, consiste en la construcción y equipamiento de las instalaciones físicas, capacitación del personal, implementación de los instrumentos legales y administrativos necesarios para el funcionamiento de la empresa, según el cronograma de diseño final con tiempos y gastos establecidos en los diagramas de actividades y redes de la fase precedente (p. 34).

Operación

Operación

Es donde se registra la información necesaria para evaluar el cumplimiento de los objetivos, fines y metas especificadas y en el corto plazo permite realizar ajustes en los factores de producción y en el largo plazo obtener los resultados previstos (p. 35).

Evaluación

Este proceso se refiere a la evaluación ex post, es decir, después de ejecución y funcionamiento se hace necesaria para medir y verificar el cumplimiento de objetivos, metas, impacto, dificultades y éxitos alcanzados con el proyecto, esta evaluación permite analizar la eficiencia en el uso de los recursos, la eficacia del cumplimiento de metas, objetivos y la efectividad en la satisfacción de las expectativas, además de permitir la retroalimentación; dependiendo de la evaluación positiva o negativa el horizonte del proyecto y ciclo del producto, está presente alternativamente la fase de liquidación del proyecto, esta es una etapa al final del periodo en la que se decide rematar o disolver el proyecto para recuperar todo el valor o parte de la inversión (valor de salvamento) realizada en el proyecto (p. 35).

3.2. Países en vía de desarrollo

Para Díez (2021) los países en desarrollo también llamados países de desarrollo intermedio o países en vía de desarrollo son aquellos cuyas economías se encuentran en pleno desarrollo, partiendo de un estado de subdesarrollo o de una economía de transición, desde el punto de vista de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), las naciones en vía de desarrollo comparten algunas características como: una economía en fase de transición, un desarrollo tecnológico desigual, un elevado déficit público y un alto índice de desempleo (p. 19).

De acuerdo con el Banco Mundial, se considera como países en vía de desarrollo todos aquellos que tengan un ingreso medio-bajo o medio-alto (lower middle income – upper middle income) (PIBM) o país menos desarrollado económicamente (LEDC), también se caracteriza por una base industrial menos desarrollada y un índice de desarrollo humano (IDH) bajo, así mismo, esta institución afirma que la cantidad de países en vía de desarrollo ha aumentado en los últimos años debido a que los países subdesarrollados (low income) han disminuido y han entrado en un periodo de transición y crecimiento económico (p. 19).

Por otra parte, para (Santos, 2000)

El sistema de transporte de un país refleja el grado de desarrollo de su economía, en las economías subdesarrolladas el transporte se caracteriza por el empleo al máximo de equipo anticuado u obsoleto de la mayoría de empresas que se dedican a esta actividad en sus diversas modalidades, al lado de unas pocas que utilizan máquinas modernas de última generación (p. 1)

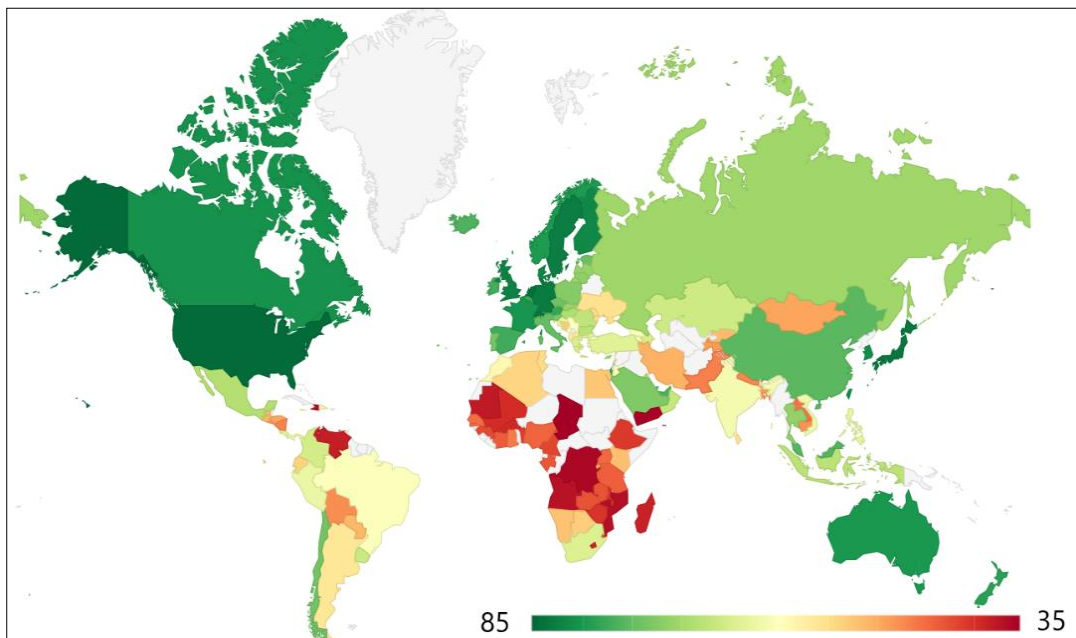
En las economías en desarrollo y en transición, la demanda de un sistema de transporte se ve impulsado por la población y el crecimiento económico (NEXOBUS, 2018, p. 1), mientras que en países desarrollados la implementación del transporte se da por la reducción del tiempo de viaje debido a los altos ingresos de los usuarios, es decir, el alto valor que le dan al tiempo.

De la misma forma Díez (2021, p. 22) considera que la clasificación solamente basada en el ingreso no representa verdaderamente el crecimiento o desarrollo del país en su totalidad, por ello enuncia que existen otros índices que involucran diferentes variables a evaluar para establecer el nivel de desarrollo de una región, como puede ser el índice de Competitividad Global (ICG) y el índice de Desarrollo Humano (IDH).

Para el Foro de Competitividad Mundial, el índice de competitividad global (ICG) mide la capacidad que posee una nación para lograr un crecimiento económico sostenido en el largo plazo en relación con los recursos materiales e inmateriales que dispone (Gobierno de Colombia, 2019 citado por Díez, 2021, p. 22).

En la Figura 3-3, se evidencia el ICG a nivel global por tonalidad, en cual los tonos verdes claros y amarillos indican países en vía de desarrollo.

Figura 3-3: ICG Global 2019.



Fuente: Datos Macro / Diario Expansión, recuperado el 27 de febrero de 2022 de: <https://datosmacro.expansion.com/estado/indice-competitividad-global>.

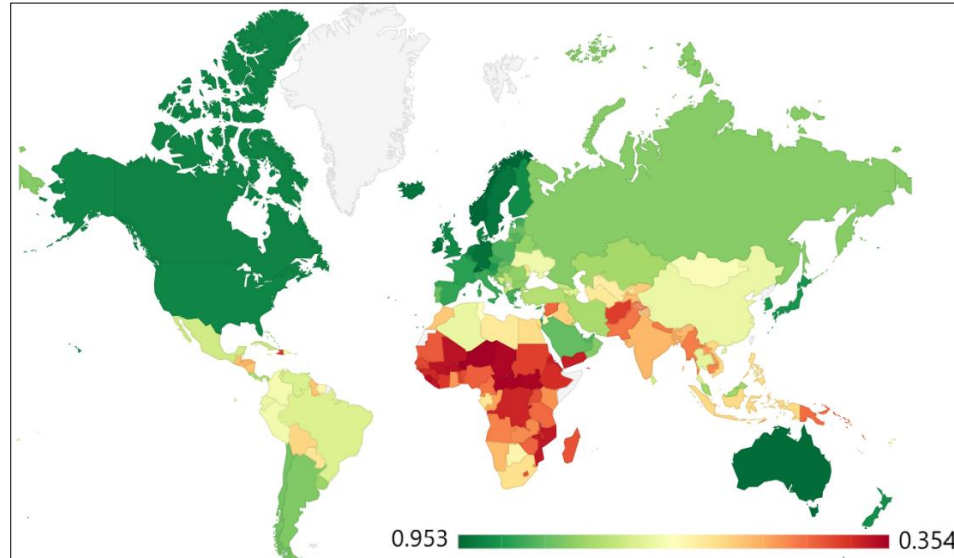
Continuando con lo anterior, el otro indicador para medir el grado de desarrollo de un país es el Índice de Desarrollo Humano (IDH) elaborado por la ONU el cual analiza características como: salud, educación e ingresos de los países (Diario Expansión, 2017, p. 1); a continuación, se describe que identifica cada característica.

Salud: Se contrasta con la esperanza de vida al nacer, el IDH mide esta característica utilizando un valor mínimo de 20 años y un valor máximo de 83,57 años, de forma que, el componente de longevidad para un país, ejemplo, cuya esperanza de vida al nacer sea de 55 años vendrá a ser el IDH de 0,551 (Díez, 2021, p. 23).

Educación: Se mide a través de los años de escolarización para personas adultas y los previstos para niñas y niños en edad escolar (Díez, 2021, p. 23).

El componente ingresos, se mide a través del Ingreso Nacional Bruto (INB) per cápita, en lugar del Producto Interno Bruto (PIB) per cápita como se hacía anteriormente, los límites mínimos y máximos son 100\$ (INB per cápita) y 87.478\$ (INB per cápita). Se entiende como **INB** al ingreso nacional, el cual, se calcula como la suma de los ingresos de los factores productivos, esto incluye los salarios de los trabajadores, ganancias de empresas, intereses a prestamistas de capital y rentas (Roldán, 2019, p. 1) y el **PIB:** según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico – OCDE (2021, p. 1) como la medida agregada de producción igual a la suma de los valores brutos agregados de todas las unidades residentes e institucionales dedicadas a la producción y los servicios (más impuestos y menos subsidios, sobre productos no incluidos en el valor de sus productos).

En la Figura 3-4, se aprecia el IDH a nivel mundial, los tonos verdes claros y amarillos indican países en vía de desarrollo.

Figura 3-4: IDH Global, 2017.

Fuente: Datos Macro / Diario Expansión, recuperado el 27 de febrero de 2022 de: <https://datosmacro.expansion.com/idh>

3.3. El Tren urbano de pasajeros

Este modo de transporte se clasifica en tres categorías a partir de las 5 tipologías propuestas por Vuchic (2007, p. 45), para esta investigación se tiene en cuenta el grado de independencia del sistema de transporte público con los demás actores de movilidad, su capacidad y su velocidad de operación.

- **Metro:** circula por vías exclusivas sin ningún tipo de interferencia del resto de actores del transporte, cuenta con una capacidad entre 20.000 a 50.000 personas/hora/sentido y una velocidad de operación de 20 a 40 Km/h.
- **Tren Ligero:** circula por carriles segregados sin ningún tipo de interferencia del resto de actores del transporte, el paso por intersecciones es a desnivel, cuenta con una capacidad entre 10.000 a 20.000 personas/hora/sentido y una velocidad de operación de 20 a 30 Km/h.
- **Tranvía:** Circula por carriles segregados, pero interactúa con los demás actores de la vía en intersecciones controladas con semáforos, no se puede identificar como una circulación de tráfico mixto ya que su única interacción con los vehículos es en intersecciones, cuenta con una capacidad entre 10.000 a 20.000 personas/hora/sentido y una velocidad de operación de 15 a 25 Km/h.

Para el caso que compete esta investigación se abordó los sistemas de mediana capacidad tipo LRT (*Light Rail Transit* o Tren ligero) y el Tranvía (TRAM), estos mejoran la accesibilidad y por lo general aumentan el valor de la tierra y la propiedad.

Los beneficios específicos del tren ligero y tranvía incluyen según CfIT (2005); Grengs, (2004); Hass-Klau et al. (2003); Knowles (1992); Knowles (1996); Knowles y Abrantes, (2008); Oficina Nacional de Auditoría (2004) & PTEG (2005), citados por Knowles y Ferbrache (2016, p. 431):

- Ligero y capaz de operar en pendientes más pronunciadas y curvas más cerradas que los trenes ferroviarios pesados
- Costos de capital más bajos en material rodante e infraestructura que los nuevos metros subterráneos y ferrocarriles suburbanos
- Capacidad de transportar hasta tres veces más pasajeros que los autobuses, operar a velocidades más altas y tener una vida útil mucho más larga
- Capacidad comprobada, más que los autobuses, para asegurar un cambio modal significativo desde los automóviles, y en ocasiones capaz de reducir los volúmenes de tráfico y la congestión
- Servicios más rápidos y confiables que los autobuses hacia y a través del corazón de los centros de las ciudades.

Sin embargo, el tren ligero y tranvía son más costosos para las ciudades comparado con la inversión en sistemas de autobuses, esto ha influido en la geografía del tren ligero y tranvía enfocado principalmente (aunque no exclusivamente) en las ciudades de los países más desarrollados y en términos de rutas específicas dentro de las ciudades (Grengs, 2004 citado por Knowles y Ferbrache, 2016, p. 431). En dichos lugares, el tren ligero y el tranvía a menudo se considera un modo de transporte público más moderno y de alta calidad que las alternativas basadas en autobuses (Hensher y Mulley, 2015 citado por Knowles y Ferbrache, 2016, p. 431), mientras que su visibilidad, particularmente donde las vías son elevadas como en Docklands de Londres (Inglaterra) (ver Figura 3-5) han hecho que tren ligero sea un ícono visual que puede ayudar a estimular la inversión pública y privada, el cual, actúa como un catalizador para la renovación y regeneración de la forma urbana y crear un sentido de pertenencia del lugar (Knowles, 2000 & Knowles y Ferbrache, 2014 citados por Knowles y Ferbrache, 2016, p. 431).

Figura 3-5: Tren ligero de DOCKLANDS, Londres (Inglaterra).



Fuente: El transporte público de la ciudad moderna, recuperado el 27 de agosto de 2020 de https://es.123rf.com/photo_40905830_londres-dlr-tren-ligero-docklands-el-transporte-p%C3%BAblico-de-la-ciudad-moderna.html

3.4. El BRT (Bus Rapid Transit)

A continuación, se describen características del BRT descritas por (Cervero, 2013, p. 1 - 20) en el Informe preparado para la Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles, denominado BRT un sistema de transporte público eficiente y competitivo.

En este, se pueden encontrar docenas de definiciones de BRT, sin embargo, todas enmarcan al BRT como un sistema basado en buses que imitan las características de alta capacidad y rendimiento de los sistemas ferroviarios urbanos a un precio más bajo; en términos de calidad y costos de servicio se piensa a menudo que el BRT ocupa el término medio entre el ferrocarril urbano y los sistemas de autobuses tradicionales, en cierto modo, ofrece lo mejor de ambos mundos: la velocidad y confiabilidad del ferrocarril y la flexibilidad operativa y menor costo de un autobús convencional (Deng y Nelson, 2011 citado por Cervero, 2013, p. 1).

Se pueden establecer dos tipologías de BRTs uno de alto rendimiento y uno ligero, las características se pueden evidenciar en la Tabla 3-1. A modo general las dos tipologías se complementan para el caso latinoamericano el de alto rendimiento es implementado en los corredores de alta demanda y con carriles exclusivos, su tipología son buses biarticulados, el BRT *lite* o ligero son los que circulan por las rutas alimentadoras o algunos tramos de corredor con tránsito mixto y son tipo Bus Padrón o menores.

Tabla 3-1: Diferencias entre BRT High-End (Alto rendimiento) y BRT Lite (Ligero).

Parámetro	BRT Grande, Servicio Completo	BRT "Lite", Bus Padrón, servicio Moderado
Tipo de Corredor	Corredores de transporte exclusivos, líneas de buses dedicadas	Tráfico Mixto
Paradas de estacionamientos	Centros de concentración de usuarios, aislados del tráfico mixto.	Paraderos tradicionales, información en el refugio, asientos, iluminación e información para los pasajeros
Servicio	Servicio con frecuencia, servicios locales y expresos integrados, tiempos de frecuencia	Servicio tradicional
Tarifa	Cobro fuera del vehículo, tarjeta electrónica, ascenso de múltiples puertas.	Cobro en vehículo, tarjeta electrónica, servicio más tradicional.

Fuente: Cervero (2013). Bus Rapid Transit (BRT): An Efficient and Competitive Mode of Public Transport. p. 2.

De igual importancia, se resaltan características sobre las condiciones de diseños de la red y la velocidad de operación del sistema de transporte tipo BRT.

Diseños de red

Las redes BRT suelen seguir una forma urbana y reflejar las filosofías de servicio, en Latinoamérica las ciudades con BRT como Curitiba (Brasil) y Bogotá D.C. (Colombia) tienen distintas formas de ciudad radial y en consecuencia sistemas de BRT radiales, implicando que la mayoría de los viajes se distribuyan a lo largo de corredores de alta densidad. En contraste, las ciudades del país de China tienden a tener densidades urbanas elevadas y distribuidas de manera bastante uniforme como la ciudad de Guangzhou, la cual, cuenta con sistemas radiales o de lazo con puntos de transferencia, ya que, la propagación de una forma urbana plana exige sistemas multidireccionales más flexibles (Yang et al., 2012 citado por Cervero, 2013, p. 15). Idealmente, una red BRT imita la cobertura espacial y la conectividad de otras redes regionales de medios de transporte, en particular redes regionales de autovías y autopistas.

Velocidades de funcionamiento

Hidalgo y Graftieux (2008 citado por Cervero, 2013, p. 18) revisaron los sistemas BRT en 11 ciudades de América y Asia, descubriendo que las velocidades promedio aumentaron entre 15 y 26 Km/h después de la conversión de servicios regulares a BRT, esto dependiendo de la calidad de la vía de buses; el sistema más rápido, no solo tiene derechos de paso separados, sino también, separación de grados por ejemplo: guiados por carriles tales como: autobuses rápidos de la ciudad de Adelaida (Australia) - 80 Km/h y vías de autobuses de alto rendimiento (ciudades como Brisbane (Australia) - 58 Km/h, Miami (EE.UU) - 45 Km/h y Pittsburgh (EE.UU) - East Busway - 41 Km/h; es de aclarar que estas mayores velocidades son en tramos interurbanos, pues dentro de las ciudades es muy difícil superar los 25 km/h debido a los semáforos, como se comentará más adelante, Brisbane es la tercera ciudad en tamaño de Australia con 2,2 millones de habitantes y Adelaida es la quinta con 1,3 millones de habitantes en sus áreas metropolitanas, Pittsburgh y Miami tienen 2, 3 y 5,4 millones de habitantes en sus áreas metropolitanas. Los autobuses en el corredor noreste de la ciudad de Adelaida pueden alcanzar velocidades de hasta 100 km/h (Currie, 2006 citado por Cervero, 2013, p. 13) debido al rodillo guía adjunto al eje delantero de los autobuses que funciona como estabilizador horizontal para alcanzar velocidades altas.

Las condiciones de infraestructura como la ausencia de túneles, pasos elevados y otras formas de separación, así como las operaciones de tráfico reducen considerablemente la velocidad de los sistemas BRT; entre los BRT de superficie con cruces a nivel, la velocidad media de funcionamiento es de 20 km/h (Hensher y Golob, 2008 citado por Cervero, 2013, p. 21), en las ciudades centrales, las velocidades disminuyen aún más, incluso cuando se proporcionan carriles exclusivos. Una velocidad promedio típica del centro de la ciudad para los sistemas BRT de alto rendimiento es de 16 a 18 km/h.

3.5. Sistemas de transporte de mediana capacidad

Las comparaciones de manzana a manzana de BRT versus los sistemas ferroviarios urbanos son difíciles debido a sus diseños contrastantes, capacidades de carga, impactos en el desarrollo urbano y similares (Cervero, 2013, p. 24) (ver Tabla 3-2).

Sin embargo, el BRT es una alternativa rentable frente al tren urbano de pasajeros, el uso más económico de los derechos de paso y las operaciones de carreteras reduce el costo de BRT en relación con los sistemas ferroviarios, aunque a expensas de capacidad de pasajeros generalmente más bajas y velocidades más lentas; las comparaciones de capacidades de pasajeros se dificultan por amplias variaciones entre los sistemas BRT: hasta 45.000 pasajeros por hora por sentido en el caso de Bogotá D.C (Colombia), sin embargo, una décima parte de este monto para otros sistemas incluso menor rendimiento por hora pico (1000 pasajeros en Ciudad del Cabo (Sudáfrica), Ámsterdam (Holanda) y Changde (China)) estos son números teóricos, en la práctica las capacidad de carga de BRT son menores (Cervero, 2013, p. 24).

Hensher y Golob (2008 citado por Cervero, 2013, p. 24), encontraron que el número de pasajeros de muchos sistemas BRT varían desde 2.000 a 8.000 pasajeros por hora por sentido, por tanto, la capacidad y relativa rentabilidad de líneas BRT en relación con el tren urbano, podría ser exagerada (ver Tabla 3-2); cualquier ventaja de la rentabilidad del BRT puede ser restringida en la medida en que las redes ferroviarias a gran escala proporcionan una mayor conectividad y accesibilidad a velocidades de viaje mayores, además, de tener mayores impactos en la configuración de la ciudad que los sistemas BRT de rango más limitado.

La integración de la red es esencial para un sistema exitoso, los servicios de BRT o tren urbano de mediana capacidad se mejoran sustancialmente cuando están vinculados a los servicios existentes de tren, buses rápidos, autobús regular y minibús, tanto físicamente como a través de programación y tarifas (medios tarifarios), por ejemplo: el Metrobus de la Ciudad de México agregó 20.000 pasajeros diarios al eliminar la transferencia, siguiendo las conexiones de ruta directa de corredores BRT separados (Institute of Transportation & Development Policy – ITDP et al., 2013 citado por Cervero, 2013, p. 13), en Los Ángeles (EE.UU.) las conexiones ferroviarias intermodales con BRT así como las disposiciones para aparcar y viajar se asoció con ganancias en el número de pasajeros diarios (Cervero et al., 2010 citado por Cervero, 2013, p. 16), en Seúl con una tarifa única (la tarjeta) se utiliza para todos los modos de transporte público, el GPS y las tarjetas inteligentes permiten a los clientes una tarifa provisional al bajar del autobús y una tarifa final al completar el viaje en tren.

Tabla 3-2: Diferencias entre TRAM, LRT y BRT.

Parámetro	BRT	LRT / TRAM
Derecho de paso	Compartido / Líneas dedicadas y exclusivas	Exclusivo / Compartido
Corredor	Pavimento	Rieles
Propulsión del vehículo	Motor de combustión Interna/ Eléctrico - Baterías	Eléctrico - catenaria
Control del vehículo	Operador	Automatizado / semi - automatizado
Tiempo de construcción	1 – 2 años	2 – 3 años
Capacidad Máxima (Pasajeros/unidad de vehículo)	160 - 270	170 - 280
Capacidad Máxima (Pasajeros/unidad acoplada)	160 – 270	500 - 900
Capacidad del Corredor (pasajeros/dirección/hora)	5.000 – 45000	12.000 – 27.000
Costo promedio de capital (millones US / Km)	8,4	21,5
Costo promedio de operación (2000 US \$ ingresos de Vehículo por Km)	2,94	7,58
<p>Notas</p> <p>Las cifras de costos son para estudios de casos de EE. UU.: costo se calculó utilizando el promedio del índice de precios al consumidor del año 2013.</p>		

Fuente: Cervero (2013). Bus Rapid Transit (BRT): An Efficient and Competitive Mode of Public Transport. p. 2.

Hay ciudades donde este costo el costo promedio de capital por kilómetro se ha duplicado, por ejemplo el tranvía de Ayacucho en Medellín (Colombia) fue un proyecto integrado y construido con cable (Teleférico), este tuvo un costo 700 mil millones de pesos colombianos, restando el costo del proyecto de cable, se obtuvo un costo de 500 mil millones de pesos colombianos para el tranvía, dividiendo entre los 4 kilómetros que tiene el corredor da un costo de 12.5000 millones de pesos colombianos por kilómetro (del año 2016); en el año 2016 el dólar estaba a una tasa de 3.000 pesos colombianos, llevando el costo del tranvía a dólares, se tiene un costo de 42 millones de dólares por kilómetro; quizá las diferencias se dieron por las obras de urbanismo aledañas que se deben realizar (rectificación de quebradas, andenes, iluminación, etc.)

Los límites del BRT en relación con el tren urbano

Si bien el BRT generalmente gana sobre los sistemas ferroviarios urbanos en términos de inversión y costos de operación por pasajero transportado, debe tenerse en cuenta que no siempre coincide bien en términos de calidad del servicio por ejemplo: velocidades promedio y cobertura regional; el BRT sufre particularmente en áreas densas y urbanizadas donde los autobuses operan en calles de tráfico mixto, en algunos casos, los sistemas BRT han sido víctimas de su propio éxito sufriendo los efectos de ser demasiado populares en relación con sus capacidades, grandes vehículos totalmente cargados y en fila es una forma segura de ahuyentar en vez de atraer a los exigentes viajeros que poseen automóvil (Cervero, 2013, p. 29)

La incapacidad de los autobuses para cargar más pasajeros y por tanto dejar clientes varados en las estaciones durante los períodos pico ha provocado disturbios y difamación a la reputación de sistema de Transporte de TransMilenio en Bogotá D.C. (Colombia), hasta el año 2020, por el principal corredor pasaban buses cada 30 segundos, posteriormente, se cambió la flota de casi 1.500 buses por vehículos de mayor tamaño, aumentando la capacidad de Transmilenio en más de un 20%, pues se pasó de buses articulados de 160 pasajeros a buses de 200 pasajeros; Curitiba (Brasil) ha experimentado dificultades como: los límites de las tecnologías de neumáticos de caucho, autobuses operando en intervalos de 30 segundos en las rutas principales durante la hora pico, los problemas de agrupamiento generan servicios interrumpidos y ralentizados, además, las sucesiones de autobuses poco espaciados aumentaron los costos excluyendo las economías de escala para hacer transición hacia trenes, el hacinamiento extremo ha

llevado a muchos viajeros a comprar automóviles, en palabras de un urbanista: “Muchos curitibanos ven el BRT como ruidoso, abarrotado e inseguro” (Duarte y Ultramari, 2012, citado por Cervero, 2013, p. 29).

A partir de las experiencias de otros países, se diseñaron muchos sistemas BRT anteriores (en términos de espacio libre, plataformas de estación, geometrías de vía, etc) para permitir la conversión a servicios ferroviarios eléctricos siempre y cuando la demanda del mercado justificara el cambio, esto fue así para Ottawa (Canada) y Curitiba (Brasil), sin embargo, los impedimentos se han interpuesto en el camino de las conversiones de autobús a ferrocarril debido a que las organizaciones de autobús e instituciones se ponen en un mentalidad de status-quo negativa que obstruye las conversiones de tecnológicas (Cervero, 2013, p. 29).

3.6. Espacio Urbano en Transporte

3.6.1. Orografía de la ciudad

La morfología urbana de una ciudad es el aspecto más relacionado con otras categorías, tales como: lugar, suelo, edificación, vivienda, energía, movilidad y transporte (Braulio-Gonzalo et al., 2020, p. 2).

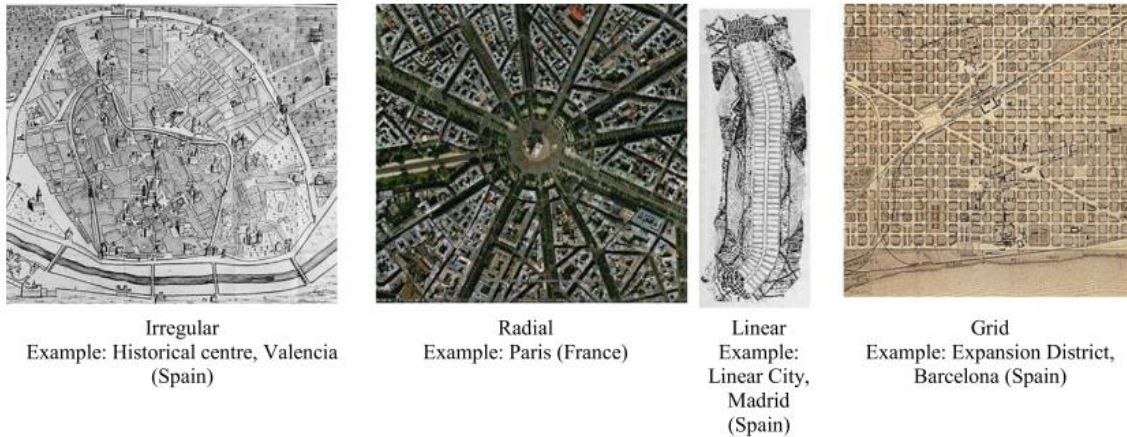
Basnak et al. (2020, p. 1-11) determinó un modelo matemático para ciudades de las américas en el cual clasifica un sistema de transporte a partir de un valor numérico denominado “Puntaje Urbano”. Este sistema tiene en cuenta factores económicos, urbanos, poblacionales, morfológicos - geográficos y del transporte, de estos factores el de morfología enuncia que la topografía de las ciudades también puede ser relevante (Taylor y Fink, 2003 citado por Basnak et al., 2020, p. 4); una topografía montañosa puede disminuir la velocidad promedio del transporte a nivel tanto privado como público, lo que puede favorecer la implementación de modos como los teleféricos, utilizados en ciudades como La Paz (Bolivia), Medellín (Colombia) y Río de Janeiro (Brasil). El modelo propuesto por Basnak tiene en cuenta las pendientes medias y medianas en las redes de las ciudades (más adelante se describe la ecuación con cada una de sus variables).

3.6.2. Escala de ciudad

El desarrollo urbano está muy influenciado por las condiciones físicas (clima, orografía, etc.) y las características socioeconómicas e históricas de cada área urbana, aunque, existen muchas clasificaciones de diseños urbanos (Marshall, 2005 citado por Braulio-Gonzalo et al., 2020, p. 5), normalmente se identifican solo cuatro en una ciudad compacta (ver Figura 3-6):

- Irregular: consiste en una red de arterias desorganizadas sin patrón específico.
- Radial: un tipo especial de estructura de árbol con una disposición familiar de "cubo y radios".
- Lineal: estructura espinal sin ramas.
- Cuadrícula: organiza las calles que se encuentran en ángulo recto entre sí para formar una cuadrícula ortogonal.

Figura 3-6: Ejemplos típicos de trazados urbanos.



Fuente: Braulio-Gonzalo et al. (2020). International Planning Studies. Exploring residential urban form patterns: a Spanish case study. Vol.25, No. 2, p. 166 – 168.

Basnak et al. (2020), en el modelo matemático desarrollado para clasificar un sistema de transporte y referenciado anteriormente, en el factor de geografía enuncia que la forma de las ciudades se puede estudiar bajo diferentes enfoques, uno de ellos es la métricas de forma espacial (Huang, Lu y Sellers, 2007 citado por Basnak et al., 2020, p. 4), a partir de indicadores simples y generalizados que están disponibles para cualquier área urbana, los cuales son:

- **Compacidad:** es un factor de forma estandarizada, cuya fórmula propuesta por (Jiang, 2007 citado por Basnak et al., 2020, p. 4), es:

$$Co = \frac{2 * \sqrt{\pi * a}}{p} \quad (1)$$

Donde:

- Co : Compacidad.
- a : área zona urbana de la ciudad.
- p : perímetro zona urbana de la ciudad.

La ecuación (1) mide en términos prácticos qué tan similar es una forma a un círculo, el indicador toma valores entre 0 y 1 y cuanto menor es la compacidad mayor es la distancia media para áreas de igual superficie; se espera que las ciudades más compactas (donde la forma urbana favorece distancias de viaje más cortas y una mayor dispersión de orígenes y destinos) tengan corredores de menor capacidad en sus redes de transporte público, mientras que en ciudades menos compactas los viajes tienden a ser más largos y con mayor concentración espacial, lo que favorece la adopción de modos más eficientes en términos de capacidad y velocidad como Metro o BRT.

- **Esbeltez:** este indicador identifica la relación entre los semiejes mayor y menor de una forma dada, cuya fórmula propuesta por (Baker y Cai, 1992 citado por Basnak et al., 2020, p. 4) es:

$$Es = \frac{Sc}{Sf} \quad (2)$$

Donde:

- Es : Esbeltez.
- Sc : superficie de la ciudad a analizar.
- Sf : perímetro zona urbana de la ciudad área del círculo envolvente mínimo.

El efecto de la ecuación (2) debe ser similar al de la compacidad en general, las ciudades más esbeltas tienden a ser menos compactas, por lo que, una esbeltez creciente debe estar relacionada con la mayor complejidad de los sistemas de transporte, así como con otros factores.

- **Atractivo:** este indicador, cuya expresión matemática para una ciudad "i" (Schneider, 1959 citado por Basnak et al., 2020, p. 5) es:

$$A_i = \max_i \left[\frac{P_o}{d^n} \right] \quad (3)$$

Donde:

- A_i : atractividad.
- P_o : población.
- d : distancia entre centroides.
- n : es un número positivo a calibrar que permite identificar la proximidad de una ciudad con otras localidades "j".

La ecuación (3) presume que las ciudades que interactúan más con sus vecinos (aquellas con mayor atractivo) pueden tener un sistema de transporte público más complejos que ciudades aisladas similares ya que tienen mayor probabilidad de tener un sistema de transporte conjunto.

3.6.3. El transporte y su influencia en la estructura urbana

El sistema de transporte es a menudo la función más importante de las estructuras urbanas en términos de uso del suelo, densidad y superficie del suelo, estas características significan que el transporte urbano es una variable importante para el desarrollo sostenible (Comisión Europea, 2011 citado por Oses et al., 2017, p. 1891).

Cualquier política, acción u obra relacionada con el transporte tendrá el potencial de afectar la accesibilidad, las funciones y los precios del suelo, en general, la definición de un sistema de transporte sostenible es que se puede utilizar de forma indefinida donde la demanda de suelo y los requerimientos del ecosistema están en armonía y cumplen con límites sostenibles al tiempo que se mejora la eficiencia y la calidad de vida urbana y equidad social (Conferencia Europea de ministros de transporte, 2004 citado por Oses et al., 2017, p. 1891).

Basnak et al. (2020) en su modelo matemático desarrollado para clasificar un sistema de transporte señala que la integración de la red es una red existente de transporte público planificada espacialmente y se considera que puede contribuir a una mayor demanda en modos de transporte público de alta capacidad como se experimenta en la red troncal

alimentadora de Santiago de Chile (Chile), esta variable se considera como binaria, en la que 1 se asigna a las ciudades en las que las rutas en modo de menor capacidad se (re) diseñan como alimentadores para corredores de alta capacidad y cero (0) en ciudades que no se tiene proyectado rediseño de rutas.

No solo se ha identificado la integración como uno de los factores para el éxito de un proyecto de transporte público, sino que también, se ha verificado que la introducción de una tarifa integrada puede duplicar la demanda de una red de Metro previamente existente, dado que es razonable que los usuarios realicen más transferencias a modos más rápidos, pero con menor cobertura cuando los costos de transferencia son menores, por eso la presencia de integración tarifaria debería favorecer la implementación de tecnologías de transporte más eficientes. En el modelo, la variable “integración tarifaria” se definió como binaria, donde 1 corresponde a traslados gratuitos o con costo reducido entre la modalidad de categoría más alta y otras modalidades en una ciudad determinada, o entre las diferentes rutas de transporte público, mientras tanto, se asigna 0 a las ciudades que no cumplen con este requisito, incluidas aquellas donde los traslados a costo reducido se limitan a una estación o servicio en particular (Basnak et al., 2020, p. 5)

3.6.4. Formas de las rutas de transporte

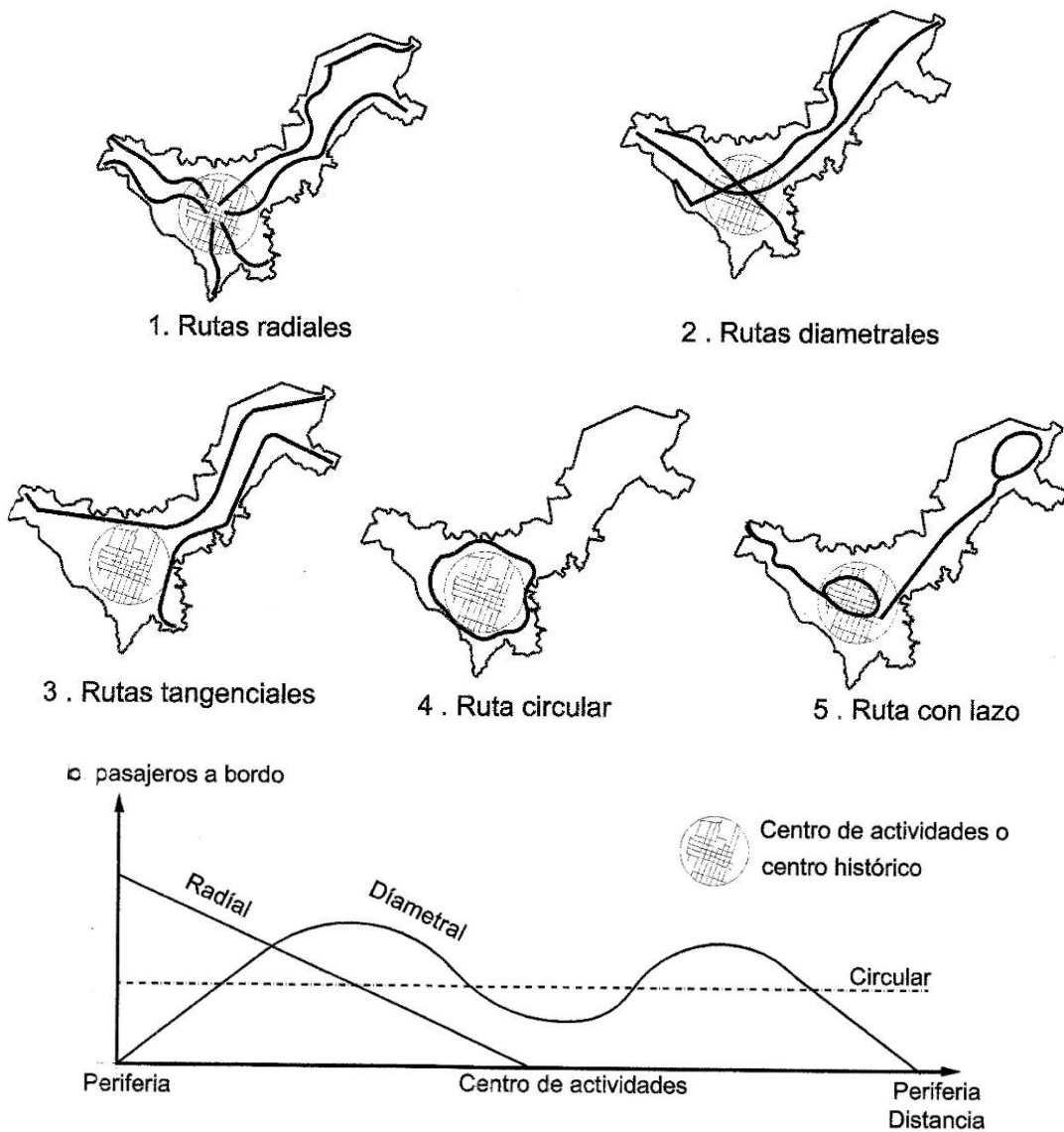
Una ruta de transporte se califica por su desempeño, la atracción de usuarios y la forma como opera, para lograr un buen calificativo en cada uno de los puntos anteriores, la ruta de transporte debe cumplir las siguientes metas (Arboleda, 2020, p. 230):

- Transportar el máximo número de pasajeros
- Procurar la máxima eficiencia operativa para un determinado nivel de desempeño.
- Tener en consideración los impactos que inducen en los patrones del uso del suelo y en las metas sociales que la comunidad tiene establecidas.

TIPOS DE RUTAS

Se toman las definiciones realizadas por (Arboleda, 2020, p. 231 - 232) en su libro “Vías Urbanas, una ciudad para todos”, las rutas integran la red de transporte del área urbana de una ciudad y por lo general, son cinco los tipos fundamentales de rutas (ver Figura 3-7) que pueden ser: radiales, diametrales, tangenciales, circulares y con lazo, con apreciación del número de pasajeros a bordo de acuerdo con la distancia entre el centro de actividades y la periferia.

Figura 3-7: Formas de rutas urbanas.



Fuente: Arboleda (2020), Vías Urbanas una ciudad para todos, Primera edición, Alpha Editorial / Alfaomega Colombia S.A.

Arboleda (2020) enuncia características para cada tipo ruta como:

Radiales: es el tipo más común y un gran número de ciudades se han desarrollado en función de este tipo de rutas, predominan en ciudades pequeñas y medias al estar la mayor parte de sus viajes canalizados a un centro de actividades o centro histórico, en ciudades mayores a los 300.000 habitantes, este tipo de rutas empieza a ser ineficiente ya que concentra los movimientos y no considera las necesidades que se presentan entre otras áreas urbanas, esto induce a que la distribución del servicio se encuentre limitada a ciertas áreas de la ciudad y concentre las terminales en las zonas de mayor densidad (p. 232).

Diametrales: por lo general, al desarrollarse la red de transporte y crecer la ciudad un primer ajuste que se realiza es la conexión de dos radiales, mismas que conforman una nueva ruta que pasa por el centro y conecta dos extremos de la ciudad (p. 232).

Con esta conexión, se logra una mejor distribución del servicio y evita la concentración de terminales en los centros históricos o de actividades lográndose una mayor eficiencia, sin embargo, se debe tener presente la necesidad de que exista un balance en la demanda a ambos extremos de la ruta ya que en caso contrario la operación y la asignación de oferta se dificulta con los consecuentes desbalances en la relación oferta demanda, así mismo, la longitud de la ruta puede ocasionar demoras y cargas desbalanceadas (p. 232).

Tangencial: son rutas que pasan a un lado del centro de actividades o centro histórico de una ciudad, este tipo de rutas solo es recomendable en las grandes ciudades debido a la menor demanda que ellas presentan (p. 232).

Circulares o semicirculares: sirven de rutas conectoras con las radiales, permitiendo una mejor distribución de los usuarios, así como una mejor utilización del parque vehicular, en este caso, se eliminan las terminales. (p. 232).

Casos típicos de este tipo de rutas son las líneas circulares de los metros de Londres (Inglaterra) y Moscú (Rusia), a su vez, pueden presentarse rutas en forma de arco o segmentos de círculo que no pasan por el centro de la ciudad (p. 232).

Rutas con Lazo en su extremo: son rutas de configuración radial en las que se presenta un lazo en uno de sus extremos lo que induce a contar con una sola terminal, es necesario buscar coordinación para lograr un mismo intervalo en la posición que conforma el lazo (p. 232).

Moreno (2021, p. 32), en su trabajo de tesis “Lineamientos generales para el diseño de rutas troncales del sistema de transporte tipo BRT en Bogotá D.C”, describe filosofías para el diseño de rutas de transporte de las cuales se tomaron 2 (radiales y diametrales) estas filosofías complementan las características de las rutas descritas anteriormente:

Filosofía de Diseño Radial

Hace referencia a la geometría del trazado de la ruta, además, sugiere que las rutas deben partir desde las zonas generadoras de viajes en la periferia (de portales o estaciones) y hacer el recorrido hasta algún punto clave en el centro de actividades de la ciudad donde haya disponibilidad para realizar maniobras de giro y regresar a su punto de partida (Moreno, 2021, p. 36). Además se tiene:

- Un adecuado diseño de rutas radiales contribuye a promover la integración con otros modos de transporte de pasajeros (Moreno, 2021, p. 37).
- El diseño radial de rutas es resiliente ante afectaciones o cambios producidos en algún ramal radial que conecten el sistema de transporte (Moreno, 2021, p. 37).

Filosofía de Diseño Diametral

(Moreno, 2021) Propone que: *Las rutas deben partir desde una zona generadora de viajes y hacer su recorrido hasta otra zona generadora en el extremo opuesto de la ciudad, al tener como premisa que un diseño de rutas diametrales disminuye los tiempos de viaje, esta filosofía contribuye a la accesibilidad en el sistema, permitiendo una rotación más rápida y eficiente de las sillas para que puedan ser usadas por nuevos usuarios*” (p. 38).

Para el diseño de una ruta diametral requiere atención con la proyección futura de la red de rutas al momento de implementar nuevos corredores troncales, de no ser así, se corre el riesgo de generar redes con demasiadas rutas que conecten todos los orígenes con todos los destinos aumentando la complejidad de la red y dificultando el control operativo (Moreno, 2021, p. 39). Además, se debe considerar lo siguiente:

- (Moreno, 2021) *Se deben diseñar rutas que interconecten diferentes corredores troncales según los principales deseos de viaje de los usuarios, para ello, se requiere contar con interconectores que permitan una conexión eficiente entre diversos corredores* (p. 38).

- El diseño de rutas diametrales debe buscar minimizar el número de transbordos, por lo que, compete la existencia de rutas que conecten directamente los principales pares origen - destino a partir del análisis de los deseos de viaje de los usuarios. (Moreno, 2021, p. 38).

3.7. Usos del suelo en Transporte

Es importante enfatizar que el patrón de uso de la suelo tiene un impacto pronunciado en la complejidad de la cadena de viajes diarios y en las opciones de modos, aquellos que viven en áreas con alta densidad de población y de empleo, optan por realizar actividades adicionales al trabajo y/o estudio con mayor frecuencia, por tanto, tiene implicaciones importantes para los responsables políticos el considerar la reubicación de asentamientos, la planificación de nuevas viviendas para residentes de bajos ingreso, recomendar arreglos centralizados en lugar de reubicaciones dispersas con el fin de mejorar la movilidad, más importante aún, los desarrollos de uso de suelo mixto y los centros de actividades de usos múltiples también deben promoverse para que los residentes de bajos ingresos puedan realizar una variedad de actividades en una cadena de viajes. (Cheng L. et al., 2016, p. 368).

El tren ligero y el tranvía tienen incidencia en el costo de la tierra y la propiedad; creando un efecto de gentrificación, el cual, desplaza a los grupos de bajos ingresos que son menos capaces de pagar alquileres (arriendos), por esto, las personas en ocasiones pueden llegar a padecer de expulsiones de las áreas que quizá son deseables para la creación de estaciones de sistemas de transporte público férreos, de modo que los grupos de personas con bajos recursos y con menos acceso a transporte privado no se benefician del sistema público de transporte (Knowles y Ferbrache, 2016, p. 436).

Continuando con lo anterior, la evidencia indica que el tren ligero generalmente aumenta el valor de la tierra y la propiedad también puede darse el caso de que el precio pueda caer, si estos cambios se consideran positivos o negativos dependerá de las personas involucradas por ejemplo: el valor de las viviendas aumenta o si no pueden pagar los precios de los predios adyacentes a las líneas son desplazados por los altos costos de impuestos y servicios a otras partes de la ciudad (Mohammad et al., 2013 citado por Knowles y Ferbrache, 2016, p. 436); en la revisión documental de en un periodo de análisis de 10 años (1998 - 2008) sobre los impactos del tren ligero en el valor de las propiedades

en ciudades de EE. UU, Reino Unido y Corea del Sur concluyeron que el impacto de los esquemas del sistema de transporte férreo en el valor de la tierra y la propiedad fue mayor en las ciudades de Asia oriental y Europa que en las ciudades de América del norte, que son de menor densidad y más dependientes del automóvil.

A medida que cada entorno urbano se acerca a un modelo particular, la sostenibilidad de su sistema de transporte de pasajeros está directamente relacionado con el modelo de ciudad que desarrolla; para que un sistema transporte urbano de pasajeros sea eficiente y sostenible requiere de un modelo de ciudad compacto y diverso (Oses et al., 2017, p. 1897), los indicadores y sus características de evaluación se muestran en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Indicadores para evaluar requerimientos de un modelo urbano.

Indicador	Medición
Intensidad del uso de suelo residencial	Habitantes/Hectárea
Superficie para infraestructura de transporte	Evaluación del porcentaje de superficie destinado a infraestructura de transporte
Superficie para vías	Evaluación del porcentaje de superficie de vías
Red ciclista	Evaluación km / 10.000 habitante

Fuente: Oses et al. (2017). Journal of Environmental Planning and Management. A multidisciplinary sustainability index to assess transport in urban areas: a case study of Donostia-San Sebastian, Spain. Vol. 60, No. 11, p. 1891-1922.

3.7.1. Patrones de desarrollo espacial

La forma urbana y el uso del suelo influyen en el costo del tiempo y la conveniencia de los diferentes modos de transporte (Banister, 2005 & Cervero, 1998 citado por Buehler, 2011 p. 645).

Los desarrollos de baja densidad y dispersión hacen que caminar y transportarse en bicicleta no sean atractivos, debido a las largas distancias entre los orígenes y destinos del viaje y a menudo por el suministro insuficiente de infraestructura para bicicletas y peatones (CEMT, 2004 & Puche y Buehler, 2006 citado por Buehler, 2011, p. 645), estos patrones de asentamiento fomentan el uso de automóviles que pueden cubrir distancias más largas

más rápido con menores costos de oportunidad, en contraste, las densidades más altas con una combinación de usos del suelo proporcionan distancias de viaje más cortas y ofrecen más oportunidades para caminar y transportarse en bicicleta (Kenworthy, 2002 citado por Buehler, 2011, p. 645).

Por otra parte, los viajes en automóvil tienden a ser más lentos y menos atractivos en áreas densas, debido a la congestión del tráfico, menos oferta de estacionamiento y mayores costos de estacionamiento, además, las densidades más altas hacen que la provisión de transporte público sea económica (TRB, 2001 & Vuchic, 1999 citado por Buehler, 2011, p. 645).

Por lo anterior, las personas que prefieren andar en bicicleta, caminar o usar el transporte público pueden mudarse a vecindarios más densos con una mayor mezcla de usos del suelo; en general, los estudios han encontrado que el desarrollo espacial y el uso del suelo o de la tierra explican una menor variabilidad en el comportamiento del viaje que las variables socioeconómicas y demográficas (Axhausen et al., 2003 & Simma y Axhausen, 2003 citados por Buehler, 2011, p. 645).

Los patrones de desarrollo espacial se aproximan a través de la densidad poblacional, el instrumento que captura la combinación de densidades poblacionales y de trabajos son los datos censales de hogares de cada encuestado (DESTATIS, 2003b & DESTATIS, 2005 citados Buehler, 2011, p. 648).

Otro patrón a tener en cuenta es el espacio público, Díez (2021, p. 69) comenta que este se relaciona con la percepción de la calidad del entorno que las personas tienen al transitar por este, en concordancia con lo anterior, el artículo 2 del decreto 1504 de 1998 de Colombia define el espacio público como el conjunto de inmuebles públicos e inmuebles privados (haciendo referencia a los elementos arquitectónicos y naturales de los inmuebles privados destinados por naturaleza). Es de resaltar que en el artículo 12 de este mismo decreto define el espacio público efectivo como el espacio público de carácter permanente, conformado por: parques, plazas, plazoletas y zonas verdes.

Díez (2021 p. 143), en una evaluación ex post que hace a al sistema tranviario de Ayacucho de Medellín (Colombia), evaluó el espacio público de una forma cualitativa, encontrando que: *“La percepción de la comunidad frente al espacio público, después de la implementación del tranvía es, en general, buena; reconocen un impacto positivo, sobre todo en el corredor del tranvía. Por otro lado, consideran que sin el tranvía y sí, hubieran continuando con la utilización de buses, la zona no contaría con un espacio público bueno”*.

Por último, el patrón de combinación de usos del suelo¹ se mide con la misma escala geográfica utilizada para la variable de densidad de población, la combinación se aproxima mediante un índice que varía de cero a uno, un valor de uno (1) indica una combinación equilibrada de residentes y trabajos en un área determinada, mientras que un cero (0) representa casi ninguna combinación de empleos y residentes (Buehler, 2011, p. 648).

Complementado la Tabla 3-3, para establecer la combinación de usos del suelo se deben medir:

- Comercio (Locales/ Km²): Este dato se obtiene de fuentes secundarias con los entes territoriales pertinentes.
- Elementos de espacio público/Km²: % de Densidad de elementos del espacio público.

En sociedades donde predomina el automóvil la construcción de una línea de tren ligero o de un tranvía generalmente no es suficiente por sí sola para desencadenar un nuevo crecimiento de las ciudades, en la mayoría de los casos el nuevo crecimiento y distribución de los usos del suelo se relaciona con estos modos férreos siempre que haya evidencia de iniciativas más amplias de política v/s desarrollo. (Knowles y Ferbrache, 2016, p. 430).

¹ Dictamen que emiten las autoridades facultadas para expedir licencias urbanísticas (licencia de urbanización, parcelación, subdivisión y construcción), el dictamen se efectúa con base en la revisión que las entidades hacen sobre las normas urbanísticas vigentes en el respectivo municipio o distrito, que corresponden al POT (Plan de Ordenamiento Territorial), PBOT (Plan Básico de Ordenamiento Territorial) o EOT (Esquemas de Ordenamiento Territorial), y a los demás instrumentos que desarrollen a cada uno; dado lo anterior, el concepto de uso del suelo contendrá la lista de actividades que se pueden ejecutar en un determinado inmueble, circunscritas a lo que las normas urbanísticas vigentes señalen (Avendaño, 2017, p. 1)

3.7.2. Accesibilidad al uso del suelo mediante transporte

Siguiendo a (Geurs and van Wee, 2004 citado por van Wee et al., 2014, p. 1), definen la accesibilidad en el caso del transporte de pasajeros como *"la medida en que los sistemas de uso del suelo y de transporte permiten a grupos de individuos llegar a actividades o destinos mediante combinación de modos de transporte"*.

Según Eddington (2006 citado por citado por Knowles y Ferbrache, 2016, p. 430), la infraestructura de transporte puede ayudar a generar accesibilidad en términos de aliviar las barreras comerciales, proporcionar acceso a sitios industriales abandonados o espacio disponibles para construir o a nuevas oportunidades de empleo donde el trabajo y / o la tierra han sido subutilizados pasando a ser tierras recuperadas:

- Post-uso del suelo, oficinas abandonadas, centrales de estacionamientos.
- Pre-uso del suelo, tierra que no ha sido construida.

La geografía de un área puede dificultar la accesibilidad, en la práctica el transporte puede ayudar considerablemente a facilitar el acceso sitios previamente inaccesibles; el cambio en el uso de la tierra puede efectuarse de manera beneficiosa cuando el transporte público se implementa en ciudades que no están tan desarrolladas o cuando se requiere que el sistema se adapte a un área casi completamente construida, de esta manera, el transporte tiene potencialmente más éxito de crecimiento donde conecta un centro de desarrollo urbano con áreas residenciales en los suburbios o penetra en el borde de la ciudad donde hay más terrenos disponibles para el desarrollo (Knowles y Ferbrache, 2016, p. 432), siempre que la densidad sea suficiente para garantizar los pasajeros del sistema o este se pueda escalar por fases.

Según lo anunciado anteriormente, la accesibilidad del transporte se medirá como el impacto en los usos del suelo de la siguiente forma:

Estado del suelo/Km²

- Post-uso del suelo, % del suelo de oficinas abandonadas, centrales de estacionamientos, que serán utilizadas.
- Pre-uso del suelo, % tierra que no ha sido construida, y que circulara la red.

3.7.3. Influencia del transporte público en el desarrollo del suelo

Para esta investigación se definió la relación entre transporte público y el uso del suelo basados en el modelo de Alonso-Muth-Mills (AMM) el cual propone que los sistemas de transporte aumentan la accesibilidad de una ubicación determinada, en la cual los usuarios tienen más probabilidades de hacer ofertas más altas por terrenos accesibles, estas alcanzan su punto máximo alrededor de las estaciones de transporte y disminuyen cuando se aleja de la estación, una mayor accesibilidad al transporte público está asociada con el uso del suelo que tiene menos producción e intensificación de rentas, existiendo una desintegración entre los sistemas de transporte público y el uso del suelo (Zhao et al., 2018, p. 291).

Así pues, la relación entre el uso del suelo y el desarrollo del transporte público es indudablemente bidireccional, como lo han demostrado muchos estudios el uso del suelo y el desarrollo de la tierra influyen en el progreso del transporte público, a menudo actuando como catalizador por ejemplo: un cierto nivel de desarrollo de la tierra y densidad de población es esencial para el suministro de servicios de transporte (Freilich, 1998; Arrington, 2004; Iv et al., 2007 & Lai y Li, 2009 citados por Zhao et al., 2018, p. 292), debido a que el desarrollo de la tierra es una forma importante de reunir capital de apoyo para la inversión en transporte público (Hong, 1998; Smith; Gihring, 2006; Krabben y Needham, 2011 citados por Zhao et al., 2018, p. 292).

Cabe destacar que el desarrollo temprano puede comenzar antes de que se construya el sistema de transporte público y el desarrollo tardío puede continuar durante algunos años después, por lo tanto, hay impactos antes y después del progreso del transporte en el perfeccionamiento de la tierra, el tiempo entre el desarrollo del transporte y el desarrollo de la tierra que puede causar un desajuste temporal que influye en su integración, además, el entorno construido local también afecta la integración por ejemplo: las áreas de estaciones accesibles para peatones y ciclistas promueven patrones de movilidad y uso del suelo más integrados (Lyu et al., 2016 citado por Zhao et al., 2018, p. 292) y la alta calidad de los servicios de transporte público también son vitales para la integración del transporte terrestre (Vale, 2015 citado por Zhao et al., 2018, p. 292).

3.8. Densidad de la demanda

Las conformaciones de hogares en una zona urbana están relacionadas con el término "estilo de vida" que, en la literatura, tiene dos significados:

- Patrones de actividad y uso del tiempo.
- Valores y orientación conductual.

Estos dos están interrelacionados pero existe una diferencia crítica, el estilo de vida como patrones de actividad puede cambiar a medida que un individuo se adapta a un cambio en el entorno, mientras que el estilo de vida como orientación es en la cual el individuo intenta mantener modificaciones a los patrones de comportamiento y adaptación al cambio; el cambio de estilo de vida como orientación tiene lugar a largo plazo mediante cambios en valores, actitudes y preferencias (Ardeshiri y Vij, 2019, p. 343).

Como se mencionó anteriormente, la influencia del estilo de vida está dado por las preferencias de los hogares en la ubicación residencial, los estudios demuestran relaciones sólidas y estadísticamente significativas entre las variables relacionadas con el estilo de vida como: los ingresos, la estructura del hogar y las preferencias de los hogares por la ubicación residencial por ejemplo: la mayoría de las investigaciones encuentran que los hogares de altos ingresos probablemente prefieran vecindarios suburbanos de baja densidad y los hogares de bajos ingresos probablemente prefieran desarrollos urbanos compactos, de manera similar, es probable que los hogares jóvenes con niños prioricen lotes y tamaños de casas más grandes sobre el acceso a las comodidades, mientras que lo opuesto se da en hogares mayores sin niños (Walker y Li, 2007; Scheiner, 2010; Pisman et al., 2011; Smith y Olaru, 2013; Ardeshiri, 2014; Zhang, 2014; Liao et al., 2015; Ardeshiri et al., 2016 & Ardeshiri et al., 2018 citados por Ardeshiri y Vij, 2019, p. 344).

Complementando lo anterior, en el modelo matemático propuesto por (Basnak et al., 2020) y explicado en el capítulo 3.6.1 de esta investigación para una de las definiciones del factor población, área urbana y densidad se aclara que la población es la variable más utilizada para recomendar modos de transporte público en las ciudades; una población más grande se correlaciona con un mayor número de usuarios de transporte público (Taylor y Fink, 2003 citado por Basnak et al., 2020, p. 4), lo que puede justificar los sistemas de transporte público con modos de mayor capacidad, un área urbana más grande

generalmente implica viajes más largos al aumentar la distancia de viaje, los modos más rápidos permiten un mayor ahorro de tiempo, por lo que estos modos pueden ser más beneficiosos, por otro lado, los modos con mayor velocidad promedio son los correspondientes a Metro, LRT y BRT (Vuchic, 2005 citado por Basnak et al., 2020, p. 4), en este sentido, se esperaría que las ciudades más grandes tengan sistemas de transporte público de categorías superiores.

Sin embargo, cuando se considera el efecto de la población en la superficie de las ciudades, es decir, cuando se usa la densidad como variable independiente, predecir el efecto esperado no es sencillo por un lado, una mayor densidad implica una menor superficie en ciudades con una determinada población, lo que se asocia a distancias de viaje más cortas y por lo tanto puede desalentar la construcción de modos más rápidos, una menor densidad de población implica una menor concentración de viajes y por esto una menor eficiencia de los modos de alta capacidad como Metro y BRT los cuales, necesitan una cantidad mínima de viajes para ser rentables, en general una mayor densidad de población urbana se considera una condición favorable para la implementación de modos de transporte público de alta capacidad (Babalik-Sutcliffe, 2002 citado por Basnak et al., 2020, p. 4).

Ardeshiri y Vij (2019, p. 343) indican que muchos estudios han concluido que el uso del suelo y los indicadores del entorno construido como: la densidad, la diversidad del uso del suelo, el diseño, la accesibilidad y la distancia al transporte público, etc., influyen en el comportamiento de los viajes de manera estadísticamente significativa, otros han argumentado que al menos parte de la correlación observada entre las decisiones de ubicación del vecindario del hogar y los comportamientos de elección del modo de viaje individual puede explicarse por los efectos de autoselección, las personas que prefieren modos de transporte particulares pueden elegir deliberadamente vivir en vecindarios propicios para el uso de estos mismos modos, los atributos del entorno construido, como la densidad y la diversidad del suelo sí tienen un impacto en los comportamientos de viaje, el desacuerdo suele limitarse a cuantificar la relevancia de este efecto en relación con otros determinantes del comportamiento de viaje.

Por ejemplo, (Mouratidis et al., 2019, p. 306) en 2019 realizó un estudio en la ciudad de Oslo (Noruega) en donde evaluó como la composición urbana afecta la satisfacción del viaje, en sus resultados concluye que la satisfacción con el viaje al trabajo así como la

satisfacción con los viajes de placer, son significativamente más altas para los residentes de barrios urbanos compactos que para los de los suburbios en expansión, esto se debe principalmente a las diferencias en la duración del viaje y la división modal del viaje; las distancias más cortas al centro de la ciudad y las densidades de vecindario más altas se asocian con una duración significativamente menor del viaje al trabajo o a los centros educación, esta menor duración del viaje que experimentan los residentes de ciudades compactas contribuye significativamente a su mayor satisfacción al viajar; de igual forma, encontró diferencias significativas en el impacto del modo de viaje a usar respecto a la satisfacción del viaje, controlando la duración del viaje se clasificó la elección del modo del más al menos agradable generando el siguiente orden (1) caminar, (2) bicicleta, (3) autobús, tranvía y metro, y (4) automóvil, estas diferencias contribuyen a la mayor satisfacción de viaje en los vecindarios compactos, ya que los residentes de estos usan los modos de viaje activos con mayor frecuencia (caminar y andar en bicicleta) y el automóvil en menor frecuencia, mientras que los residentes suburbanos caminan y se movilizan en bicicleta significativamente menos y usan más el vehículo particular.

Finalmente Basnak et al. (2021, p. 5) describe un indicador que se basa en la demanda existente en los sistemas de transporte público, ponderada por la densidad de viajes y la distancia recorrida, llamado “**densidad potencial de demanda**”, este enuncia que al aumentar la distancia media de los viajes en transporte público se ahorran tiempos de viaje para modos más rápidos, lo que se traduce en un mayor beneficio social; asumiendo una distribución dada de viajes en el corredor el beneficio para los usuarios (expresado en tiempo ahorrado por viaje en vehículo) es proporcional al largo del corredor, al dividir los viajes diarios en el sistema por la superficie de cada ciudad se determina la intensidad de demanda medida en viajes/km²/día, dado que el tiempo ahorrado en vehículo al viajar en un modo más rápido es (conjeturando velocidades constantes) proporcional a la distancia recorrida y que ésta depende del largo del área urbana para un patrón de viajes definido, al expresar la densidad de demanda en viajes/km/día, lo que equivale a dividir la demanda proyectada por la raíz cuadrada de la superficie urbana, se tiene en cuenta tanto la densidad de población como la distancia media de viajes, como se muestra en la ecuación (4):

$$DPD \left(\frac{\text{Viajes}}{\text{día} * \text{Km}} \right) = \frac{q \left(\frac{\text{Viajes}}{\text{día}} \right)}{\sqrt{Sc \text{ (Km}^2)}} \quad (4)$$

Donde:

- DPD : Densidad potencial de la demanda.
- q : Demanda.
- Sc : superficie de la ciudad a analizar.

En la Tabla 3-4 se muestran los valores mínimos de demanda para establecer un sistema de transporte de mediana capacidad tipo BRT. (Basnak et al., 2021, p. 2) indica que el cálculo establecido en la política CONPES 3167 2022 de Colombia para determinar la cantidad mínima de viajes/hora/sentido no se detalla en la normativa, además, este valor es marcadamente superior al de otras fuentes que incluyen modelos de optimización, esto puede deberse al menor ingreso promedio de los habitantes de Colombia en relación con el de países desarrollados lo que resulta en una menor valoración equivalente de los ahorros en tiempos de viaje y por ende una mayor cantidad de viajes necesarios para compensar los costos de inversión.

Tabla 3-4: Demanda mínima para justificar un BRT en corredores.

Fuente - Ubicación	Unidad	Valor mínimo
CONPES 3167 (2002) – política de transporte urbano Colombia	Pasajeros/ Hora punta/ dirección	7.000
LAMTA (2012) – Los Ángeles (EE.UU.)	Pasajeros/ Hora punta/ dirección	1.000
Moccia y Laporte (2016) – Modelo de optimización en corredores	Pasajeros/ Hora punta/ dirección (70% - 30%)	4.000
AECOM (2012) – Canberra (Australia)	Buses / Hora	75

Fuente: Basnak et al. (2021), "Criterios para planificar transporte masivo en ciudades intermedias de Colombia: ¿Cómo complementar y mejorar la política actual?", Revista Ingenio, vol. 18 (1), p. 1-

La población de las ciudades es sin duda atractiva por su fácil valoración para establecer en qué condiciones debe evaluarse la potencial implementación de corredores BRT porque a medida que incrementa el número de habitantes el sistema de transporte debe ser de mayor complejidad, no obstante, al ignorar otras características básicas de las ciudades y sus habitantes que explican un mayor uso de transporte público, no permite identificar la adopción de transporte masivo en localidades de menor población ubicadas cerca de las grandes ciudades, que podrían compartir sus sistemas de transporte masivo (Basnak et al., 2020, p.6).

3.9. Sincronización entre viajes, forma urbana y usos del suelo.

Existen dos enfoques básicos para recomendar modos de transporte masivo en la literatura, el más simple consiste en establecer umbrales para implementar tecnologías como bus rápido, tren ligero, tranvía o metro en base a variables como la población de las ciudades y el PIB per cápita, estas recomendaciones muestran límites inferiores entre 0,25 y 1,0 millón de habitantes para construir buses rápidos, entre 0,3 y 3,0 millones para tren ligero o tranvía y entre 1,0 y 6,0 millones para Metro (Basnak et al., 2020, p. 2), un segundo enfoque más elaborado consiste en establecer límites mínimos de demanda comparando costos de implementar distintas opciones de transporte público; diversos autores han desarrollado modelos matemáticos para estimar cuál es la cantidad mínima de viajes que justifica la implementación de una tecnología dada (como bus rápido o Metro) en redes simplificadas o en corredores modificando variables como la frecuencia, la densidad de paraderos y el tamaño de los vehículos, como se muestra en la Tabla 3-4.

La experiencia internacional muestra que algunas ciudades de menos de 400.000 habitantes cuentan con líneas de BRT como Eugene (Estados Unidos), Uberaba (Brasil) y Caen (Francia), tren ligero como Vitória (España), Haifa (Israel) o Bonn (Alemania) o incluso Metro como Brescia (Italia) y Lausanne (Suiza). (Basnak et al., 2021, p. 1).

Basnak et al. (2021, p. 2), considera como “ciudades intermedias” a aquellas con población entre 50.000 y un millón de habitantes. La mayoría de las ciudades intermedias con metro o tren ligero pertenece a países desarrollados, en donde existe mayor presupuesto para financiar infraestructura de transporte y los usuarios tienen mayor ingreso lo que se asocia con una mayor disposición a pagar por ahorro en tiempos de viaje; los corredores BRT tienen costos de construcción marcadamente inferiores al del metro y su capacidad máxima es comparable con la de líneas de metro esta combinación los hace particularmente atractivos para países en vías de desarrollo, en la actualidad casi el 90% de los pasajeros transportados en BRT pertenecen a ciudades de América latina o Asia.

De lo anterior Basnak et al. (2020, p. 9), determinó un modelo matemático para ciudades de las américas (este fue calibrado a partir de 400 ciudades), el cual clasifica un sistema de transporte a partir de un valor numérico denominado “Puntaje Urbano”, este tiene en cuenta factores económicos, urbanos, poblacionales, morfológicos - geográficos y del transporte como se muestra en la ecuación

$$\begin{aligned}
 PU = & \left(2,30 * \text{Log}_{10} (Po) \right) + \left(0,799 * \text{Ln} (PIB) \right) + \left(5,13 * 10^{-4} * (A_i) \right) \\
 & - \left(2,91 * (Co) \right) + \left(9,13 * 10^{-2} * \text{Log}_{10} (Po) * \text{Ln} (De) \right) \\
 & - \left(1,66 * 10^{-3} * (M) \right) + \left(0,0422 * (Pe) \right) + \left(0,352 * I \right)
 \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

- PU : Puntaje Urbano
- Po : Población.
- A_i : Atractividad
- Co : Compacidad
- De : Densidad
- M : Motor
- Pe : Pendiente promedio (%)
- I : Integración

Algunas de estas variables ya fueron abordadas en apartados anteriores de esta investigación, para complementar la definición de todas las variables, a continuación, se enuncian estas:

Factores socioeconómicos

EL PIB, de los usuarios es una de las principales variables que explican la elección del modo de transporte dado que la valoración del tiempo tiende a aumentar con los ingresos se espera que en las ciudades más ricas se prioricen modos más costosos y más rápidos (metro) sobre los modos más lentos y más (autobuses), dado que en muchos países existe escasa información sobre el ingreso promedio de los residentes en sus ciudades, se utilizó el PIB per cápita nacional y regional como sustitutos del ingreso (Basnak et al., 2020, p. 4).

Motor, es la motorización o la propiedad de automóviles, aunque generalmente se correlaciona con un menor uso del transporte público, las ciudades que tienen una propiedad de automóviles similar pueden tener diferencias significativas en la proporción de viajes en transporte público; por lo anterior, la presencia de mayores costos para el usuario en el transporte público también se correlaciona con la compra de vehículos privados por esta razón, los precios del combustible también se consideraron como un indicador de la propiedad de automóviles y con la compra de automóviles, mientras que el uso del transporte público no tiene una influencia aparente en los precios del combustible cuando los precios de los combustibles aumentan, el incentivo para adquirir o usar automóviles privados disminuye lo que debería traducirse en una mayor demanda de transporte público y por lo tanto en el uso de modos más eficientes en una ciudad (Basnak et al., 2020, p. 4).

Factor Geográfico

La Densidad, a través de la provisión de calles medido en km de calle por km cuadrado y la densidad de la red medida en intersecciones por kilómetro cuadrado, también puede ser relevante, estas variables deberían tener un efecto similar a la longitud de las carreteras per cápita cuyo aumento favorece el uso del automóvil y desalienta la participación del transporte público (Basnak et al., 2020, p. 4).

Este puntaje urbano cuenta con cinco categorías (ver Tabla 3-5), basadas en la clasificación modal de (Vuchic, 2005 citado por Basnak, 2020, p. 9), la categoría V corresponde a ciudades con modos de transporte público con separación total (Carriles segregados) respecto de otros vehículos y sin cruces a nivel como el metro de Medellín (Colombia); la categoría IV corresponde a ciudades que cuentan con modos de transporte

público parcialmente segregados del tránsito pero con cruces a nivel como el BRT MIO de Cali (Colombia) o el tranvía de Ayacucho en Medellín (Colombia), ciudades con modos de transporte público con derecho de vía parciales con tránsito compartido con otros vehículos como buses comunes como por ejemplo el transporte de Pasto (Colombia) o el SITP de Bogotá (Colombia) pertenecen a la categoría III; por último, ciudades que sólo tienen servicios de taxi pertenecen a la categoría II y ciudades sin transporte público son de categoría I.

Tabla 3-5: Valores límite entre categorías.

Límite entre Categorías	Valor puntaje urbano
I (Sin Transporte público)	0.00 – 16,71
II (Taxis)	16,71 – 19,31
III (Transporte Masivo Mixto)	19,31– 24,20
III (Transporte Masivo Mixto o Segregado)	24,20 – 26,47
V (Transporte Totalmente Segregado)	> 26,47

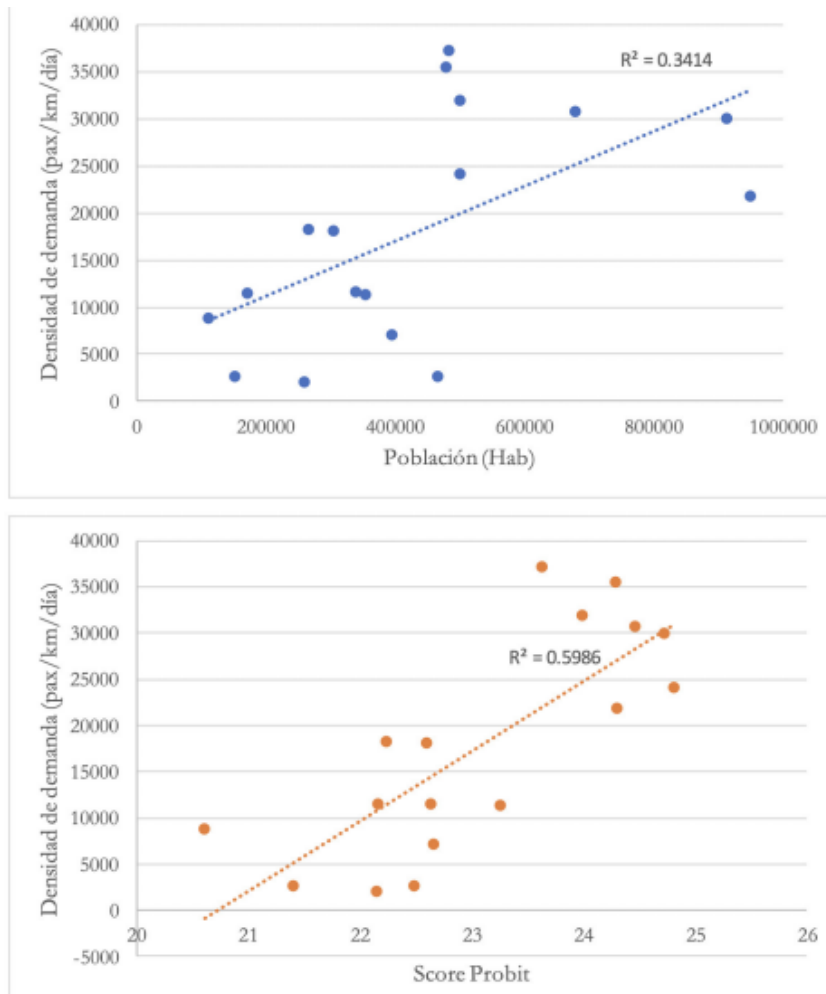
Fuente: Basnak et al., (2020). Technology choices in public transport planning: A classification framework.

Basnak et al. (2021, p. 3), aplica el modelo de puntaje urbano y densidad potencial de la demanda potencial a ciudades intermedias de Colombia entre 100.000 y 1.000.000 de habitantes (ver Figura 3-8) y encuentra que el puntaje urbano es significativamente mejor que solo la variable población para la selección de un sistema de transporte masivo y concluye que incorporar variables adicionales a la población permite mejorar los criterios para planificar transporte público masivo en ciudades intermedias.

Continuando con lo anterior, Basnak et al. (2021, p. 6) recomienda no tener en cuenta las diferencias regionales en el PIB per cápita, aunque él manifiesta que el PIB per cápita regional explica mejor los modos de transporte público en ciudades que el PIB nacional, el uso de esta variable a nivel regional implicaría una mayor tendencia a invertir en transporte público en zonas de mayor ingreso. Esta política puede ser costo-efectiva pero implica impulsar proyectos que podrían acentuar la inequidad; por su parte, la densidad de la demanda de los sistemas de transporte público tiene como principal ventaja que considera tanto la densidad de población como la distancia de viajes, no obstante, no tiene en cuenta

que la cantidad de viajes que se realizan en un sistema dado depende de su nivel de servicio debido a que se evidenció que algunas ciudades intermedias del contexto colombiano como Valledupar en donde la partición modal del transporte público podría aumentar con una mejora de las condiciones de viaje, este indicador es adecuado aunque la evidencia estadística es insuficiente para definir un umbral mínimo en términos de viajes/km/día, se consideró la ciudad de Pereira como ciudad de referencia cuyo sistema BRT tiene una demanda adecuada para justificar su operación tomando en cuenta los costos sociales totales un límite inferior de 30.000 viajes/km al día es una primera aproximación razonable.

Figura 3-8: Regresión lineal de la densidad potencial de demanda vs población (figura superior), densidad potencial de demanda vs puntaje urbano (figura inferior).



Fuente: Basnak et al. (2021). Criterios para planificar transporte masivo en ciudades intermedias de Colombia: ¿Cómo complementar y mejorar la política actual?, Revista Ingenio, vol. 18 (1), p. 1-9.

Aglomeraciones Urbanas

En la rapidez del desarrollo urbano, una gran parte de la nueva población se ubica en espacios de la ciudad descentralizados, esto manifiesta una oportunidad para la planificación del desarrollo urbano pero a medida que las ciudades continúan volviéndose más dispersas los costos de construcción y operación de sistemas de transporte público se vuelve prohibitivo (carreteras, caminos locales, sistemas ferroviarios, etc.) por ejemplo: existen 290 aglomeraciones urbanas que tienen sistemas ferroviarios de pasajeros (Schwandl, 2019, p. 1), la gran mayoría de ellas en países desarrollados, en los cuales se manifiestan patrones residenciales dispersos típicos de las ciudades que dependen del automóvil, generando que los sistemas de transporte público sean menos convenientes para los viajeros (Bagley, 2003, p. 36) además la falta de espacio para desarrollar vías impulsa la descentralización del uso del suelo (Gakenheimer, 1998, p. 37).

Los residentes más pobres a menudo se encuentran aislados en áreas periféricas sin acceso a un transporte asequible, en atención a esto el transporte público se percibe a menudo como la mejor opción para las áreas urbanas aisladas, no obstante, los desafíos más difíciles que enfrenta el transporte urbano propuestos por (Bagley, 2003) son:

Descentralización: *Los sistemas de transporte público no están diseñados para dar servicio a áreas urbanas de baja densidad y dispersas que dominan cada vez más el paisaje. Cuanto mayor es la descentralización más difícil y costoso se vuelve servir a las áreas urbanas con transporte público (p. 37).*

Conectividad: *El sistema de transporte público suele ser independiente de otros modos y terminales. En consecuencia, es difícil transferir pasajeros de un sistema a otro (p. 37).*

Competición: *En vista de que los sistemas de transporte por carretera son baratos, el transporte público se enfrenta a una fuerte competencia. Cuanto mayor sea el nivel de dependencia del automóvil, más inadecuado será el nivel de servicio del transporte público. El servicio público que se ofrece es superado por la comodidad del automóvil privado (p. 37).*

3.10. Evaluación Multicriterio

Díez (2021) indica que: *La evaluación de proyectos de transporte requiere hoy en día la incorporación de varios objetivos adicionales como la reducción del ruido, el impacto social positivo, el impacto urbanístico favorable, e incluso incorpora las prioridades políticas, que son difíciles de poner en valores monetarios; para medir algunos de estos aspectos, se utilizan evaluaciones multicriterio, el análisis multicriterio, llamado también análisis multi objetivo, abreviado como AMO, es un instrumento que se utiliza para evaluar múltiples soluciones a un determinado problema, considerando un número variable de criterios, se utiliza para apoyar la toma de decisiones en la selección de la solución más conveniente (p. 31).*

Además Balaguera y León (2019) enuncian que: *Los métodos de evaluación varían de acuerdo al tipo de variable y la cantidad de objetivos así: cuantitativos simples (indicadores económicos), cuantitativos complejos (programación lineal), cualitativos simples (lista de verificación, modelo Q-sorting), cualitativos complejos (modelo Delphi) y mixtos complejos (proceso de jerarquía analítica y modelos de puntuación); este último método, involucra procesos capaces de recolectar, analizar y vincular datos de tipo cualitativo y cuantitativo, tiene la ventaja de dar una visión más precisa y adquirir un mayor grado de comprensión del fenómeno en estudio, la posibilidad de una multiplicidad de observaciones permite un análisis detallado del problema y una mayor variedad de perspectiva ya que identifica las partes del sistema, reconoce su peso, identifica los vínculos entre las partes y propone una solución racional (p. 35)*

Métodos de análisis multicriterio discretos

Los escenarios en los que las opciones de decisión son finitas se denominan problemas de “Decisión Multicriterio Discretos” que da a lugar en la presente investigación, algunos de los métodos utilizados son:

Ponderación Lineal (scoring): permite abordar situaciones de incertidumbre o con escaso nivel de información; se construye una función de valor para cada una de las alternativas. Supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad (EcuRed, 2022, p. 1).

Utilidad Multiatributo (MAUT): para cada atributo se determina la correspondiente función de utilidad (parcial) y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa, al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas; utiliza “escalas de intervalo”, y acepta el principio de “preservación de orden” (rank preservation) (EcuRed, 2022, p. 1).

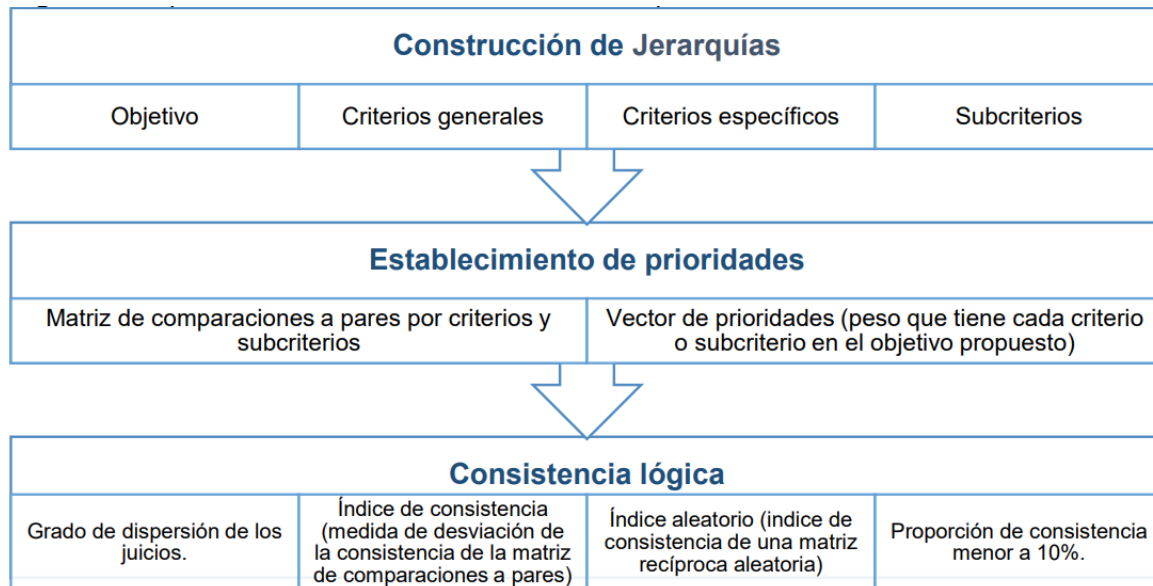
Relaciones de Superación: estos métodos usan como mecanismo básico el de las comparaciones dos a dos de las alternativas, criterio por criterio, de esta forma puede construirse un coeficiente de concordancia asociado con cada par de alternativas; existen dos métodos de la escuela francesa: ELECTRE y PROMETHEE. El método ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) tiene varias versiones que usan pseudocriterios y la teoría de conjuntos difusos, el método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) se ha aplicado con predicción para problemas de ubicación (EcuRed, 2022, p. 1).

Proceso Analítico Jerárquico (AHP- The Analytic Hierarchy Process): fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty en 1980 y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico, el propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un modelo que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas, una vez construido el modelo jerárquico, se realizan comparaciones por pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende, una vez obtenido el resultado final, el AHP permite llevar a cabo el análisis de sensibilidad del modelo (EcuRed, 2022, p. 1).

Selección del método

Teniendo en cuenta que se deben priorizar aspectos para la intervención de los proyectos en cada una de sus etapas de planeación, se necesita de una herramienta que permita calificar los aspectos en la sub etapa de prefactibilidad en el nivel ex ante (preinversión) etapa de análisis de esta investigación, dado que se utiliza información secundaria, para ello, se sugiere emplear la metodología de evaluación multicriterio acogida Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL, la cual, permite evaluar y discriminar entre proyectos su prioridad y eficiencia para la asignación de recursos y apoyar la toma de decisiones, esta se basa en el método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) o proceso de jerarquía analítica (Balaguera y León, 2019, p. 36) (ver Figura 3-9), descrito anteriormente.

CEPAL (2008, p. 49), enuncia los beneficios del análisis de alternativas con una metodología multicriterio en cualquier nivel de preinversión o evaluación ex ante (perfil, prefactibilidad, factibilidad), ya que, el nivel de prefactibilidad es una sub etapa tradicional en la evaluación de proyectos (luego del estudio de la idea y el perfil del proyecto) en la que se hace necesario evaluar varias alternativas, para este fin se puede implementar el método AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Figura 3-9: Etapas del proceso de Jerarquía Analítica.

Fuente: Balaguera y León. (2019). Guía para el desarrollo orientado al transporte sostenible (DOTS) en ciudades Intermedias. Tunja.

4. Metodología

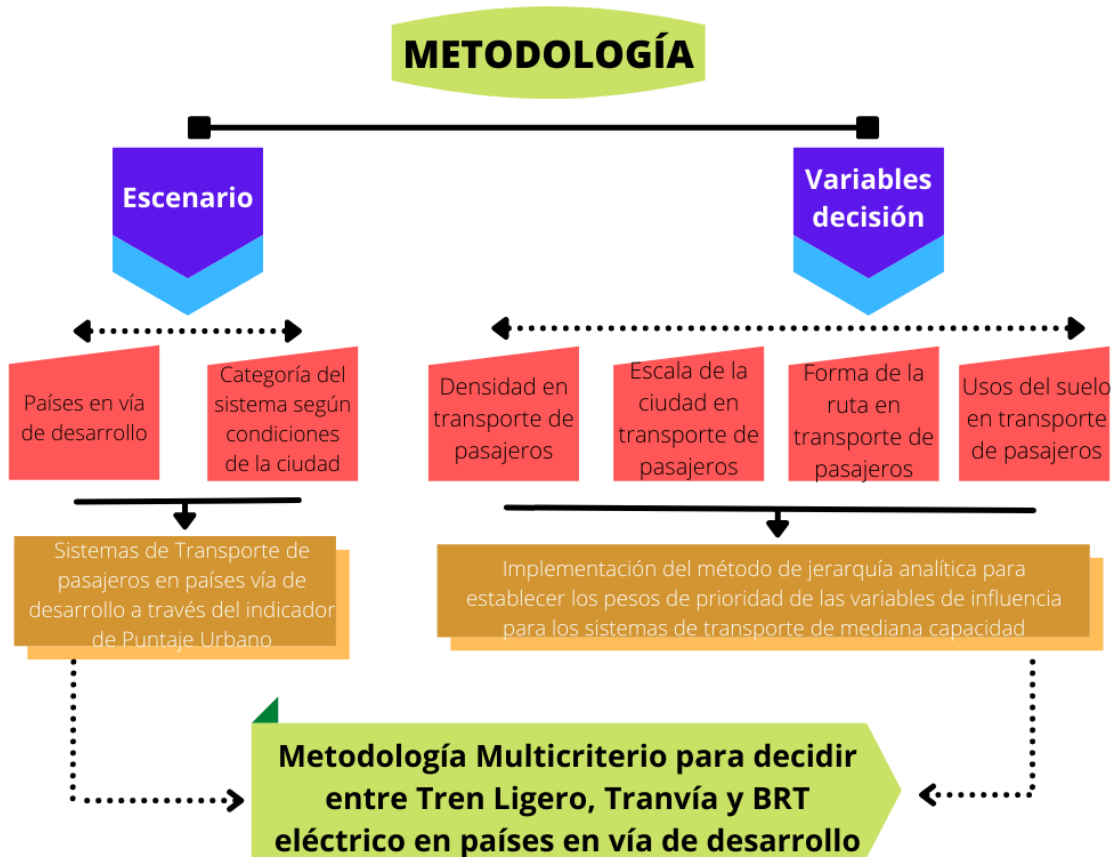
Este capítulo trata el proceso metodológico para cuantificar el valor que tienen las variables de interés a partir de ponderadores calculados mediante metodología multicriterio, con el fin de clasificar numéricamente los modos de interés (tren ligero, tranvía y BRT eléctrico) y así seleccionar el idóneo.

Como primera etapa, se establece el máximo sistema al cual puede acceder un grupo poblacional, que para esta investigación es en un escenario de países en vía de desarrollo, por lo tanto, se utiliza el indicador denominado “Puntaje Urbano” el cual clasifica un sistema de transporte a partir de factores económicos, urbanos, poblacionales, morfológicos - geográficos y del transporte.

En la segunda etapa, se calcula los puntajes que diferenciarán un modo de transporte de mediana capacidad (tren ligero, tranvía o BRT eléctrico): considerando: 1. definición de las variables que tienen relevancia en la selección de un sistema de transporte de pasajeros de mediana capacidad; 2. Identificación de los subcriterios que describen cada variable, estos serán los elementos para la recolección de información, 3. aplicación de la metodología multicriterio AHP (*Analytic Hierarchy Process* – Proceso de Jerarquía Analítica) propuesta por la CEPAL para determinar los ponderadores que tiene cada variable y subcriterio, 4. cálculo de los puntajes finales que mediante análisis y selección con base en los datos recolectados para cada subcriterio, se establece el modo idóneo para operar en el corredor de mediana capacidad.

En la Figura 4-1, se evidencia el esquema metodológico descrito.

Figura 4-1: Esquema metodológico.



Fuente: Elaboración propia.

4.1. Transporte de pasajeros en países en vía de desarrollo

Un sistema de transporte puede operar en cualquier orografía, la diferencia está en la optimización de la operación y la sustentabilidad para atender las necesidades y presupuestos disponibles de cada ciudad para ponerlo en funcionamiento.

En países en vía de desarrollo la demanda de usuarios para plantear un sistema de transporte es mayor que en países desarrollados debido al menor ingreso promedio de los habitantes en relación con el de países desarrollados lo que resulta en una menor valoración equivalente de los ahorros en tiempos de viaje y por ende una mayor cantidad de viajes necesarios para compensar los costos de inversión (Basnak et al., 2021, p. 4).

Para establecer los países en vía de desarrollo se tomaron 3 índices que fueron explicados en el capítulo 3.2 y que tengan accidentes topográficos notables, ya que, la orografía influye en la disposición de un usuario para acceder mediante caminata a un sistema de transporte, para determinar países con accidentes notables (orografía montañosa), se supuso como altura mínima sobre el nivel del mar los 3000 metros (ver Tabla 4-4).

Índice de desarrollo Humano, Se extrajeron los datos del portal expansión y se tomó como referencia los países con IDH entre 0,69 y 0,78; en la Tabla 4-1, se muestra la clasificación y cantidad de naciones por continente.

Tabla 4-1: Número de países en vía de desarrollo a partir de índice de desarrollo Humano.

Continente	Naciones IDH	Porcentaje países seleccionados
AMÉRICA	19	37%
ASIA	17	33%
EUROPA	4	8%
ÁFRICA	7	14%
OCEANÍA	4	8%
Cuba, Irán, Sri Lanka, Bosnia y Herzegovina, Granada, San Cristóbal y Nieves, México, Ucrania, Antigua y Barbuda, Perú, Tailandia, Armenia, Macedonia del Norte, Colombia, Brasil, China, Ecuador, Santa Lucía, Azerbaiyán, República Dominicana, Moldavia, Argelia, Líbano, Fiyi, Dominica, Maldivas, Túnez, Surinam, San Vicente y las Granadinas, Mongolia, Botsuana, Jamaica, Jordania, Paraguay, Tonga, Libia, Uzbekistán, Bolivia, Indonesia, Filipinas, Belice, Turkmenistán, Samoa, Venezuela, Sudáfrica, Estado de Palestina, Egipto, Islas Marshall, Vietnam, Gabón, Kirguistán		

Fuente: Elaboración propia basada en el índice de desarrollo humano (IDH) propuesto por las naciones unidas.

Nivel de Ingreso. Se extrajeron los datos del banco mundial y se tomó como referencia los países con un nivel de ingreso medio bajo y medio alto, en la Tabla 4-2, se muestra la clasificación y cantidad de naciones por continente.

Tabla 4-2: Número de países con ingreso medio alto y medio bajo.

Continente	Naciones	Ingreso Medio -Bajo	Ingreso Medio - Alto	Porcentaje del continente		Porcentaje países seleccionados		
				Medio - Bajo	Medio - Alto	Medio-Bajo	Medio-Alto	Total
AMÉRICA	25	6	19	24%	76%	11%	35%	23%
ASIA	33	19	14	58%	42%	35%	25%	30%
EUROPA	11	1	10	9%	91%	2%	18%	10%
ÁFRICA	30	23	7	77%	23%	42%	13%	27%
OCEANÍA	11	6	5	55%	45%	11%	9%	10%

ANGOLA, ARGELIA, BANGLADESH, BELICE, BENIN, BHUTÁN, BOLIVIA, CABO VERDE, CAMBOYA, CAMERÚN, COMORAS CONGO, REPÚBLICA COSTA DE MARFIL, DJIBOUTI, EGIPTO, EL SALVADOR, ESWATINI, FILIPINAS GHANA, HAITÍ, HONDURAS, INDIA, INDONESIA, IRÁN, REPÚBLICA ISLÁMICA, ISLAS SALOMÓN, KENYA, KIRGUISTÁN, KIRIBATI, LESOTHO, MARRUECOS, MAURITANIA, MICRONESIA, MONGOLIA, MYANMAR, NEPAL, NICARAGUA, NIGERIA ,PAKISTÁN, PAPUA, NUEVA, GUINEA, REPÚBLICA, DEMOCRÁTICA, POPULAR, LAO, RIBERA OCCIDENTAL Y GAZA, SAMOA, SANTO TOMÉ Y PRÍNCIPE SENEGAL, SRI, LANKA, TANZANÍA, TAYIKISTÁN, TIMOR-LESTETÚNEZ, UCRANIA UZBEKISTÁN VANUATU VIETNAM ZAMBIA ZIMBABWE ALBANIA ARGENTINA ARMENIA AZERBAIYÁN, BELARÚ,S BOSNIA Y HERZEGOVINA, BOTSWANA, BRASIL, BULGARIA, CHINA, COLOMBIA, COSTA RICA, CUBA, DOMINICA, ECUADOR, FEDERACIÓN DE RUSIA, FIJI, GABÓN, GEORGIA, GRANADA ,GUATEMALA, GUINEA, ECUATORIAL, GUYANA, IRAQ, ISLAS, MARSHALL, JAMAICA, JORDANIA, KAZAJSTÁN, KOSOVO, LIBIA, LÍBANO, MACEDONIA DEL NORTE, MALASIA, MALDIVAS, MAURICIO, MONTENEGRO, MÉXICO, NAMIBIA, PANAMÁ, PARAGUAY, PERÚ, REPÚBLICA DOMINICANA, REPÚBLICA DE MOLDOVA, RUMANIA, SAMOA AMERICANA, SAN VICENTE Y LAS GRANADINAS, SANTA LUCÍA, SERBIA, SUDÁFRICA, SURINAME, TAILANDIA, TONGA, TURKMENISTÁN, TURQUÍA, TUVALU

Fuente: Elaboración propia basada en el nivel de ingreso propuesto por el banco Mundial.

Índice de Competitividad Global, Se extrajeron los datos del portal expansión y se tomó como referencia los países con ICG entre 60 y 72, en la Tabla 4-3, se muestra la clasificación y cantidad de naciones por continente.

Tabla 4-3: Número de países en vía de desarrollo a partir de índice de competitividad global.

Continente	Naciones ICG	Porcentaje de países seleccionados
AMÉRICA	8	17%
ASIA	18	39%
EUROPA	17	37%
ÁFRICA	3	7%
OCEANÍA	0	0%
Italia, Estonia, República Checa, Chile, Portugal, Eslovenia, Arabia Saudita, Polonia, Malta, Lituania, Tailandia, Letonia, Eslovaquia, Rusia, Chipre, Baréin, Kuwait, Hungría, México, Bulgaria, Indonesia, Rumanía, Mauricio, Omán, Uruguay, Kazajistán, Brunéi, Colombia, Azerbaiyán, Grecia, Sudáfrica, Turquía, Costa Rica, Croacia, Filipinas, Perú, Panamá, Vietnam, India, Armenia, Jordania, Brasil, Serbia, Montenegro, Georgia, Marruecos		

Fuente: Elaboración propia basada en el índice de competitividad global (ICG) propuesto por el foro de competitividad mundial.

Tabla 4-4: Número de países con orografía montañosa.

Continente	Naciones orografía montañosa	Porcentaje países seleccionados
AMÉRICA	15	23%
ASIA	26	39%
EUROPA	6	9%
ÁFRICA	17	26%
OCEANÍA	2	3%
Nepal, China, Pakistán, India, Bután, Tayikistán, Afganistán, Kirguistán, Kazajistán, Argentina, Chile, Perú, Bolivia, Ecuador, Estados Unidos, Canadá, Tanzania, Birmania, Colombia, Rusia, México, Irán, Kenia, Georgia, Turquía, Uganda, República Democrática del Congo, Venezuela, Indonesia, Francia, Italia, Uzbekistán, Suiza, Etiopía, Ruanda, Papúa Nueva Guinea, Azerbaiyán, Mongolia, Guatemala, Marruecos, Malasia, Armenia, Camerún, Costa Rica, Austria, Japón, Nueva Zelanda, España, Yemen, Irak, Lesoto, Panamá, Sudáfrica, Chad, Sudán del Sur, Vietnam, Turkmenistán, República Dominicana, Líbano, Sudán, Eritrea, Guinea Ecuatorial, Argelia, Malawi, Arabia Saudita Brasil		

Fuente: Elaboración propia basada en la altura máxima que tiene cada país.

Para establecer los países que cumplen cada uno de los índices mostrados anteriormente, se cruzaron todos los países con sus respectivos datos y se obtuvo la siguiente lista de países en vía de desarrollo y con orografía montañosa.

Tabla 4-5: Número de países en vía de desarrollo y con orografía montañosa.

Continente	Naciones mundo	Países en desarrollo - montañoso	Porcentaje del continente	Porcentaje países seleccionados
AMÉRICA	35	18	51%	28%
ASIA	49	26	53%	40%
EUROPA	46	9	20%	14%
ÁFRICA	54	11	20%	17%
OCEANÍA	14	1	7%	2%

Fuente: Elaboración propia basada en el IDH, ICG, ingreso y orografía montañosa.

Tabla 4-6: Países en vía de desarrollo y con orografía Montañosa.

CONTINENTE	NACIONES
AMÉRICA	El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Costa Rica, Jamaica, República Dominicana, Argentina, Bolivia, Ecuador, Surinam, Venezuela, Brasil, Chile, Colombia, Perú
ASIA	India, Kazajistán, Kirguistán, Tayikistán, Turkmenistán, Uzbekistán, Mongolia, Rusia, Armenia, Azerbaiyán, Georgia, Iraq, Jordania, Líbano, Omán, Brunéi, Filipinas, Indonesia, Malasia, República Democrática popular de Lao, Tailandia, Vietnam, Bhután, Irán, Pakistán, Turquía
EUROPA	Rumanía, Bulgaria, Ucrania, Albania, Bosnia y Herzegovina, Croacia, Macedonia del Norte, Montenegro
ÁFRICA	Gabón, Guinea Ecuatorial, Argelia, Egipto, Marruecos, Túnez, Ghana, Kenya, Botswana, Mauricio, Sudáfrica
OCEANÍA	Fiyi

Fuente: Elaboración propia basada en el IDH, ICG, ingreso y orografía montañosa.

Continuando con lo anterior y para establecer el sistema de transporte de pasajeros en ciudades de países en vía de desarrollo, esta investigación se apoya en el modelo matemático propuesto por Basnak et al. (2020) (calibrado a partir de 400 ciudades americanas) en el cual clasifica un sistema de transporte a partir de un valor numérico denominado "Puntaje Urbano" (ver ecuación (5) el cual tiene en cuenta factores económicos, urbanos, poblacionales, morfológicos - geográficos y del transporte (ver capítulos 3.6.1, 3.6.2, 3.6.3 y 3.9).

Este modelo puede ser utilizado para cualquier ciudad, pero para esta investigación se limita a los territorios que estén en vía de desarrollo; hay que destacar que el modelo de clasificación representa los sistemas actuales de las ciudades, lo que no necesariamente debe coincidir con los modos que debería tener, no obstante, es un indicador que se aproxima a la identificación del máximo sistema de transporte al cual puede acceder una ciudad.

Además, para esta investigación se deja fija la variable orografía y se varían las condiciones económicas de la región, ya que, la valoración del tiempo depende del nivel de ingreso de cada sector; mientras que la orografía de un terreno influye más en la selección de la tecnología de un modo y la disposición de un usuario para acceder al sistema de transporte debido a altas pendientes (en altas pendientes los usuarios disminuyen su velocidad de caminata y por ende los tiempos de accesibilidad aumentan); la tecnología entendida en esta investigación como el mecanismo para operar el modo de transporte, por ejemplo, tipo de rodamiento (neumático o rieles), tipo de tracción (combustión, eléctrico o híbrido), etc.

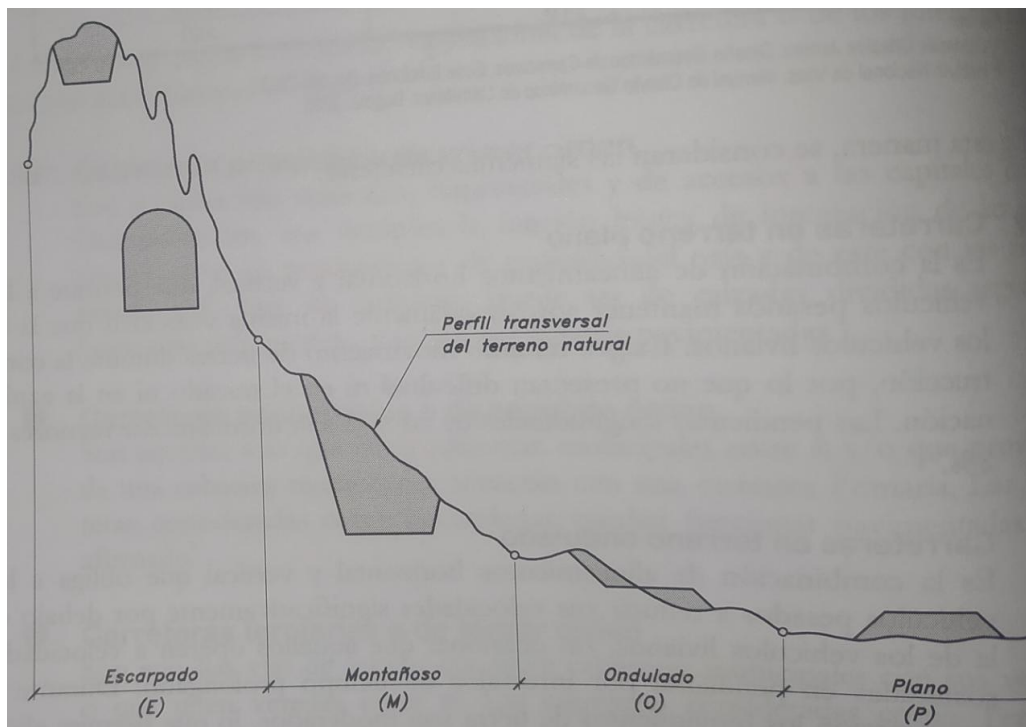
Con el fin de establecer un valor fijo que represente la pendiente de una orografía montañosa, se buscó bibliografía que midiera las pendientes transversales de un terreno, de lo encontrado se optó por revisar los manuales de diseño geométrico de carreteras los cuales establecen criterios de pendientes transversales y longitudinales, la primera tiene que ver con el terreno y la segunda con la carretera.

La orografía determinada por Basnak et al. (2020, p. 5) fue calculada a partir de las pendientes de las calles de las ciudades mediante una API (Application Programming Interfaces) de Google, lo que no necesariamente coincide con el relieve de los países; dado que no se cuenta con acceso a este tipo de información y para tener sincronía con la ecuación de Basnak et al. (2020), propone el supuesto de que las pendientes de las calles de las zonas urbanas de ciudades coinciden con la orografía, el valor de pendiente se construyó a partir de los manuales de diseño geométrico de carreteras de países del continente americano (compatibilidad de condiciones con las 400 ciudades analizadas por (Basnak et al., 2020) descritos en la Tabla 4-6, los cuales tienen características de orografía montañosa y están en vía de desarrollo, además, el valor se ajustó con los parámetros de construcción urbana de la ciudad de referencia Medellín (presenta orografía

mixta de: alta pendiente, media pendiente y baja pendiente, además de combinación de diferentes modos de transporte como tren urbano pesado, tranvía y bus rápido).

Para establecer el criterio de clasificación para una orografía determinada en zona rural, se tomó como input o valor de entrada la pendiente transversal del terreno (ver Figura 4-2). Una forma de delimitar los valores de pendientes predominantes es a través de los manuales de diseño geométricos de carreteras (ver Tabla 4-7) que clasifican un terreno en función de la orografía predominante de forma cualitativa y/o cuantitativa.

Figura 4-2: Perfil transversal del terreno Natural.



Fuente: Cárdenas (2013). Diseño Geométrico de carreteras, 2ª Edición, Colombia.

Tabla 4-7: Clasificación del terreno según la orografía predominante, países en vía de desarrollo, continente América.

Documento	Valor, pendiente transversal al eje de la vía
G.O. Ruhle. (1967). Diseño Geométrico de caminos rurales. Dirección Nacional de Vialidad. Dirección General de Estudios y Proyectos Trazado y Obras básicas. Argentina.	<p><i>Llano:</i> Pendientes reducidas. <i>Ondulado:</i> Pendientes moderadas. <i>Montañoso:</i> Pendientes fuertes.</p>
Carciente. (1980). Carreteras estudio y proyecto. Ediciones Vega s.r.l. Venezuela.	<p><i>Plano:</i> Pocas restricciones naturales o artificiales. <i>Ondulado:</i> Cerros bajos. <i>Montañoso:</i> Cubierto de cerros y cumbres.</p>
Mejía (1982). Criterios básicos para el diseño geométrico de carreteras, Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones - MOPC, República Dominicana.	<p><i>Llano:</i> < 5% <i>Ondulado:</i> 5% - 15% <i>Montañoso:</i> >15%</p>
Ministério dos Transportes. (1999). Projeto Geométrico de Estradas Rurais – DNIT. Manual de Projeto Geométrico. Brasil.	<p>Cota por kilómetro recorrido <i>Plano:</i> <10 m/Km <i>Ondulado:</i> 10 a 40 m/Km <i>Montañoso:</i> > 40 m/Km</p>
Administradora Boliviana de Carreteras – ABC. (2007). Manual de Diseño Geométrico, Manual de Carreteras Vol. 1. Bolivia.	<p><i>Llano:</i> Amplias extensiones libres de obstáculos naturales, ondulaciones moderadas. <i>Ondulado:</i> Frecuentes cambios de cota, que, si bien nos demasiado importantes en términos absolutos, son repetitivos. <i>Montañoso:</i> Constituido por cordones montañosos o “cuestas” (puntillas, laderas de fuerte inclinación transversal, quebradas profundas, etc.)</p>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-7: (Continuación)

Documento	Valor, pendiente transversal al eje de la vía
Instituto Nacional de Vías Colombia. (2008). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras.	<i>Plano:</i> 0% - 6% <i>Ondulado:</i> 6% - 13% <i>Montañoso:</i> 13% - 40% <i>Escarpado:</i> > 40%
Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras. (2011). 3ª edición. Países (Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá).	<i>Llano o Plano:</i> < 5% <i>Ondulado:</i> 5% - 15% <i>Montañoso:</i> 15% - 30%
Barbosa et al. (2013). Mapeamento de adequação de uso das terras através da técnica de análise de multicritério em ambiente SIG: estudo de caso do município de conde - PB, Brasil. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 22. Colombia.	<i>Plano:</i> 0% - 3% <i>Suave Ondulado:</i> 3% - 8% <i>Moderadamente Ondulado:</i> 8% - 13% <i>Ondulado:</i> 13% - 20% <i>Fuertemente Ondulado:</i> 20% - 45% <i>Montañoso:</i> > 45%
Cárdenas. (2013). Diseño Geométrico de carreteras. 2ª Edición. Colombia.	<i>Plano:</i> 0% - 5% <i>Ondulado:</i> 5% - 25% <i>Montañoso:</i> 25% - 75% <i>Escarpado:</i> > 75%
Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Subsecretaría de Infraestructura del Transporte. (2013). Normas para estudios y diseños viales, Vol. 2 – Libro A. Ecuador.	<i>Plano:</i> <5% <i>Ondulado:</i> 6% - 12% <i>Montañoso:</i> 13% - 40% <i>Escarpado:</i> > 40%
Ministério de Obras Públicas. Dirección de vialidad. (2018). Manual de Carreteras. Vol. 3. Instrucciones y criterios de diseño. Chile.	<i>Plano:</i> Ondulaciones Moderadas. <i>Ondulado:</i> Frecuente cambios de cota (Medio – Franco - Fuerte). <i>Montañoso:</i> Cordones montañosos o “cuestas”, desniveles considerables (puntillas, laderas de fuerte inclinación transversal, quebradas profundas, etc.)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-7: (Continuación)

Documento	Valor, pendiente transversal al eje de la vía
American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. (2018). A Policy on Geometric Design of Highways and streets, 7 edition. Estados Unidos.	<p><i>Llano:</i> Sin restricciones naturales.</p> <p><i>Ondulado:</i> Las pendientes naturales se elevan y descienden constantemente.</p> <p><i>Montañoso:</i> Los cambios en las pendientes son abruptos.</p>
Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de servicios técnicos. (2018). Manual de Proyecto Geométrico de carreteras. México.	<p><i>Plano:</i> Perfil con pendientes transversales escasa o nula.</p> <p><i>Lomerío:</i> Perfil presenta en sucesión cimas y depresiones de cierta magnitud, con pendientes no mayores a 25°</p> <p><i>Montañoso:</i> Perfil caracterizado por accidentes topográficos notables, pendientes mayores a 25°.</p>
Dirección general de caminos y ferrocarriles. (2018). Manual de Carreteras. Perú.	<p><i>Plano:</i> <10%</p> <p><i>Accidentado:</i> 11% - 50%</p> <p><i>Montañoso:</i> 51% - 100%</p> <p><i>Escarpado:</i> > 100%</p>

Fuente: Elaboración propia

De las referencias mencionadas anteriormente se identificó que el tipo de terreno según la orografía predominante en zonas rurales se clasifica en plano, ondulado, montañoso y escarpado. En la Tabla 4-8 se evidencian los valores porcentuales del perfil de elevación para clasificar un terreno.

Tabla 4-8: Clasificación de la orografía.

Tipo de Orografía	Pendiente (%)	Característica
Plano o Llano	$\leq 8,0$	Perfil con amplias extensiones libres de obstáculos naturales o artificiales y las pendientes naturales son leves; valles.
Ondulado o Accidentado o Lomerío	8,1 – 20,0	Perfil presenta sucesión de cimas y depresiones y las pendientes naturales se elevan y descienden constantemente; cerros.
Montañoso	20,1 – 50,0	Perfil caracterizado por accidentes topográficos notables y los cambios de las pendientes son fuertes; cordones montañosos.
Escarpado	$>50,1$	Perfil caracterizado por cambio de pendientes abruptas; puntillas, laderas de fuerte inclinación y divisoria de aguas de las cuestas.

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 4-8 se determinó que un terreno montañoso tiene una pendiente del perfil de elevación entre 20% y 50% para zonas rurales, además la orografía es caracterizada por accidentes topográficos notables y los cambios de las pendientes son fuertes, este tipo de terreno se da en los cordones montañosos.

En zonas urbanas se tomará como referencia la ciudad de Medellín ya que presenta orografía mixta de: alta pendiente, media pendiente y baja pendiente (clasificación usada en los componentes del subsistema de movilidad) y combinación de diferentes modos de transporte como tren urbano pesado, tranvía y bus rápido. La (Alcaldía de Medellín, 2017) establece como “*pendiente longitudinal máxima permitida para vías vehiculares nuevas del sistema vial donde no se presente transporte público un valor del 16%, en las vías nuevas con transporte público 12% y en el suelo rural para vías primarias, secundarias y terciarias municipales nuevas tendrán una pendiente máxima del 25%*” (p. 142)

A partir de la revisión hecha tanto de manuales de diseño geométrico vial y del manual de espacio público de Medellín, se establece para esta investigación el rango máximo del perfil de elevación para terrenos montañosos en zonas urbanas de 16% y para zonas rurales de 25%.

Con el fin de establecer sí la ciudad puede acceder a un sistema de pasajeros de mediana capacidad tipo BRT, LRT o TRAM, se aplica la fórmula de puntaje urbano con los supuestos expuestos anteriormente de países en vía de desarrollo (ver Tabla 4-6) y con pendiente promedio de 16% zonas urbanas y 25% zonas rurales; las ciudades que no califiquen en las categorías III, IV y V (ver Tabla 3-5), será conveniente revisar otro modo de transporte que puedan suplir las necesidades de movilidad, por ejemplo: si están por debajo de la categoría III, ósea la categoría I y II, optar por taxi y/o busetas de transporte público colectivo urbano.

4.2. Selección de variables de decisión

Una vez se establezca el máximo sistema de transporte de pasajeros al cual puede acceder una comunidad aplicando la ecuación de puntaje urbano, que para esta investigación debe encontrarse en la categoría III o IV o V (ver Tabla 3-5), se debe proceder a indicar qué modo de transporte es conveniente para su posible implementación. El puntaje urbano revela que en las categorías límites III y IV se puede optar por 3 alternativas el BRT eléctrico, LRT y TRAM, estos sistemas como red de transporte de pasajeros no son rivales, sino más bien complementarios, no obstante, para una línea de transporte público se debe elegir cuál puede tener mayor viabilidad para su implementación.

Del estado del arte y los antecedentes expuestos en los capítulos 2 y 3 se identificaron 4 variables que tienen la bondad de ser empleadas con información de tipo secundaria y que son sensibles al momento de implementar cualquiera de los modos expuestos en el acápite anterior, por ello, estas variables tienen relevancia al momento de seleccionar un sistema de transporte a nivel ex – ante. Adicionalmente, los datos que se necesitan para calcular o describir las variables se pueden extraer de entidades territoriales de la ciudad de acceso al público o de herramientas informática de libre acceso, es decir, información secundaria, lo cual es un punto a favor, ya que, esta investigación se plantea en un nivel de prefactibilidad; cabe mencionar que con la recolección de información primaria los análisis son más exactos.

A continuación, se exponen las variables seleccionadas que tienen incidencia en la implementación de un sistema de transporte a nivel ex ante en la sub etapa de prefactibilidad:

- Densidad en transporte de pasajeros.
- Escala de la ciudad en transporte de pasajeros.
- Forma de la ruta en transporte de pasajeros.
- Usos del suelo en transporte de pasajeros.

4.2.1. Densidad en transporte de pasajeros

De lo tratado en el apartado 3.8 en cuanto a densidad y estilo de vida se tiene:

- a) Los estilos de vida de una población dependen de la ubicación de su residencia en un territorio (superficie), lo cual, genera diferentes densificaciones poblacionales y conexiones entre ellas a lo largo de un territorio.
- b) La satisfacción de un viaje depende del tiempo de viaje y este varía en función de las distancias de viaje de cada conexión y la velocidad del modo de transporte.
- c) La eficiencia de un modo de transporte varía según las distancias de viaje y la densidad poblacional.

Con el fin de establecer un criterio que agrupe las consideraciones anteriores y describa la variable densidad en transporte de pasajeros, el autor se apoya en el indicador denominado “DENSIDAD POTENCIAL DE LA DEMANDA” (ver ecuación (4) propuesto por Basnak et al. (2021).

Dado que para esta metodología se evalúa el escenario donde se tiene aproximación del sector por donde se proyecta el tramo, se puede estimar la longitud del corredor de transporte de pasajeros y por ende la fórmula queda reescrita de la siguiente forma:

$$DPD_A \left(\frac{\text{Viajes}}{\text{día} * \text{Km}} \right) = \frac{q_c \left(\frac{\text{Viajes}}{\text{día}} \right)}{L_c (\text{Km})} \quad (6)$$

Donde:

- DPD_A : Densidad potencial de la demanda ajustada
- q_c : Demanda del corredor
- L_c : Longitud del corredor

La evidencia estadística sobre el indicador de densidad potencial de la demanda – DPD (ver ecuación (4) es insuficiente para definir un umbral mínimo en términos de viajes/km/día, este indicador se implementó para el caso estudio Colombiano con el objetivo de establecer el máximo sistema de transporte al cual pueden acceder ciudades intermedias (100.000 y 1.000.000 de habitantes) colombianas, de este estudio, se encontró que las políticas existentes no reflejan rangos claros sobre la cantidad de viajes mínimos que deben generarse en una ciudad para que un sistema de transporte en países en vía de desarrollo sea rentable. Basnak et al. (2021, p. 6) consideró a Pereira como ciudad de referencia cuyo sistema BRT tiene una demanda adecuada para justificar su operación considerando los costos sociales totales, un límite inferior de 30.000 viajes/km al día es una primera aproximación razonable.

El valor de referencia de 30.000 viajes/km/día se construyó sólo para un sistema BRT colombiano en su versión original teniendo en cuenta la cantidad de viajes totales de ciudad producidos en un área urbana, por lo que, debería ser recalibrado para incluir sistemas de transporte de ciudades ubicadas en otros países, este vacío puede dar origen a futuras investigaciones de interés con el fin de mejorar las evidencias estadísticas y evaluar otros sistemas de transporte de pasajeros. Es por ello, que se ajusta el valor de referencia para ser utilizado junto con la densidad potencial de la demanda ajustada – DPD_A (ver ecuación (6); teniendo en cuenta que la fluctuación de la demanda de un corredor de transporte público con respecto a la demanda de viajes al día de la ciudad oscila en un 10% (valor conservador), la demanda de 30.000 viajes/día/km de la ciudad de referencia correspondería a 3.000 viajes/día/km para un corredor de transporte público tipo BRT.

Además, para suplir la falta de información referente a rangos aproximados para diferentes modos de transporte en ciudades, se toma como punto de partida el dato teórico ajustado de 3.000 viajes/km/día para un corredor tipo BRT y la información de capacidad de sistemas BRT, LRT y TRAM descritas por (Vuchic, 2007, p. 45). Cabe destacar, que el LRT es más caro y rápido que el TRAM por lo que debería justificarse ante una mayor demanda de pasajeros o mayores distancias de viaje; a partir de lo descrito anteriormente, en la Tabla 4-9 se proponen rangos conservadores para ser usados junto con la ecuación (6).

Tabla 4-9: Rangos de Densidad Máxima Potencial para considerar la implementación de un sistema de transporte de pasajeros de mediana capacidad.

Sistema de Transporte	Densidad Máxima Potencial (Viajes/(Km*día))
<i>Bus Rapid Transit – Bus rápido</i> - BRT	2500 – 4500
<i>Tranvía</i> - TRAM	3000 – 5000
<i>Light Rail Transit – Tren ligero</i> - LRT	3500 – 5500

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Escala de la ciudad en transporte de pasajeros

El desarrollo urbano está muy influenciado por las condiciones físicas (clima, orografía, etc.) y las características socioeconómicas e históricas de cada área (Marshall, 2005 citado por Braulio-Gonzalo et al., 2020, p. 5), de la combinación de estas características se pueden obtener 4 clasificaciones típicas de ciudades urbanas: Irregular, Radial, Lineal y Cuadrícula, explicadas en el capítulo 3.6.2.

Las clasificaciones urbanas están asociadas a una forma, éstas representan las huellas culturales, sociales, económicas, de transporte y políticas a lo largo de una línea histórica propia para cada población, ninguna forma es mejor que otra entre sí, cada forma representa una ciudad, la cual se está reorganizando constantemente partir de su expansión socio-económica y territorial.

Además, los sistemas de transporte se desempeñan mejor en una u otra forma, esta se puede estudiar bajo diferentes enfoques, uno de ellos es la métrica de forma espacial (Huang-Lu y Sellers, 2007 citado por Basnak et al., 2020, p. 4) a partir de indicadores simples y generalizados que están disponibles para cualquier área urbana, los cuales son:

- **Compacidad (Co):** es un factor de forma estandarizada (ver ecuación (1) propuesta por (Jiang, 2007 citado por Basnak et al., 2020, p. 4), mide en términos prácticos qué tan similar es una forma a un círculo, el indicador toma valores entre 0 y 1 y cuanto menor es la compacidad mayor es la distancia media para áreas de igual superficie.

Se espera que las ciudades más compactas (donde la forma urbana favorece distancias de viaje más cortas y una mayor dispersión de orígenes y destinos) tengan corredores de menor capacidad en sus redes de transporte público, mientras que en ciudades menos compactas los viajes tienden a ser más largos y con mayor concentración espacial, lo que favorece la adopción de modos más eficientes en términos de capacidad y velocidad como metro o bus rápido.

Los rangos de compacidad estimados a partir de los datos calculados por Basnak et al. (2020, p. 7), para las 400 ciudades de América, son:

- $Co \leq 0,35$ Baja
- $Co > 0,35$ Alta

- **Esbeltez (Es):** este indicador propuesto por (Baker y Cai, 1992 citado por Basnak et al., 2020, p. 4) identifica la relación entre los semiejes mayor y menor de una forma dada (ver ecuación (2). El efecto de este indicador debe ser similar al de la compacidad, en general, las ciudades más esbeltas tienden a ser menos compactas, por lo que una esbeltez creciente debe estar relacionada con la mayor complejidad de los sistemas de transporte, así como con otros factores.

Los rangos de esbeltez estimados a partir de los datos calculados por Basnak et al. (2020, p. 7), para las 400 ciudades de América, son:

- $Es \leq 3,0$ Baja
- $Es > 3,0$ Alta




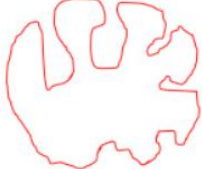
De las métricas mencionadas, a modo de resumen se indica que:

- a) Ciudades con compacidad baja (dispersas) optan por sistemas de transporte con alta capacidad y alta velocidad que para esta investigación se podría referir al LRT y ciudades con compacidad alta (compactas) optan por sistemas de transporte con menor capacidad y menor velocidad que para esta investigación sería el BRT. Se considera como valores conservadores:
Compacidad $\leq 0,35$ Baja y Compacidad $> 0,35$ Alta.

- b) Ciudades con Esbeltez baja son compactas y ciudades con esbeltez alta son dispersas. Se consideran como valores conservadores:
Esbeltez ≤ 3.0 Baja y Esbeltez > 3.0 Alta.

Existen diferentes combinaciones de esbeltez y compacidad que infieren diferentes formas y a las cuales pueden asociarse un tipo de ciudad (ver Figura 3-6); en la Tabla 4-10 se muestra las combinaciones genéricas asociadas a la forma de la ciudad y la clase de ciudad, las cuales pueden repercutir en el desempeño de un sistema de transporte.

Tabla 4-10: Clasificación genérica de la escala de la ciudad.

Esbeltez	Baja	Alta	Alta	Baja
Compacidad	Alta	Alta	Baja	Baja
Forma genérica				
Clase	Cuadrícula, Radial	Lineal	Lineal - Irregular	Irregular

Fuente: Elaboración propia a partir de Basnak et al. (2020). Technology choices in public transport planning: A classification framework.

4.2.3. Forma de la ruta en transporte de pasajeros

Los trazados de las rutas sobre la geografía de una ciudad no siempre responden a las necesidades de viaje de los usuarios, por lo cual, los usuarios realizan viajes en rutas que no son óptimas ni naturales (Moreno, 2020, p. 4).

Las rutas que integran la red de transporte del área urbana de una ciudad por lo general son cinco: radiales, diametrales, tangenciales, circulares y con lazo (ver características capítulo 3.6.4), con apreciación del número de pasajeros a bordo de acuerdo con la distancia entre el centro de actividades y la periferia (Arboleda, 2020, p. 231).

Además, la elección de un modo para una ruta de transporte de pasajeros está relacionada con estudios económicos de factibilidad, estudios geométricos de la red vial (Moreno, 2020, p. 7) y consideraciones sobre los impactos que inducen en los patrones del uso del suelo, las metas y necesidades sociales que la comunidad tienen establecidas (Arboleda, 2020, p. 233).

Molinero y Sanchez (1996, p. 215) en su libro *“Transporte público: planeación, diseño operación y administración”*, describe la estructura física de una ruta, se enuncia que a medida las rutas o líneas de transporte público se acercan al centro histórico, están convergen en una sola línea troncal.

De lo anterior se establecen dos tipos de rutas conocidas como: alimentadoras y ramales, las primeras, cubren áreas de interés y transportan al pasajero a una estación donde puedan realizar transbordo de un modo con igual o mayor capacidad, las segundas circulan por el tramo troncal sin necesidad de que los usuarios hagan trasbordos; generalmente se acostumbra el uso de ramales en corredores que presentan altos volúmenes de tráfico, por otra parte, es deseable la conexión de la ruta troncal y corredores donde los volúmenes de pasajeros son bajos con rutas alimentadoras. Para esta investigación la evaluación se desarrollará para el tipo de ruta troncal.

Tipología del corredor

La tipología o estructura física de un corredor de transporte público de pasajeros puede ser agrupada por tipos que dependen: de la forma urbana de la ciudad (densidades poblacionales, patrones de uso del suelo, entre otros aspectos), red vial con que cuenta la ciudad, la topografía del espacio urbano y otros factores adicionales. La diferencia principal se presenta entre dos tipos de redes de transporte, las redes con medios de transporte que operan en corredores con derechos de vía confinado o segregado y aquellas redes que operan en corredores con derechos de vía mixtos. (Molinero y Sánchez, 1996, p. 216) (ver Tabla 4-11).

Tabla 4-11: Diferencias entre corredores mixtos y segregados.

Corredores con medios de transporte en derechos de vía mixtos	Corredores con medios de transporte en derechos de vía segregados
Sigue el trazado vial	Alineamiento independiente
La distribución y recolección de usuarios es un elemento primordial	Operación de líneas para cubrir mayores distancias
Paradas más cercanas, lo que propicia velocidades menores	Paradas más lejanas, lo que propicia velocidades mayores
Trabajo bajo control manual	Trabaja bajo control por señal
Mayor frecuencia	Menor frecuencia
Redes más densas	Redes menos densas
Menor imagen	Mayor imagen
Sistema BRT y TRAM	Sistema LRT

Fuente: Elaboración propia a partir de cuadro 5.1, Molinero y Sánchez (1996). Transporte público: planeación, diseño, operación y administración. Universidad Autónoma de Estado de México.

De los acápites anteriores se concluye que:

- a) Las rutas que integran la red de transporte del área urbana de una ciudad por lo general son cinco: radiales, diametrales, tangenciales, circulares y con lazo.
- b) El tipo de estructura de una ruta de transporte influyen en la selección de un sistema de transporte de pasajeros y en las necesidades de viaje.
- c) Cualquier sistema de transporte puede operar cualquier ruta de transporte público de pasajeros, no obstante, un sistema puede ser más competente que otro para cada tipo de ruta.

Con el fin de establecer como la forma de las rutas de transporte público de pasajeros influyen en la selección de un sistema de transporte de pasajeros tipo BRT, LRT o TRAM; se clasificó el tipo de sistema de transporte idóneo para cada tipo ruta a partir de la evaluación multicriterio AHP (en el Anexo A se presentan los cálculos de la evaluación AHP siguiendo la misma secuencia descrita en el capítulo 4.3, en la Tabla 4-12 se presenta el resumen de pesos y la prelación del modo respecto del tipo de ruta de transporte), teniendo en cuenta: los atributos que ofrece la ruta (ver capítulo 3.6.4, se excluyó la circular y con lazo debido a que es una combinación de dos tipologías), las bondades que ofrece el sistema (ver capítulo 3.3 y capítulo 3.4) y la estructura física del corredor (ver Tabla 4-11); estas características se toman a partir de los supuestos expuestas anteriormente.

Tabla 4-12: Pesos de metodología AHP para establecer el sistema idóneo dependiendo del tipo de ruta de transporte.

Ruta/Modo	Circular	Radial	Diametral	Tangencial
BRT	55	40	20	20
TRAM	24	40	31	49
LRT	21	20	49	31
SUMA	100	100	100	100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-13: Tipo de sistema de transporte según la tipología de ruta.

Circular o Semicircular	Radial	Diametral	Tangencial
Rutas conectoras con las radiales.	Ciudades pequeñas y medias, además promueve la integración con otros modos de transporte.	La ruta pasa por el centro y conecta dos extremos de la ciudad. La ciudad está en crecimiento.	Es tipo de ruta solo es recomendable para las grandes ciudades.
Se eliminan terminales.	Viajes canalizados al centro de actividades o centro histórico.	Evita los terminales en los centros históricos o de actividades.	Son rutas que pasan a un lado del centro de actividades o centro histórico
Problemas operativos de no poder recuperar tiempos perdidos.	El servicio se encuentre limitado a ciertas zonas y los terminales se concentran en las zonas de mayor densidad.	La longitud de la ruta puede ocasionar demoras y cargas desbalanceadas.	Al ser rutas que no pasan por el centro de actividades la demanda puede ser menor.
Que vaya desde una localidad y haga un recorrido circular o sea parte de una red de corredores que necesiten estar conectados		Disminuye los tiempos de viaje y busca minimizar el número de transbordos, por lo que se precisa que existan rutas que conecten directamente los principales pares Origen - Destino.	
Sistema idóneo bus rápido - BRT	Sistema idóneo bus rápido - BRT y/o Tranvía - TRAM	Sistema idóneo tren ligero - LRT	Sistema idóneo Tranvía - TRAM

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Usos del suelo en transporte de pasajeros

La relación entre el uso del suelo y el desarrollo del transporte público es bidireccional, como lo han demostrado muchos estudios el uso del suelo y el desarrollo de la tierra influyen en el progreso del transporte público, a menudo actuando como catalizador por ejemplo: un cierto nivel de desarrollo de la tierra y densidad de población es esencial para el suministro de servicios de transporte (Freilich, 1998; Arrington, 2004; Iv et al., 2007 & Lai y Li, 2009 citados por Zhao et al., 2018, p. 292), debido a que el desarrollo de la tierra es una forma importante de reunir capital de apoyo para la inversión en transporte público (Hong, 1998; Smith; Gihring, 2006; Krabben y Needham, 2011 citados por Zhao et al., 2018, p. 292).

Igualmente, la tierra que rodea las estaciones de transporte público generalmente se desarrolla en fases: 1. el desarrollo temprano puede comenzar antes de que se construya el sistema de transporte público y 2. el desarrollo tardío puede continuar durante algunos años después, por lo tanto, hay impactos antes y después del progreso del transporte en el perfeccionamiento de la tierra, el tiempo entre el desarrollo del transporte y el desarrollo de la tierra que puede causar un desajuste temporal que influye en su integración, además, el entorno construido local también afecta la integración por ejemplo: las áreas de estaciones accesibles para peatones y ciclistas promueven patrones de movilidad y uso del suelo más integrados (Lyu et al., 2016 citado por Zhao et al., 2018, p. 292) y la alta calidad de los servicios de transporte público también son vitales para la integración del transporte terrestre (Vale, 2015 citado por Zhao et al., 2018, p. 292).

Como se mencionó anteriormente y lo expuesto en el capítulo 3.7, el uso del suelo y el transporte tienen una relación bidireccional, entonces, para establecer la selección de un sistema de transporte a partir del uso del suelo, se tuvo en cuenta cuatro aspectos que reflejan la relación entre el suelo y sistema de transporte para esta investigación; estos aspectos se describen a continuación:

4.2.4.1. Requerimientos de la superficie de transporte

La forma urbana y el uso del suelo influyen en el costo del tiempo y la conveniencia de los diferentes modos de transporte (Banister, 2005 & Cervero, 1998 citado por Buehler, 2011 p. 645), la conveniencia de un sistema de transporte para este ítem se determinará a partir del uso del suelo ya que la forma urbana se trató en el capítulo 4.2.4.; para medir la conveniencia del uso del suelo en la elección de un modo, se establecen 3 componentes que describen el uso el suelo en el transporte: patrones de desarrollo espacial, la superficie para infraestructura de transporte y área de servicio de las estaciones.

Los patrones de desarrollo espacial

Los patrones de desarrollo espacial se aproximan a través de la densidad de población (ver capítulo 3.7.1).

- Las áreas densas se caracterizan por ser más compactas, es decir, que el número de habitantes por área se concentran en zonas puntuales y que no estén distribuidas en toda el área (dispersas).
- Los viajes en automóvil tienden a ser más lentos y menos atractivos en áreas compactas, debido a la congestión del tráfico, menos oferta de estacionamiento y mayores costos de estacionamiento (TRB, 2001 & Vuchic, 1999 citado Buehler, 2011, p. 645).
- Las densidades más altas hacen que la provisión de transporte público sea económica (TRB, 2001 & Vuchic, 1999 citado Buehler, 2011, p. 645).

La superficie de infraestructura de transporte

Las personas que prefieren andar en bicicleta, caminar o usar el transporte público pueden mudarse a vecindarios más densos con una mayor mezcla de usos del suelo (Axhausen et al., 2003 & Simma y Axhausen, 2003 citados por Buehler, 2011, p. 645).

Para medir el cubrimiento de la superficie de infraestructura, se toma como referencia el principio de transportar de Balaguera y León (2019). Este principio describe:

“Este principio corresponde al desplazamiento de los usuarios entre diferentes zonas de la ciudad, incentivando el uso del transporte público colectivo. Es importante que el transporte público que se ofrezca a los habitantes de la ciudad, sea accesible y que satisfaga la necesidad de movilidad del usuario mediante una operación confiable y segura, con el fin de que los recorridos de larga distancia (que estén por fuera del rango para ir a pie o en bicicleta) se realicen en estos sistemas de transporte.” (p. 43)

Los autores miden este principio a través de ocho indicadores, pero para esta investigación se tomará el descrito en la Tabla 4-14 que tiene relevancia con la superficie de un sistema de transporte:

Tabla 4-14: Medición de superficie de infraestructura.

Indicador	Detalles	Forma de Medición
<p style="text-align: center;">Cubrimiento rutas de transporte público / kilómetros de red vial</p> <p>Porcentaje de red vial ocupada por las rutas de transporte</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se verifica el corredor principal por el que circulan las rutas de transporte público y sus respectivos accesos para las zonas colindantes a este corredor. - La longitud que cubren las rutas debe ser medida desde el acceso al área analizada hasta el egreso de ésta, no se consideran las conexiones con otras áreas. - Se recomienda realizar la medición para una franja de 250 metros a lado y lado del corredor, que es lo que las personas están dispuestas a caminar y de 200 metros según recomendación de la literatura. Se toma el valor más crítico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Medir el área que cubren las rutas de transporte público en el área. (A) - Medir el área total. (B) - Dividir A entre B, para calcular el cubrimiento de las rutas de transporte público.

Fuente: Elaboración propia a partir de Balaguera y León. (2019). Guía para el desarrollo orientado al transporte sostenible (DOTS) en ciudades Intermedias, Tunja.

Indicador cubrimiento de rutas de transporte público.

- Más de 55% tiene cobertura, es bueno.
- Menos del 55% tiene cobertura, con implicaciones.

Área de servicio de las estaciones

Molinero y Sánchez (1996, p 225) la definen como el área servida por el sistema de transporte público de pasajeros, siendo la unidad de medida el tiempo o la distancia recorrida a pie y que resulta por el usuario tolerable a caminar, este valor puede ser relacionado con un porcentaje de los usuarios que el sistema podría atender; al examinar el área de cobertura del sistema de transporte se debe considerar la extensión de la red, la provisión de medios de acceso a la red y la cobertura para llegar al centro de actividades de la ciudad.

Además, consideran que el área de servicio se divide en dos cuencas, la primera delimitada por la distancia que puede ser recorrida a pie por un usuario en cinco minutos desde cualquier estación o parada y la cuenca secundaria definida como todos aquellos puntos que se encuentran entre cinco y diez minutos desde la estación y los cuales representan una menor captación de usuarios potenciales.

Los umbrales asumidos convencionalmente para caminar y acceder al transporte público de pasajeros son de 400 metros para autobús y 800 metros para ferrocarril (Van Soest et al., 2020, p. 161).

Díez (2021, p. 57) indica que para el tranvía (TRAM) el área de influencia se compone de un radio de circunferencia de 500 metros alrededor de cada estación, esta distancia es el valor promedio que un usuario está dispuesto a caminar para acceder al sistema.

De lo anterior, se establecen los siguientes valores (radio) conservadores como área de servicio de las estaciones de transporte de mediana capacidad: BRT - 400 metros, TRAM - 600 metros y LRT - 800 metros.

Teniendo en cuenta los patrones de desarrollo espacial, la superficie de infraestructura de transporte y el área de servicio que ofrecen las estaciones, el requerimiento de superficie de transporte se define como: El área servida a la población por el sistema de transporte público, generalmente, es la distancia que puede ser recorrida a pie en cinco minutos (radio de 200 metros a 250 metros) desde cualquier estación siendo accesible, confiable y segura, con el fin, de que los recorridos de larga distancia (que estén por fuera del rango para ir a pie o en bicicleta) puedan ser captados y realizados en estos sistemas de transporte.

Para calcular, el requerimiento de superficie de transporte se utiliza la ecuación (7)

$$RST = \frac{A}{B} \quad (7)$$

Donde:

- RST : requerimiento de superficie de transporte
- A : medir el área que cubren las estaciones de la ruta de transporte público. Radio: 400 m BRT, 600 m TRAM y 800 m LRT, sobre la franja de cobertura del corredor.
- B : medir el área total, correspondiente al buffer o franja de cobertura del corredor.

Rangos del requerimiento de la superficie de transporte.

- Más de 55 %, es bueno.
- Menos del 55 %, tiene implicaciones

4.2.4.2. Espacio Público

Hace referencia a la percepción que tiene una persona de la calidad del espacio público que usa para movilizarse, está conformado por inmuebles públicos y elementos arquitectónicos y naturales como, por ejemplo: zonas verdes, parques, plazas y plazoletas.

El espacio público al ser una percepción, se medirá en una escala cualitativa; para establecer el impacto de un sistema de transporte en el espacio público, se tendrá como referencia los comentarios realizados por Díez (2021, p. 143) en una evaluación Ex Post de un sistema tranviario en Medellín – Colombia a partir de datos de encuestas realizadas a la comunidad circundante sobre la línea del tranvía de Ayacucho, de lo cual se enuncia que: *“La percepción de la comunidad frente al espacio público, después de la implementación del tranvía es en general buena, reconocen un impacto positivo, sobre todo en el corredor del tranvía; por otro lado, consideran que sin el tranvía la zona no contaría con un espacio público bueno, sí, se seguían implementando buses”*.

Por lo tanto, los sistemas ferroviarios de transporte de pasajeros urbanos tienen un mayor impacto en el espacio urbano que los sistemas carreteros, esto es debido a que requieren de una mayor inversión en infraestructura lo cual requiere mayores modificaciones en su

entorno circundante (implementación de inmuebles públicos) y, por lo tanto, la mezcla ciudad - transporte es más compacta y habitable, lo cual genera una mejor percepción del ciudadano.

De lo anterior, se clasifica el sistema de transporte según su impacto positivo en el espacio público; adicionalmente se tiene en cuenta los costos que incurren la intervención de inmobiliario, en este punto es importante aclarar que los sistemas ferroviarios segregados inciden en altos costos de implementación urbanística como por ejemplo el LRT, lo cual, no es muy llamativo para los entes gubernamentales, a partir de lo expuesto, se tiene la siguiente clasificación de forma cualitativa de mayor a menor, respecto al impacto positivo del sistema de transporte en el uso del suelo: (1) TRAM, (2) LRT y (3) BRT.

4.2.4.3. Accesibilidad al suelo mediante transporte

La infraestructura de transporte puede ayudar a generar accesibilidad en términos de aliviar las barreras comerciales, proporcionar acceso a sitios industriales abandonados o espacio libres o a nuevas oportunidades de empleo donde el trabajo y / o la tierra han sido subutilizados, pasando a ser tierras recuperadas. La geografía de un área puede dificultar la accesibilidad, en teoría y en la práctica el transporte puede ayudar considerablemente a desbloquear sitios previamente inaccesibles, sin embargo, no hay garantía de que el desarrollo continuara en el tiempo (Eddington, 2006 citado por Knowles y Ferbrache, 2016, p. 430).

Según lo anunciado anteriormente, la accesibilidad del transporte se medirá como el impacto en las superficies abandonadas y nuevas; evitando el TAD² y promoviendo el TOD³, de la siguiente forma:

- Post-uso del suelo, Implementación de oficinas abandonadas, centrales de estacionamientos, etc.
- Pre-uso del suelo, tierra que no ha sido construida.

² TAD (Transportation Oriented to Adjacent Development), el entorno urbano se desarrolla en función del sistema de transporte.

³ TOD (Transportation Oriented to Sustainable Development), el sistema de transporte se desarrolla en función de su entorno urbano.

De lo anterior, no hay mayor prelación en la elección de un sistema entre BRT, TRAM y LRT porque dependerá propiamente de cada condición donde se implemente el sistema; con el fin de escalafonar el sistema en este aspecto, se propone la siguiente clasificación (ver Tabla 4-15):

Tabla 4-15: Clasificación de la accesibilidad al suelo mediante sistemas de transporte.

Accesibilidad al suelo	Post-Uso	Pre-Uso
Sí	El sistema de transporte hace uso de oficinas abandonadas y de centrales de estacionamientos existentes (el sistema de transporte usa la infraestructura existente, se harán cambios de adecuación sin necesidad de derrumbar y construir nuevamente).	El sistema de transporte implementa terrenos en los cuales no se ha construido (la compra de espacios ya construidos para su posterior demolición y construcción de un espacio nuevo, no es válido para este caso).
No	El sistema de transporte no hace uso de oficinas abandonadas y de centrales de estacionamientos.	El sistema de transporte no implementa terrenos (terrenos sin ningún tipo de construcciones)
<p>Comentarios sobre el sistema de transporte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Accesibilidad al suelo “Alta”: Se tiene acceso a Post-Uso del suelo y Pre-Uso del suelo • Accesibilidad al suelo “Media”: Solo cuenta con una accesibilidad, ya sea Post-Uso del suelo o Pre-Uso del suelo • Accesibilidad al suelo “Baja”: No cuenta con a acceso a Post-uso del suelo o Pre-uso del suelo 		

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4.4. Influencia del sistema de transporte en el uso del suelo

Es importante enfatizar que el patrón de uso de la tierra tiene un impacto pronunciado en la complejidad de la cadena de viajes diarios y en las opciones de modos, aquellos que viven en áreas con alta densidad de población y empleo eligen realizar actividades adicionales con mayor frecuencia, por lo tanto, tiene implicaciones importantes para los responsables políticos considerar la reubicación de asentamientos en la planificación de nuevas viviendas para residentes de bajos ingresos con el fin de acceder al sistema de transporte y que no sean desplazados hacia la periferia; es adecuado los arreglos centralizados en lugar de reubicaciones dispersas con el fin de mejorar la movilidad. (Long Cheng et al., 2016, p. 368).

Los sistemas ferroviarios urbanos tienen incidencia en el aumento del costo de la tierra, lo que ocasiona especulaciones sobre la valorización del suelo alrededor de las estaciones y en el suelo mixto, lo que se traduce en la inaccesibilidad de los estratos más bajos a estos predios, a este efecto se le denomina gentrificación.

La gentrificación de la propiedad residencial desplaza a los grupos de bajos ingresos que son menos capaces de pagar alquileres (arriendos) y precios de la vivienda más altos, las personas de bajos y medianos ingresos pueden ser expulsadas de las áreas que de repente son deseables cuando se abren las estaciones de sistemas de transporte público, de modo que los grupos con menos acceso a transporte privado que realmente necesitan transporte, no se benefician (Grengs, 2004 citado por Knowles y Ferbrache, 2016, p. 436).

Por lo tanto, se tiene un impacto negativo en la valorización de la tierra de los sectores de bajos ingresos que son realmente quienes van a utilizar el sistema de transporte; les corresponde a los entes gubernamentales promover desarrollos de uso de suelo mixto y de centros de actividades de usos múltiples, en el que se involucren a los residentes de bajos ingresos. (Long Cheng et al., 2016, p. 368).

Como se evidenció en acápites anteriores, los sistemas férreos tienen mayor incidencia en la valorización de la tierra que los sistemas carreteros, a partir de esto, se clasificó el sistema de transporte de menor a mayor, respecto al impacto negativo del sistema de transporte en el uso del suelo: (1) BRT, (2) TRAM y (3) LRT.

4.3. Cálculo de ponderadores mediante AHP (Proceso de Jerarquía Analítica)

Para evaluar los modos opcionados en corredores de mediana capacidad se deben establecer las prioridades a partir de las variables de decisión descritas en el capítulo 4.2, para lo cual, esta investigación se apoyó en la metodología multicriterio AHP para la evaluación de proyectos (ver capítulo 3.10).

El proceso de Jerarquía Analítica (AHP por sus siglas en inglés) propuesta por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) permite evaluar y discriminar, entre proyectos su prioridad y eficiencia para la asignación de recursos y apoyar la toma de decisiones.

Esta metodología se implementó como herramienta para jerarquizar y asignar un puntaje a los ámbitos y criterios, con el fin de establecer los pesos de las variables de decisión para seleccionar el mejor modo, sea BRT, LRT o TRAM en un corredor de mediana capacidad en países en vía de desarrollo; esta metodología consta de tres etapas que guían el proceso de evaluación y priorización de las variables de decisión, estas son:

- Construcción de jerarquías, esta etapa descompone los elementos constituyentes, los estructura y jerarquiza de acuerdo con la importancia relativa de los elementos de cada nivel de la jerarquía.
- Establecimiento de prioridades, en esta etapa se expresa la preferencia de un elemento con juicios (decisión a partir de la percepción de los seres humanos entre los elementos que describen una situación); estos juicios se desarrollan a partir de comparaciones a pares entre los elementos respecto a un cierto criterio.
- Consistencia lógica, se verifican los juicios realizados. El cerebro humano crea un ordenamiento jerárquico de los elementos, pero debido a la inexistencia de una escala con valores exactos en la mente humana, este no puede emitir juicios 100% consistentes y por lo tanto deben ser verificados.

A continuación, se describen los pasos aplicados en esta investigación para las variables de decisión mediante metodología AHP.

El primer paso para realizar el análisis y determinar los pesos de las variables de interés, es recopilar los ámbitos (variables) que tendrán relevancia en el presente estudio.

Para el caso, son las descritas en el capítulo 4.2.

- Densidad en transporte de pasajeros (ver capítulo 4.2.1).
- Escala de la ciudad en transporte de pasajeros (ver capítulo 4.2.2).
- Forma de la utu en transporte de pasajeros (ver capítulo 4.2.3).
- Usos del suelo en transporte de pasajeros (ver capítulo 4.2.4), de este, se desprenden 4 subámbitos los cuales son: requerimientos de la superficie de transporte, espacio público, accesibilidad al suelo mediante transporte, influencia del transporte en el uso del suelo.

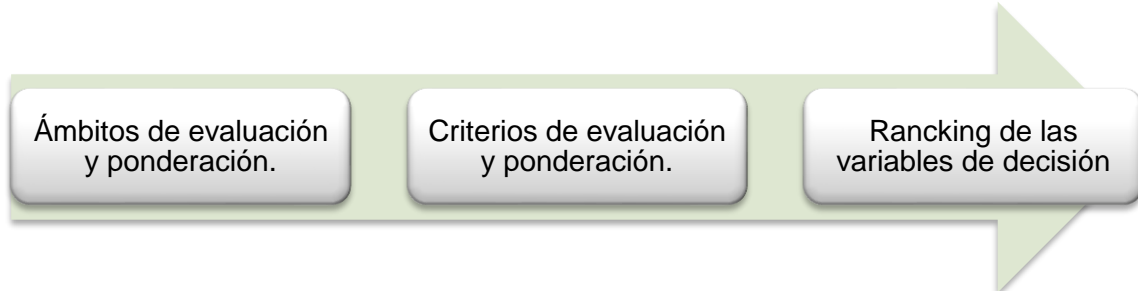
Después se procede a la selección de los criterios de análisis de cada ámbito (variable), que, para el presente estudio corresponde a los modos de análisis BRT (Bus Rápido), LRT (Tren ligero) y TRAM (Tranvía).

Segundo, para desarrollar la matriz multicriterio es necesario realizar el siguiente planteamiento para la simplificación del problema

- I. ¿Cuál de los ámbitos o disciplinas de evaluación tiene más peso que las demás en la decisión?
- II. Para un determinado ámbito ¿Cuál criterio tiene más peso en la decisión de ese ámbito en específico?
En el caso de los subámbitos, cual de estos tienen más peso que los demás respecto al ámbito.

En la Figura 4-3, se observa el esquema general del proceso ejecutado y mencionado anteriormente.

Figura 4-3: Proceso general para determinar los pesos de las variables de decisión



Fuente: Elaboración propia.

La evaluación realizada se lleva a cabo para comparaciones pareadas con base en la escala de valoración de la metodología adoptada, así, ante cada pregunta sobre qué criterio preferiría con respecto a otro, el evaluador califica la comparación de acuerdo a la escala de valoración establecida de 1 a 9, dependiendo sí, el primer criterio se prefiere sobre el segundo y la magnitud semántica de la preferencia o valores de 1 a 1/9 (1 /calificación numérica) si se prefiere el segundo criterio sobre el primero, de tal modo que la inversa de la comparación i - j ésima siempre tendrá un inverso multiplicativo en la comparación j - i ésima, motivo por el cual es posible construir una matriz de prelación a través de las preferencias de la diagonal superior; la escala de valoración de preferencias se muestra en la Tabla 4-16.

Tabla 4-16: Escala de preferencias según el Proceso de Análisis Jerárquico

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Muy fuertemente preferible	7
Fuertemente preferible	5
Moderadamente preferible	3
Igualmente, preferible	1

Fuente: Toskano, 2005.

Luego, se determina mediante una matriz normalizada el peso de cada variable en una matriz de comparaciones. En este paso, primero se calcula la matriz normalizada dividiendo cada elemento de la matriz de comparaciones a pares por la suma total de cada columna y finalmente, se calcula la media de cada fila de la matriz normalizada para obtener el vector de prioridades el cual representa la importancia relativa de los criterios comparados en cada una de las matrices de comparaciones a pares; con estas operaciones se obtiene el peso de cada ámbito y criterio con su respectivo puntaje.

Tercero, consistencia lógica, esta tiene relación con el grado de dispersión de los juicios seleccionados respecto a cada criterio, es el resultado de la división entre el índice de consistencia (IC) y el índice aleatorio (IA), para que se considere evidencia de un juicio acertado el valor de consistencia no debe superar el 10%.

El IC es una medida de la desviación de la consistencia de la matriz de comparaciones a pares, la forma de obtenerlo es a través del máximo valor propio de la matriz, así:

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (8)$$

Donde:

- λ : Delta máximo, es el valor propio de la matriz de comparaciones en pares
- n : es el número de criterios.

El IA es el índice aleatorio de una matriz recíproca aleatoria con recíprocos forzados, del mismo rango de escala de 1 hasta 9, Saaty (1997, p. 36) definió esta matriz tal como se muestra en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17: Índice aleatorio (IA)

Tamaño de la Matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente. Saaty. (1997). Toma de decisiones para líderes. El proceso analítico jerárquico. Estados Unidos: RWS Publications.

A continuación, se describe a manera de ejemplo la aplicación del proceso AHP del primer ámbito.

Ejemplo:

La matriz de comparaciones a pares para los ámbitos generales se presenta en la Tabla 4-18. Estos valores se obtienen en un orden de jerarquía en donde la diagonal se rellena con el número 1 y se completan las demás celdas en el orden correspondiente de mayor a menor con su respectivo número inverso que sería haciendo la comparación en dirección opuesta.

Tabla 4-18: Matriz de comparaciones a pares para el ámbito general (variables de decisión)

Variables de decisión	Densidad en transporte	Escala de la ciudad	Forma de la ruta de Transporte	Usos del suelo en transporte
Densidad en transporte	1	5	3	2
Escala de la ciudad	1/5	1	1	1/2
Forma de la ruta de Transporte	1/3	1	1	1/2
Usos del suelo en transporte	1/2	2	2	1
SUMA	2	9	7	4

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de la matriz normalizada y la asignación de puntaje para el ámbito general se presentan a continuación:

- Las celdas correspondientes a los pares (el valor de cada celda dividido en la suma de la columna de cada ámbito), ejemplos:

$$\text{Densidad en transporte (fila) – Densidad en transporte (columna)} = \frac{1}{2} = 0,49$$

$$\text{Densidad en transporte (fila) – Escala de la ciudad (columna)} = \frac{5}{9} = 0,56$$

- Las Columnas de pesos

Peso del ámbito densidad en transporte (suma de cada una de las celdas en la fila dividido en el número de ámbitos)

$$\text{Densidad en transporte} = \frac{0,49+0,56+0,43+0,50}{4} = 0,49$$

Peso de la variable de decisión densidad de la demanda = $100 * 0,49 = 49 \%$

Los resultados de la matriz normalizada para los ámbitos se exponen en la Tabla 4-19.

Tabla 4-19: Matriz normalizada y asignación de puntaje para el ámbito general.

Ámbitos	Densidad en transporte	Escala de la ciudad	Forma de la ruta de Transporte	Usos del suelo en transporte	PROMEDIO
Densidad en transporte	0,49	0,56	0,43	0,50	0,49
Escala de la ciudad	0,10	0,11	0,14	0,13	0,12
Forma de la ruta de Transporte	0,16	0,11	0,14	0,13	0,14
Usos del suelo en transporte	0,25	0,22	0,29	0,25	0,25
SUMA	1,00	1,00	1,00	1,00	

Fuente: Elaboración propia.

La consistencia lógica se determinó inicialmente con el valor propio de la matriz de comparaciones a pares (delta máximo), así:

$$\Lambda_{\text{máx}} = (0,49 * 2) + (0,12 * 9) + (0,14 * 7) + (0,25 * 4) = 3,0384$$

$$\Lambda_{\text{máx}} = 3$$

El índice aleatorio (IA) de una matriz recíproca aleatoria con recíprocos forzados obtenidos es de: 0.58 correspondiente a un tamaño de la matriz de 3 (ver Tabla 4-17) y el índice de consistencia se obtiene a través del máximo valor propio de la matriz de la siguiente forma:

$$IC = \frac{3 - 3}{3 - 1} = 0$$

Finalmente, la proporción entre el IC y el IA tiene como resultado 0, por lo tanto, es evidencia de un juicio acertado con una relación de consistencia menor a 0.1 (10%) y no es necesario reevaluar los juicios expresados en la matriz de comparaciones.

Se realiza el mismo procedimiento para cada criterio y subámbitos correspondientes; teniendo en cuenta el puntaje de la variable de decisión se multiplica la proporción calculada del subcriterio por el peso de cada ámbito (ver Anexo A).

Densidad en transporte de pasajeros, peso calculado = 49

En la Tabla 4-20, se muestran los puntajes de los criterios para la variable densidad en transporte, este ámbito se dividió en rangos correspondientes a la densidad potencial de la demanda descritos en la Tabla 4-9.

Tabla 4-20: Pesos de los criterios a partir de la densidad potencial de la demanda.

		Pesos según la densidad potencial de la demanda y el modo (100)					
Criterios	25- 30	30 -35	35 - 40	40- 45	45 -50	50 - 55	
BRT	31	27	22	15	7	5	
TRAM	13	15	19	24	16	13	
LRT	5	8	8	10	26	31	
SUMA	49	49	49	49	49	49	

Fuente: Elaboración propia.

Cabe resaltar, que la densidad en transporte representa el 50% de la decisión dejando con menor relevancia otras variables de decisión, por ende, se hizo un ajuste con los pesos (ver Tabla 4-21) dejando como peso del ámbito la suma de los criterios como se muestra en la Tabla 4-22.

Tabla 4-21: Pesos de los criterios en el ámbito densidad en transporte de pasajeros.

Criterios (modo)		Ponderado (%)	Pesos
1	BRT	26	13
2	TRAM	33	16
3	LRT	41	20
SUMA			49

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-22: Ajuste del peso del ámbito densidad de demanda de transporte de pasajeros a partir de los pesos de los criterios y los rangos de la densidad potencial de la demanda.

Criterios	Pesos según densidad de la demanda y características operación del sistema (100)						SUMA
	25- 30	30 -35	35 - 40	40- 45	45 -50	50 - 55	
BRT	4	3	3	2	1	1	13
TRAM	2	2	3	4	3	2	16
LRT	1	2	2	2	6	7	20
SUMA							49

Fuente: Elaboración propia.

Escala de la ciudad en transporte de pasajeros, peso calculado = 12

En la Tabla 4-23, se muestran los puntajes de los criterios para la variable escala de la ciudad en transporte de pasajeros. Este ámbito se dividió en la clasificación genérica de la escala de la ciudad por modo (ver Tabla 4-10).

Tabla 4-23: Pesos criterios a partir de la escala de la ciudad en transporte de pasajeros.

Criterios	Cuadrícula	Lineal	Lineal - Irregular	Irregular
BRT	5	5	4	2
TRAM	4	4	4	4
LRT	3	3	4	6
SUMA	12	12	12	12

Fuente: Elaboración propia.

Forma de la ruta en transporte de pasajeros, peso calculado = 14

En la Tabla 4-24, se muestran los puntajes de los criterios para la variable forma de la ruta en transporte de pasajeros, este ámbito se dividió en la tipología de la ruta (ver Tabla 4-13).

Tabla 4-24: Pesos criterios a partir de la forma de la ruta en transporte de pasajeros.

Criterios	Circular o Semicircular	Radial	Diametral	Tangencial
BRT	7	5	3	3
TRAM	4	5	4	7
LRT	3	4	7	4
SUMA	14	14	14	14

Fuente: Elaboración propia.

Usos del suelo en transporte de pasajeros peso calculado = 25

En la Tabla 4-26, se muestran los puntajes de los criterios para la variable usos del suelo en transporte de pasajeros, este ámbito se dividió en 4 subámbitos que a la vez fueron evaluados a partir de los criterios (ver Tabla 4-25)

Tabla 4-25: Pesos del ámbito usos del suelo en transporte de pasajeros, a partir de los subámbitos.

Subámbitos usos del suelo en transporte de pasajeros		Ponderado (%)	Peso
1	Requerimientos de la superficie de transporte	36	9
2	Espacio público	15	4
3	Accesibilidad al uso del suelo mediante transporte público	20	5
4	Influencia del sistema de transporte en el uso del suelo (aspecto negativo)	29	7
SUMA			25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-26: Pesos de los criterios a partir de los subámbitos

Pesos Usos del suelo en transporte por modo y subámbitos				
Criterios	1	2	3	4
BRT	2	1	1	-1
TRAM	3	1	3	-2
LRT	4	2	1	-4
SUMA	9	4	5	-7

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1. Análisis de sensibilidad de los pesos de las variables de decisión

A partir de los pesos calculados en el capítulo 4.2, se desarrolló un análisis de sensibilidad con el fin de estimar cual es el modo idóneo teniendo en cuenta cada una de las variables de decisión, para este análisis se tiene en cuenta los siguientes supuestos:

- Se suman todos los puntajes para cada criterio y para cada ámbito, hay que tener en cuenta que, al momento de evaluar un modo de transporte, en algún ítem no se puede presentar alguna condición de las variables de decisión y, por lo tanto, puede poseer un valor de cero puntos.
- El análisis tomará como variable fija la forma de la ruta de transporte, ya que, es el que tiene menor peso en la decisión de un modo de transporte para un corredor de mediana capacidad.
- Para todas las combinaciones se tiene en cuenta una importancia favorable en el uso del suelo y su efecto negativo por la implementación del sistema.

Ejemplo de cálculo para la evaluación del BRT eléctrico teniendo en cuenta los supuestos anteriores y la siguiente información:

Datos:

Densidad potencial Demanda = 2500 Viajes/Km/día	4 puntos (ver Tabla 4-22)
Escala o forma de la ciudad = Cuadrícula	5 puntos (ver Tabla 4-23)
Tipo de ruta = Semicircular	7 puntos (ver Tabla 4-24)

Usos del suelo (ver Tabla 4-26)

Requerimiento de la superficie de transporte = 55% con cobertura	2 puntos
Espacio Público = Buen impacto	1 punto
Accesibilidad al uso del suelo = Alta	1 punto
Influencia del sistema de transporte en el uso del suelo = siempre negativo	-1 punto

Una vez establecidos los puntajes, se suman, para este caso se obtiene como resultado un total de 19 puntos, este mismo procedimiento se hace para el modo tren ligero y tranvía, tomando la misma información sus puntajes son 10 y 15 respectivamente, por lo tanto, la decisión final de elección será el BRT eléctrico (bus rápido eléctrico) ya que tiene el mayor puntaje; en las siguientes tablas, Tabla 4-27, Tabla 4-28, Tabla 4-29 y Tabla 4-30 se exponen los análisis de sensibilidad, en estas se varía las variables de densidad potencial de la demanda, forma de la ciudad y tipo de ruta.

En la Tabla 4-27 y Tabla 4-28, los puntajes son iguales dado que los valores de las escalas de la ciudad (ver Tabla 4-23) son iguales, en ellas se puede observar que, para densidades potenciales de demanda bajas predomina el BRT eléctrico y para altas el LRT, la elección del TRAM se dispone en densidades potenciales de demanda intermedias y con tipologías de rutas más complejas.

En la Tabla 4-29, predomina la elección del TRAM (tranvía) dado que es un sistema que brinda las ventajas de rapidez y capacidad, en este tipo de ciudades (lineal - irregular) la implementación de cualquier modo es viable, el criterio de elección predominante dependerá de las ventajas operacionales de cada sistema (capacidad, velocidad, tipo de ruta o impacto en el uso del suelo.)

En la Tabla 4-30, el LRT (tren ligero) sobresale para formas de ciudades irregulares ya que las zonas generadoras de viajes están dispersas en la ciudad, lo que exige sistemas de transporte más rápidos para realizar viajes de menores tiempos como el LRT.

En la Tabla 4-31, se presenta un resumen esquemático del modo de transporte que puede ser seleccionado, sí, este modo cumple con todos los ítems de las variables de decisión, como el ejemplo mostrado anteriormente.

Tabla 4-27: Análisis de sensibilidad en la elección del modo de transporte, Escala Cuadrícula.

CUADRICULA	25 - 30		Circular o Semicircular		25 - 30		Radial		25 - 30		Diametral		25 - 30		Tangencial	
	BRT	TRAM	LRT		BRT	TRAM	LRT		BRT	TRAM	LRT		BRT	TRAM	LRT	
	19	15	10		17	16	11		15	15	14		15	18	11	
		30 - 35	Circular o Semicircular			30 - 35	Radial			30 - 35	Diametral			30 - 35	Tangencial	
	18	15	11		16	16	12		14	15	15		14	18	12	
		35 - 40	Circular o Semicircular			35 - 40	Radial			35 - 40	Diametral			35 - 40	Tangencial	
	18	16	11		16	17	12		14	16	15		14	19	12	
		40 - 45	Circular o Semicircular			40 - 45	Radial			40 - 45	Diametral			40 - 45	Tangencial	
	17	17	11		15	18	12		13	17	15		13	20	12	
		45 - 50	Circular o Semicircular			45 - 50	Radial			45 - 50	Diametral			45 - 50	Tangencial	
	16	16	15		14	17	16		12	16	19		12	19	16	
		50 - 55	Circular o Semicircular			50 - 55	Radial			50 - 55	Diametral			50 - 55	Tangencial	
	16	15	15		14	16	16		12	15	19		12	18	16	

*La demanda de viajes/km/día se multiplica por 100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-28: Análisis de sensibilidad en la elección del modo de transporte, Escala Lineal.

LINEAL	25 - 30	Circular o Semicircular	25 - 30	Radial	25 - 30	25 - 30	Diametral	25 - 30	Tangencial
BRT	TRAM	LRT	BRT	LRT	TRAM	BRT	LRT	TRAM	LRT
19	15	10	17	11	16	15	14	18	11
BRT	30 - 35	Circular o Semicircular	BRT	Radial	30 - 35		Diametral	30 - 35	Tangencial
18	TRAM	LRT	16	LRT	TRAM	BRT	LRT	TRAM	LRT
	15	11	16	12	16	14	15	18	12
BRT	35 - 40	Circular o Semicircular	BRT	Radial	35 - 40		Diametral	35 - 40	Tangencial
18	TRAM	LRT	16	LRT	TRAM	BRT	LRT	TRAM	LRT
	16	11	16	12	17	14	15	19	12
BRT	40 - 45	Circular o Semicircular	BRT	Radial	40 - 45		Diametral	40 - 45	Tangencial
17	TRAM	LRT	15	LRT	TRAM	BRT	LRT	TRAM	LRT
	17	11	15	12	18	13	15	20	12
BRT	45 - 50	Circular o Semicircular	BRT	Radial	45 - 50		Diametral	45 - 50	Tangencial
16	TRAM	LRT	14	LRT	TRAM	BRT	LRT	TRAM	LRT
	16	15	14	16	17	12	19	19	16
BRT	50 - 55	Circular o Semicircular	BRT	Radial	50 - 55		Diametral	50 - 55	Tangencial
16	TRAM	LRT	14	LRT	TRAM	BRT	LRT	TRAM	LRT
	15	15	14	16	16	12	19	18	16

*La demanda de viajes/km/día se multiplica por 100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-29: Análisis de sensibilidad en la elección del modo de transporte, Escala Lineal - Irregular.

LINEAL - IRREGULAR		Circular o Semicircular		Radial		Diametral		Tangencial	
	25 - 30		25 - 30		25 - 30		25 - 30		25 - 30
BRT	TRAM	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	TRAM
18	15	11	16	12	14	15	14	15	18
	30 - 35	Circular o Semicircular		Radial		Diametral		Tangencial	
BRT	TRAM	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	TRAM
17	15	12	15	13	13	16	13	16	18
	35 - 40	Circular o Semicircular		Radial		Diametral		Tangencial	
BRT	TRAM	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	TRAM
17	16	12	15	13	13	16	13	16	19
	40 - 45	Circular o Semicircular		Radial		Diametral		Tangencial	
BRT	TRAM	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	TRAM
16	17	12	14	13	12	16	12	17	20
	45 - 50	Circular o Semicircular		Radial		Diametral		Tangencial	
BRT	TRAM	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	TRAM
15	16	16	13	17	11	20	11	19	19
	50 - 55	Circular o Semicircular		Radial		Diametral		Tangencial	
BRT	TRAM	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	BRT	LRT	TRAM
15	15	16	13	17	11	20	11	18	18

*La demanda de viajes/km/día se multiplica por 100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-30: Análisis de sensibilidad en la elección del modo de transporte, Escala Irregular.

IRREGULAR		25 - 30		Circular o Semicircular		25 - 30		Radial		25 - 30		Diametral		25 - 30		Tangencial	
BRT	16	TRAM	15	LRT	13	BRT	14	TRAM	16	LRT	14	BRT	12	TRAM	18	LRT	14
BRT	15	TRAM	15	LRT	14	BRT	13	TRAM	16	LRT	15	BRT	11	TRAM	18	LRT	15
BRT	15	TRAM	16	LRT	14	BRT	13	TRAM	17	LRT	15	BRT	11	TRAM	19	LRT	15
BRT	14	TRAM	17	LRT	14	BRT	12	TRAM	18	LRT	15	BRT	10	TRAM	20	LRT	15
BRT	13	TRAM	16	LRT	18	BRT	11	TRAM	17	LRT	19	BRT	9	TRAM	19	LRT	19
BRT	13	TRAM	15	LRT	18	BRT	11	TRAM	16	LRT	19	BRT	9	TRAM	18	LRT	19

*La demanda de viajes/km/día se multiplica por 100

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-31: Selección del modo de transporte cumpliendo cada uno de los ítems de las variables de decisión.

FORMA CIUDAD CUADRICULA O LINEAL				
Densidad Potencial Demanda (100)	Ruta Circular o Semicircular	Ruta Radial	Ruta Diametral	Ruta Tangencial
25 - 30	BRT	BRT	BRT	BRT
30 - 35	BRT	BRT	TRAM	TRAM
35 - 40	BRT	TRAM	TRAM	TRAM
40 - 45	BRT	TRAM	TRAM	TRAM
45 - 50	TRAM	TRAM	LRT	TRAM
50 - 55	LRT	LRT	LRT	LRT

FORMA CIUDAD LINEAL - IRREGULAR				
Densidad Potencial Demanda (100)	Ruta Circular o Semicircular	Ruta Radial	Ruta Diametral	Ruta Tangencial
25 - 30	BRT	BRT	BRT	BRT
30 - 35	BRT	BRT	TRAM	TRAM
35 - 40	BRT	TRAM	TRAM	TRAM
40 - 45	TRAM	TRAM	TRAM	TRAM
45 - 50	TRAM	LRT	LRT	TRAM
50 - 55	LRT	LRT	LRT	LRT

FORMA CIUDAD IRREGULAR				
Densidad Potencial Demanda (100)	Ruta Circular o Semicircular	Ruta Radial	Ruta Diametral	Ruta Tangencial
25 - 30	BRT	BRT	BRT	BRT
30 - 35	BRT	TRAM	TRAM	TRAM
35 - 40	TRAM	TRAM	LRT	TRAM
40 - 45	TRAM	TRAM	LRT	TRAM
45 - 50	LRT	LRT	LRT	LRT
50 - 55	LRT	LRT	LRT	LRT

Nota: Para todas las combinaciones se tiene en cuenta una importancia favorable en el uso del suelo (subámbitos 1-2-3) y su efecto negativo por la implementación del sistema (subámbitos 4), ver Tabla 4-26.

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Síntesis de Evaluación

En síntesis, la implementación de la metodología denominada proceso de jerarquía analítica, permite organizar las prioridades de actuación de las variables a analizar según la jerarquización y asignación de los puntajes de los ámbitos y criterios, esto es: 1. evaluar y discriminar entre variables su prioridad y eficiencia para la toma de decisiones (Balaguera y León, 2019, p. 64), 2. responder a los retos de planificación de sistemas de transporte y 3. formular estrategias de decisión.

A continuación, se exponen las tablas de clasificación para evaluar los sistemas de transporte tipo BRT eléctrico, TRAM y LRT para corredores de mediana capacidad en países en vía de desarrollo, con el fin de seleccionar el más idóneo de los tres en corredores específicos.

Primer Paso: Se determinan cuál es el máximo sistema de transporte (modo) al cual puede acceder una ciudad a partir de la ecuación de puntaje urbano (ver Tabla 4-32); este tiene en cuenta las variaciones de un territorio según las condiciones de la población, el PIB de la región específica de evaluación, la integración del transporte público entre otros, para este caso, se deja fijo la variable de pendiente y se varían las condiciones económicas de la región, ya que, la valoración del tiempo depende del nivel de ingreso, mientras que, la orografía de un terreno influye en la selección de la tecnología de un modo y la disposición de un usuario de acceder al sistema de transporte por altas pendientes (en altas pendientes los usuarios disminuyen su velocidad de caminata y por ende los tiempos de accesibilidad aumentan); la tecnología entendida en esta investigación como el mecanismo para operar el modo de transporte, por ejemplo, tipo de rodamiento (neumático o rieles), tipo de tracción (combustión, eléctrico o híbrido), etc.

Tabla 4-32: Primer paso, determinación del máximo sistema de transporte al cual puede acceder una ciudad.

Formula (ver capítulos 3.6.1, 3.6.2, 3.6.3 y 3.9)	Límite entre Categorías	Valor puntaje urbano
$ \begin{aligned} &Puntaje\ Urbano = \\ &(2,30 * Log_{10}(Población)) \\ &+ (0,799 * Ln(PIB\ per\ Capita)) \\ &+ (5,13 * 10^{-4} * (Atractivo)) \\ &- (2,91 * (Compacidad)) \\ &+ (9,13 * 10^{-2} \\ &* Log_{10}(Población) \\ &* Ln(densidad)) \\ &- (1,66 * 10^{-3} * (Motor)) \\ &+ (0,0422 * (Prom_{pend}[\%])) \\ &+ (0,352 * Integración) \end{aligned} $	I (Transporte privado - Taxis)	0,00 – 16,71
	II ((Transporte Público Colectivo Urbano)	16,71 – 19,31
	III (Transporte Masivo Mixto)	19,31 – 24,20
	IV (Transporte Masivo Mixto o Segregado)	24,20 – 26,47
	V (Transporte Totalmente Segregado)	> 26,47

Fuente: Elaboración propia a partir de Basnak et al. (2020). Technology choices in public transport planning: A classification framework.

Segundo Paso: Para proceder con la evaluación del modo de transporte (BRT eléctrico, TRAM y LRT), la ciudad de implementación debe encontrarse en las categorías III o IV o V de la Tabla 4-32, ya que, estos sistemas de transporte deben operar en condiciones de ciudad en los cuales los sistemas de transporte público tipo bus colectivo y/o taxi son insuficientes para atender la demanda y movilidad de los usuarios de una ciudad específica; sí, la ciudad se encuentra en las categorías I o II se debe optar por sistemas de transporte de menor categoría como el transporte público colectivo urbano tradicional y/o el taxi. En la Tabla 4-33, se exponen las variables, indicadores y puntajes para evaluar un sistema de transporte tipo BRT eléctrico, TRAM y LRT.

Tabla 4-33: Segundo Paso, Evaluación del sistema de transporte para corredores de mediana capacidad en países en vía de desarrollo.

DENSIDAD EN TRANSPORTE DE PASAJEROS		PUNTOS		
INDICADOR. Densidad Potencial de la Demanda	Viajes/(Km*Día)	BRT	TRAM	LRT
$\text{Densidad Potencial de demanda ajustada} = \frac{\text{demanda corredor} \left(\frac{\text{Viajes}}{\text{día}} \right)}{\text{longitud corredor (Km)}} \left(\frac{\text{Viajes}}{\text{día} * \text{Km}} \right)$	2500 - 3000	4	2	1
	3000 - 3500	3	2	2
	3500 - 4000	3	3	2
	4000 - 4500	2	4	2
	4500 - 5000	1	3	6
	5000 - 5500	1	2	7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-33: (Continuación)

ESCALA DE LA CIUDAD EN TRANSPORTE DE PASAJEROS		PUNTOS		
INDICADOR. Compacidad (Co) y Esbeltez (Es)	Forma Ciudad	BRT	TRAM	LRT
<p>Co: es un factor de forma estandarizada, cuya fórmula es: $\frac{2 * \sqrt{\pi * \text{área}}}{\text{perímetro}}$, mide en términos prácticos qué tan similar es una forma a un círculo. El indicador toma valores entre 0 y 1, y cuanto menor es la compacidad mayor es la distancia media para áreas de igual superficie.</p> <p>Co ≤ 0,35 Baja Co > 0,35 Alta</p> <p>Es: este indicador identifica la relación entre los semiejes mayor y menor de una forma dada, a través de la expresión $\frac{Sc}{Sf}$, donde Sf es la superficie de la ciudad a analizar y Sc es el área del círculo envolvente mínimo.</p> <p>Es ≤ 3,0 Baja Es > 3,0 Alta</p>	Cuadrícula	5	4	3
	Co = Alta Es = Baja			
	Lineal	5	4	3
	Co = Alta Es = Alta			
	Lineal - Irregular	4	4	4
	Co = Baja Es = Alta			
	Irregular	2	4	6
	Co = Baja Es = Baja			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-33: (Continuación)

FORMA DE LA RUTA EN TRANSPORTE DE PASAJEROS		PUNTOS		
INDICADOR. Tipología de la ruta	Clasificación	BRT	TRAM	LRT
<ul style="list-style-type: none"> *Rutas conectoras con las radiales. *No tienen terminales. *Que vaya desde una localidad y haga un recorrido circular o sea parte de una red de corredores que necesiten estar conectados. 	Circular o Semicircular	7	4	3
<ul style="list-style-type: none"> *Ciudades pequeñas y medias, promueve la integración con otros modos de transporte. *Viajes canalizados al centro de actividades o centro histórico. *El servicio se encuentre limitado a ciertas zonas y los terminales se concentran en las zonas de mayor densidad. 	Radial	5	5	4
<ul style="list-style-type: none"> *Ciudad está en crecimiento. *La ruta pasa por el centro y conecta dos extremos de la ciudad. *Evita los terminales en los centros históricos o de actividades. *Busca minimizar el número de transbordos, por lo que esta ruta, conecta directamente los principales pares de origen y destino. 	Diametral	3	4	7
<ul style="list-style-type: none"> *Es tipo de ruta, solo es recomendable para las grandes ciudades. *Es una ruta que pasa a un lado del centro de actividades o centro histórico. 	Tangencial	3	7	4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-33: (Continuación)

USOS DEL SUELO EN TRANSPORTE DE PASAJEROS		PUNTOS		
INDICADOR. Requerimiento de la superficie de transporte	Cobertura	BRT	TRAM	LRT
<p>*Se recomienda realizar la medición para una franja de 250 metros a lado y lado del corredor, que es lo que las personas están dispuestas a caminar, y de 200 metros según recomendación de la literatura. Se toma el valor más crítico.</p> <p>*Medir el área que cubren las estaciones de la ruta de transporte público. Radio: 400m BRT, 600m TRAM y 800m LRT. (A)</p> <p>*Medir el área total, correspondiente al buffer o franja de cobertura. (B)</p> <p>*Dividir A entre B, para calcular RST.</p>	< 0,55	0	0	0
	> 0,55	2	3	4
INDICADOR. Espacio Público	Impacto	BRT	TRAM	LRT
<p>*Los sistemas ferroviarios de transporte de pasajeros urbanos tienen un mayor impacto positivo en el espacio urbano que sistemas carreteros.</p> <p>*Los costos en que incurren la implementación urbanística de sistemas ferroviarios segregados son altos, lo cual, no es muy llamativo para los entes gubernamentales.</p> <p>*Clasificatoria de forma cualitativa: (1) TRAM, (2) LRT, y (3) BRT.</p>	Negativo	0	0	0
	Positivo	1	1	2
INDICADOR. Accesibilidad al suelo mediante transporte	Accesibilidad	BRT	TRAM	LRT
<p>Post-Uso: El sistema de transporte hace uso de oficinas abandonadas y de centrales de estacionamientos existentes (El sistema de transporte usa la infraestructura existente, se harán cambios de adecuación sin necesidad de derrumbar y construir nuevamente).</p> <p>Pre-Uso: El sistema de transporte implementa terrenos, en los cuales no se ha construido (la compra de espacios ya construidos y se derrumbe para un espacio nuevo, no es válido para este caso).</p>	Alta: Acceso a Post-Uso del suelo y Pre-Uso del suelo	1	3	1
	Media: Acceso a Post-Uso del suelo o Pre-Uso del suelo	0,5	1,5	0,5
	Baja: Ninguna accesibilidad al uso del suelo	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-33: (Continuación)

USOS DEL SUELO EN TRANSPORTE DE PASAJEROS		PUNTOS		
INDICADOR. Influencia del sistema de transporte en el uso del suelo	Impacto	BRT	TRAM	LRT
<p>Los sistemas férreos tienen mayor incidencia en la valorización de la tierra que los sistemas carreteros; por lo tanto, gentrifican (desplazan) a los usuarios de estratos más bajos, los cuales realizan el mayor volumen de viajes en transporte público.</p> <p>A partir de esto, se clasifica el sistema de transporte de menor a mayor, respecto al impacto negativo en el uso del suelo:</p> <p>(1) BRT, (2) TRAM y (3) LRT.</p>	Negativo	-1	-2	-4

Fuente: Elaboración propia.

5. Evaluación casos estudio

La finalidad del caso estudio, es aplicar la metodología para la selección de un sistema de transporte de mediana capacidad de una ciudad que se encuentre en un país en vía de desarrollo tal como puede ser: Medellín (Colombia), Bogotá D.C. (Colombia) y Guadalajara (México), así, en este capítulo se presenta la elección del sistema y área de análisis basado en los proyectos de transporte que están en planeación y operación.

A partir de la revisión del estado del arte presentado en el capítulo 3, se estableció que la metodología para la elección de un sistema de transporte tipo BRT eléctrico o TRAM o LRT tiene 2 etapas, primero se establece el máximo sistema de transporte al cual puede acceder una ciudad y segundo se evalúan de alternativas para un corredor de mediana capacidad.

En la presente investigación se seleccionaron tres ciudades específicas de análisis para aplicar estas etapas, cuya elección se realiza de acuerdo con criterios que responden a su sistema de transporte, condiciones socioeconómicas, urbanas y proyectos que se están desarrollando; la etapa de diagnóstico se elabora a partir de las características generales de la ciudad, tales como: el tamaño poblacional, la morfología urbana, las actividades económicas, los usos del suelo, la tenencia de vehículo particular y la estructura del sistema de transporte, estas características se evalúan mediante el puntaje urbano.

Por otra parte, la aplicación de la metodología en la etapa de evaluación comprende la construcción y análisis de los indicadores a partir de la recolección de información de acceso al público de los portales administrativos de cada ciudad y geo-portales con archivos de información geográfica, lo cual, da como resultado el puntaje de cada indicador (estos puntajes se presentan en las matrices de calificación por componente expuestas en el capítulo 4).

Finalmente, en la etapa de decisión se selecciona la alternativa que tenga el mayor puntaje (suma de puntajes de cada indicador), en caso de empate, la selección del sistema será desempataada a partir de la suma del puntaje del indicador de densidad potencial de la demanda más el puntaje del indicador de la tipología de la ruta y si vuelve a presentarse un empate el valor de desempate será el que tenga menor impacto de gentrificación a partir del indicador de influencia del sistema de transporte en el uso del suelo. El sistema de transporte con menor impacto en la gentrificación es el BRT, le sigue el TRAM y por último el LRT.

En la Figura 5-1, se presentan las etapas de la metodología de evaluación multicriterio para decidir entre BRT eléctrico, tranvía y tren ligero para corredores de mediana capacidad recomendada para países en vía de desarrollo.

Figura 5-1: Etapas de la metodología para la selección de un modo de transporte tipo BRT eléctrico o TRAM o LRT en corredores de mediana capacidad en ciudades de países en desarrollo.



Fuente: Elaboración propia.

5.1. Corredores de análisis

Los corredores de análisis corresponden a proyectos que se están desarrollando como política, caso Medellín (Colombia) y Bogotá D.C. (Colombia) y un corredor que ya está en operación y funciona con un sistema de transporte tipo LRT, como es el caso de Guadalajara (México), este último se tomó con el fin de corroborar la proximidad de esta metodología con los sistemas de transporte ya establecidos, cabe mencionar que en la decisión final para la implementación de un sistema de transporte intervienen actores políticos que pueden ir en contra o a favor de las decisiones técnicas tomadas por profesionales involucrados en temas de transporte, no obstante, esta metodología pone a disposición un instrumento que pueda ser entendido y usado de manera sencilla a partir de información secundaria de acceso al público.

A continuación, se expone a modo de ejemplo los cálculos para el corredor de la ciudad de Medellín, para las demás ciudades se exponen los datos finales, en el Anexo B el lector puede consultar los análisis geoespaciales hechos para determinar los indicadores de la metodología de investigación.

5.1.1. Corredor en Medellín (Colombia)

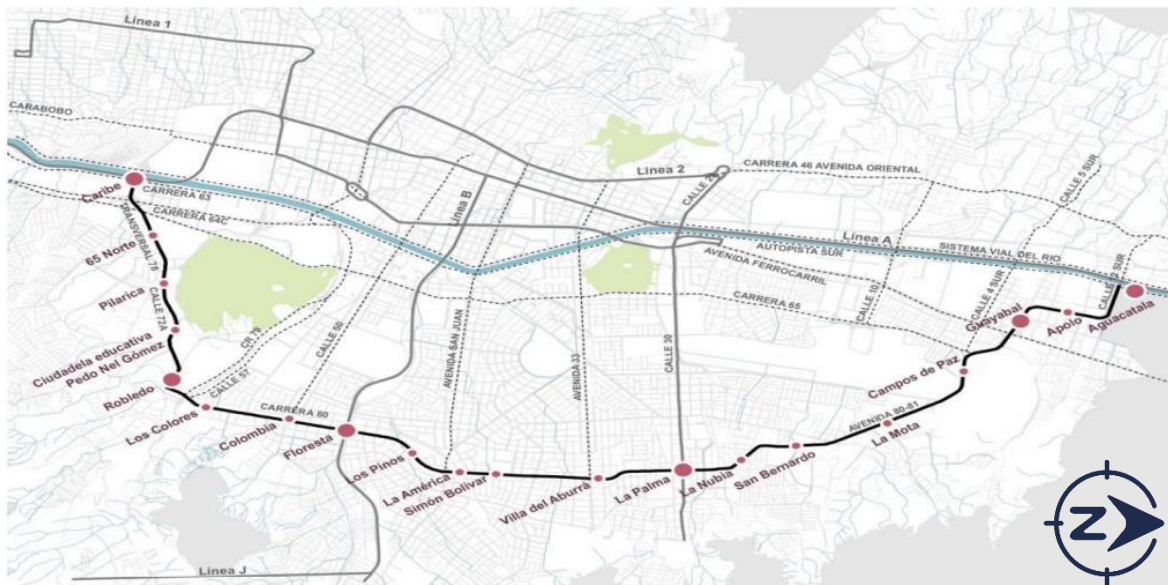
Este corredor fue identificado dentro del plan maestro de la empresa Metro como uno de los proyectos de transporte de pasajeros de mediana capacidad a estudiarse en la ciudad de Medellín (FINDETER, 2016), adicionalmente, el plan maestro de movilidad de la región metropolitana del valle de Aburrá, lo identifica como un proyecto a ser implementado en el mediano plazo; para esto se realizaron diferentes estudios que permitieron determinar el trazado más adecuado denominado corredor de la avenida 80, este comprende un trazado desde la estación Aguacatala del metro, ubicada en la calle 12 sur con avenida regional a través de la avenida 80 - 81 hasta el sector de la Facultad de Minas (avenida 80 con calle 65) y de allí por la calle 65 hasta la transversal 73 y cerrando el circuito en la estación Caribe del metro en el norte de la ciudad (FINDETER⁴, 2016).

⁴ Financiera de desarrollo territorial (FINDETER), Convocatoria concurso de méritos No. 05 de 2016, Anexo 1 – Alcance Técnico, Colombia, 2016.

Un aspecto a destacar de este corredor es la integración con la terminal de transportes del norte, las líneas A y B del metro, la estación del sistema férreo multipropósito propuesto en el plan maestro de movilidad metropolitana, proyecto que actualmente también es estudiado por funcionarios del Metro de Medellín, cabe mencionar, que el modo tren ligero (LRT) fue establecido por la ciudad para operar el corredor, denominado “Metro ligero de la 80”.

En la Figura 5-2, se expone el corredor del Metro ligero de la 80 en Medellín (Colombia).

Figura 5-2: Corredor de análisis Medellín (Colombia).



Fuente: Financiera de Desarrollo Nacional, Convocatoria concurso de méritos No. 05 de 2016, Anexo 1 – Alcance Técnico, Bogotá D.C. – Colombia, 2016.

ETAPA DE DIAGNOSTICO

La etapa de diagnóstico se elabora a partir de las características generales de la ciudad, tales como: el tamaño poblacional, la morfología urbana, las actividades económicas, los usos del suelo, la tenencia de vehículo particular y la estructura del sistema de transporte, toda esta información utilizada para estimar el máximo transporte al cual puede acceder una ciudad a partir del indicador puntaje urbano.

La información fue extraída de los datos abiertos de portales y geo-portales que tiene la administración de Medellín (Área Metropolitana del Valle de aburra - AMVA), es por ello, que dado el tipo de información es difícil encontrar datos con la misma fecha de captura, no obstante, la información extraída para esta investigación no desfasa un tiempo de 5 años.

Para poder establecer el máximo sistema al cual puede acceder la ciudad de Medellín, se implementa la ecuación descrita en el capítulo 4 correspondiente al puntaje urbano, para ello se dispone de la siguiente información:

Tabla 5-1: Información socio-demográfica de Medellín (Colombia).

VARIABLE	UNIDAD	DATO	FUENTE	LINK DE BUSQUEDA
Población	[Habitantes - AMVA]	4.055.296	Medellín cómo vamos - 2020	https://www.medellincomovamos.org/territorio/area-metropolitana-del-valle-de-aburra
PIB per cápita	[\$US]	3.794	Centro Iberoamericano de Desarrollo Estratégico Urbano (CIDEU) - 2019	https://www.cideu.org/miembro/medellin/
Densidad	[Habitantes/Km ²]	3.479	Medellín cómo vamos - 2020	https://www.medellincomovamos.org/territorio/area-metropolitana-del-valle-de-aburra
Motor	[Autos/1000 Hab]	500	Subdirección del Área Metropolitana - 2020, Artículo de revista el Tiempo	https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/pico-y-placa-como-se-implementara-esta-medida-en-medellin-575951#:~:text=Seg%C3%BAn%20datos%20de%20la%20Subdirecci%C3%B3n
Integración	[Dummy]	1	Uno (1) corresponde a transbordos gratuitos o a costo reducido entre el modo de mayor categoría y otros modos en una ciudad determinada, o entre las diferentes rutas de transporte público; de lo contrario es cero (0); Basnak et al., 2020.	
Atractivo	[Conectividad]	3,58	Indicador gravitatorio que representa la conectividad entre ciudades (Mínimo: 0 - Máximo: 4,148; Basnak et al., 2020) - Autor: Análisis Geoespacial en QGIS	
Compacidad	[Forma estandarizada]	0,29	Factor de forma estandarizado (0 - 1; Basnak et al., 2020) - Autor: Análisis Geoespacial en QGIS	
Prome. Pendiente	[%]	16	Autor: Capítulo 4.1.1: zonas urbanas 16% y para zonas rurales 25%.	

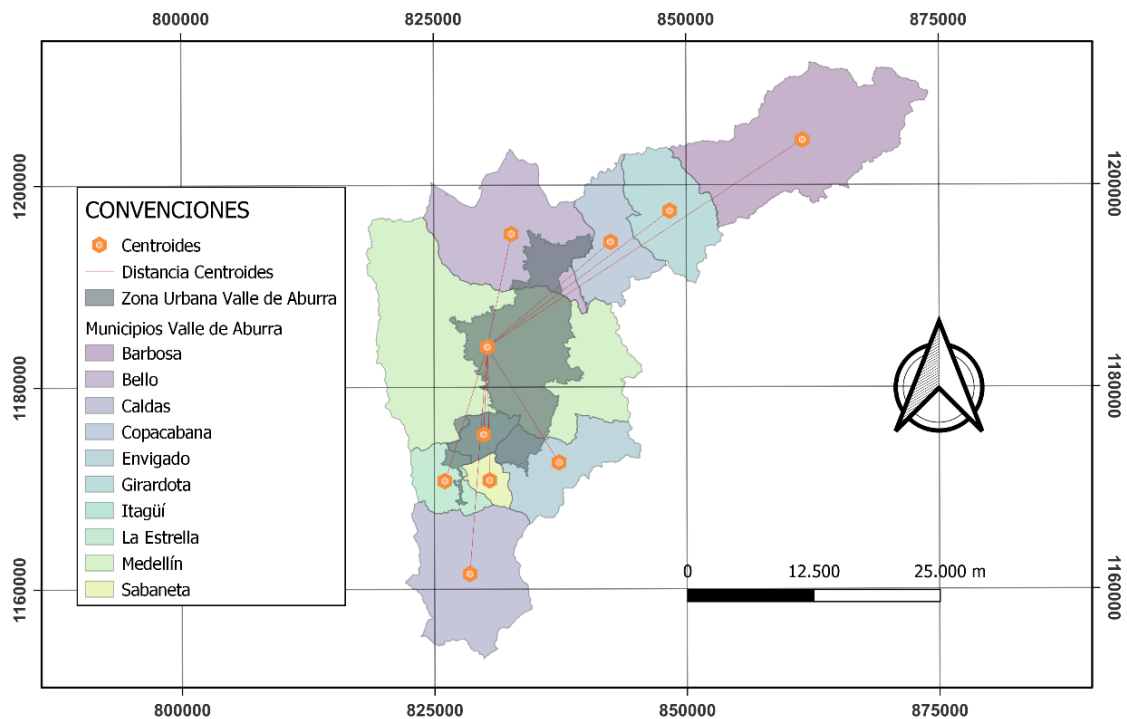
Fuente: Elaboración propia a partir de datos abiertos de portales estadísticos del municipio de Medellín.

El atractivo y la compacidad se calculan utilizando el software de código abierto en análisis geoespacial QGIS a partir de información georreferenciada de geo-portales de acceso al público como: los límites territoriales, red vial, área urbana, el corredor de análisis y la ubicación de las futuras estaciones de pasajeros.

Cálculo del indicador atractivo para la ciudad de Medellín

El atractivo es un indicador descrito en el capítulo 3.6.3, que establece la conectividad entre ciudades, se presume que las ciudades que interactúan más con sus vecinos (aquellas con mayor atractivo) pueden tener un sistema de transporte público más complejo que ciudades aisladas similares, ya que tienen mayor probabilidad de tener un sistema de transporte conjunto, para ello, primero se establecieron los municipios que conforman el área metropolitana del valle de Aburrá (conformación de una zona urbana que tienen un sistema de transporte integrado de varios municipios, entre ellos Medellín), segundo, mediante un análisis geoespacial en QGIS se determinaron los centroides de cada municipio y se calcula la distancia recta que hay desde cada centroide municipal hasta Medellín (ver Figura 5-3); la población se extrajo de un portal de acceso al público con información demográfica del área urbana del valle de Aburrá conformada por 10 municipios entre ellos Medellín (ver Tabla 5-2).

Figura 5-3: Distancia entre centroides municipios valle de Aburrá, Medellín (Colombia).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

Tercero, mediante la ecuación (3) se calculó la conectividad del sistema de transporte entre ciudades; el factor n, es un valor de calibración, este valor se ajustó para que el resultado estuviera dentro de los rangos descritos por Basnak et al. (2020, p. 7), los cuales son: A mínimo: 0 – A máximo: 4,148; en la Tabla 5-2 se exponen los resultados y el valor seleccionado.

$$A_i = \max_i \left[\frac{P_o}{d^n} \right]$$

Donde:

- A_i : atractividad.
- P_o : población.
- d : distancia entre centroides.
- n : es un número positivo a calibrar que permite identificar la proximidad de una ciudad con otras localidades "j".

Ejemplo, par vial Envigado – Medellín:

- Población: 238.173 habitantes
- Distancia entre el centroide de Medellín y el centroide de Envigado: 13,43 Km
- Para el caso de Medellín el valor de $n = 5,2$ esto teniendo en cuenta todos los valores de A para cada municipio.

$$A_{Medellin-Envigado} = \frac{276936}{(8,71)^{5,2}} = 3,583$$

Tabla 5-2: Datos atracción valle de Aburrá, Medellín (Colombia).

Atractivo	3,583	El factor n, es un valor de calibración; este valor se ajusto para que el resultado de A_i de cada par Origen - Destino, estuviera dentro de los rangos descritos por Basnak et al., 2020		$A_i = \max_i \left[\frac{Población_j}{(distancia_{ij})^n} \right]$
n	5,2			
PAR	DISTANCIA (Km)	POBLACIÓN	A	FUENTE - POBLACIÓN
Medellin - Bello	11,45	482.255	1,5048	Población: https://datosabiertos.metropol.gov.co/
Medellin - Itagui	8,71	276.936	3,5833	
Medellin - Envigado	13,43	238.173	0,3243	
Medellin - Sabaneta	13,19	53.914	0,0806	Distancia: Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
Medellin - La Estrella	13,95	62.344	0,0697	
Medellin - Caldas	22,53	80.528	0,0074	
Medellin - Copacabana	16,05	70.171	0,0378	
Medellin - Girardota	22,54	54.219	0,0050	
Medellin - Barbosa	37,34	50.052	0,0003	

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del indicador compacidad para la ciudad de Medellín

La compacidad (ver ecuación (1) es un indicador descrito en el capítulo 3.6.3, mide en términos prácticos qué tan similar es una forma a un círculo, el indicador toma valores entre 0 - 1 y describe que cuanto menor es la compacidad mayor es la distancia media para áreas de igual superficie, se espera que las ciudades más compactas (donde la forma urbana favorece distancias de viaje más cortas y una mayor dispersión de orígenes y destinos) tengan corredores de menor capacidad en sus redes de transporte público, mientras que en ciudades menos compactas los viajes tienden a ser más largos y con mayor concentración espacial.

A continuación, se presenta el ejemplo de cálculo y un resumen de los datos obtenidos.

$$Co = \frac{2 * \sqrt{\pi * a}}{p}$$

Donde:

- Co : Compacidad.
- a : área zona urbana de la ciudad.
- p : perímetro zona urbana de la ciudad.

Ejemplo, cálculo de compacidad zona urbana del valle de Aburrá:

- Área urbana del valle de Aburrá (ver Figura 5-3): 170,53 Km²
- Perímetro urbano del valle de Aburrá (ver Figura 5-3): 161,60 Km

$$Co = \frac{2 * \sqrt{\pi * 170,53}}{161,60}$$

$$Co = 0,286$$

Tabla 5-3: Datos compacidad valle de Aburrá, Medellín (Colombia).

VARIABLE	UNIDAD	DATO	FUENTE
Área Zona Urbana del Valle de Aburra	[Km ²]	170,35	Autor: Análisis Geoespacial en QGIS
Perímetro Zona Urbana del Valle de Aburra	[Km]	161,6	
Compacidad		0,286	

Fuente: Elaboración propia.

Una vez consultada y estimada la información necesaria (ver Tabla 5-4), se calcula el puntaje urbano (ver ecuación (5)) para poder establecer el máximo sistema de transporte público de pasajeros al cual puede acceder la ciudad de Medellín, de la siguiente forma:

Tabla 5-4: Datos para calcular el puntaje urbano de Medellín (Colombia).

VARIABLE	UNIDAD	DATO	FUENTE	LINK DE BUSQUEDA
Población	[Habitantes - AMVA]	4.055.296	Medellín cómo vamos - 2020	https://www.medellincomovamos.org/territorio/area-metropolitana-del-valle-de-aburra
PIB per cápita	[\$US]	3.794	Centro Iberoamericano de Desarrollo Estratégico Urbano (CIDEU) - 2019	https://www.cideu.org/miembro/medellin/
Densidad	[Habitantes/Km ²]	3.479	Medellín cómo vamos - 2020	https://www.medellincomovamos.org/territorio/area-metropolitana-del-valle-de-aburra
Motor	[Autos/1000 Hab]	500	Subdirección del Área Metropolitana - 2020, Artículo de revista el Tiempo	https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/pico-y-placa-como-se-implementara-esta-medida-en-medellin-575951#:~:text=Seg%C3%BAn%20datos%20de%20la%20Subdirecci%C3%B3n
Integración	[Dummy]	1	Uno (1) corresponde a transbordos gratuitos o a costo reducido entre el modo de mayor categoría y otros modos en una ciudad determinada, o entre las diferentes rutas de transporte público; de lo contrario es cero (0); Basnak et al., 2020.	
Atractivo	[Conectividad]	3,58	Indicador gravitatorio que representa la conectividad entre ciudades (Mínimo: 0 - Máximo: 4,148; Basnak et al., 2020) - Autor: Análisis Geoespacial en QGIS	
Compacidad	[Forma estandarizada]	0,29	Factor de forma estandarizado (0 - 1; Basnak et al., 2020) - Autor: Análisis Geoespacial en QGIS	
Prome. Pendiente	[%]	16	Autor: Capítulo 4.1.1: zonas urbanas 16% y para zonas rurales 25%.	
PUNTAJE URBANO		26,07		

Fuente: Elaboración propia.

$$\begin{aligned}
 PU = & \left(2,30 * \log_{10} (Po) \right) + \left(0,799 * \ln (PIB) \right) + \left(5,13 * 10^{-4} * (A_i) \right) - \left(2,91 * (Co) \right) \\
 & + \left(9,13 * 10^{-2} * \log_{10} (Po) * \ln (De) \right) - \left(1,66 * 10^{-3} * (M) \right) + \left(0,0422 * (Pe) \right) \\
 & + \left(0,352 * I \right)
 \end{aligned}$$

Donde:

- PU : Puntaje Urbano
- Po : Población.
- A_i : Atractividad
- Co : Compacidad
- De : Densidad
- M : Motor
- Pe : Pendiente promedio (%)
- I : Integración

$$\begin{aligned}
 PU_{Medellín} = & \\
 & (2,30 * \log_{10} (4055296)) + (0,799 * \ln (3794)) + (5,13 * 10^{-4} * 3,58) - (2,91 * 0,29) \\
 & + (9,13 * 10^{-2} * \log_{10} (4055296) * \ln (3479)) - (1,66 * 10^{-3} * (500)) \\
 & + (0,0422 * (16)) + (0,352 * 1) \\
 PU_{Medellín} = & 26,07
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, según el puntaje urbano calculado y la Tabla 4-32, la ciudad de Medellín puede acceder a un sistema de transporte tipo IV, correspondiente a BRT eléctrico o LRT o TRAM, por ende, puede pasar a la etapa 2 o evaluación.

ETAPA DE EVALUACIÓN

La etapa de evaluación comprende la construcción y el análisis de los indicadores expuestos en el resumen metodológico de la Tabla 4-33 a partir de la recolección de información de centros administrativos de la ciudad de Medellín como es el caso de Metro de Medellín y los geo-portales como: Geomedellín y Datos abiertos Valle de Aburrá, los cuales contienen archivos de información geográfica.

Se realizó una depuración de información y análisis geoespaciales en el software de código abierto QGIS. A continuación, se presenta los ejemplos de cálculo correspondientes a cada indicador de la metodología del capítulo 4 para el corredor del “Tren Ligero de la 80” en la ciudad de Medellín; las fuentes de cada uno de los datos recolectados se encuentran indicados en la Tabla 5-5.

Ítem Densidad en Transporte de Pasajeros, evaluado mediante el indicador Densidad Potencial de la Demanda.

La densidad potencial de la demanda para el corredor de Medellín se calcula a partir de la ecuación (6)

$$DPD_A \left(\frac{Viajes}{día * Km} \right) = \frac{q_c \left(\frac{Viajes}{día} \right)}{L_c (Km)}$$

Donde:

- DPD_A : Densidad potencial de la demanda ajustada
- q_c : Demanda del corredor
- L_c : Longitud del corredor

Demanda del proyecto, aproximadamente 8.800 Viajes/Hora/Sentido en un periodo de servicio de 10 horas.

$$Demanda\ corredor = 8.800 * 10 = 88.000\ viajes/día$$

Longitud del corredor calculada a partir de análisis geoespacial (ver Figura 5-5)= 13.30 Km

$$DPD_A = \frac{88.000\ viajes/día}{13.30\ Km} \approx 6.617 \left(\frac{Viajes}{Km * día} \right)$$

Teniendo en cuenta que el valor anterior se ubica en una densidad potencial de demanda mayor de 5.500 viajes/km/día, el puntaje para los tres sistemas de evaluación en el Ítem de Densidad en Transporte de Pasajeros según la Tabla 4-33 es:

- BRT = 1 punto
- TRAM = 2 puntos
- LRT = 7 puntos

Ítem Escala de la ciudad en transporte de pasajeros, evaluado mediante el indicador Compacidad (Co) y Esbeltez (Es)

La compacidad es un factor de forma estandarizada.

Los rangos de compacidad son:

- Co <= 0,35 Baja
- Co > 0,35 Alta

En la Figura 5-4 se evidencian los análisis geoespaciales correspondiente al área urbana de Medellín para calcular los indicadores de compacidad y esbeltez, la compacidad fue calculada anteriormente dando como resultado 0,29.

Por lo tanto, la compacidad del área urbana del valle de Aburrá corresponde a baja, por lo que se puede definir como una ciudad poco compacta donde los viajes tienden a ser más largos y con mayor concentración espacial.

La esbeltez este indicador que establece la relación entre los semiejes mayor y menor de una forma dada (ver ecuación (2)).

$$Es = \frac{Sc}{Sf}$$

Donde:

- Es : Esbeltez.
- Sc : superficie de la ciudad a analizar.
- Sf : perímetro zona urbana de la ciudad área del círculo envolvente mínimo.

El efecto de este indicador debe ser similar al de la compacidad, en general, las ciudades más esbeltas tienden a ser menos compactas, por lo que una esbeltez creciente debe estar relacionada con la mayor complejidad de los sistemas de transporte (ver capítulo 3.6.2).

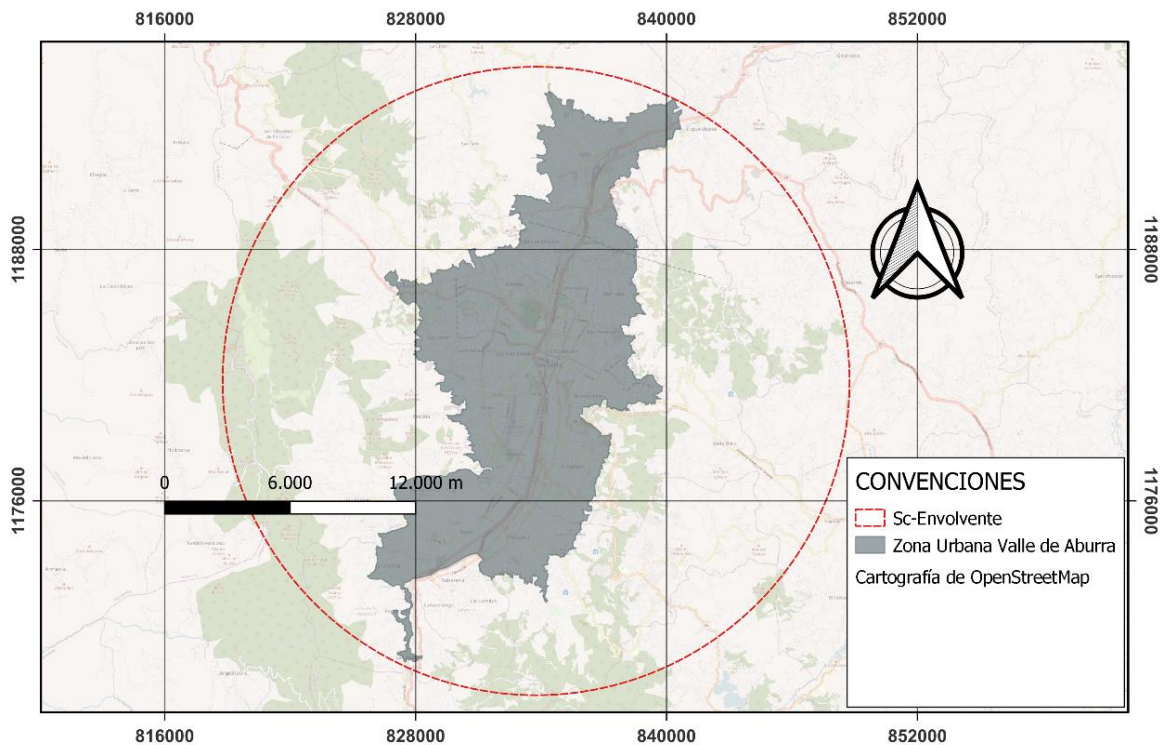
Los rangos de esbeltez son:

- Es ≤ 3,0 Baja
- Es > 3,0 Alta

Datos del área urbana de Medellín para calcular la esbeltez estimados a partir de análisis geoespacial (ver Figura 5-4).

- Superficie del del área urbana del valle de Aburrá (Medellín) = 170,35 Km²
- Circulo envolvente mínimo del área urbana del valle de Aburrá (Medellín) = 706,09 Km²

$$Es = \frac{706,09 \text{ Km}^2}{170,60 \text{ Km}^2} = 4,14$$

Figura 5-4: Área envolvente mínima zona urbana valle de Aburrá, Medellín (Colombia).

Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

Por lo tanto, la esbeltez del área urbana del valle de Aburrá corresponde a alta, por lo que se puede definir como una ciudad menos compacta, se infiere que debe estar relacionada con la mayor complejidad de los sistemas de transporte.

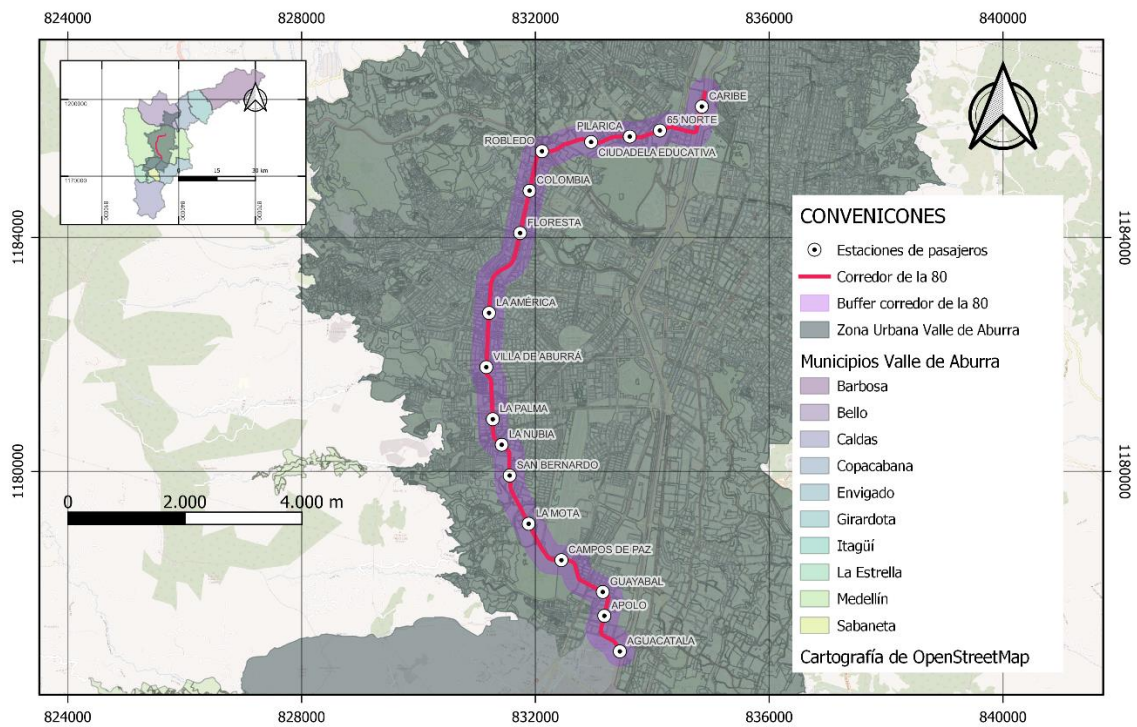
Teniendo en cuenta los valores anteriores de compacidad baja y esbeltez alta, la ciudad se caracteriza como Línea – Irregular (ver Tabla 4-10) y según la Tabla 4-33, el puntaje para los tres sistemas de evaluación en el ítem de escala de la ciudad en transporte de pasajeros es:

- BRT = 4 punto
- TRAM = 4 puntos
- LRT = 4 puntos

Ítem Forma de la ruta en transporte de pasajeros, evaluado mediante el indicador Tipología de la ruta:

La tipología de la ruta se definió a partir de un análisis geoespacial en el software de código abierto QGIS y las condiciones de operación del sistema; en la Figura 5-5, se puede observar la forma de la ruta de transporte.

Figura 5-5: Corredor de la avenida 80, Medellín (Colombia).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

La clasificación de la tipología de la ruta es Semicircular, además, se puede indicar que es un corredor que hace parte de una red de corredores que necesitan estar conectados.

Teniendo en cuenta la información anterior y la Tabla 4-33, el puntaje para los tres sistemas de evaluación en el Ítem de forma de la red en transporte de pasajeros es:

- BRT = 7 punto
- TRAM = 4 puntos
- LRT = 3 puntos

Ítem Usos del suelo en transporte de pasajeros, evaluado mediante los indicadores Requerimiento de la superficie de transporte, Espacio público, Accesibilidad al suelo mediante transporte e influencia del transporte en el uso del suelo.

Indicador Requerimiento de la superficie de transporte

El requerimiento de superficie de transporte es el área servida a la población por el sistema de transporte público, generalmente, es la distancia que puede ser recorrida a pie en cinco minutos (radio de 200 metros a 250 metros) desde cualquier estación, siendo accesible, confiable y segura, con el fin, de que los recorridos de larga distancia (que estén por fuera del rango para ir a pie o en bicicleta) puedan ser captados y realizados en estos sistemas de transporte (ver capítulo 4.2.4.1).

Para calcular el requerimiento de superficie de transporte se utiliza la ecuación (7):

$$RST = \frac{A}{B}$$

Donde:

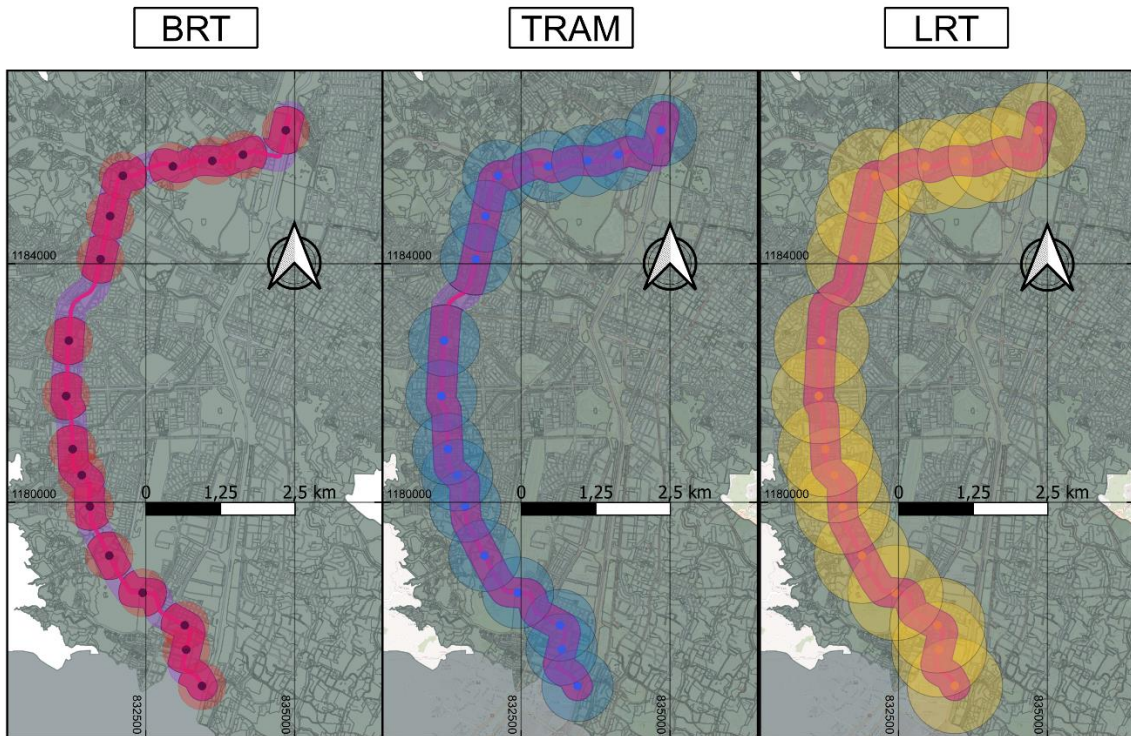
- RST : requerimiento de superficie de transporte
- A : medir el área que cubren las estaciones de la ruta de transporte público. Radio: 400 m BRT, 600 m TRAM y 800 m LRT, sobre la franja de cobertura del corredor.
- B : medir el área total, correspondiente al buffer o franja de cobertura del corredor.

Los rangos del requerimiento de la superficie de transporte son:

- Más de 55%, es bueno.
- Menos del 55%, tiene implicaciones

Los datos del corredor de la avenida de la 80 para calcular el requerimiento de superficie de transporte son estimados a partir de análisis geoespaciales (ver Figura 5-6)

Figura 5-6: Área de cobertura del servicio de transporte de pasajeros por sistema, Medellín (Colombia).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

- Buffer o franja de cobertura corredor de la avenida 80 = 6,86 Km²
- Área de cobertura de las estaciones con sistema tipo BRT eléctrico sobre el buffer del corredor = 5,75 Km²
- Área de cobertura de las estaciones con sistema tipo TRAM sobre el buffer del corredor = 6,65 Km²
- Área de cobertura de las estaciones con sistema tipo LRT sobre el buffer del corredor = 6,86 Km²

$$RST_{BRT} = \frac{5,75 \text{ Km}^2}{6,86 \text{ Km}^2} = 0,84 \geq 0,55$$

$$RST_{TRAM} = \frac{6,65 \text{ Km}^2}{6,86 \text{ Km}^2} = 0,97 \geq 0,55$$

$$RST_{LRT} = \frac{6,86 \text{ Km}^2}{6,86 \text{ Km}^2} = 1,00 \geq 0,55$$

De lo anterior, se indica que el requerimiento de la superficie de transporte es mayor de 55% para los tres sistemas de transporte, lo cual infiere que la cobertura para captar usuarios es buena teniendo en cuenta unas condiciones accesibles, seguras y confiables.

A partir de la información anterior y la Tabla 4-33, el puntaje para los tres sistemas de evaluación en el indicador requerimiento de la superficie de transporte es:

- BRT = 2 punto
- TRAM = 3 puntos
- LRT = 4 puntos

Indicador Espacio público

En el espacio público, los sistemas ferroviarios urbanos de transporte de pasajeros tienen mayor impacto positivo que los sistemas carreteros, además, los costos en que incurren la implementación urbanística de sistemas ferroviarios segregados son altos, lo cual, no es muy llamativo para los entes gubernamentales (ver capítulo 4.2.4.2)

De la búsqueda de información en los portales públicos, se identificó que en la proyección del corredor de mediana capacidad de pasajeros no habrá implementación de nuevos espacios públicos, el impacto en el espacio público es bajo, se interferirá lo actual en baja medida para no crear afectaciones negativas, dado los altos costos de implementación del sistema de transporte en una localidad densa en población y construcciones.

Por ende, el corredor de la avenida de la 80 en cuanto a su intervención en el espacio público tiene un impacto cualitativo negativo debido a su baja interferencia en el espacio público.

Teniendo en cuenta la información anterior y la Tabla 4-33, el puntaje para los tres sistemas de evaluación en el indicador espacio público es:

- BRT = 0 punto
- TRAM = 0 puntos
- LRT = 0 puntos

Indicador Accesibilidad al suelo mediante transporte

Se mide como el impacto en las superficies abandonadas y nuevas.

- Post-uso del suelo, Implementación de oficinas abandonadas, centrales de estacionamientos, etc.
- Pre-uso del suelo, tierra que no ha sido construida.

De la búsqueda de información en los portales públicos se identificó que, en la proyección del corredor de mediana capacidad de pasajeros, la línea se desarrollará sobre terrenos ya construidos y no habrá adecuaciones de equipamientos y estacionamientos antiguos.

Según la Tabla 4-15, la accesibilidad al suelo es baja porque no cuenta con acceso a Post-uso del suelo, ni acceso al Pre-uso del suelo.

Teniendo en cuenta la información anterior y la Tabla 4-33, el puntaje para los tres sistemas de evaluación en el indicador accesibilidad al suelo mediante transporte es:

- BRT = 0 punto
- TRAM = 0 puntos
- LRT = 0 puntos

Indicador Influencia del sistema de transporte en el uso del suelo

Los sistemas férreos tienen mayor incidencia en la valorización de la tierra que los sistemas carreteros, por lo tanto, gentrifican (desplazan) a los usuarios de estratos más bajos, los cuales realizan el mayor volumen de viajes en transporte público, a partir de esto, se clasifica el sistema de transporte de menor a mayor respecto al impacto negativo en el uso del suelo: (1) BRT eléctrico, (2) TRAM y (3) LRT.

No se necesita hacer cálculos o identificar información, el puntaje se asigna directamente según la Tabla 4-33.

- BRT = - 1 punto
- TRAM = - 2 puntos
- LRT = - 3 puntos

ETAPA DE DECISIÓN

En esta etapa se selecciona la alternativa que tenga el mayor puntaje; en caso de empate, la selección del sistema será desempataada a partir de la suma del puntaje del indicador de densidad potencial de la demanda más el puntaje del indicador de la tipología de la ruta y si vuelve a presentarse un empate el valor de desempate será el que tenga menor impacto de gentrificación a partir del indicador de influencia del sistema de transporte en el uso del suelo. El sistema de transporte con menor impacto en la gentrificación es el BRT, le sigue el TRAM y por último el LRT.

Se suman cada uno de los puntajes para cada sistema evaluado a partir de los cálculos correspondientes de cada indicador de la metodología.

BRT eléctrico

Densidad potencial Demanda = 6.617 Viajes/Km/día	1 punto
Escala o forma de la ciudad = Lineal - Irregular	4 puntos
Tipo de ruta = Semicircular	7 puntos
Usos del suelo	
Requerimiento de la superficie de transporte = 55% con cobertura	2 puntos
Espacio Público = Bajo impacto	0 puntos
Accesibilidad al uso del suelo en transporte = Baja	0 puntos
Influencia del sistema en el uso del suelo = siempre negativo	-1 punto
Total	13 Puntos

TRAM

Densidad potencial Demanda = 6.617 Viajes/Km/día	2 punto
Escala o forma de la ciudad = Lineal - Irregular	4 puntos
Tipo de ruta = Semicircular	4 puntos

Usos del suelo

Requerimiento de la superficie de transporte = 55% con cobertura	3 puntos
Espacio Público = Bajo impacto	0 puntos
Accesibilidad al uso del suelo en transporte = Baja	0 puntos
Influencia del sistema en el uso del suelo = siempre negativo	-2 punto

Total **11 Puntos**

LRT

Densidad potencial Demanda = 6.617 Viajes/Km/día	7 punto
Escala o forma de la ciudad = Lineal - Irregular	4 puntos
Tipo de ruta = Semicircular	3 puntos
Usos del suelo	
Requerimiento de la superficie de transporte = 55% con cobertura	4 puntos
Espacio Público = Bajo impacto	0 puntos
Accesibilidad al uso del suelo en transporte = Baja	0 puntos
Influencia del sistema en el uso del suelo = siempre negativo	-3 punto

Total **15 Puntos**

Del análisis anterior, se determina que el sistema de transporte idóneo para operar sobre el corredor propuesto en la avenida 80 es el tren ligero (LRT – *Light Rail Transit*).

En la Tabla 5-5, se presenta el resumen de la información recolectada, cálculos y análisis geoespaciales con su respectiva fuente de información para el corredor de la avenida 80 en la ciudad de Medellín (Colombia).

Se desarrollo el mismo ejercicio para corredores de transporte público en las ciudades de Bogotá (Colombia) y Guadalajara (México). Se presentará un resumen de los cálculos y análisis desarrollados para estos casos estudio.

Tabla 5-5: Resumen metodología multicriterio a nivel ex ante, para valorar los sistemas de transporte tipo BRT eléctrico, TRAM y LRT en la ciudad de Medellín (Colombia).

INDICADOR	VARIABLE	DATO	UNIDAD	VALOR	PUNTAJE			COMENTARIO	FUENTE
					BRT	TRAM	LRT		
Densidad Potencial de la Demanda	Demanda	88.000	[viajes/día]	6,617	1	2	7	*Aproximadamente 8.800 viajes/Hora/Sentido *10 horas de Servicio	Solicitud Metro de Medellín, información con fines académicos. Respuesta 20220001709 correspondiente a la Solicitud 20220000470.
	Long. Corredor	13,30	[Km]					Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.	
Escala de la Ciudad, Compacidad(Co) y Esbeltez (Es)	Co - Area Zona Urbana	170,35	[Km ²]	0,29				Tiene una compacidad (Co): Baja y una Esbeltez (Es): Alta, por lo tanto se caracteriza por ser una ciudad Lineal-Irregular.	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
	Co - Perímetro Zona Urbana	161,60	[Km]		4	4	4		
	Es - Sc	706,09	[Km ²]	4,14					
	Es - Sf	170,60	[Km ²]						
Forma de la Ruta	Clasificación	Semi-circular	[Tipología]	-	7	4	3	Es un corredor que hace parte de una red de corredores y necesitan estar conectados.	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
Usos del Suelo	BRT - A	5,75	[Km ²]	0,84				Requerimiento de la superficie de Transporte	
	BRT - B	6,86	[Km ²]					*Área que cubren las estaciones de la ruta de transporte público(A).	
	TRAM - A	6,65	[Km ²]	0,97	2	3	4	*Área correspondiente al buffer o franja de cobertura (B).	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
	TRAM - B	6,86	[Km ²]					Cubrimiento Bueno > 0,55	
	LRT - A	6,86	[Km ²]	1,00				No habrá implementación de nuevos espacios públicos, el impacto en el espacio público es bajo (inferir lo actual en baja medida, para no crear afectaciones negativas, dado los altos costos de implementación).	Solicitud Metro de Medellín, información con fines académicos. Respuesta 20220001709 correspondiente a la Solicitud 20220000470.
	LRT - B	6,86	[Km ²]						
Usos del Suelo	Espacio Público	Nuevos espacios públicos.	[Cualitativo]	Negativo	0	0	0	Se construya la línea, sobre terrenos ya constituidos, y no habrá adecuaciones de equipamientos y estacionamientos antiguos.	Solicitud Metro de Medellín, información con fines académicos. Respuesta 20220001709 correspondiente a la Solicitud 20220000470.
	Accesibilidad al Suelo	Sin Uso de antiguas Estaciones Sin Nuevos Terrenos	[Post - Uso] [Pre - Uso]	Baja	0	0	0		
	Influencia del sistema de transporte	Impacto del sistema de transporte en el suelo	[Descriptivo]	Negativo	-1	-2	-3	Los sistemas de transporte valorizan de la tierra; por lo tanto, gentrifican (desplazan) a los usuarios de estratos más bajos, los cuales realizan el mayor volumen de viajes en transporte público.	Investigación del Autor.
RESULTADO					13,0	11,0	15,0	Se suman los puntajes para cada modo, y el sistema seleccionado es el de mayor puntaje.	Autor

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Corredor en Bogotá D.C. (Colombia)

El CONPES 4034 de 2021, describe lo siguiente sobre el corredor del Norte de Bogotá; es el corredor férreo preliminarmente denominado Regiotram del Norte, es estratégico para la región Bogotá D.C. de Cundinamarca de acuerdo con lo expuesto en la visión a mediano y largo plazo de la región en documentos previos como el Documento CONPES 3677, POT y PMM entre otros. Con su desarrollo, se aprovecha el corredor para proveer una opción sostenible de transporte que conecte los municipios aledaños con Bogotá, porque a futuro se promueve un desarrollo orientado al transporte sostenible y así desacelerar la expansión basada en baja densidad que siga aumentando los viajes de transporte privado.

Su trazado inicia en el kilómetro 5 del actual corredor férreo en cercanía al centro comercial Gran Estación (calle 26) de Bogotá D.C. y transcurre en el sentido norte por la avenida Novena hasta llegar a la estación La Caro, en este lugar se desvía para continuar hacia Chía, Cajicá y Zipaquirá, en donde termina en el abscisado kilómetro 53.

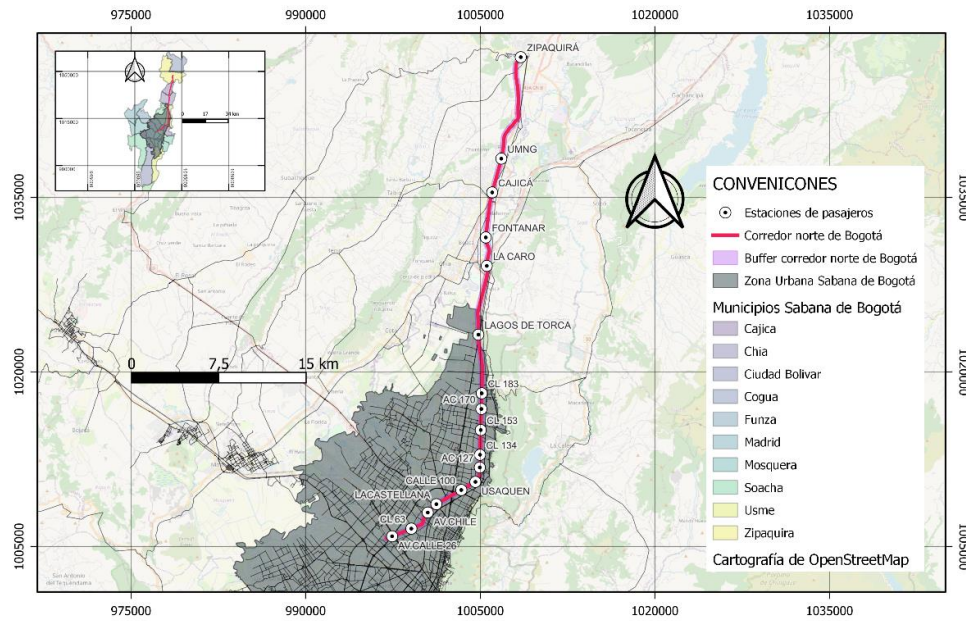
El trazado en estudio preliminarmente contempla un total de 47,5 km, 24,9 km en el distrito capital y 22,6 km en los municipios de La Sabana, así mismo se está analizando la mejor alternativa para viabilizar la operación de trenes de pasajeros, carga y optimización logística entre Bogotá D.C. y Zipaquirá. (ver Figura 5-7)

El corredor se encuentra actualmente en estudios de factibilidad y se espera contar con los resultados de la estructuración integral durante el segundo trimestre de 2022, de estos estudios se obtendrá el modelo operacional y de transacción desde el punto de vista técnico, financiero, ambiental, legal, predial, de equidad de género y de responsabilidad social en el corredor férreo señalado, así como la mejor alternativa para el manejo de la carga.

A continuación, se evidencias los resúmenes de cálculos y mapas siguiendo los mismos pasos descritos para el corredor Medellín (Colombia), con el fin de establecer cual sistema es el idóneo en la etapa de prefactibilidad.

La información fue extraída de portales administrativos y geo-portales de la ciudad de Bogotá D.C.

Figura 5-7: Corredor Norte, Bogotá D.C. (Colombia).

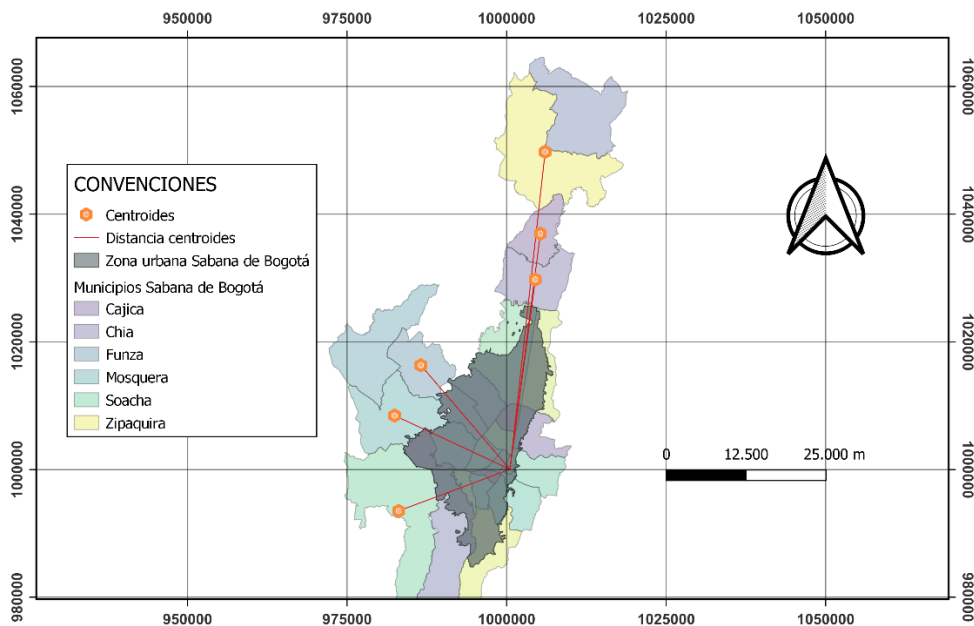


Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

ETAPA DE DIAGNOSTICO

Se establece cual es el máximo sistema al cual puede acceder la ciudad de Bogotá D.C.

Figura 5-8: Distancia entre centroides municipios Sabana de Bogotá, Bogotá D.C. (Colombia).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

Tabla 5-6: Datos cálculos compacidad y atraktividad.

VARIABLE	UNIDAD	DATO	FUENTE
Área Zona Urbana de la Sabana de Bogotá	[Km ²]	419,27	Autor: Análisis Geoespacial en QGIS
Perímetro Zona Urbana de la Sabana de Bogotá	[Km]	203,92	
Compacidad			0,356

Atractivo	3,726	El factor n, es un valor de calibración; este valor se ajusto para que el resultado de A _i de cada par Origen - Destino, estuviera dentro de los rangos descritos por Basnak et al., 2020		$A_i = \max_i \left[\frac{Población_j}{(distancia_{ij})^n} \right]$
n	4,2			
PAR	DISTANCIA (Km)	POBLACIÓN	A	FUENTE - POBLACIÓN
SantaFe - Cajica	37,22	70.689	0,0179	Población: https://www.dane.gov.co/files/censo2018/proyecciones-de-poblacion/Municipal/anexo-proyecciones-poblacion-Municipal_Area_2018-2035.xlsx
SantaFe - Chía	29,99	25.394	0,0159	
SantaFe - Funza	21,47	110.894	0,2826	
SantaFe - Mosquera	19,93	159.650	0,5562	Distancia: Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
SantaFe - Soacha	18,62	803.750	3,7257	
SantaFe - Zipaquirá	50,02	132.465	0,0097	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-7: Datos para calcular el puntaje urbano de Bogotá D.C. (Colombia).

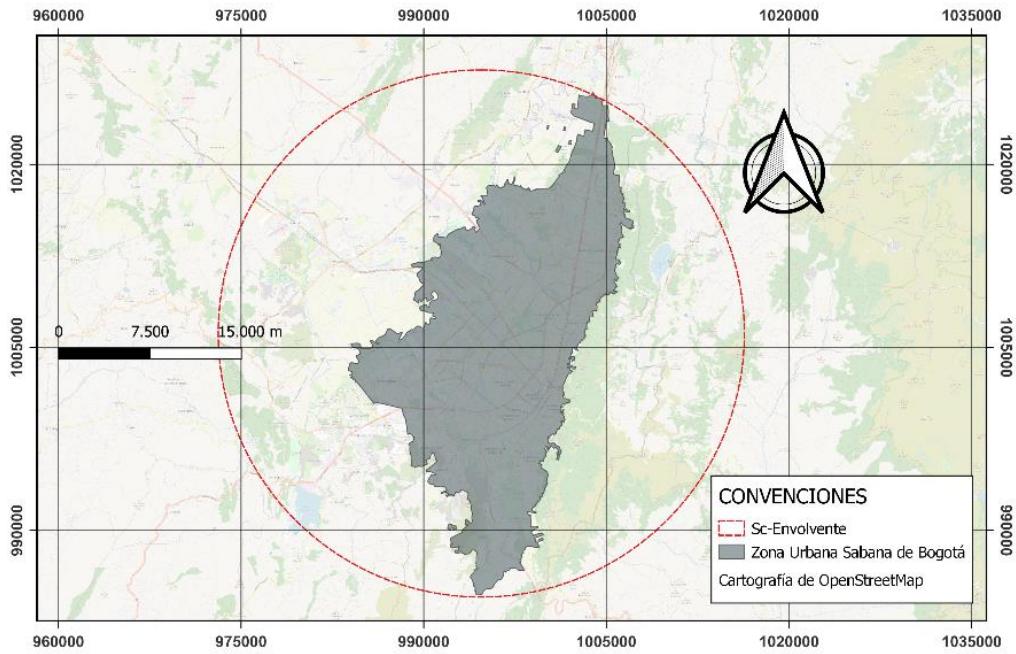
VARIABLE	UNIDAD	DATO	FUENTE	LINK DE BUSQUEDA
Población	[Habitantes]	8.181.047	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) - 2018	http://orarbo.gov.co/apc-aa-files/a65cd60a57804f3f1d35afb36cfc958/bogota_ficha_11001.pdf
PIB per cápita	[\$US]	7.946	Datos Generales y Cifras de Bogotá Región - 2020	https://es.investinbogota.org/por-que-bogota/datos-generales-y-cifras-de-bogota#:~:text=En%202020%2C%20el%20PIB%20de
Densidad	[Habitantes/Km ²]	5.097	Departamento Nacional de Planeación (DNP) - 2018	http://orarbo.gov.co/apc-aa-files/a65cd60a57804f3f1d35afb36cfc958/bogota_ficha_11001.pdf
Motor	[Autos/1000 Hab]	1.169	Bogotá cómo vamos - 2021	https://bogotacomovamos.org/preocupacion-crecimiento-de-parque-automotor/#:~:text=Hoy%2C%20en%20Bogot%C3%A1%2C%20circular%20cerca,por%20cada%20motocicleta%2C%204%20carros.
Integración	[Dummy]	1	Uno (1) corresponde a transbordos gratuitos o a costo reducido entre el modo de mayor categoría y otros modos en una ciudad determinada, o entre las diferentes rutas de transporte público; de lo contrario es cero (0); Basnak et al., 2020.	
Atractivo	[Conectividad]	3,73	Indicador gravitatorio que representa la conectividad entre ciudades (Mínimo: 0 - Máximo: 4,148; Basnak et al., 2020) - Autor: Análisis Geoespacial en QGIS	
Compacidad	[Forma estandarizada]	0,36	Factor de forma estandarizado (0 - 1; Basnak et al., 2020) - Autor: Análisis Geoespacial en QGIS	
Prome. Pendiente	[%]	16	Autor: Capítulo 4.1.1: zonas urbanas 16% y para zonas rurales 25%.	
PUNTAJE URBANO				26,52

Fuente: Elaboración propia.

ETAPA DE EVALUACIÓN

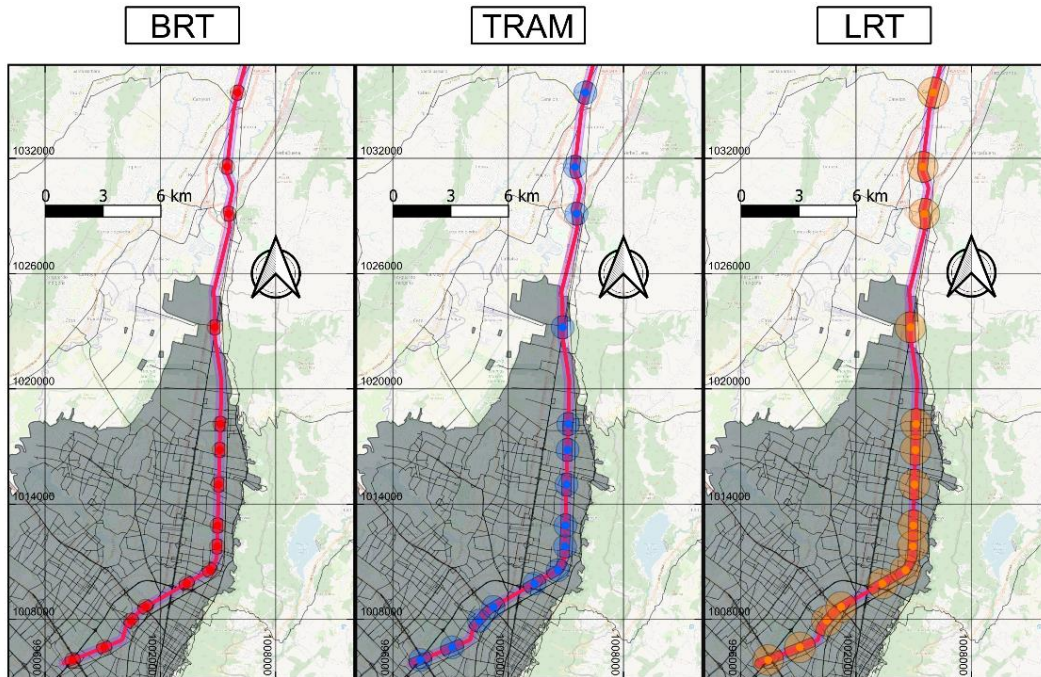
Por lo tanto, según el puntaje urbano calculado y la Tabla 4-32, la ciudad de Bogotá D.C. puede acceder a un sistema de transporte tipo V, correspondiente a transporte ferroviario pesado de pasajeros – METRO y los de menor categoría, por ende, puede pasar a la etapa 2 o evaluación.

Tabla 5-8: Área envolvente mínima zona urbana Sabana de Bogotá, Bogotá D.C. (Colombia).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

Tabla 5-9: Área de cobertura del servicio de transporte de pasajeros por sistema, Bogotá D.C. (Colombia).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

Tabla 5-10: Resumen metodología multicriterio a nivel ex ante, para valorar los sistemas de transporte tipo BRT eléctrico, TRAM y LRT en la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia).

INDICADOR	VARIABLE	DATO	UNIDAD	VALOR	PUNTAJE			COMENTARIO	FUENTE
					BRT	TRAM	LRT		
Densidad Potencial de la Demanda	Demanda	200.000	[viajes/día]	4.211	2	4	2	*Configuración alta de estaciones, diseminadas a lo largo del corredor, tanto en la parte urbana como metropolitana, sin conllevar a una captura superior a los 20.000 pas/hora/sentido ni inferior a los 15.000. *10 horas de servicio	ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DEL CORREDOR FÉRREO TRÁNSITO, TRANSPORTE, SEGURIDAD VIAL Y MOVILIDAD - UNIÓN TEMPORAL EGIS-DELOITE-DURÁN & OSORIO
	Long. Corredor	47,50	[Km]					Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.	
Escala de la Ciudad, Compacidad(Co) y Esbeltez (Es)	Co - Área Zona Urbana	419,27	[Km ²]	0,36	5	4	3	Tiene una compacidad (Co): Alta y una Esbeltez (Es): Alta, por lo tanto se caracteriza por ser una ciudad Lineal.	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
	Co - Perímetro Zona Urbana	203,92	[Km]						
	Es - Sc	1,466,64	[Km ²]	3,50					
	Es - Sf	419,27	[Km ²]						
Forma de la Ruta	Clasificación	Radial	[Tipología]	-	5	5	4	Promueve la integración con otros modos de transporte y es una ruta que canaliza los viajes al centro de actividades.	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
Usos del Suelo	BRT - A	6,24	[Km ²]	0,26				Requerimiento de la superficie de Transporte	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
	BRT - B	23,61	[Km ²]					*Área que cubren las estaciones de la ruta de transporte público(A).	
	TRAM - A	9,91	[Km ²]	0,42	0	0	0	*Área correspondiente al buffer o franja de cobertura(B).	
	TRAM - B	23,61	[Km ²]					Cubrimiento Bueno > 0,55	
	LRT - A	12,21	[Km ²]	0,52					
	LRT - B	23,61	[Km ²]						
Espacio Público Inmobiliario Urbano	Nuevo		[Cualitativo]	Positivo	1	1	2	El proyecto se ha planteado con un enfoque de inclusión, de modo tal que se garanticen altos estándares de servicio para los diferentes actores de la población, incluyendo diferentes géneros y condiciones sociales.	ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DEL CORREDOR FÉRREO TRÁNSITO, TRANSPORTE, SEGURIDAD VIAL Y MOVILIDAD - UNIÓN TEMPORAL EGIS-DELOITE-DURÁN & OSORIO
	Con Uso de antiguas Estaciones		[Post - Uso]	Alta	1	3	1	Uso de la antigua estación ferroviaria de Zapaquirá y compra de nuevos terrenos sin construir a las afueras de Bogotá, para ampliar la sección transversal del sistema.	
	Nuevos Terrenos		[Pre - Uso]					Los sistemas de transporte valorizan de la tierra; por lo tanto, gentrifican (desplazan) a los usuarios de estratos más bajos, los cuales realizan el mayor volumen de viajes en transporte público.	
Influencia del sistema de transporte	Impacto del sistema de transporte en el suelo		[Descriptivo]	Negativo	-1	-2	-3	Se suman los puntajes para cada modo, y el sistema seleccionado es el de mayor puntaje.	Investigación del Autor.
RESULTADO					13,0	15,0	9,0		Autor

Fuente: Elaboración propia.

ETAPA DE DECISIÓN

De la Tabla 5-10, se concluye que el sistema de transporte idóneo para operar sobre el corredor Norte es el tranvía (*TRAM*).

5.1.3. Corredor en Guadalajara (México)

El corredor de transporte de mediana capacidad en Guadalajara (México), es un corredor que opera con tren ligero, se tomó como referencia un sistema de transporte en operación con el fin de medir la exactitud de la metodología propuesta con un proyecto ya ejecutado.

Cabe mencionar, que en la decisión final para poner en operación un sistema de transporte intervienen diversas disciplinas entre ellas un aspecto político que puede cambiar la decisión final; esta metodología funciona como soporte para la decisión en una etapa de prefactibilidad.

A continuación, se exponen las características del sistema de transporte para el corredor de Guadalajara denominado “Línea 3” (Figura 5-9), esta información fue extraída del portal oficial del operador “Mi Tren”.

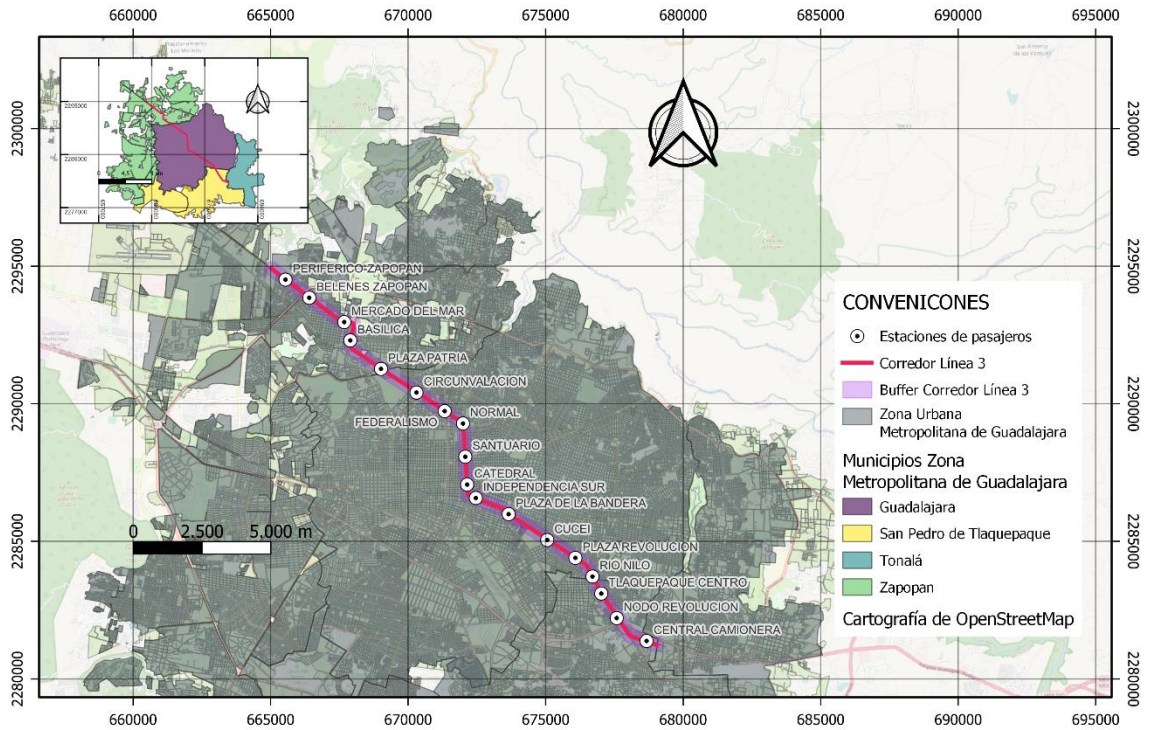
La Línea 3 de Mi Tren, es una de las obras más importantes en cuanto a infraestructura de transporte público para el área metropolitana de Guadalajara y que suma a la apuesta del gobierno de Jalisco por una movilidad integrada que conecte a los usuarios de forma rápida, accesible y segura.

- Horarios: 05:00 a 23:00 horas
- Tiempo de recorrido: 33 minutos
- Pago: Integrado.
- Con la Línea 3, se puede viajar a los centros históricos de Guadalajara, Zapopan y Tlaquepaque en un solo recorrido.

A continuación, se evidencian los resúmenes de cálculos y mapas siguiendo los mismos pasos descritos para el corredor Medellín (Colombia), con el fin de establecer cual sistema es el idóneo y si corresponde a lo proyectado en la ciudad de Guadalajara.

La información fue extraída de portales administrativos y geo-portales de la ciudad de Guadalajara y el estado de Jalisco.

Figura 5-9: Línea 3, Guadalajara (México).

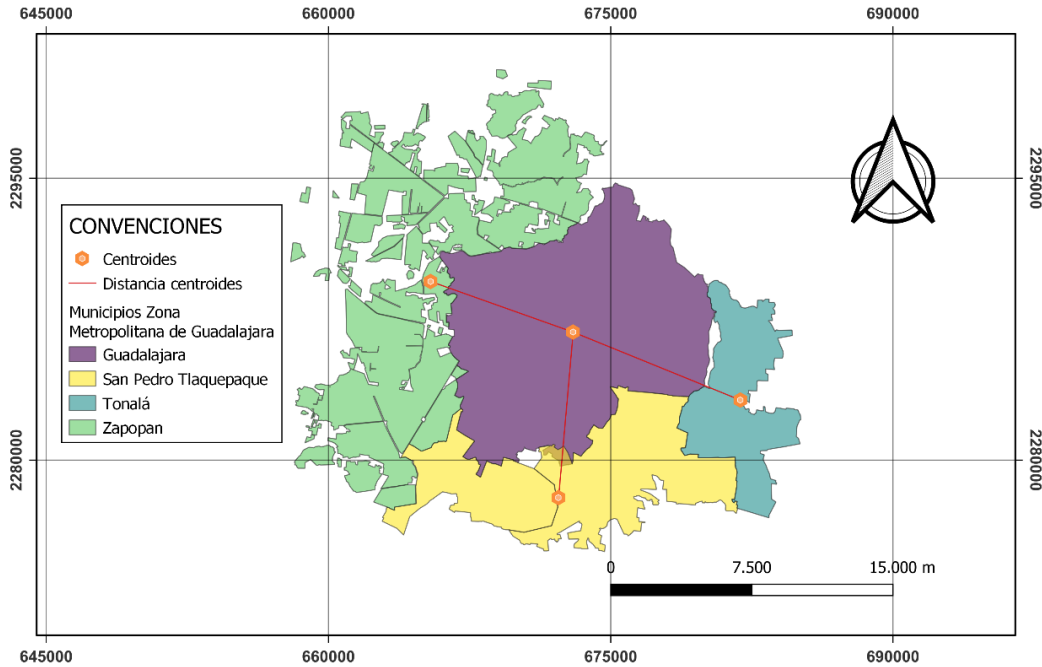


Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

ETAPA DE DIAGNOSTICO

Se establece cual es el máximo sistema al cual puede acceder la ciudad de Guadalajara.

Figura 5-10: Distancia entre centroides municipios zona metropolitana de Guadalajara, Guadalajara (México).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

Tabla 5-11: Datos cálculos compacidad y atractividad.

VARIABLE	UNIDAD	DATO	FUENTE
Área Zona Urbana Metropolitana de Guadalajara	[Km ²]	379,51	Autor: Análisis Geoespacial en QGIS
Perímetro Zona Urbana Metropolitana de Guadalajara	[Km]	168,76	
Compacidad		0,409	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-11: (Continuación)

Atractivo	3,603	El factor n, es un valor de calibración; este valor se ajusto para que el resultado de Ai de cada par Origen - Destino, estuviera dentro de los rangos descritos por Basnak et al., 2020	$A_i = \max_i \left[\frac{Población_j}{(distancia_{ij})^n} \right]$	
n	6,2			
PAR	DISTANCIA (Km)	POBLACIÓN	A	FUENTE
Guadalajara - Zapopan	8,04	1.476.491	3,6028	Población: https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara
Guadalajara - Tonalá	9,59	536.111	0,4385	Distancia: Análisis Geopespacial realizado por el Autor en QGIS.
Guadalajara - San Pedro Tlaquepaque	8,85	687.127	0,9247	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-12: Datos para calcular el puntaje urbano de Guadalajara (México).

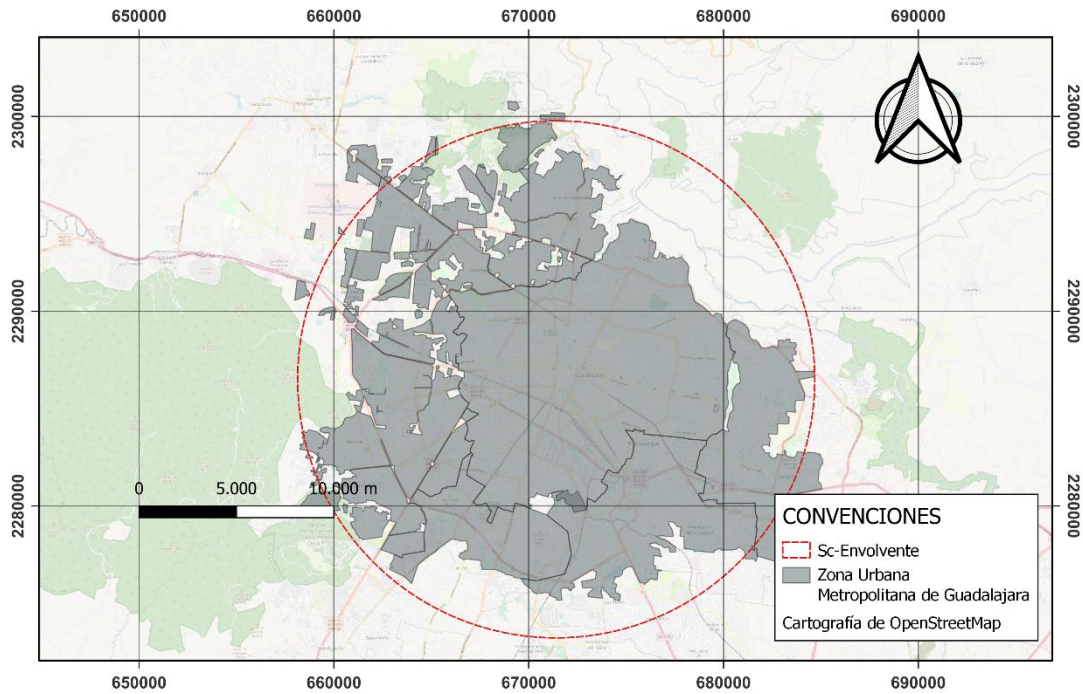
VARIABLE	UNIDAD	DATO	FUENTE	LINK DE BUSQUEDA
Población	[Habitantes]	5.179.874	Instituto de Información Estadístico y Geográfico de Jalisco (IIEG) - 2020	https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara
PIB per cápita	[\$US]	10.400	UDGTV44 (Canal periodístico) - 2022	https://udgtv.com/noticias/guadalajara-la-ciudad-la-desigualdad/
Densidad	[Habitantes/Km ²]	2.145	Instituto de Información Estadístico y Geográfico de Jalisco (IIEG) - 2020	https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara
Motor	[Autos/1000 Hab]	648	Instituto de Información Estadístico y Geográfico de Jalisco (IIEG) - 2020	https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2020/08/Ficha-Informativa_Parque-vehicular-2000-2019.pdf
Integración	[Dummy]	1	Uno (1) corresponde a transbordos gratuitos o a costo reducido entre el modo de mayor categoría y otros modos en una ciudad determinada, o entre las diferentes rutas de transporte público; de lo contrario es cero (0); Basnak et al., 2020.	
Atractivo	[Conectividad]	3,60	Indicador gravitatorio que representa la conectividad entre ciudades (Mínimo: 0 - Máximo: 4,148; Basnak et al., 2020) - Autor: Análisis Geoespacial en QGIS	
Compacidad	[Forma estandarizada]	0,41	Factor de forma estandarizado (0 - 1; Basnak et al., 2020) - Autor: Análisis Geoespacial en QGIS	
Prome. Pendiente	[%]	16	Autor: Capítulo 4.1.1: zonas urbanas 16% y para zonas rurales 25%.	
PUNTAJE URBANO			26,30	

Fuente: Elaboración propia.

ETAPA DE EVALUACIÓN

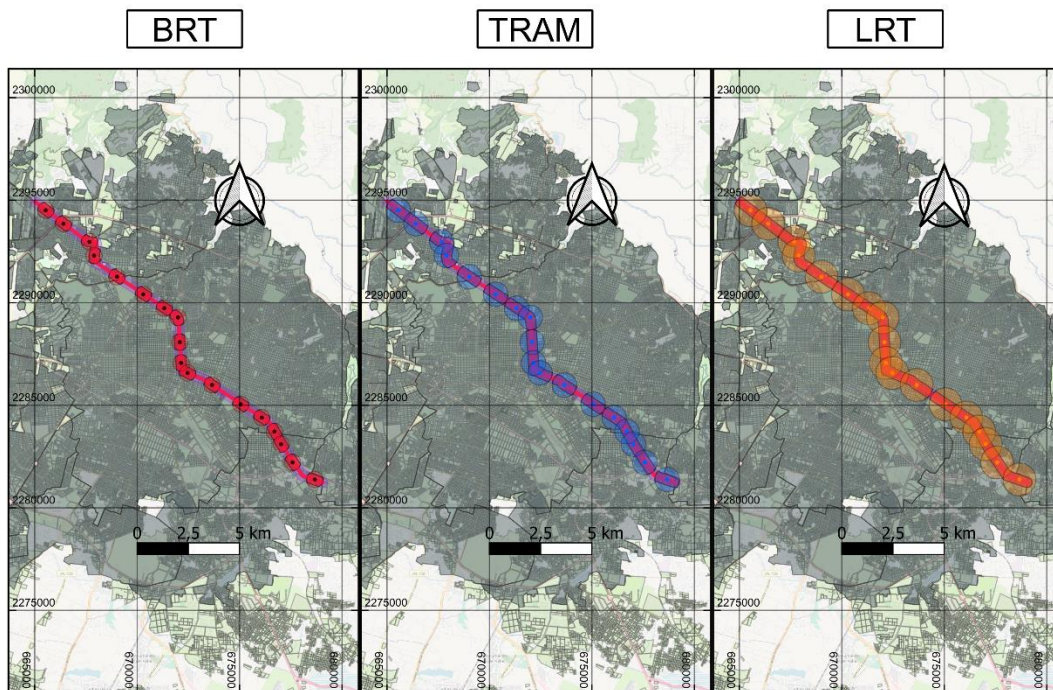
Por lo tanto, según el puntaje Urbano calculado y la Tabla 4-32, la ciudad de Guadalajara puede acceder a un sistema de transporte tipo IV, correspondiente a BRT eléctrico o LRT o TRAM, por ende, puede pasar a la etapa 2 o evaluación.

Tabla 5-13: Área envolvente mínima zona urbana Guadalajara, Guadalajara (México).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

Tabla 5-14: Área de cobertura del servicio de transporte de pasajeros por sistema, Guadalajara (México).



Fuente: Elaboración propia con herramienta QGIS.

Tabla 5-15: Resumen metodología multicriterio a nivel ex ante, para valorar los sistemas de transporte tipo BRT eléctrico, TRAM y LRT en la ciudad de Guadalajara (México).

INDICADOR	VARIABLE	DATO	UNIDAD	VALOR	PUNTAJE			COMENTARIO	FUENTE
					BRT	TRAM	LRT		
Densidad Potencial de la Demanda	Demanda	90,000	[viajes/día]	4,255	2	4	2	Este nuevo sistema de tren ligero realiza aproximadamente 90 mil viajes diarios	https://lineatres.jalisco.gob.mx/
	Long. Corredor	21,15	[Km]					Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.	
Escala de la Ciudad, Capacidad(Co) y Esbeltez (Es)	Co - Área Zona Urbana	379,51	[Km ²]	0,41				Tiene una compacidad (Co): Alta y una Esbeltez (Es): Baja, por lo tanto se caracteriza por ser una ciudad Cuadrícula	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
	Co - Perímetro Zona Urbana	168,76	[Km]		5	4	3		
	Es - Sc	553,38	[Km ²]	1,46					
	Es - Sf	379,51	[Km ²]						
Forma de la Ruta	Clasificación	Diametral	[Tipología]	-	3	4	7	La ruta pasa por el centro y conecta dos extremos de la ciudad, los principales Pares Origen y Destino.	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
	BRT - A	6,61	[Km ²]	0,62				Requerimiento de la superficie de Transporte	
Usos del Suelo	BRT - B	10,74	[Km ²]					*Área que cubren las estaciones de la ruta de transporte público(A).	
	TRAM - A	9,45	[Km ²]	0,88	2	3	4	*Área correspondiente al buffer o franja de cobertura(B).	Análisis Geoespacial realizado por el Autor en QGIS.
	TRAM - B	10,74	[Km ²]					Cubrimiento Bueno > 0,55	
	LRT - A	10,64	[Km ²]	0,99					
	LRT - B	10,74	[Km ²]						
	Espacio Público y Estaciones	Nuevos Parques y Estaciones		[Cualitativo]	Positivo	1	1	2	se caracteriza por atender equipamiento urbano, educativo, administrativo, económico y turístico.
Accesibilidad al Suelo	Con Uso de antiguos equipamientos.		[Post - Uso]	Medio	0,5	1,5	0,5	Otorgar servicio residencial	https://lineatres.jalisco.gob.mx/
	Sin Nuevos Terrenos		[Pre - Uso]						
Influencia del sistema de transporte	Impacto del sistema de transporte en el suelo		[Descriptivo]	Negativo	-1	-2	-3	Los sistemas de transporte valorizan de la tierra; por lo tanto, gentrifican (desplazan) a los usuarios de estratos más bajos, los cuales realizan el mayor volumen de viajes en transporte público.	Investigación del Autor.
RESULTADO					12,5	15,5	15,5	Se suman los puntajes para cada modo, y el sistema seleccionado es el de mayor puntaje.	Autor

Fuente: Elaboración propia.

ETAPA DE DESICIÓN

De la Tabla 5-15, se tiene empate de puntajes y se debe decidir entre tren ligero y tranvía, se desempata a partir de la suma del puntaje del indicador de densidad potencial de la demanda más el puntaje del indicador de la tipología de la ruta y si vuelve a presentarse un empate el valor de desempate será el que tenga menor impacto de gentrificación a partir del indicador de influencia del sistema de transporte en el uso del suelo. El sistema de transporte con menor impacto en la gentrificación es el BRT, le sigue el TRAM y por último el LRT.

TRAM

Densidad potencial Demanda = 4.255 Viajes/Km/día	4 punto
Tipo de ruta = Diametral	4 puntos
Total	8 Puntos

LRT

Densidad potencial Demanda = 4.255 Viajes/Km/día	2 punto
Tipo de ruta = Diametral	7 puntos
Total	9 Puntos

De acuerdo a lo anterior se concluye que el sistema de transporte idóneo para operar sobre el corredor de la Línea 3 es el tren ligero el cual coincide con el sistema de transporte que está en operación en la ciudad de Guadalajara.

6. Discusión

Los hallazgos encontrados a partir de la implementación metodológica para la selección de un sistema de transporte de mediana capacidad en una etapa ex ante, demuestran validez en los casos de estudios aplicados: estudio en la ciudad de Medellín (Colombia) el cual correspondió al tren ligero de la 80, en principio las decisiones administrativas de la ciudad de Medellín eran optar por corredores verdes, donde el modo que transitaría sería bus eléctrico, pero debido a la elevada carga de tráfico mixto, congestiones prolongadas y velocidades de operación de 12 Km/h, las intenciones de optar por un sistema de transporte público tipo BRT decayeron, y por ello, se adoptó un modo tipo tren donde los criterios de decisión fueron: la inserción urbana, disminución de la huella de carbono, atención de la demanda y gestión de limitantes sociales; es de notar que los criterios generales para la elección de un sistema de transporte es la población y la cantidad de viajes de pasajeros (Basnak et al., 2020), pero, como se evidencia en el caso estudio de la ciudad de Medellín, la elección de un sistema de transporte es sensible a criterios o variables diferentes a los generales usados por los tomadores de decisiones, este panorama valida el primer objetivo específico de la presente investigación, siendo uno de los puntos clave de la metodología diseñada en esta investigación, investigar variables que fuesen sensibles para decidir entre diferentes sistemas de transporte de mediana capacidad.

Continuando con lo anterior, a partir de las variables que tuvo en cuenta la administración de la ciudad de Medellín para la elección del sistema de transporte y comparando con las variables de esta investigación se tiene: 1. La inserción urbana se contrasta con el espacio público debido a la percepción de los usuarios por un cambio en el espacio, Díez (2021) indica que los ciudadanos de Medellín perciben que si se siguen con buses eléctricos no disminuirá la congestión y que los recursos destinados no serán usados adecuadamente, por ello se valida este argumento ya que la percepción del cambio en el espacio público se da con el desarrollo de nueva infraestructura producto de la implementación de un nuevo sistema de transporte;

2. la tipología de la ruta, dado que es un corredor semicircular es necesario transbordar a otros modos en las estaciones Caribe y Floresta visiones que tiene la ciudad para gestionar recursos correspondientes a la Ley de Metros (Colombia) y confirma lo expuesto por Molineros (2021) sugiriendo que las rutas de transporte deben promover la integración con otros modos, condición propia de las rutas radiales, estas características son evaluadas en la variable tipología de la ruta, expuesta en la metodología de esta investigación; 3. la atención de la demanda y mayores velocidades se contrasta con la densidad potencial de la demanda debido a que se presentan velocidades demasiado bajas es pertinente buscar un sistema de transporte que se encuentre segregado, el cual, pueda circular a mayores velocidades y captar un mayor número de usuarios (Vuchic, 2007 y Molinero y Sánchez, 1996), es decir la demanda de pasajeros; 4. la gestión de limitantes sociales se contrata con la influencia del suelo en el transporte, escala de la ciudad y accesibilidad al suelo, los sistemas de transporte son inoperables, mayores demoras, menor espacio público por lo que ajustarse al entorno existente y establecer los impactos que implica la implementación de un sistema de transporte son determinados por estos indicadores; de lo descrito anteriormente se denota que las variables establecidas son implementadas desde diferentes enfoques pero que tienen sensibilidad en la elección de un sistema teniendo en cuenta así que todas las variables son necesarias para la decisión final, por lo tanto, el interés fundamental de los tomadores de decisiones es definir cual parámetro tiene mayor peso, temas que se abordaron en esta investigación y que realzan los resultados calculados para un caso estudio real como el expuesto, en donde la elección definitiva fue tren ligero con 15 puntos por encima del tranvía con 11 puntos y el bus rápido eléctrico con 13 puntos, puntajes determinados a partir variables como: densidad de viajes, escala de la ciudad, forma de la ruta, y usos del suelo; es de aclarar que el sistema con mayor puntaje no necesariamente es el que se va a implementar ya que, la evaluación es en una etapa de prefactibilidad y en un ciclo de proyectos, el sistema seleccionado entraría a ser evaluado en una etapa posterior como factibilidad, y en esta etapa pueda que el tren ligero no sea viable teniendo que evaluarse otro modo, que para este caso sería el bus rápido eléctrico con carril preferencial y tráfico mixto ya que, quedo en segundo puesto.

Por otra parte, el caso estudio en el corredor norte de la ciudad de Bogotá D.C. (Colombia) tiene una peculiaridad en los resultados hallados, y es que, pese a ser una ciudad con categoría V (indicador de puntaje urbano propuesto por Basnack et al. (2020)), indicando que el máximo sistema de transporte al cual puede acceder es un metro pesado, el corredor en cuestión tiene un mayor trazado en la zona suburbana norte (municipios de chía, Cajicá y Zipaquirá), por lo que es lógico especular que debería evaluarse un tranvía o tren ligero o bus rápido eléctrico y no con un metro pesado, la demanda aproximada de 4.211 viajes/día que movería el corredor norte indicaría a largo plazo la adopción de un metro pesado, no obstante las políticas de la administración del distrito de Bogotá es optar por un sistema de transporte que sea de cercanías, disminuyendo el número de estaciones en la zona urbana de Bogotá y optando por sistemas con velocidades apropiadas como las que ofrece un sistema ferroviario tipo tranvía, la metodología diseñada en esta investigación acota los alcances que imponen las autoridades y la población respecto a las variables de decisión que son sensibles en la elección de un sistema que para este caso sería: 1. la tipología de la ruta, dado que los viajes que los usuarios realizaran son desde sus hogares hasta el centro de actividades, 2. la demanda de usuarios a atender y la escala de la ciudad ya que, este es un sistema que se proyecta funcione como transporte de cercanías, los resultados fueron: 15 puntos para tranvía, 13 puntos para BRT eléctrico y 9 puntos para tren ligero, de lo cual se induce que el modo de transporte idóneo sería el tranvía, este resultado es acorde con los alcances dispuestos por la alcaldía del distrito de Bogotá, por optar por un sistema de transporte de cercanías tipo tranvía.

En el último caso de estudio, la ciudad de Guadalajara (México) se tomó con el fin de observar y comparar la coincidencia con decisiones de ejecución de sistemas de transporte por parte de los administradores públicos; a partir de la metodología desarrollada en esta investigación y aplicada en el corredor de la ciudad de Guadalajara se observa que aunque la metodología de puntaje urbano propuesta por Basnack et al. (2020) define sistemas de transporte ya establecidos, el caso estudio arroja que puede ser un buen indicador de pronóstico para la proyección futura de sistemas de transporte teniendo en cuenta la secuencia de pasos desarrollada en la metodología para la elección de un sistema de transporte a modo de ejemplo: el puntaje urbano para la ciudad de Guadalajara fue de 26,30 lo que corresponde a una ciudad tipo IV es decir que puede acceder a un sistema de transporte tipo tren ligero, y de la metodología de elección de un sistema de transporte se obtuvieron puntajes de 15,5 puntos para tren ligero, 15,5 puntos para tranvía y 12,5 puntos

para BRT eléctrico, para desempatar entre tren ligero y tranvía se tuvo en cuenta la suma de los puntajes de densidad potencial de la demanda y el tipo de ruta, donde el tren ligero tuvo un puntaje de 9 puntos y el tranvía de 8 puntos, por lo que la elección final fue tren ligero, este resultado corresponde con el resultado del indicador de puntaje urbano; además, las variables densidad potencial de la demanda y la tipología de la ruta son representativas para desempatar un sistema de transporte, esto se recalca, con los resultados expuestos anteriormente y los pesos calculados mediante la aplicación de la metodología AHP de esta investigación, la cual indico que la densidad de la demanda tiene un peso del 49% y la tipología de la ruta de transporte del 14%, los usos del suelo aunque tienen un peso de preferencia del 25% tiene subdivisiones de criterios que hacen que los pesos sean menores que el de la tipología de la ruta de transporte, no obstante se debe aclarar que, la aplicación de la metodología fue solo para un caso estudio que ya está en operación y por lo tanto no es una muestra estadística representativa, aun así, los resultados pueden dar un pronóstico favorable para la identificación de sistemas en operación y así garantizar la proyección para sistemas de transporte futuros, esto puede generar interés en la aplicación de otros casos estudio con sistemas de transporte que operen en corredores de mediana capacidad y en ciudades que se encuentren en países en vía de desarrollo.

A partir de los casos estudios se confirma que el empleo de variables diferentes a la población y la demanda de viajes, como: los usos del suelo, la escala de la ciudad y el tipo de ruta extienden el marco conceptual sobre criterios para la elección de un sistema de transporte a nivel ex ante, este marco conceptual ayuda al tomador de decisiones a realizar juicios que no se basen netamente en el uso de variables generales como la población de una zona urbana y la demanda de viajes a atender por un sistema de transporte, variables recurrentes en los documentos técnicos existentes. Las variables propuestas en la metodología de esta investigación se diseñaron de tal forma que puedan ser evaluadas en una metodología para seleccionar sistemas de transporte que operen en corredores de mediana capacidad, aportando técnicas para la planeación de una ciudad como por ejemplo: en los planes de ordenamiento territorial (POT) y/o en los planes de desarrollo regional (PDR) y/o en el plan nacional de desarrollo (PND) y así, disminuir la falta herramientas para la planeación de sistemas de transporte público (Quintero, 2017). Es de resaltar que los sistemas de transporte de mediana capacidad en un red de transporte no

son competidores (Caipa, 2007), pero la metodología los evalúa como competidores, debido a que el enfoque es establecer cuál es el más adecuado entre BRT eléctrico, tranvía y tren ligero los cuales pertenecen a una misma categoría; debido a la diversidad de sistemas de transporte que operan en un territorio estos deben de complementarse, por ello los tomadores de decisiones no deben ser detractores por un sistema y defensores del otro (Caipa, 2007), la competencia (no es una preferencia del actor decisor por una tipología) debe ser para la elección idónea de un sistema de transporte para un corredor determinado de toda la red. La reducción de la huella de carbono es una meta de las políticas públicas de diferentes regiones del mundo, es por esto que los sistemas ferroviarios llaman la atención por ser modos que utilizan sistemas de tracción eléctricas, pero las nuevas tecnologías han evolucionado a los sistemas de transporte carreteros que en el transcurso de la historia han funcionado con sistemas de tracción carburados, por esto, los BRT eléctricos no tendrán desventaja en su operación por el aumento en la huella de carbono logrando competir con modos de transporte que reducen el impacto negativo de la huella de carbono; las combinaciones tecnológicas del ferrocarril y el bus originan sistemas de transporte tipo trolebús o trasnlorh, sistemas de transporte híbridos, los cuales pueden clasificarse dentro de las categorías principales de esta investigación, el trolebús se podría clasificar como un BRT con alimentación eléctrica por catenaria y el trasnlorh se clasificaría como un tranvía con rodamiento neumático.

Cabe considerar por otra parte, factores que pueden ser relevantes en la decisión de un sistema de transporte público como: 1. La orografía de una ciudad, Basnak et al. (2020) indica que las pendientes fuertes asociadas a una topografía montañosa puede disminuir la velocidad promedio del transporte a nivel tanto privado como público, lo que favorecería la implementación de modos por cables (teleféricos), esta investigación complementa este argumento ya que la orografía también influye directamente con la elección de la tecnología de un sistema de transporte, es decir el mecanismo para operar el modo de transporte como el tipo de rodamiento y/o el tipo de tracción, a modo de ejemplo, en un corredor con altas pendientes donde no se pueda operar un tranvía se podría optar por un trasnlorh (tranvía con rodamiento neumático), la orografía influiría en la tecnología del sistema de transporte y no por el cambio hacia otro sistema de transporte, además, en altas pendientes los usuarios disminuyen su velocidad de caminata y por ende los tiempos de accesibilidad aumentan (Molinero y Sánchez, 1996), esto conlleva a que los usuarios no accedan a un sistema de transporte ya que la accesibilidad a las estaciones se limita por las altas

pendientes de las calles y andenes, disminuyendo el número de usuarios a atender y por lo tanto volviendo ineficiente el sistema de transporte, es por ello, que para esta investigación la orografía de un terreno se establece como la influencia para la selección de la tecnología de un modo, la tecnología entendida en esta investigación como el mecanismo para operar el modo de transporte, por ejemplo, tipo de rodamiento (neumático o rieles), tipo de tracción (combustión, eléctrico o híbrido), etc., asimismo la orografía también se podría definir como la disposición de un usuario para acceder al sistema de transporte por altas pendientes; 2. Presupuesto del proyecto, esta variable puede jugar un rol importante debido a que, la adquisición de predios (mediante la herramienta de expropiación) y las tasas de financiamiento podrían aumentar los costos de un proyecto de transporte público; los países en vía de desarrollo tienen mayor densidad de población que las de ciudades de países desarrollados (Banco Mundial, 2020), por lo que probablemente los costos de expropiación sean mayores para países en vía desarrollo dado que tienen que comprar predios a un mayor número de afectados, además, las tasas de financiamiento para estas ciudades son más altas (CEPAL, 2022), lo que también incrementaría los costos del proyecto; 3. La concentración o dispersión de la red vial y centros de producción y atracción de viajes, puesto que una demanda más concentrada en pocos puntos debería favorecer un tren ligero o un bus rápido de alta capacidad (estaciones más caras, pero con mayor velocidad en tramos) frente a un tranvía, pero hay que aclarar que la producción y atracción de viajes es un análisis que debe provenir de un modelo de transporte clásico de cuatro etapas y este estudio corresponde a etapas donde se debe recolectar información primaria, lo cual se sale del alcance de la presente investigación.

Por último, es de tener en cuenta que según la metodología implementada para esta investigación se encontraron las siguientes limitantes: 1. La adquisición de información secundaria, debido a las diferencias de tiempo y las sinergias de la economía puede que cambien los comportamientos y tendencias en los viajes de transporte, patrones de los usos del suelo, indicaciones y alcances del propio proyecto, etc, por lo que no se generaría un adecuado empalme de toda la información, por ello se recomendaría que no tengan un desfase de más de 5 años, además, algunos datos se encuentran incompletos y con acceso restringido estos datos aunque hacen parte de una institución pública tienen especificaciones de confidencialidad, las experiencias de esta investigación sugiere realizar solicitud por carta e indicar que la información compartida se utilizaría de forma anónima

y/o académica, igualmente se puede complementar con fuentes de información de periódicos regionales de los cuales se pueden extraer datos y comentarios sobre el desarrollo y planeación de proyectos de transporte; 2. La calidad con la asignación de puntajes, en vista de que en la decisión pueden influir subjetivismos políticos para forzar la decisión de elección del sistema de transporte, los puntajes asignados para cada variable deben ser sometidos a juicios de expertos con su debida justificación, es por ello que se exponen rangos y valores para cada indicador con el fin de desarrollar caculos y así someter la elección de un sistema de transporte a una decisión técnica y no a un subjetivismo personal o forzado.

7. Conclusiones y Recomendaciones

La presente investigación busca aportar herramientas para la planeación de sistemas de transporte de pasajeros a nivel ex ante, a partir de una metodología para evaluar sistemas de transporte, específicamente en corredores de mediana capacidad para países en vía de desarrollo, para ello se postularon variables sensibles en la elección de un sistema de transporte como: la densidad de viajes, escala de la ciudad, forma de la ruta de transporte y usos del suelo, a partir de estas variables desarrollar, lo que soporta los objetivos planteados en esta investigación. El interés de la investigación surgió por la curiosidad de indagar herramientas implementadas en la planeación de sistemas ferroviarios de pasajeros en contextos latinoamericanos y del caribe, la orientación académico sugirió, no solo evaluar sistemas ferroviarios, si no, otros modos de transporte los cuales compiten por operar un corredor en específico y simultáneamente se complementan en una red global; esto llevó a plantear la pregunta: ¿Cuáles variables son sensibles en la elección de un sistema de transporte en corredores de mediana para países en vía de desarrollo?, con el fin de atender esta inquietud se propone una metodología de evaluación en la cual: 1. Se expusieron los antecedentes en una línea de tiempo con el fin de establecer las características esenciales para optar por un determinado sistema de transporte; 2. Se desarrolló un marco teórico, en el cual se identificaron variables que puedan ser sensibles en la elección de un sistema de transporte y parámetros para evaluar dichas variables; 3. Construcción de la metodología de evaluación, siendo el eje central de la propuesta investigativa a partir de las variables establecidas e implementando una metodología AHP se calculó los pesos de las variables y se diseñó una secuencia de pasos para determinar que tipo de sistema de transporte entre bus rápido eléctrico (BRT eléctrico), tren ligero (LRT) y Tranvía (TRAM) es el más adecuado; 5. Evaluación de casos de estudio, en esta etapa se aplicó la metodología a corredores de ciudades que se encuentran en países en vía de desarrollo y por último se discutieron los hallazgos encontrados a partir de la aplicación de la metodología propuesta con el fin de extraer las principales conclusiones y recomendaciones que se describen a continuación:

7.1. Conclusiones

Basados en los objetivos indicados en esta investigación se concluye que:

La metodología propuesta tiene proximidad en cuanto a la decisión de elección de un sistema de transporte de mediana capacidad tipo BRT (Bus Rápido), LRT (Tren Ligero) y TRAM (Tranvía), puesto que, los resultados de la evaluación de esta investigación para los casos estudio a partir de información secundaria coincidió con los sistemas de transporte de los tres corredores de ciudades importantes, Medellín (Colombia), Bogotá D.C. (Colombia) y Guadalajara (México), los dos primeros pertenecen a proyectos en proceso de desarrollo y el último en operación, por ejemplo: en Medellín el sistema de transporte determinado (ver apartado 5.1.1) para operar sobre el corredor propuesto en la avenida 80 es el tren ligero (LRT – *Light Rail Transit*) el cual concuerda con el sistema de transporte que será ejecutado por la administración pública de Medellín llamado “Tren ligero de la 80”, para Bogotá D.C. el sistema de transporte identificado (ver apartado 5.1.2) para operar sobre el corredor Norte es el tranvía (*TRAM*) el cual coincide con el sistema de transporte que será ejecutado por la administración de Bogotá D.C., cabe mencionar que algunos tramos dentro de la zona urbana serán totalmente segregados, comportándose como un tren ligero, no obstante, la velocidad y capacidad del sistema corresponderán a las condiciones de un tranvía y finalmente para Guadalajara, el sistema de transporte estimado (ver apartado 5.1.3) para operar sobre el corredor de la Línea 3 es el tren ligero el cual corresponde con el sistema de transporte que está en operación en la ciudad de Guadalajara.

Las variables establecidas para esta investigación como la demanda de pasajeros, la forma de la ciudad, el tipo de ruta de transporte público y los usos del suelo influyen en la selección de un sistema de transporte de mediana capacidad tipo BRT eléctrico, tranvía, y tren ligero, dado que, de la revisión del estado del arte y los resultados obtenidos de la evaluación aplicando la metodología, dispone:

La demanda de pasajeros tiene una condición de valoración del tiempo, esta valoración depende del nivel de ingreso de un grupo poblacional, en países en vía de desarrollo los ingresos son bajos respecto a países desarrollados, por ende, el valor del tiempo es desvalorado y se opta por sistemas de transporte más económicos y de menor velocidad; para que los sistemas de transporte tipo BRT eléctrico, LRT o TRAM sean sostenibles en países en vía de desarrollo deben captar un mayor ingreso, este se obtiene por un mayor número de usuarios en el sistema, es decir, en países en vía de desarrollo los sistemas más complejos requieren mover mayor número de personas para que sean sostenibles (la demanda de pasajeros), esta condición se calcula con el indicador de densidad potencial de la demanda, que para esta investigación es de las variables con mayor peso, puesto que, la eficiencia de un modo de transporte varía según las distancias de viaje y la densidad poblacional.

De esta investigación se encontró que la forma de la ciudad se divide en dos características principales: la primera corresponde a una ciudad compacta, la cual describe distancias de viaje más cortas y dispersión de sus orígenes y destinos, este tipo de ciudades optan por tener corredores de menor capacidad en sus redes de transporte público, la segunda corresponde a ciudades menos compactas, las cuales describen distancias de viajes más largos y con mayor concentración espacial de la población, lo que favorece la adopción de modos más eficientes en términos de capacidad y velocidad, estas características se miden a partir de la variable escala de la ciudad; cabe mencionar que en ciudades con formas cuadrículas y lineales (ver Tabla 4-10) se establecen en una sola categoría, debido a que conservan las mismas características de distancias de viaje cortas y barrios compactos.

El tipo de estructura de una ruta de transporte influye en la selección de un sistema de transporte de pasajeros y en las necesidades de viaje, todo sistema de transporte puede operar cualquier ruta de transporte público de pasajeros; no obstante, un sistema puede ser más competente que otro para cada tipo de ruta debido a que, dependiendo del tipo de ruta, la carga de pasajeros es diferente al igual que la distancia del corredor (ver Figura 3-7), por ende, la carga de pasajeros será una condición de la capacidad y la distancia del corredor será una condición de la velocidad del sistema.

El uso del suelo y el transporte tiene una relación bidireccional, el uso de suelo influye en el desarrollo del transporte y el tipo de transporte a implementar influye en la caracterización de los usos del suelo de una ciudad; como aspectos positivos de los sistemas de transporte se tiene la influencia en la accesibilidad de inmuebles abandonados o sin utilizar, implementación de nuevo espacio público y la perspectiva favorable del usuario en seguridad y comodidad, pero como aspecto negativo, se origina un efecto de gentrificación, en el cual la valorización y especulaciones del valor de la tierra antes, durante y después de la construcción del sistema de transporte desplazan a los usuarios de estratos más bajos hacia zonas lejanas de la ciudad donde no está implementado el sistema de transporte, siendo los estratos de bajos y medios ingresos los que realizan el mayor volumen de viajes en transporte público y los que demandan mayor acceso. Los sistemas ferroviarios tienen mayor impacto positivo en el espacio público que los carreteros, pero, mayor impacto negativo en la gentrificación sí, no hay apoyo de medidas públicas hacia usuarios de ingresos medios y bajos que minimicen este aspecto.

El sistema de transporte de un país refleja el grado de desarrollo de su economía; en las economías subdesarrolladas, el transporte se caracteriza por el empleo de equipo anticuado u obsoleto por parte de la mayoría de empresas que se dedican a esta actividad en sus diversas modalidades en comparación con pocas entidades que utilizan máquinas modernas de última generación, en las economías en desarrollo y transición, la demanda del sistema se ve impulsada por la población y el crecimiento económico mientras que, en las economías desarrolladas la implementación del transporte se da por la reducción del tiempo de viaje debido a los altos ingresos de los usuarios, es decir, el alto valor que le dan al tiempo, no necesariamente la implementación de un sistema de transporte en economías desarrolladas debe ser impulsado por el número de pasajeros a movilizar.

La orografía no jugó un papel fundamental en la selección de un modo de transporte de mediana capacidad, puesto que en esta investigación se encontró que la orografía de un terreno influye en la selección de la tecnología de un modo y en la disposición de un usuario de acceder al sistema de transporte por altas pendientes (en altas pendientes los usuarios disminuyen su velocidad de caminata y por ende los tiempos de accesibilidad aumentan); la tecnología entendida en esta investigación como el mecanismo para operar el modo de transporte, por ejemplo, tipo de rodamiento (neumático o rieles), tipo de tracción (combustión, eléctrico o híbrido), etc.

Esta investigación no evaluó los sistemas de transporte, tipo metro pesado, trolebús, tranvía o de cables como el teleférico, puesto que, el metro pesado es un sistema de transporte de alta capacidad que moviliza alrededor de 20.000 a 50.000 personas/hora/sentido (Vuchic, 2007), el teleférico es un sistema de transporte que se implementa en zonas con pendientes agrestes o condiciones donde los sistemas de transporte terrestre no pueden circular por el limitado espacio público o condiciones sociales y los sistemas tipo trolebús o tranvía son modos que combinan tecnologías del ferrocarril y del bus, lo que se puede traducir como modos de transporte híbridos.

Es de claridad mencionar que, en una red de transporte integrada, los modos públicos de pasajeros no deben generar controversia en su elección, al ser defensores partidarios de uno de los tres sistemas y claros detractores de los otros, los sistemas de transporte de mediana capacidad presentados en esta metodología tipo bus rápido eléctrico, tren ligero y tranvía más que competidores, son complementarios en una red de transporte de una ciudad, teniendo en cuenta que, cada modo se desempeña mejor dependiendo de condiciones morfológicas, socioeconómicas y urbanas de un corredor en específico.

7.2. Recomendaciones

De la investigación realizada se consideran las siguientes recomendaciones:

El modelo de clasificación de una ciudad establecido a partir del indicador de *puntaje urbano* propuesto por Basnak et al. (2020) representa los sistemas actuales de las ciudades, lo que no necesariamente debe coincidir con los modos que debería tener, no obstante, es un indicador que se aproxima a la identificación del máximo sistema de transporte al cual puede acceder una ciudad.

La aproximación de cantidad mínima de 30.000 viajes / (Km * día) propuesta por Basnak et al. (2021) en el indicador *densidad máxima potencial* se construyó sólo para el sistema de transporte tipo bus rápido de Colombia considerando la cantidad de viajes totales producidos en un área urbana, en su versión original, por lo que, debería ser recalibrado para incluir sistemas de transporte de ciudades ubicadas en otros países, este vacío puede dar origen a futuras investigaciones de interés con el fin de mejorar las evidencias estadísticas y evaluar otros sistemas de transporte de pasajeros, aplicando el indicador en ciudades con poblaciones superiores a 1.000.000 de habitantes y entre 100.000 y 1.000.000 de habitantes, que cuenten con sistemas de transporte tipo bus rápido, tren ligero, tranvía y metro pesado con el fin de tener rangos precisos sobre la cantidad de viajes mínimos que deben generarse en una ciudad para que un sistema de transporte sea rentable, teniendo en cuenta la premisa de la implementación de un sistema de transporte debe ser impulsado por el número de pasajeros a movilizar.

La variable de *pendiente*, determinada por Basnak et al. (2020) fue calculada a partir de las pendientes de las calles de las ciudades mediante una API (Application Programming Interfaces) de Google, lo que no necesariamente coincide con el relieve de los países, dado que no se cuenta con acceso a este tipo de información y para tener sincronía con la ecuación de *puntaje urbano* establecida por Basnak et al. (2020), se propone el supuesto de que las pendientes de las calles de las zonas urbanas de ciudades coinciden con la orografía, este valor se construyó a partir de los manuales de diseño geométrico de carreteras de países del continente americano (compatibilidad de condiciones con las 400 ciudades analizadas por Basnak et al. (2020), los cuales tienen características de orografía montañosa y están en vía de desarrollo, además, el valor se ajustó con los parámetros de construcción urbana de la ciudad de referencia Medellín (presenta orografía mixta de: alta

pendiente, media pendiente y baja pendiente, además de combinación de diferentes modos de transporte como tren urbano pesado, tranvía y bus rápido). Cabe mencionar, que el parámetro de pendiente puede ser calculado para una ciudad específica con herramientas de geoprocésamiento espacial de uso comercial o libre.

Los aspectos cualitativos evaluados en esta metodología, tienen una característica de percepción del usuario cuando está construido un sistema de transporte, se recomienda hacer un análisis desde el componente urbanístico, con el fin de valorar y asignar de manera objetiva los pesos de los criterios de espacio público y accesibilidad al suelo. Para el indicador de espacio público, aunque se midió cualitativamente también se podría medir de forma cuantitativa a partir de nuevas investigaciones, en las cuales se mida el impacto que ocasiona un sistema de transporte de pasajeros antes y después de su puesta en operación implementando indicadores como: los inmuebles de espacio público por km² (parques o zonas verdes), crecimiento del comercio por km² y/o kilómetros de cicloinfraestructura por número de habitantes.

Un criterio de evaluación adicional puede ser la concentración o dispersión de la red vial y centros de producción y atracción de viajes, puesto que una demanda más concentrada en pocos puntos debería favorecer un LRT o BRT de alta capacidad (estaciones más caras, pero con mayor velocidad en tramos) frente a un TRAM, pero hay que aclarar que la producción y atracción de viajes es un análisis que debe provenir de un modelo de transporte clásico de cuatro etapas y este estudio corresponde a fases donde se debe recolectar información primaria.

Un factor importante en la decisión de un sistema de transporte es el presupuesto del proyecto, este factor juega un rol importante debido a que, la adquisición de predios (mediante la herramienta de expropiación) y las tasas de financiamiento podrían aumentar los costos de un proyecto de transporte público; los países en vía de desarrollo tienen mayor densidad poblacional que las de ciudades de países desarrollados (Banco Mundial, 2020), por lo que probablemente los costos de expropiación sean mayores para países en vía de desarrollo dado que tienen que comprar predios a un mayor número de afectados, además, las tasas de financiamiento para estas ciudades son más altas (CEPAL, 2022), lo que también incrementaría los costos del proyecto.

Para la etapa de decisión se selecciona la alternativa que tenga el mayor puntaje (suma de puntajes de cada indicador), en caso de empate, la selección del sistema será desempataada a partir de la suma del puntaje del indicador de densidad potencial de la demanda más el puntaje del indicador de la tipología de la ruta y si vuelve a presentarse un empate el valor de desempate será el que tenga menor impacto de gentrificación a partir del indicador de influencia del sistema de transporte en el uso del suelo. El sistema de transporte con menor impacto en la gentrificación es el BRT, le sigue el TRAM y por último el LRT.

La herramienta de metodología de evaluación multicriterio propuesta en esta investigación para decidir entre tren ligero, tranvía y BRT eléctrico en corredores de mediana capacidad en países en vía de desarrollo esta orientada para casos donde no se tenga estudios a detalle para la elección de un sistema de transporte, un ejemplo podría ser los planes de ordenamiento territorial o regionales, donde el nivel de detalle de implementación es menor. El valor de inversión para un proyecto es una limitante principal en la decisión de un sistema de transporte para países en vía de desarrollo, debido a que un presupuesto bajo establecido por una administración generaría una decisión directa para modos más baratos, un ejemplo es el caso de BRT en el cual, dado sus bajos costos de implementación (comparado con modos férreos) es más usado en economías en vía de desarrollo.

La metodología de evaluación multicriterio indica valores de clasificación con el fin de identificar el sistema de transporte óptimo, esto no quiere decir que el sistema seleccionado sea la decisión final para la implementación de un sistema de transporte, si no que, la orientación de la metodología es definir a nivel de estrategia el sistema que entraría a ser evaluado en una etapa posterior como es la factibilidad donde se realizan estudios más profundos como: Recolección de información primaria y desarrollo de modelos de transporte, financieros, socio-económicos, etc. En caso de que el sistema de transporte seleccionado en esta metodología no sea viable en la etapa de factibilidad, se deberá realizar el análisis de viabilidad para el sistema de transporte que quedó en segundo lugar y después para el que quedara en tercer lugar. En síntesis, la metodología propuesta en esta investigación es una herramienta para encaminar el proyecto desde su concepción.

La gentrificación es una externalidad negativa producto de la implementación de un sistema de transporte público, la manera de amortiguar esta problemática es con la implementación de políticas públicas que brinden oportunidades de adquisición de espacios residenciales y comerciales para usuarios con economías bajas, como por ejemplo: Políticas que promuevan proyectos de interés social cercanos a las estaciones de transporte y/o regulación de la valorización del suelo en zonas residenciales y comerciales.

A. Anexo: Cálculos de ponderadores mediante metodología AHP

Es un anexo tipo Excel, en cual se presentan las tablas y cálculos realizados para determinar los pesos de las variables de decisión mediante la metodología de Proceso de Jerarquía Analítica (AHP - *Analytic Hierarchy Process*).

B. Anexo: Análisis geoespaciales de las ciudades caso estudio.

Es un anexo con archivos de extensión "shapefile .shp", y geo-procesados en la herramienta de código abierto QGIS, de las tres ciudades caso estudio: Medellín (Colombia), Bogotá D.C. (Colombia) y Guadalajara (México).

Bibliografía

- AFERIOJA. (2018). *Historia del Metro - Sistema de transporte rápido*. AFERIOJA - HISTORIA DEL TREN. <https://aferioja.es/metro/historia-del-metro-sistema-de-transporte-rapido/>
- Alberto Grajales Quintero. (2003). *Los Métodos y procesos multicriterio para la evaluación* (L. Azul, Ed.; 36th ed.)
- Alcaldía de Medellín. (2017). Por medio del cual se adopta el Manual del Espacio Público de Medellín, Pub. L. No. Decreto 113. https://www.medellin.gov.co/normograma/docs/astrea/docs/d_alcamed_0113_2017.htm
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (n.d.). *Datos generales y cifras de Bogotá Región | Investinbogota.org | Invierta en Bogotá*. Retrieved April 13, 2022, from <https://es.investinbogota.org/por-que-bogota/datos-generales-y-cifras-de-bogota/>
- Alexander Jimenez Laverde. (2018). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA DETERMINAR SI LA INFRAESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO DEBE SER SUBTERRÁNEA, A NIVEL O EN VIADUCTO*. Universidad Nacional de Colombia.
- Apaza, R. (2013). *Ciclo de vida del proyecto*. Ruben Apaza. <https://ruben-apaza.blogspot.com/2013/07/etapas-preparacion-y-evaluacion.html>
- Ardeshiri, A., & Vij, A. (2019). Lifestyles, residential location, and transport mode use: A hierarchical latent class choice model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 126, 342–359. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.06.016>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (n.d.). *DATOS ABIERTOS*. Retrieved April 13, 2022, from <https://datosabiertos.metropol.gov.co/>

- Avendaño, S. (2017, January 14). Lo que debe saber sobre los conceptos de uso de suelo. Asuntos: Legales. <https://www.asuntoslegales.com.co/consumidor/lo-que-debe-saber-sobre-los-conceptos-de-uso-de-suelo-2459531>
- Bagley, S. (2003). *DELHI: ONE CITY MULTIPLE DESTINIES Impact of the metro rail on urban form*. Massachusetts Institute of Technology
- Balaguera, A. L., & León, A. del P. (2019). *GUÍA PARA EL DESARROLLO ORIENTADO AL TRANSPORTE SOSTENIBLE (DOTS) EN CIUDADES INTERMEDIAS* [Investigación, Construcción y Gestión del Territorio]. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Balz, V., & Schrijnen, J. (2009). *Transit Oriented Development: Making It Happen*.
- Banco Mundial. (2020). Desarrollo Urbano. <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview>
- Basnak, P., Giesen, R., & Muñoz, J. C. (2020). Technology choices in public transport planning: A classification framework. *Research in Transportation Economics*, 83, 100901. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100901>
- Basnak, P., Giesen-Encina, R., & Muñoz-Abogabir, J. C. (2021). Criterios para planificar transporte masivo en ciudades intermedias de Colombia: ¿Cómo complementar y mejorar la política actual? *Revista Ingenio*, 18(1), 1–9. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2663>
- BOGOTÁ Cómovamos. (n.d.). *Preocupa crecimiento de parque automotor en Bogotá - Bogotá Cómo Vamos*. Retrieved April 13, 2022, from <https://bogotacomovamos.org/preocupa-crecimiento-de-parque-automotor/>
- Braulio-Gonzalo, M., Ruá, M. J., & Bovea, M. D. (2020). Exploring residential urban form patterns: a Spanish case study. *International Planning Studies*, 25(2), 166–188. <https://doi.org/10.1080/13563475.2018.1552124>
- Bree, S., Fuller, D., & Diab, E. (2020). Access to transit? Validating local transit accessibility measures using transit ridership. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 430–442. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.019>
- Brundtland, G. H. (1987). *Report of the World Commission on environment and development: Our common future*. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
- Buder, S. (1990). *Visionaries and Planners: The Garden City Movement and the Modern Community* (OXFORD UNI). Oxford University Press, Inc.

- Buehler, R. (2011). Determinants of transport mode choice: a comparison of Germany and the USA. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 644–657.
<https://doi.org/10.1016/J.JTRANGE0.2010.07.005>
- Caipa Parra, M. (2007). ESTUDIO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CAPACIDAD INTERMEDIA: METROS LIGEROS Y AUTOBUSES RÁPIDOS (BRT): APROXIMACIÓN AL PROBLEMA DESDE EL ESTUDIO DE CASOS. *Red Ibero-Americana de Estudio Em Pólos Geradores de Viagens*, 1–12.
<http://www.redpgv.coppe.ufrj.br/index.php/es/produccion/articulos-cientificos/2007-1/319-estudo-comparativo-sistemas-media-capacid/file>
- Calthorpe, P. (1993). *The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream* (Vol. 1). Princeton Architectural Press.
- Carlos Mojica, & Banco Interamericano de Desarrollo. (2018, December 18). *Los buses eléctricos transforman el transporte público*. Movilitiblog.
<https://blogs.iadb.org/transporte/es/los-autobuses-electricos-pueden-transformar-el-transporte-publico-de-america-latina/>
- Centro Iberoamericano de Desarrollo Estratégico Urbano - CIDEU. (n.d.). Medellín. Retrieved April 13, 2022, from <https://www.cideu.org/miembro/medellin/>
- CEPAL. (2022). América Latina y el Caribe desacelerará su crecimiento a 2,1% en 2022 en medio de importantes asimetrías entre países desarrollados y emergentes, from <https://www.cepal.org/es/comunicados/america-latina-caribe-desacelerara-su-crecimiento-21-2022-medio-importantes-asimetrias>
- Cervero, R. (2013). *Bus Rapid Transit (BRT): An efficient and competitive mode of public transport* (Issues 2013–01). University of California, Institute of Urban and Regional Development (IURD). <http://hdl.handle.net/10419/92378>
- Cheng, L., Chen, X., & Yang, S. (2016). An exploration of the relationships between socioeconomics, land use and daily trip chain pattern among low-income residents. *Transportation Planning and Technology*, 39(4), 358–369.
<https://doi.org/10.1080/03081060.2016.1160579>
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE - CEPAL. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Santiago de Chile.
- Congreso de Colombia. (1997). *Ley 338 DE 1997*.
- Congreso de Colombia. (2002). *Ley 769 de 2002*.
- CurioSfera. (2016). *Origen del Tranvía - Inventor y Evolución*. https://curiosfera-historia.com/historia-del-tranvia-inventor-origen/#Historia_del_declive_del_tranvia

- datosmacro.com. (2019a). *Índice de Competitividad Global*.
<https://datosmacro.expansion.com/estado/indice-competitividad-global>
- datosmacro.com. (2019b). *Índice de Desarrollo Humano - IDH*.
<https://datosmacro.expansion.com/idh>
- Deng, T., & Nelson, J. D. (2011). Recent Developments in Bus Rapid Transit: A Review of the Literature. *Transport Reviews*, 31(1), 69–96.
<https://doi.org/10.1080/01441647.2010.492455>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2019). *PROYECCIONES DE POBLACIÓN A NIVEL MUNICIPAL. PERIODO 2018 - 2035*.
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivenda-2018>
- Díez Ruíz, N. I. (2021). *Metodología para evaluaciones Ex- Post para sistemas tranviarios en Ciudades de países en vía de desarrollo – Caso: Tranvía de Ayacucho, Medellín, Colombia* [Planeamiento del transporte]. Universidad Nacional de Colombia.
- Dittmar, H., Poticha, S., Dittmar, H., & Ohland, G. (2004). *The New Transit Town: Best Practices in Transit-Oriented Development* (G. O. Hank Dittmar, Ed.).
- EcuRed. (2019, June 18). *País en desarrollo*. https://www.ecured.cu/País_en_desarrollo
- EcuRed. (2022). *Análisis multicriterio*. https://www.ecured.cu/Análisis_multicriterio
- Expansión. (2019). *Índice de Competitividad Global 2019*. Datosmacro.Com.
<https://datosmacro.expansion.com/estado/indice-competitividad-global>
- Gaffron, P., Huismans, G., & Skala, F. (2005). *Ecocity Book I: A Better Place to Live* (Facultas Verlag, Ed.; Vol. 1). Facultas Verlags- und Buchhandles AG.
- Gakenheimer, R. (1998). Los problemas de la movilidad en el mundo en desarrollo. *Revista Eure*, 24, 33–52.
- GEOMEDELLÍN. (n.d.). *Portal geográfico del Municipio de Medellín*. Retrieved April 13, 2022, from <https://www.medellin.gov.co/geomedellin/#divOpenData>
- Germán Arboleda Vélez. (2020). *VÍAS URBANAS una ciudad para todos* (A. Omega, Ed.; Primera). Alfaomega Colombiana SA.
- Gobierno de México - datos.gob.mx. (n.d.). *Datos Abiertos de México*. Retrieved April 13, 2022, from <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset?tags=guadalajara&tags=planimetria>

- Gobierno del Estado de Jalisco. (n.d.). *Área Metropolitana de Guadalajara*. Retrieved April 13, 2022, from <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara>
- Gobierno del estado de Jalisco. (n.d.). *Datos Abiertos - Jalisco*. Retrieved April 13, 2022, from <https://datos.jalisco.gob.mx/search/type/dataset>
- Grava, S. (2003). *Urban Transportation Systems*. Arquitectura profesional McGraw-Hill.
- GRUPO BANCO MUNDIAL. (2020a). *Países con Ingreso mediano alto*. <https://datos.bancomundial.org/nivel-de-ingresos/ingreso-mediano-alto>
- GRUPO BANCO MUNDIAL. (2020b). *Países de ingreso mediano bajo*. <https://datos.bancomundial.org/nivel-de-ingresos/paises-de-ingreso-mediano-bajo>
- Ibraeva, A., Correia, G. H. de A., Silva, C., & Antunes, A. P. (2020). Transit-oriented development: A review of research achievements and challenges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 110–130. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.10.018>
- Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco – IIEG. (n.d.). *Cartografía y Ortofotos*. Retrieved April 13, 2022, from https://iieg.gob.mx/ns/?page_id=161
- Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco - IIEG. (2020). *Crecimiento del parque vehicular en Jalisco y el AMG 2000 - 2019*. https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2020/08/Ficha-Informativa_Parque-vehicular-2000-2019.pdf
- Jenks, M., & Dempsey, N. (2005). *Future Forms and Design for Sustainable Cities* (Elsevier, Ed.; Vol. 1). matter and selection Copyright.
- Ju, D., Deng, J., Huang, Z., Xia, J., Qin, H., & Jiang, F. (2021). Large Eddy Simulation with dense fluid approximation and experimental study on the commercial diesel trans-critical injections. *Applied Thermal Engineering*, 183, 116181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116181>
- Knowles, R. D., & Ferbrache, F. (2016). Evaluation of wider economic impacts of light rail investment on cities. *Journal of Transport Geography*, 54, 430–439. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.09.002>
- Lopes, M. (2018, September 24). *Cómo nació el primer sistema de transporte colectivo del mundo - BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45632196>
- Marcus Lopes. (2018). *Cómo nació el primer sistema de transporte colectivo del mundo*. Revista Electrónica BBC News Brasil. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-45632196>

- Marino, A. (2018, December 31). *Historia del FERROCARRIL - Origen, evolución e impacto*. La Historia Mundial Frente a Tí. <https://historiando.org/ferrocarril/>
- Marshall, S. (2005). *Streets & Patterns* (Francis & Taylor, Ed.; Vol. 1).
- MEDELLÍN Cómovamos. (n.d.). *Área Metropolitana*. Retrieved April 13, 2022, from <https://www.medellincomovamos.org/territorio/area-metropolitana-del-valle-de-aburra>
- Mercado, A. (2021, April 11). Pico y placa: como se implementara esta medida en Medellín - Medellín - Colombia - ELTIEMPO.COM. *EL TIEMPO*, 0–1. <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/pico-y-placa-como-se-implementara-esta-medida-en-medellin-575951>
- Mi movilidad - Modelo Integrado de Movilidad. (n.d.). *Línea 3 de Mi Tren*. Retrieved April 13, 2022, from <https://lineatres.jalisco.gob.mx/>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (n.d.). *Datos Abiertos Colombia*. Retrieved April 13, 2022, from <https://www.datos.gov.co/>
- APOYO DEL GOBIERNO NACIONAL A LA ACTUALIZACIÓN DEL PROGRAMA INTEGRAL DE MOVILIDAD DE LA REGIÓN BOGOTÁ-CUNDINAMARCA (PIMRC), Pub. L. No. 4034, CONPES 4034 1 (2021).
- Mojica, C., & Lefevre, B. (2018, December 14). *Los buses eléctricos transforman el transporte público*. Banco Interamericano de Desarrollo - Moviliblog. <https://blogs.iadb.org/transporte/es/los-autobuses-electricos-pueden-transformar-el-transporte-publico-de-america-latina/>
- Molinero, A., & Sánchez, I. (1996). *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración*. Universidad Autónoma del Estado de México. <https://books.google.com.co/books?id=11R3sRgOZFAC>
- Mouratidis, K., Ettema, D., & Næss, P. (2019). Urban form, travel behavior, and travel satisfaction. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 129, 306–320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.002>
- NEXOBUS. (2018, April 3). *El transporte público crece en países desarrollados*. Nexobús.Com. <https://www.nexotrans.com/noticia/90048/nexobus/el-transporte-publico-crece-en-paises-desarrollados.html>
- Olesen, M. (2014). Framing light rail projects – Case studies from Bergen, Angers and Bern. *Case Studies on Transport Policy*, 2(1), 10–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cstp.2013.12.002>

- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos - OCDE. (2021). *El Producto Interno Bruto o Producto Interior Bruto (PIB)*. Oecd.Org. <https://www.oecd.org/centrodemexico/estadisticas/pib-espanol.htm>
- Oses, U., Rojí, E., Gurrutxaga, I., & Larrauri, M. (2017). A multidisciplinary sustainability index to assess transport in urban areas: a case study of Donostia-San Sebastian, Spain. *Journal of Environmental Planning and Management*, 60(11), 1891–1922. <https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1264374>
- Pacheco, J. F., & Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/35914>
- Padeiro, M., Louro, A., & da Costa, N. M. (2019). Transit-oriented development and gentrification: a systematic review. *Transport Reviews*, 39(6), 733–754. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1649316>
- Piyush Yadav, & Sandeep Bhandari. (2020). *Difference Between Developing Countries and Emerging Markets (With Table) – Ask Any Difference*. AskAnyDifference.Com. <https://askanydifference.com/difference-between-developing-countries-and-emerging-markets/>
- Quintero González, J. R. (2017). Beneficios ambientales, sociales y económicos del tranvía y el tren ligero: valoración de las políticas públicas en Colombia. *Revista Transporte y Territorio*, 17, 203–228. <https://goo.gl/kK3bPC>.
- Roldán, P. (2019). *Qué es, definición y concepto*. Economipedia. <https://economipedia.com/definiciones/ingreso-nacional.html>
- Rueda, S., Cuchí, A., Subirats, J., de Mingo, M., & Díaz, A. (2007). *Libro Verde de Medio Ambiente Urbano* (Vol. 1).
- Saaty, T. (1997). *Toma de decisiones para líderes. El proceso analítico jerárquico*. RWS Publications.
- Sagaris, L., Tiznado-Aitken, I., & Steiniger, S. (2017). Exploring the social and spatial potential of an intermodal approach to transport planning. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(10), 721–736. <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1312645>
- Santos, E. (2000, June 18). TRANSPORTE Y SUBDESARROLLO. *EL TIEMPO*, 0–1. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1264496>
- Schwandl, R. (2019). *metro - tren ligero*. Urbanrail.Net. <https://urbanrail.net/>

- Soria-Lara, J. A., Aguilera-Benavente, F., & Arranz-López, A. (2016). Integrating land use and transport practice through spatial metrics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 91, 330–345. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.06.023>
- TerriData - Sistema de Estadísticas Territoriales. (2020). *Datos Generales y cifras de Bogotá*.
- UDGTV.com. (n.d.). *Guadalajara, la ciudad de la desigualdad*. Retrieved April 13, 2022, from <https://udgtv.com/noticias/guadalajara-la-ciudad-la-desigualdad/>
- VALORA ANALITIK. (n.d.). *Conpes aprueba financiación de la Nación para Metro de la 80 en Medellín - Valora Analitik 2020-09-16*. Retrieved April 13, 2022, from <https://www.valoraanalitik.com/2020/09/16/conpes-aprueba-financiacion-de-la-nacion-para-metro-de-la-80-en-medellin/>
- van Soest, D., Tight, M. R., & Rogers, C. D. F. (2020). Exploring the distances people walk to access public transport. *Transport Reviews*, 40(2), 160–182. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1575491>
- van Wee, B., Bohte, W., Molin, E., Arentze, T., & Liao, F. (2014). Policies for synchronization in the transport–land-use system. *Transport Policy*, 31, 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.10.003>
- Viana Suberviola, E. (2015). Definición y tipología de los sistemas ferro-viarios, aspectos generales. El caso español. *Biblio 3w: Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, 21, 742–798.
- Vuchic, V. R. (2007). *Urban Transit: Operations, Planning and Economics* (John Wiley & Sons Inc., Ed.). Hoboken.
- World Bank. (2015, July 1). *En la última clasificación por el ingreso del Banco Mundial, diez países progresaron y cambiaron de categoría*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2015/07/01/new-world-bank-update-shows-bangladesh-kenya-myanmar-and-tajikistan-as-middle-income-while-south-sudan-falls-back-to-low-income>
- Zhao, P., Yang, H., Kong, L., Liu, Y., & Liu, D. (2018). Disintegration of metro and land development in transition China: A dynamic analysis in Beijing. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 116, 290–307. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2018.06.017>
- Zhou, L., Liu, Y.-J., Yu, L., & Liu, Y. (2016). Research on the Spatial-System-Based Rail Transit Systems of the World Cities. *Procedia Engineering*, 137, 699–708. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.307>