UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

SECRETARIA DE CIENCIA, HUMANIDADES, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

DISEÑO DE MODELO MATEMATICO PARA EVALUAR LA ACCESIBILIDAD VIAL

TRABAJO TERMINAL DE GRADO PARA DOCTORADO

PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTORA EN DISEÑO

PRESENTA: DALIA ZUÑIGA AVILES

DIRECTOR: DR. JUAN CARLOS ARTEAGA ARCOS

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, MARZO, 2026.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN 3

ABSTRACT 3

INTRODUCCIÓN 6

Objetivo General del Trabajo: 8

Objetivos Específicos: 8

Hipótesis 8

Estado del Arte 9

Alcances y limitaciones 13

Descripción general de los capítulos 16

CAPITULO 1 21

ANTECEDENTES 21

1.1 Antecedentes 22

1.2 Planteamiento del Problema 30

1.3 Justificación 33

CAPITULO 2 36

CIUDADES INTELIGENTES 36

2.1 Smart City 37

2.2 Smart Cities: generadoras de innovación desde la gestión pública 46

2.2.1 Características de la Ciudad de México 50

2.3 Ciudad de 15 minutos 54

2.4 Cuidad Accesible 59

CAPITULO 3 63

PROTOTIPOS 63

3.1. Modelo de accesibilidad a partir de variables socioeconómicas 64

3.1.1 Metodología 65

3.2. Modelo de accesibilidad a partir de variables geográficas 73

3.2.1. Metodología 74

3.3 Modelo de accesibilidad a partir de redes viales 81

3.3.1 Metodología 82

CAPITULO 4 93

METODOLOGIA 93

4.1 Propuesta Metodológica 94
4.1.1 Norma internacional ISO 19115-1:2014 sobre metadatos de datos geoespaciales 98
4.2 Descripción de la Metodología 103
4.2.1 Recolección y Preprocesamiento de Datos 103
4.2.2 Recopilar datos de series de tiempo 108
4.2.2.1 Mapbox 109
4.2.2.2 OpenWeatherMap 113
4.2.2.3 Comisión Reguladora de Energía 117
4.2.3. Análisis Exploratorio de Datos (EDA) 120
4.2.4. Análisis de Correlación 126
4.2.5. Análisis de Sensibilidad 128
4.2.6. Análisis Temporal 132
CAPITULO 5 138
RESULTADOS Y CONCLUSIONES 138
5.1. Resultados 139
5.1.1. Simulación del Índice de Accesibilidad Urbana 145
5.1.2. Resultados para los escenarios I-X 156
5.1.2.1. Impacto directo de α en los resultados 159
5.2. Conclusión de los resultados 159
CONCLUSIONES GENERALES 164
Conclusiones Generales 165
Comentarios finales y sugerencias para trabajos futuros 175
Bibliografía 177

RESUMEN

La investigación sugiere elaborar un modelo matemático que permita establecer el nivel de accesibilidad vial, este modelo combina un enfoque multivariable y espaciotemporal, considerando la accesibilidad como una función que depende de variables físicas, ambientales, económicas y de infraestructura vial. La accesibilidad se entiende como el grado de facilidad con que las personas logran llegar a destinos clave dentro de un área geográfica determinada, teniendo en cuenta el tiempo, el costo y las condiciones ambientales. Se realizó una simulación utilizando datos urbanos típicos obtenidos de plataformas como Google Maps, Outscraper, SCT, mediante Python. Se evaluaron diez escenarios variando los parámetros del modelo. El resultado es un conjunto de puntos que muestran cómo disminuye el índice de accesibilidad al aumentar el tiempo de viaje bajo diferentes condiciones. La implementación de este modelo permite calcular el índice de accesibilidad de manera certera, con el objetivo de elaborar una recomendación orientada a la optimización de la ruta, tomando en consideración las prioridades establecidas por el tomador de decisiones.

ABSTRACT

The research suggests developing a mathematical model that allows establishing the level of road accessibility, this model combines a multivariable and spatiotemporal approach, considering accessibility as a function that depends on physical, environmental, economic and road infrastructure variables. Accessibility is understood as the degree of ease with which people manage to reach key destinations within a given geographical area, taking into account time, cost and environmental conditions. A simulation was carried out using typical urban data obtained from platforms such as Google Maps, Outscraper, SCT, using Python. Ten scenarios were evaluated by varying the parameters of the model. The result is a set of dots that show how the accessibility index decreases as travel time increases under different conditions. The implementation of this model allows the accessibility index to be calculated accurately, with the aim of developing a recommendation aimed at optimizing the route, taking into consideration the priorities established by the decision-maker.

INTRODUCCIÓN

La accesibilidad vial representa un componente esencial para entender el funcionamiento de las ciudades actuales y su capacidad de garantizar a la población un acceso equitativo a bienes, servicios y oportunidades. En el escenario urbano contemporáneo, marcado por una rápida expansión territorial, un crecimiento constante de la motorización y una movilidad cada vez más compleja, la evaluación de la accesibilidad se ha convertido en un requisito estratégico para la planeación y el desarrollo sostenible de las urbes.

Durante las últimas décadas, distintas metodologías han intentado explicar y medir este fenómeno desde perspectivas físicas, sociales, económicas y tecnológicas. No obstante, la diversidad de factores involucrados como los tiempos de traslado, los costos, la infraestructura vial, las condiciones ambientales y la distribución de oportunidades exige la creación de modelos integrales que permitan abordar la accesibilidad como un sistema dinámico y multivariable.

El avance de las Smart Cities, la disponibilidad de datos en tiempo real y las herramientas de análisis geoespacial ofrecen nuevas posibilidades para generar mediciones más precisas, flexibles y útiles en la toma de decisiones. En este contexto, el presente estudio plantea el diseño de un modelo matemático que incorpora dimensiones físicas, ambientales, económicas y de infraestructura vial con el propósito de calcular un índice de accesibilidad aplicable a entornos urbanos.

La metodología integra técnicas de análisis de series de tiempo, información geográfica, datos climáticos, costos energéticos y parámetros operativos de la red vial, con el fin de evaluar cómo distintas condiciones horarias, climáticas, vehiculares y económicas inciden en la capacidad de desplazamiento y, por ende, en la accesibilidad.

El caso de aplicación se centra en el corredor Toluca–Atlacomulco, una de las vías más transitadas y con mayores problemas de congestión y siniestralidad en el Estado de México. A través del modelo propuesto se examinan diversos escenarios que permiten identificar patrones, comparar condiciones y estimar niveles de accesibilidad bajo diferentes supuestos, aportando así una herramienta de utilidad para planificadores urbanos, autoridades de movilidad y organismos de gestión territorial.

En conclusión, esta investigación busca enriquecer la comprensión de la accesibilidad urbana desde un enfoque cuantitativo, tecnológico y espacial, ofreciendo una metodología replicable y adaptable a distintos contextos. Con ello, se pretende avanzar hacia ciudades más eficientes, equitativas y orientadas al bienestar de sus habitantes, mediante decisiones fundamentadas en datos y análisis interdisciplinarios.

Objetivo General del Trabajo:

El propósito central de esta investigación consiste en la construcción de un modelo matemático sustentado en variables cuantitativas, orientado a la evaluación del nivel de accesibilidad de las vialidades.

Objetivos Específicos:

- Examinar las metodologías propuestas por diversos autores, tanto en el ámbito nacional como internacional, con el fin de identificar sus fortalezas y debilidades, e integrar aquellos elementos pertinentes al desarrollo del presente estudio.
- Analizar el contexto de los individuos y de los hogares, con el objetivo de comprender los procesos de urbanización y consolidación territorial.
- Identificar los condicionantes físicos, sociales y económicos del entorno, a fin de evaluar la estructura de oportunidades disponible para los sujetos y hogares.
- Estudiar los procesos de apropiación mediante los cuales los individuos y hogares generan y reproducen estructuras de acceso a oportunidades.
- Reconocer la relevancia de la infraestructura vial y de los sistemas de transporte como factores determinantes para una adecuada integración urbana.
- Aplicar modelos matemáticos generalizados con el propósito de analizar la incidencia de la accesibilidad en la localización de las actividades de la población.

Hipótesis

Si se estudian las variables que describan la falta de accesibilidad, entonces se podrá evaluar el índice de accesibilidad de las vialidades en la ciudad.

Estado del Arte

La accesibilidad vial se entiende como la capacidad de desplazarse de manera segura, cómoda y autónoma por las vialidades y espacios públicos urbanizados, independientemente de su edad o condición física su desarrollo integra cuatro pilares: normativa y estándares, infraestructura inclusiva, tecnologías inteligentes y enfoques urbano-territoriales que priorizan la proximidad y la equidad en el acceso (Desarrollo, 2023).

Respecto a la normativa en México la NOM-004-SEDATU-2023 establece especificaciones obligatorias para el diseño de vías urbanas bajo enfoques de seguridad vial, accesibilidad, eficiencia y sostenibilidad. Esta norma se enlaza con la reforma constitucional de 2020 (derecho humano a la movilidad) y la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial (2022), siendo aplicable en todo el territorio desde junio de 2024.

Entre sus objetivos destaca construir calles más humanas y habitables con estándares mínimos de diseño y rehabilitación. La convergencia normativa apunta a la accesibilidad universal como requisito mínimo en diseño y operación de vías, con adaptación a contextos locales, climáticos y socioculturales; la tendencia es integrar criterios de seguridad, inclusión y sostenibilidad en instrumentos obligatorios y guías técnicas (SEDATU, 2024).

La planificación y el diseño inclusivo requieren métricas de accesibilidad (tiempo/costo de viaje, continuidad de recorridos, legibilidad espacial) y evaluaciones que conecten beneficios sociales con decisiones de inversión. Algunas tecnologías inteligentes consideran la adopción de IA, IoT, V2X, edge

computing, sensores y materiales inteligentes para crear redes viales más seguras, sostenibles e inclusivas incluyendo semáforos adaptativos, mantenimiento predictivo, guiado accesible y soporte a vehículos autónomos (SEDATU, 2024).

La accesibilidad se potencia con soluciones digitales multisensoriales (audio, visual, háptico), señalización dinámica y gestión en tiempo real, siempre que se aborden retos de interoperabilidad, ciberseguridad y financiamiento de la infraestructura inteligente. El enfoque urbano-territorial se enfoca en la proximidad, equidad y diseño para todas las personas, por su parte París y la “Ciudad de los 15 minutos" subrayan que el éxito de la proximidad depende de transporte público accesible, itinerarios peatonales y ciclistas libres de barreras y servicios cercanos (Celering, 2025).

La articulación desarrollo urbano–transporte, se plantea como estrategia para reducir motorización, congestión y desigualdad, resaltando debilidades institucionales y la necesidad de políticas integradas entre planeamiento y movilidad. La ciudad accesible combina proximidad funcional (servicios a 15 a 30 minutos), movilidad activa y redes inclusivas; se prioriza la escala humana y el rediseño de lo existente frente a grandes obras, con métricas de inclusión y participación comunitaria (Celering, 2025).

Las tendencias de aplicación de esta tecnología en México son la adopción obligatoria para calles urbanas; impulso a rampas normadas, señalización táctil, semáforos sonoros y enfoque sistémico de calles completas Ciudades como CDMX han expandido corredores peatonales y ciclovías con criterios de accesibilidad e inclusión (SEDATU, 2024).

Internacionalmente en España considera aceras con pendientes máximas, franjas táctiles, semáforos acústicos y plataformas bajas en buses/tranvía; iniciativas en Barcelona y Madrid integran zonas 30, ampliación de aceras y red de cruces accesibles alineadas con la normativa estatal y guías técnicas. En Colombia la metodología de priorización de proyectos por índices de accesibilidad y ahorro de tiempo/costo de viaje (Ministerio de Transportes, 2021).

En París la ciudad de 15 minutos establece la reconfiguración de calles escolares, ciclovías y proximidad a servicios con enfoque de inclusión; los estudios críticos advierten que el sistema depende de accesibilidad integral del transporte y de la eliminación de barreras en itinerarios cotidianos. En Estados Unidos las políticas federales y locales promueven calles seguras para todos los modos; recogen mejores prácticas y métricas de desempeño multimodal (seguridad, accesibilidad, equidad, conectividad) para evaluación en diseño y operación (Celering, 2025).

Las tendencias actuales se enfocan a la Integración normativa obligatoria de accesibilidad en diseño y operación de calles de México con guías técnicas y estándares medibles, expansión de calles completas y planes de proximidad (15–30 minutos) como estrategia de equidad y salud urbana, despliegue de smart roads con IA/IoT/V2X para semaforización adaptativa, mantenimiento predictivo y guiado multisensorial (SEDATU, 2024).

Sin embargo, esto también trae grandes retos como la interoperabilidad y ciberseguridad de sistemas inteligentes y datos en tiempo real, el financiamiento y modelos de negocio para infraestructura sensorizada y comunicación cooperativa,

capacidades institucionales y coordinación multinivel para articular urbanismo, transporte y accesibilidad.

Por lo tanto, la accesibilidad vial ha evolucionado hacia un paradigma integral que combina normativa avanzada, diseño inclusivo, tecnologías inteligentes y planificación de proximidad. Los casos en México, España, Colombia, Francia y EE. UU. demuestran que la medición rigurosa de accesibilidad y la implementación de soluciones universales producen beneficios tangibles (reducción de tiempos y costos de viaje, seguridad, autonomía y calidad de vida).

El siguiente paso es consolidar mecanismos de evaluación, financiamiento sostenible y gobernanza colaborativa que permitan escalar estas prácticas en contextos locales. La medición de la accesibilidad vial hasta ahora plantea metodologías que contemplan la preparación de los datos como capas de carreteras, calles, caminos rurales en formato shapefile o GeoJSON (Celering, 2025).

Los puntos de interés hospitales, escuelas, mercados, centros de trabajo, datos demográficos población por zonas, densidad. y restricciones de velocidad promedio, estado de la vía, tráfico, las herramientas más utilizadas actualmente son los SIG´s como QGIS, ArcGIS y complementos útiles *Network Analyst* o *Road Graph* para análisis de redes e isócronas para calcular áreas accesibles en cierto tiempo (Celering, 2025).

Los Métodos de análisis contemplan el análisis de red, para crear una red con nodos (intersecciones) y arcos (tramos de carretera), asignar atributos como

tiempo de viaje, distancia, costo y calcular rutas óptimas y tiempos de acceso, con mapas de isócronas para generar polígonos que muestran hasta dónde se puede llegar en 10, 20, 30 minutos (Celering, 2025).

Algunas formulas como la de Hansen calculan el índice de accesibilidad, sumando las oportunidades de empleo, servicios, etc. en el punto, el costo y la función de fricción. Visualizando los resultados en los mapas temáticos que muestren zonas con alta/baja accesibilidad, diferencias entre áreas urbanas y rurales y gráficos comparativos por municipio o región (Hadjidimitriou, 2025).

Alcances y limitaciones

La accesibilidad vial es un concepto central en los estudios de movilidad, ya que permite evaluar en qué medida la infraestructura de transporte facilita el acceso a bienes, servicios y oportunidades distribuidos en el territorio. Su medición ha evolucionado significativamente gracias al desarrollo de nuevas metodologías, sistemas de información geográfica (SIG) e indicadores de red (Levinson y Wu, 2020).

Sin embargo, continúa enfrentando retos asociados a su complejidad conceptual, la diversidad de escalas territoriales implicadas y las limitaciones técnicas y de datos disponibles. Las técnicas actuales permiten analizar no solo la facilidad de movimiento, sino también la capacidad real de los individuos para alcanzar destinos relevantes.

Esto amplía la comprensión del funcionamiento de las ciudades, en tanto la accesibilidad incorpora tanto atracción de oportunidades como impedancia

(tiempos, distancias o costos). El uso de indicadores derivados de teorías de redes y grafos ha permitido estimar escenarios de accesibilidad real e ideal, así como visualizar patrones de desigualdad territorial.

Estudios recientes han demostrado que medir correctamente la accesibilidad permite evaluar el impacto de intervenciones viales, optimizar redes de transporte y priorizar proyectos de infraestructura, además muestran cómo ciertas obras reducen tiempos de viaje y mejoran la conectividad de áreas urbanas, contribuyendo directamente a decisiones de planificación.

Asimismo, metodologías basadas en índices de accesibilidad sirven para comparar el estado actual de una red vial frente a escenarios futuros, estimando beneficios en términos económicos y sociales. La literatura clasifica las medidas de accesibilidad en tres grandes grupos, isócronas, medidas basadas en la gravedad y medidas basadas en la utilidad, cada una responde a problemas específicos y ofrece un marco metodológico robusto para el análisis de ciudades y regiones.

Además, el desarrollo de los SIG facilita la representación espacial de los indicadores y la identificación de barreras urbanas, permitiendo una mayor comprensión de fenómenos como la permeabilidad y la distribución desigual de servicios.

Algunas limitaciones provienen desde el concepto, pues dependen simultáneamente de variables físicas, sociales, económicas y de comportamiento, por lo que su cuantificación precisa es un desafío. Diferentes poblaciones experimentan niveles distintos de accesibilidad debido a sus preferencias o

restricciones individuales. Esta variabilidad dificulta la estandarización de métricas universales.

La medición de accesibilidad exige datos detallados sobre redes viales, patrones de viaje, tiempos de desplazamiento y localización de servicios. Sin embargo, en muchos contextos estos datos son incompletos o poco fiables, afectando la calidad del análisis. Los estudios territoriales resaltan que evaluar relaciones entre infraestructura y territorio implica procesar múltiples fuentes y enfrentar vacíos de información.

Aunque modelos basados en la gravedad o isócronas facilitan comparaciones, suelen simplificar comportamientos reales, asumiendo funciones de impedancia o distribución homogéneas que no siempre reflejan la complejidad urbana. Incluso cuando se integran SIG y análisis topológico, persisten dificultades para capturar efectos de elementos como barreras físicas, patrones de tráfico local o distribución desigual de equipamientos.

La accesibilidad puede variar significativamente según la escala de análisis barrio, ciudad, región o nación. Un indicador útil en escala regional puede no ser adecuado a nivel local, lo que complica su aplicación universal. Los estudios señalan que la accesibilidad debe considerarse como un instrumento escalable, pero sujeto a las particularidades espaciales.

La medición de la accesibilidad vial ofrece enormes beneficios para la evaluación de infraestructuras, la movilidad urbana y la planificación territorial. Permite diagnosticar desigualdades, optimizar proyectos viales y comprender mejor

cómo las personas acceden a oportunidades distribuidas espacialmente. No obstante, enfrenta importantes retos metodológicos, conceptuales y de disponibilidad de datos que obligan a una interpretación cuidadosa y contextualizada de sus resultados.

El avance en sistemas de información geográfica, métodos cuantitativos y enfoques integradores sigue siendo clave para mejorar la precisión y utilidad de estas mediciones.

Descripción general de los capítulos

Capítulo 1 : El capítulo establece la base conceptual y contextual de la investigación, se enfoca en la revisión histórica del término desde enfoques clásicos, hasta aproximaciones contemporáneas, estudia el concepto de 0 accesibilidad como una medida relacionada con tiempo, distancia, costo, oportunidades y estructura territorial. Los factores que influyen en la accesibilidad son transporte, distribución del territorio, condiciones socioeconómicas y movilidad cotidiana y desigualdad territorial.

Así mismo, algunos problemas encontrados en la falta de accesibilidad son debido a la expansión urbana y el uso del automóvil, lo cual genera periferias desconectadas, aumento de costos de traslado, falta de equidad en el acceso a servicios y dificultades para la movilidad segura y eficiente. Por lo tanto, la accesibilidad es clave para inclusión, movilidad sostenible y derecho a la ciudad. Este capítulo construye la necesidad de medir la accesibilidad y contextualiza su complejidad.

Capítulo 2: Este capítulo analiza cómo las tecnologías emergentes pueden mejorar la movilidad y accesibilidad urbana, el concepto de Smart City integra los sistemas físicos, digitales y humanos, e integra el uso de datos, sensores e inteligencia artificial para mejorar servicios urbanos. En este capítulo se consideran varias dimensiones de una ciudad inteligente, basado en el modelo de Giffinger, movilidad, economía, gobierno, medio ambiente, vida ciudadana y personas.

Algunas aplicaciones tecnológicas de las Smart City son gestión del tráfico, energía inteligente, seguridad con sensores, salud digital, gobierno electrónico, gestión del agua y residuos, un modelo que se ha hecho muy popular enfocado en aplicar nuevas tecnologías es la Ciudad de 15 minutos, este es un modelo urbano que busca proximidad a servicios clave en un radio de 15 minutos, enfatiza la movilidad activa, reducción de emisiones y bienestar social. Este capítulo conecta la accesibilidad vial con la transformación digital urbana.

Capítulo 3 : En este capítulo se revisan tres grupos de modelos matemáticos utilizados para medir la accesibilidad, el primero basado en variables socioeconómicas, analizan cercanía a mercados, costos de mano de obra, renta del suelo, especialización productiva, son útiles para medir accesibilidad industrial y localización de empresas.

El segundo modelo es a partir de variables geográficas, el uso de SIG, redes viales, fotografía aérea y GPS, además del cálculo de velocidades, isócronas, tiempos promedio y accesibilidad media global e integral, por ultimo el tercer modelo se basa en redes viales, considerando la confiabilidad de red, vulnerabilidad, Índices de accesibilidad (Hansen), impacto de fallas y consecuencias socioeconómicas y

ambientales. Este capítulo muestra diferentes métodos usados en el mundo y sirve como marco para proponer el modelo de la investigación.

Capítulo 4 : Este capítulo presenta la metodología integral propuesta por la investigación para medir accesibilidad vial en tiempo real, con un enfoque cuantitativo e investigación aplicada tecnológica, el objetivo metodológico es construir un modelo que integre datos de movilidad (velocidad, tiempo, distancias), datos ambientales (clima, contaminación), datos económicos (combustible, peajes) y datos espaciales (geolocalización, rutas).

Describe la recolección de datos, a través del uso de API´s y plataformas como Mapbox para rutas, distancias, velocidades, OpenWeatherMap para clima y calidad del aire, Comisión Reguladora de Energía para el precio de gasolina y Python para el procesamiento, limpieza y análisis.

Las técnicas analíticas van desde el análisis exploratorio de datos (EDA), modelos de correlación, información de Fisher (para medir orden/desorden del sistema) y series de tiempo. Además, se considera el Marco de metadatos ISO 19115 para garantizar calidad y trazabilidad de datos. Este capítulo describe cómo se obtiene, procesa, valida y analiza la información para construir el modelo final.

CAPÍTULO 5 : Presenta la implementación del modelo y sus resultados, el modelo matemático final define un índice de accesibilidad multivariable, donde intervienen oportunidades, tiempos de viaje, costos, factores ambientales, distancia y parámetro de atenuación espacial α, además se realizaron simulaciones con datos sintéticos muestran coherencia y comportamiento esperado del modelo.

Se aplican 10 escenarios distintos en la autopista Toluca–Atlacomulco, variando hora del día, tipo de vehículo, clima, tiempos y costos. Los resultados clave mencionan que a menor tiempo de viaje mayor accesibilidad, el mejor escenario 05:00 h (menor tráfico, menor temperatura, menor costo), el peor escenario 11:00 h (mayor tráfico y temperatura), el parámetro α ajustado mejora la precisión.

“La configuración fragmentada de las áreas urbanas se ha visto facilitada por la dependencia al transporte automotor” (Cahill, 2010).



1 ANTECE-DENTES

CAPITULO 1

ANTECEDENTES

ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA ACCESIBILIDAD VIAL

El capítulo tiene como objetivo mostrar la evolución literaria del concepto de accesibilidad, la accesibilidad se ha estudiado desde diversos enfoques cambiando según el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad, algunos autores la definen como una medición de la distancia entre puntos de encuentro entre las personas y los servicios que ofrece la ciudad, otras parten desde el beneficio económico al considerar la cercanía del equipamiento urbano, actualmente es posible medirla o evaluarla, sin embargo cada autor considera diferentes variables para su medición, de ahí que el problema de accesibilidad cada día sea complejo en su análisis.

1.1 Antecedentes

La accesibilidad se ha consolidado como un campo de estudio abordado desde diversas perspectivas y enfoques. En los últimos años, el debate teórico en torno a este concepto ha permitido delimitar sus principales dimensiones. Una de las aproximaciones más clásicas es la propuesta por Harris (1954), quien la define como la cuantificación de las oportunidades disponibles en un lugar determinado, demostrando que el potencial de mercado depende tanto de la distancia hacia la demanda como del tamaño de esta en localizaciones alternativas.

Posteriormente, Hansen (1959) profundizó en la noción de accesibilidad al fundamentarla en el concepto de “potencial” tomado de la física, entendido como una medida de proximidad relativa entre un lugar o individuo respecto a los demás. Más adelante, Ohnmacht (2009) señaló que el análisis de la accesibilidad se ha enriquecido mediante la incorporación de tres elementos esenciales. El primero corresponde al estudio de los sistemas de transporte y la manera en que estos determinan el grado de conexión entre distintos lugares según su integración en la red.

Adeel (2016) complementa esta visión al introducir un segundo elemento: la estructura territorial y la distribución espacial de los lugares donde se concentran beneficios y oportunidades para el desarrollo de actividades fundamentales. De esta forma, la accesibilidad se entiende como el modo en que los sistemas de transporte articulan las distintas localizaciones en las que se llevan a cabo los principales servicios y actividades dentro de la organización territorial (Cahill, 2010).

Posteriormente, Hernández (2012) añadió un tercer espacio de reflexión, señalando que los bienes y servicios son accesibles a través de los sistemas de transporte, pero dirigidos a públicos específicos. Otros autores, como Seo (2013), plantean que la accesibilidad puede traducirse en la medición de distancias hacia residencias, centros de trabajo o paradas de transporte público. Widener (2013) matiza que estas distancias deben considerarse a lo largo de todos los desplazamientos diarios, mientras que Blanford (2012) advierte que no pueden entenderse como trayectorias lineales, sino como rutas efectivamente utilizadas.

Wiedener (2015) propone que los tiempos de traslado constituyen una variable clave para comprender la accesibilidad, ya sea en automóvil o mediante otros medios de transporte. Esta perspectiva espacio–temporal permite complejizar los modelos al integrar los tiempos de desplazamiento en las dinámicas domésticas y laborales, donde se estructuran las rutinas cotidianas (Hernández, 2015).

El análisis también se ha vinculado con modelos de toma de decisiones y maximización de utilidades. Dong (2006) reflexiona sobre cómo los sujetos diseñan estrategias para optimizar sus beneficios totales, considerando la posibilidad de encadenar desplazamientos y actividades diversas. En este marco, mayores niveles de accesibilidad implican una maximización de las utilidades derivadas de las decisiones adoptadas.

Páez, Scott y Morency (2012) sostienen que la accesibilidad, entendida como el potencial de lograr una distribución espacial de oportunidades, constituye uno de los resultados más relevantes del desarrollo territorial. Las diferencias en accesibilidad generan desigualdades territoriales, identificándose la falta de

accesibilidad como un obstáculo central para la competitividad económica de las regiones menos desarrolladas (Comisión Europea, 1999).

En este sentido, toda ciudad debe garantizar condiciones básicas de movilidad y accesibilidad para la totalidad de las personas tanto residentes permanentes como visitantes temporales, dado que ello constituye un elemento clave para la integración socioespacial. Para alcanzar este objetivo, resulta indispensable contar con infraestructuras y servicios de transporte público adecuados, así como con información suficiente que permita a los ciudadanos conocer la red y elegir sus recorridos (Alcalá, 2015).

Estas condiciones deben concebirse en el marco del derecho universal a la ciudad, el cual implica inclusión, derecho a ocupar y ejercer un espacio urbano, acceso a bienes y servicios, y preservación de estas oportunidades para las generaciones futuras. Este enfoque pone de manifiesto tanto la garantía de los derechos individuales como las obligaciones colectivas orientadas a salvaguardar los intereses comunes.

La accesibilidad urbana se ha visto afectada por la marcada dispersión territorial de viviendas, centros educativos, espacios laborales, hospitales y áreas comerciales. Este fenómeno, particularmente evidente en ciudades de países en desarrollo, ha sido favorecido por la expansión del uso del automóvil. Dicho medio de transporte ha permitido que los servicios y actividades urbanas se localicen de manera dispersa, posibilitando desplazamientos flexibles según las necesidades de las personas. Sin embargo, esta dinámica genera un círculo vicioso: la dispersión

territorial incrementa la dependencia del automóvil, lo que a su vez refuerza la desconcentración de los espacios significativos (Cahill, 2010).

En este nuevo esquema urbano, la posesión de un automóvil se convierte en un factor de estratificación social, al condicionar las posibilidades de accesibilidad. Diversos estudios demuestran que contar con un vehículo en el hogar amplía las oportunidades laborales y contribuye al incremento de los ingresos mensuales (Serulle, 2016). Por el contrario, las poblaciones con menores recursos, al carecer de acceso al automóvil, suelen ser desplazadas hacia zonas periféricas, enfrentando mayores dificultades para acceder a empleos, servicios y comercio, lo que incrementa sus costos temporales y monetarios (Zolnik, 2012).

Las periferias urbanas se caracterizan por la ausencia de servicios básicos como agua, electricidad, salud, educación y transporte, además de contar con una infraestructura vial deficiente, insegura y poco permeable (Haouluan, 2016). A ello se suma un sistema de transporte limitado: menor disponibilidad de automóviles, escasa infraestructura para movilidad no motorizada, baja cobertura de transporte formal y la presencia de operadores informales que concentran sus rutas en las pocas carreteras principales (Díaz Olvera, 2013).

El transporte colectivo, especialmente el servicio de autobuses resulta ineficiente para las poblaciones periféricas, obligándolas a realizar trayectos más largos y complejos. Las dificultades se intensifican los fines de semana y en horarios de baja frecuencia, cuando el cumplimiento de los servicios es más imprevisible (Farber, 2014). Estas deficiencias llevan a que muchos habitantes opten por limitar sus actividades a la proximidad inmediata, resignándose a un entorno empobrecido.

Otro factor que incide en la accesibilidad es el costo del transporte colectivo. Adeel (2016) señala que este debe ser asequible para todos los hogares. Sin embargo, estudios muestran que el gasto en transporte varía significativamente: desde el 12% de los ingresos familiares en ciudades densas como Singapur, hasta el 20.9% en urbes más dispersas como Houston (Lau, 2011). En consecuencia, las poblaciones marginadas deben destinar una proporción considerable de sus ingresos a la movilidad, lo que limita sus posibilidades de acceso a servicios básicos (Susilo, 2014).

Alcalá (2015) añade que la movilidad y la accesibilidad dependen también de condiciones personales, físicas y socioeconómicas, así como de la disponibilidad de información adecuada. Esto plantea una visión más amplia de la urbanización de las calles, que no se limita al pavimento de la calzada, sino que incluye aceras, rampas, semaforización, señalización, iluminación, recorridos ciclistas y espacios de detención y estacionamiento.

Estas condiciones solo pueden concebirse dentro del marco del derecho universal a la ciudad, el cual implica, entre otros aspectos, la inclusión de todos los habitantes, el derecho a ocupar y ejercer un espacio urbano, el acceso al conjunto de bienes y servicios que la ciudad ofrece y la obligación de preservar estas oportunidades para las generaciones futuras. Este enfoque pone de relieve tanto la garantía de los derechos individuales como las responsabilidades colectivas orientadas a proteger los intereses comunes.

De acuerdo con la Carta Mundial por el Derecho a la Ciudad (ONU Hábitat, 2018), este derecho se define como el usufructo equitativo de las ciudades bajo

principios de sustentabilidad, democracia, equidad y justicia social. En este sentido, el espacio público debe concebirse como universal, inclusivo y capaz de garantizar diversas formas de desplazamiento peatonal, vehicular, ciclista y transporte público, asegurando que todas ellas puedan realizarse de manera segura, digna y confortable.

Entre las múltiples funciones del espacio público, la movilidad y la accesibilidad urbanas ocupan un lugar central, ya que constituyen condiciones necesarias para la inclusión y la igualdad de oportunidades en el acceso a los distintos puntos del territorio metropolitano. La planificación de la movilidad debe garantizar criterios de equidad, priorizar a los grupos más vulnerables y fomentar medios de transporte menos contaminantes, más sustentables y ecológicos (Thorson Jorgensen, 2019).

Asimismo, la movilidad debe servir y dignificar al ciudadano, transformando incluso los recorridos obligados en espacios capaces de acoger e incluir a quienes los utilizan como miembros reconocidos y respetados de la sociedad (Gelh, 2014). Concebida como un derecho, la movilidad exige políticas urbanas orientadas al desarrollo de territorios bien comunicados y equitativos, fortaleciendo la oferta de modos de transporte sustentables, saludables y accesibles peatón, bicicleta, transporte público sin excluir otras formas de desplazamiento, cada una adecuada a diferentes distancias espaciales y temporales.

Desde una perspectiva regional, la accesibilidad desempeña un papel estratégico en el desarrollo económico y en la distribución espacial de la actividad. En la literatura reciente de la nueva economía geográfica y en estudios empíricos,

el concepto ha adquirido un renovado interés como factor determinante de la organización territorial (Halden, 2002).

No obstante, frente al ideal de una prestación universal de servicios urbanos, las infraestructuras existentes presentan tramos deficientes o degradados que generan entornos urbanos de segunda categoría y producen ciudadanos marginados y excluidos. En los países en desarrollo, esta extensión deficitaria de recursos urbanos constituye la situación predominante en gran parte de los territorios (McFarlane y Graham, 2015).

Las consecuencias de esta fragmentación se traducen en la desconexión de servicios básicos, expresada en fenómenos como el “efecto bypass” o el “efecto túnel”, donde infraestructuras de alta calidad atraviesan territorios marginados sin integrarlos (Young y Keil, 2014). En el acceso al transporte, las desigualdades se explican por la lógica del libre mercado en la política territorial, que expulsa a las poblaciones pobres de los anillos centrales hacia zonas periféricas con viviendas más económicas (Davis, 2006; Rodríguez Vignoli, 2008; Pezzoli, 2002; Fadda, Jiron y Allen, 2000).

En síntesis, la accesibilidad está determinada principalmente por los patrones de uso del territorio y por la naturaleza y capacidad del sistema de transporte existente (Hansen, 1959; Xuan y Suxia, 2004; Rodrigue, Comtois y Slack, 2017).

En consecuencia, el concepto de accesibilidad integra de manera implícita las nociones fundamentales de localización y distancia. Su definición puede abordarse desde distintos enfoques, dependiendo de los objetivos de análisis. Los

planteamientos más difundidos consideran la evaluación de la localización de un lugar o nodo en relación con los demás, entendiéndola como separación espacial, distancia, tiempo de viaje o costo de desplazamiento (Hägerstrand, 1967).

Asimismo, se emplean medidas que describen el grado de facilidad para alcanzar oportunidades desde un punto específico, mediante índices compuestos de accesibilidad total que valoran la conexión de un lugar con todos los demás. En este tipo de mediciones resulta igualmente relevante la calidad del trazado y las posibilidades que tiene una persona, desde una posición determinada, de participar en diversas actividades. Ello permite identificar el beneficio neto derivado de estar en una localización concreta y de poder utilizar un sistema de transporte, aproximándose al concepto de renta de situación (Seguí y Martínez, 2004; Mérenne-Schoumaker, 2008).

De esta manera, Páez, Scott y Morency (2012) sostienen que la accesibilidad, entendida como el potencial de lograr una distribución espacial de oportunidades, constituye uno de los resultados más significativos del desarrollo territorial. Las diferencias en accesibilidad, derivadas de que ciertos lugares sean más accesibles que otros, generan desigualdades territoriales, siendo la falta de accesibilidad un obstáculo central para la competitividad económica de las regiones menos desarrolladas (Comisión Europea, 1999).

El déficit de accesibilidad produce además desequilibrios internos relevantes, dado que el transporte se convierte en un elemento que puede evitar la exclusión social (Nutley, 1998; Kenyon, Lyons y Rafferty, 2002; Farrington y Farrington, 2005; Preston y Rajé, 2007; Hine, 2009). En este sentido, Cass, Shove y Urry (2005)

destacan la creciente importancia de la accesibilidad por sus implicaciones en la exclusión social, especialmente en contextos urbanos periféricos y zonas rurales que suelen presentar carencias en este ámbito (Nutley, 1998).

Farrington (2007) profundiza en este enfoque social de la accesibilidad, reflexionando sobre su relación con las políticas y la planificación, y subrayando su vinculación con discursos más amplios como la globalización, la sostenibilidad y la igualdad. No obstante, Batty (2009) advierte que el concepto de accesibilidad presenta dos problemas fundamentales en su construcción teórica.

Por lo tanto, la estimación y valoración de la accesibilidad se convierte en una herramienta clave para identificar zonas con deficiencias en infraestructura y transporte, comparar alternativas de planificación y evaluar los impactos territoriales (Rodrigue, Comtois y Slack, 2017).

1.2 Planteamiento del Problema

La accesibilidad urbana se ha visto afectada por la amplia dispersión territorial de viviendas, centros educativos, espacios laborales, hospitales y áreas comerciales. Este patrón de dispersión, particularmente evidente en numerosas ciudades de países en desarrollo, ha sido favorecido por la expansión del uso del automóvil (Cahill, 2010).

El vehículo privado ha permitido que los servicios y actividades urbanas se localicen de manera fragmentada, posibilitando desplazamientos flexibles según las necesidades de las personas. Sin embargo, esta dinámica genera un círculo vicioso:

la dispersión territorial incrementa la dependencia del automóvil, lo que a su vez refuerza la desconcentración de los espacios significativos (Cahill, 2010).

En este nuevo esquema urbano, la posesión de un automóvil se convierte en un factor de estratificación social, al condicionar las posibilidades de accesibilidad. Diversos estudios demuestran que contar con un vehículo en el hogar amplía las oportunidades laborales y contribuye al incremento de los ingresos mensuales (Serulle, 2016).

Por el contrario, bajo la lógica del mercado, las poblaciones con menores recursos son las que menos capacidad tienen para decidir su lugar de residencia, siendo desplazadas hacia zonas periféricas y alejadas. En ausencia de acceso al automóvil, estas comunidades enfrentan mayores dificultades para acceder a empleos, servicios y comercio, incurriendo en costos adicionales tanto en tiempo como en recursos monetarios (Zolnik, 2012).

Las periferias urbanas se caracterizan por la carencia de servicios básicos indispensables para la reproducción de los hogares agua, electricidad, salud, educación, comercio y transporte, además de contar con una infraestructura vial deficiente, insegura y poco permeable (Haouluan, 2016).

Frente al ideal de una prestación universal de servicios urbanos, las infraestructuras existentes presentan tramos degradados que generan entornos de segunda categoría y producen ciudadanos marginados y excluidos. En los países en desarrollo, esta deficiencia en recursos urbanos constituye la situación predominante en gran parte de los territorios (McFarlane y Graham, 2015).

El sistema de transporte en las periferias tampoco contribuye a mejorar la situación. Se ha documentado una menor disponibilidad de automóviles, insuficiencia de infraestructura para movilidad no motorizada, baja cobertura de transporte formal y la proliferación de operadores informales que concentran sus rutas en las escasas carreteras principales que conectan con los centros urbanos (Díaz Olvera, 2013).

El transporte colectivo, especialmente el servicio de autobuses resulta ineficiente, obligando a los habitantes a realizar trayectos más largos y complejos. Las dificultades se intensifican los fines de semana y en horarios de baja frecuencia, cuando el cumplimiento de los servicios es más imprevisible (Farber, 2014).

En este contexto, el acceso desigual a los servicios de transporte se explica por la lógica del libre mercado en la política territorial, que expulsa a las poblaciones pobres de los anillos centrales hacia zonas periféricas con viviendas más económicas (Rodríguez, 2008). Estos deficientes niveles de servicio llevan a que muchos habitantes opten por evitar el transporte colectivo, resignándose a desarrollar la mayoría de sus actividades en la proximidad inmediata de la periferia.

Otro factor que incide en la accesibilidad urbana es el costo del transporte colectivo. Adeel (2016) subraya la necesidad de que este sea asequible para todos los hogares. No obstante, estudios como los del INEGI (2019) muestran que la población mexicana destina en promedio el 19% de su salario a pasajes, mientras que solo el 6% del ingreso federal se invierte en transporte. Esta situación obliga a

las poblaciones marginadas de las periferias a realizar traslados más largos y complejos, enfrentando serias dificultades para planificar estrategias de movilidad viables dentro de la ciudad (Susilo, 2014).

1.3 Justificación

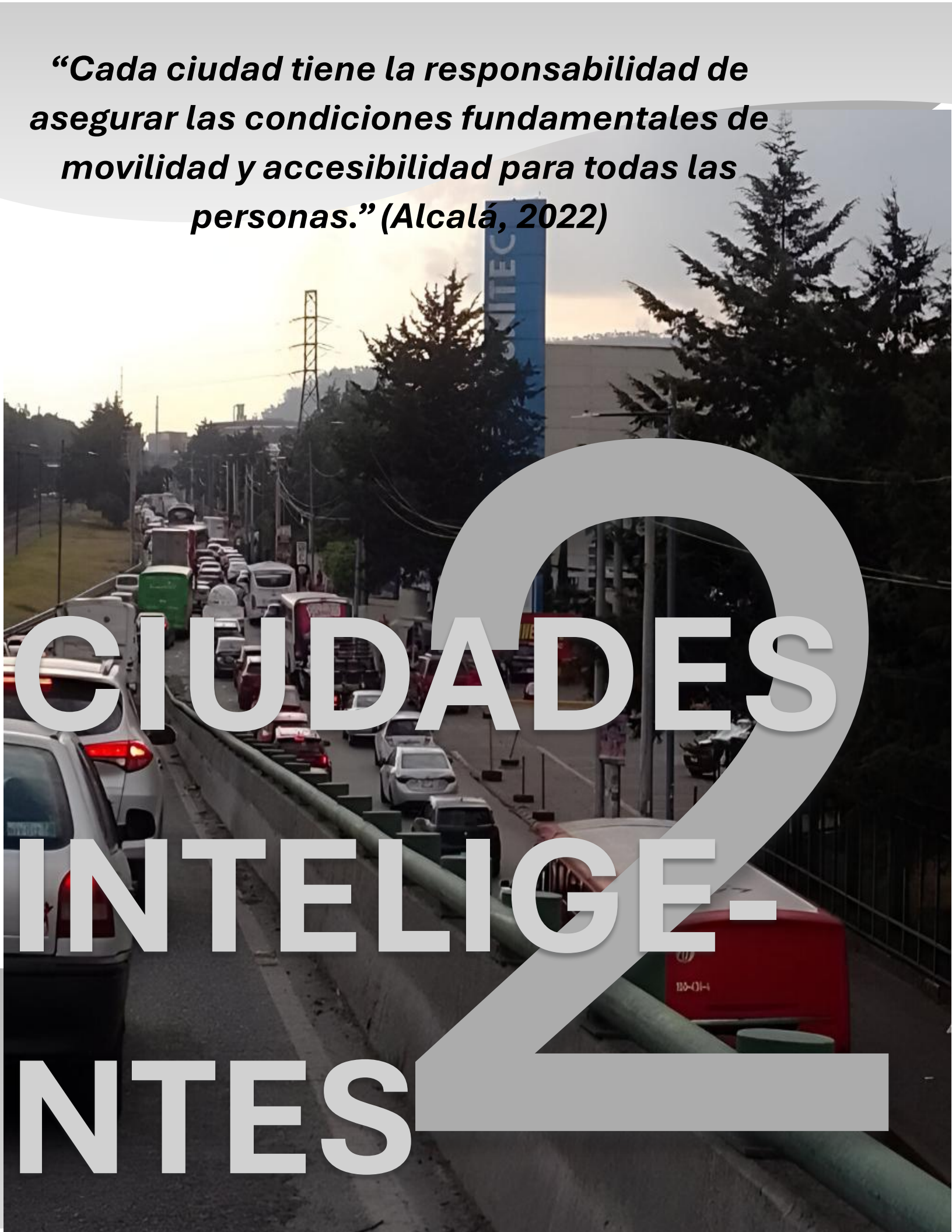
Dentro de las múltiples funciones que cumple el espacio público, la garantía de movilidad y accesibilidad constituye un aspecto esencial para aquellas ciudades que buscan promover la inclusión y equilibrar las oportunidades de sus habitantes en términos de comunicación, interacción y acceso a los distintos puntos del territorio metropolitano. La incorporación de diversos tipos de usuarios implica que las condiciones de movilidad deben regirse por criterios de equidad, priorizando a las mayorías, otorgando atención preferente a los grupos más vulnerables y fomentando medios de transporte menos contaminantes, más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente (Thorson Jorgensen, 2019).

Asimismo, la ciudad debe cumplir una función de servicio y dignificación hacia sus ciudadanos, lo que supone transformar los recorridos incluso aquellos de carácter obligatorio en espacios capaces de acoger e incluir a quienes los transitan como miembros reconocidos y respetados de la sociedad (Gelh, 2014). Concebida como un derecho, la movilidad exige la implementación de políticas urbanas orientadas al desarrollo de territorios bien comunicados y equitativos, fortaleciendo la oferta de modos de transporte sustentables, saludables y accesibles, tales como el desplazamiento peatonal, la bicicleta y el transporte público, sin excluir otras formas de movilidad que responden a diferentes distancias espaciales y temporales.

El análisis de la accesibilidad también se apoya en indicadores que describen el grado de facilidad para alcanzar oportunidades desde un punto específico, mediante índices compuestos que miden la accesibilidad total hacia todos los demás lugares. En estas mediciones resulta relevante considerar la calidad del trazado y las posibilidades que tiene una persona, desde una localización determinada, de participar en diversas actividades. Ello permite identificar el beneficio neto derivado de la ubicación y del uso de un sistema de transporte, aproximándose al concepto de renta de situación (Mérenne-Schoumaker, 2008).

En consecuencia, la estimación y valoración de la accesibilidad se convierte en una herramienta fundamental para identificar zonas con deficiencias en infraestructura y transporte, comparar alternativas de planificación y evaluar los impactos territoriales (Rodrigue, 2017).

“Cada ciudad tiene la responsabilidad de asegurar las condiciones fundamentales de movilidad y accesibilidad para todas las personas.” (Alcalá, 2022)



2 CIUDADES INTELIGE-NTES

CAPITULO 2

CIUDADES INTELIGENTES

LAS CIUDADES INTELIGENTES SE DEFINEN COMO AQUELLAS QUE INCORPORAN TECNOLOGÍAS DIGITALES CON EL PROPÓSITO DE OPTIMIZAR LA EFICIENCIA EN LOS DESPLAZAMIENTOS URBANOS.

El propósito de este capítulo es analizar las alternativas vinculadas con las nuevas plataformas de prestación de servicios, en las que el uso de tecnologías digitales y la recopilación de datos contribuyen a elevar la calidad de vida. Dichas herramientas permiten optimizar los desplazamientos, garantizar servicios e infraestructuras más accesibles y, al mismo tiempo, fortalecer tanto los sistemas de transporte público como privado.

2.1 Smart City

De acuerdo con datos del Banco Mundial, más de la mitad de la población mundial reside actualmente en ciudades, lo que equivale a 4.2 mil millones de personas, es decir, el 55.2% del total. Esta cifra ha experimentado un crecimiento acelerado desde 1950, cuando la población urbana era de apenas 750 millones, hasta superar hoy los 4 mil millones. La Organización de Naciones Unidas (ONU) proyecta que para el año 2050 el 68% de la población mundial vivirá en áreas urbanas.

Asimismo, se estima que para 2030 existirán 43 megaciudades con más de 10 millones de habitantes, la mayoría localizadas en regiones en vías de desarrollo. En este contexto, las ciudades se consolidan como el eje central del crecimiento económico y social, generando alrededor del 70% del producto interno bruto mundial. Sin embargo, también representan el mayor consumidor de recursos y el principal foco de contaminación a nivel global (Lizarraga, 2020).

El concepto de Smart City surge hacia 2009, inicialmente bajo la denominación de digital city, aunque este término perdió popularidad y fue reemplazado por el de Smart City, que ha ganado relevancia en ámbitos empresariales, gubernamentales y mediáticos. En la literatura especializada no existe aún un consenso sobre una definición única (Lizarraga, 2020).

El British Standard Institute define una ciudad inteligente como la integración efectiva de sistemas físicos, digitales y humanos en el entorno construido, con el fin de ofrecer un futuro sostenible, próspero e inclusivo para sus habitantes. Otros

autores la describen como territorios tecnológicamente avanzados, donde personas y organizaciones se encuentran altamente conectadas (Lizarraga, 2020).

En términos operativos, las ciudades inteligentes se conciben como sistemas compuestos por subsistemas interconectados, diseñados para utilizar tecnologías de última generación que incluyen millones de sensores y dispositivos vinculados a bases de datos, sistemas de monitorización y algoritmos de toma de decisiones. En este marco, cobran especial relevancia el almacenamiento y análisis de datos, así como la aplicación de inteligencia artificial en la gestión urbana (Lizarraga, 2020).

Diversos autores también destacan el papel del capital humano y social, subrayando que el objetivo último de las ciudades inteligentes es mejorar la calidad de vida. En todas las definiciones se resalta la importancia de las tecnologías de la información y la comunicación como motor de desarrollo económico y social, siempre bajo la premisa de la sostenibilidad. En términos generales, una Smart City representa la manera en que las urbes del mundo proyectan su futuro a través de la tecnología (Lizarraga, 2020).

Alegre (2019) añade que una ciudad inteligente no debe perder su identidad cultural e histórica frente a la tendencia hacia la homogeneización de las urbes contemporáneas. Por el contrario, debe potenciar sus características diferenciadoras y construir una visión integral que oriente sus objetivos y estrategias. Desde el capital humano se debe fomentar la producción de conocimiento y la búsqueda de soluciones adaptadas a los retos propios de cada ciudad, evitando la adopción acrítica de modelos internacionales incompatibles con sus particularidades.

Si bien la visión de ciudad inteligente varía según la vocación, necesidades y perspectivas de cada urbe, se reconoce como característica común la implementación progresiva de soluciones innovadoras y eficientes, integradas en planes de acción que buscan avanzar hacia un modelo global de ciudad sostenible e interconectada. Estas estrategias se estructuran en seis dimensiones propuestas en el informe City-ranking of European medium-sized cities (Giffinger et al., 2007): gobernanza, economía, ciudadanía, movilidad, medio ambiente y calidad de vida.

Estos pilares representan de manera general los subsistemas urbanos y abarcan los distintos sectores sobre los que se implementan proyectos tecnológicos orientados a alcanzar la inteligencia urbana (Lizarraga, 2020).

- Transporte (movilidad): Incluye todas las formas de desplazamiento urbano, desde transporte público hasta automóviles privados o compartidos, bicicletas y motocicletas. Las iniciativas en este ámbito buscan reducir la congestión y garantizar un transporte equitativo. Entre ellas se encuentran los estacionamientos inteligentes, la gestión del tráfico en tiempo real y las aplicaciones móviles que informan sobre el transporte público en tiempo real (Lizarraga, 2020).

Este sector suele ser el primero en el que las ciudades concentran sus esfuerzos de transición hacia la inteligencia urbana, dado que proporciona beneficios inmediatos en la calidad de vida, especialmente para los grupos de menores ingresos (Lizarraga, 2020).

- Seguridad pública: Hace referencia a la protección y al fortalecimiento del bienestar de los ciudadanos en el entorno urbano. Este ámbito incluye soluciones

como el mapeo y monitoreo de la delincuencia en tiempo real, aplicaciones digitales (web o móviles) para la notificación de alertas de emergencia, sistemas de vigilancia inteligente mediante cámaras y sensores, así como una conectividad avanzada con las fuerzas policiales (Lizarraga, 2020).

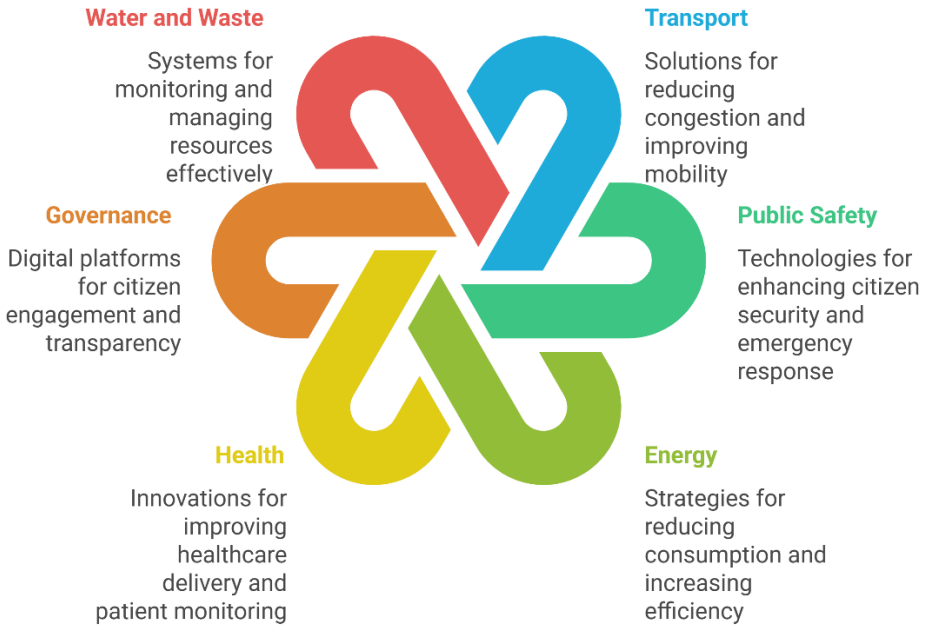
- Energía: Comprende todo lo relacionado con el suministro y la distribución energética de la ciudad, con el objetivo de reducir el consumo y alcanzar una eficiencia energética integral. Entre las soluciones destacan las luminarias inteligentes, las redes y micro redes conectadas, entre otras. Estas iniciativas generan beneficios como la disminución del consumo energético, el aumento de la resiliencia urbana y el incremento en el uso de energías renovables (Lizarraga, 2020).
- Salud: Constituye un sector fundamental para la mejora de la calidad de vida de la población. El aprovechamiento de las tecnologías resulta imprescindible en la detección y tratamiento de enfermedades, así como en el seguimiento remoto de pacientes para evitar desplazamientos innecesarios. En el contexto de las *Smart Cities*, la tecnología facilita la conectividad tanto dentro de hospitales y centros de salud entre sus distintas áreas como con el resto de la ciudad y sus habitantes (Lizarraga, 2020).
- Gobierno y servicios públicos: Implica administraciones locales digitalizadas y diseñadas bajo el principio de “poner al ciudadano en el centro”. Este sector busca simplificar los trámites administrativos mediante el uso de las TIC, fomentar la participación ciudadana a través de plataformas digitales y garantizar el acceso a la información pública mediante portales de datos abiertos. Tales iniciativas

promueven la transparencia, fortalecen la confianza de los ciudadanos en sus gobernantes y favorecen la interacción entre los distintos subsistemas urbanos (Lizarraga, 2020).

- Agua y residuos: La aplicación de tecnologías en la gestión del agua y de los residuos genera beneficios significativos que mejoran la calidad de vida y reducen la contaminación, vinculándose directamente con los objetivos del desarrollo sostenible (Lizarraga, 2020). En cuanto al agua, se destacan sistemas de monitoreo en tiempo real del consumo y la calidad, medidores inteligentes y mantenimientos predictivos de redes de abastecimiento y alcantarillado mediante sensores que registran presión, caudales y puntos de riego.

La gestión inteligente de residuos es otro campo ampliamente adoptado por las ciudades que han implementado estrategias *Smart*. Incluye el uso de sensores en los contenedores de basura que emiten alertas en tiempo real sobre su nivel de llenado, lo que permite optimizar y predecir las rutas de recolección (Lizarraga, 2020).

Figura 2.1. Componentes de una Smart City



Nota: La figura 2.1 describe los pilares de las ciudades inteligentes. Fuente: Lizárraga (2020).

En la figura 2.1 se ilustran las interacciones entre los distintos sectores que integran una *Smart City* y los pilares que requieren incorporar inteligencia en el ámbito urbano. En particular, el sector energético influye directamente en la economía, al orientarse hacia la construcción de un modelo de economía circular y la consecución de una eficiencia energética que permita avanzar hacia un sistema económico más inteligente (Lizárraga, 2020).

Figura 2.2. Relaciones entre los sectores que componen e integran una ciudad inteligente



Nota: La figura 2.2 describe los pilares que representan de una manera más generalista los subsistemas, Lizárraga (2020).

Las Smart Cities funcionan como un conjunto de propuestas prescriptivas orientadas a modelar el desarrollo urbano (Hatuka, 2018). La ciudad inteligente se ha consolidado como un marco de referencia para la planificación y la gobernanza urbana a nivel global. No obstante, la traducción del discurso Smart en políticas urbanas concretas no siempre resulta sencilla, lo que genera dos escenarios:

Por un lado, una desconexión entre el concepto de ciudad inteligente y las iniciativas realmente implementadas (Wiig, 2015); y por otro, una visión de la Smart City como una categoría amplia en la que cualquier proyecto puede ser catalogado

como inteligente (Jirón et ál., 2020). En medio de estas tensiones, cada vez más metrópolis latinoamericanas han comenzado a desarrollar iniciativas inscritas en los repertorios de acción de las ciudades inteligentes. De manera general, es posible identificar tres estrategias complementarias:

Primera estrategia: el diseño de instrumentos de planificación específicos. Ejemplos de ello son el Plan Estratégico Ciudad Inteligente (PECCI) de Campinas, Brasil (Prefeitura Municipal de Campinas, 2019), o el Plan Ciudad Inteligente de Santiago de Chile de 2014, seguido por el Programa Estratégico Regional Santiago Ciudad Inteligente, con énfasis en movilidad, seguridad y medio ambiente (Corfo, 2018).

Segunda estrategia: la incorporación de programas específicos en los instrumentos de planeación ya existentes. Tal es el caso de Ciudad de México, que en su Programa de Desarrollo 2019-2024 incluyó proyectos de gobierno abierto y una hoja de ruta hacia la movilidad inteligente, con la creación de un centro de control e innovación para la movilidad (Gobierno de la Ciudad de México, 2019).

En la misma línea, ciudades colombianas como Bogotá, Medellín y Cali han integrado programas de ciudad inteligente en sus planes de desarrollo recientes, con iniciativas centradas en conectividad, alfabetización digital, gobierno electrónico, movilidad, seguridad y medio ambiente (Amar Flórez, 2016; Alcaldía Mayor de Bogotá, 2019; Alcaldía de Cali, 2020).

La experiencia de Medellín resulta especialmente relevante, al ser la primera ciudad colombiana en adoptar plenamente este modelo urbano y vincularlo estrechamente con la innovación. Programas como Medellín Ciudad Inteligente (MDE) han ampliado el acceso gratuito a Internet en espacios públicos y han implementado sistemas tecnológicos en sectores como movilidad y medio ambiente (alertas tempranas, monitoreo de calidad del aire y del ruido), acompañados de iniciativas de co-creación ciudadana y promoción de la innovación social (Amar Flórez, 2016).

Tercera estrategia: el desarrollo de proyectos emblemáticos, como el de Ciudad Inteligente Buzios en Brasil, enfocado en la eficiencia energética y el uso de energías renovables (Vilaca et ál., 2014). También se incluyen proyectos de menor escala o pilotos, como los de gobierno electrónico virtualización de trámites y datos abiertos en ciudades como Vitória, Valdivia o Rosario. Otras urbes han priorizado la seguridad mediante la instalación de cámaras de videovigilancia en espacios públicos, como Villavicencio o Joao Pessoa.

Si bien los ámbitos de intervención y las soluciones implementadas suelen ser similares, su alcance, cobertura y nivel de complejidad varían según el tamaño de la ciudad y los recursos disponibles para adoptar infraestructura tecnológica más o menos sofisticada (Figura 2.3).

Figura 2.3. Tipo de soluciones inteligentes según dimensión



Nota: La figura 2.3 describe algunas soluciones inteligentes para las dimensiones urbanas, Franco (2021).

2.2 Smart Cities: generadoras de innovación desde la gestión pública

Convertirse en una ciudad inteligente y sostenible constituye uno de los principales objetivos de la gestión pública de numerosos gobiernos locales en la región. Para alcanzar esta meta, resulta necesario replantear el funcionamiento del gobierno a partir de la transformación digital, habilitando recursos que fomenten la innovación, incrementen la eficiencia y permitan conocer mejor al ciudadano para atender sus necesidades y mejorar su calidad de vida urbana (Cabello, 2022).

No obstante, en América Latina y el Caribe no todas las ciudades que impulsan proyectos de ciudades inteligentes siguen un plan estructurado ni cuentan con una gobernanza diseñada para tal fin. En muchos casos, las iniciativas se

desarrollan de manera gradual, aprovechando oportunidades que surgen sobre la marcha, a partir de mayores niveles de conectividad y del desarrollo de plataformas que facilitan la gestión de servicios como transporte, seguridad y salud, ajustándose además a los presupuestos disponibles (Cabello, 2022).

Algunas urbes han creado agencias de innovación, aunque estas no siempre lideran todas las iniciativas tecnológicas. En ocasiones, las soluciones emergen de manera descentralizada desde áreas internas específicas o por imitación de experiencias en otras ciudades. En particular, aquellas con un ingreso per cápita superior al promedio nacional suelen observar a sus pares regionales o internacionales y avanzar sin esperar directrices nacionales o alinearse a planes digitales centralizados (Cabello, 2022).

En agosto de 2021, el Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires presentó el primer Plan de Inteligencia Artificial de la ciudad, con el propósito de maximizar los beneficios de esta tecnología, consolidar su experiencia de uso y fomentar su desarrollo con un enfoque centrado en las personas (Cabello, 2022).

Como ocurre en otros ámbitos vinculados a las tecnologías de la información y la comunicación, el avance hacia las ciudades inteligentes es desigual y depende de las capacidades económicas de cada metrópoli. Las urbes líderes en innovación digital y adopción de nuevas tecnologías como la sensorización mediante el Internet de las Cosas o la atención ciudadana continua a través de bots de inteligencia artificial suelen ser aquellas con más de tres millones de habitantes, una institucionalidad sólida y capacidad para atraer financiamiento y talento (Cabello, 2022).

El IMD Smart City Index 2021, que evalúa a 118 ciudades del mundo mediante encuestas a sus ciudadanos, ubica a Buenos Aires (Argentina), Medellín (Colombia), Ciudad de México (México) y Santiago (Chile) entre las más destacadas de la región. Posteriormente, la adopción de soluciones en la nube con mayor escalabilidad ha permitido el desarrollo de proyectos apoyados en tecnologías 4.0 (Cabello, 2022).

Las metrópolis regionales también han impulsado nuevos ecosistemas como el denominado GovTech, que actúa como un capital de riesgo, fomenta la creación de cadenas de valor mediante la publicación de datos abiertos con APIs y estimula el desarrollo de capacidades para la internacionalización, posteriormente transferidas al sector privado (Cabello, 2022).

Las ciudades inteligentes se consolidan como motores de innovación, marcando tendencias que en ocasiones anteceden al resto del país y actuando como catalizadores de la digitalización. El IDC Worldwide Smart Cities Spending Guide estimaba que en ese año las iniciativas de ciudades inteligentes alcanzarían los 124 mil millones de dólares a nivel global, con un crecimiento acumulado del 15% hasta 2023, llegando a 189.5 mil millones, impulsadas principalmente por ciudades pequeñas y medianas que invertirían alrededor de un millón de dólares o menos por año (Cabello, 2022).

Cabello (2020) propone una clasificación cualitativa de los modelos de desarrollo de ciudades inteligentes en función de las iniciativas implementadas. Esta

tipología considera aspectos como la existencia de una autoridad especializada, el nivel de coordinación gubernamental, la participación ciudadana, la toma de decisiones basada en datos, la madurez de las políticas de datos abiertos y el uso de servicios de computación en la nube (Cabello, 2022).

En el contexto latinoamericano y caribeño, se pueden distinguir tres grupos de ciudades en proceso de digitalización:

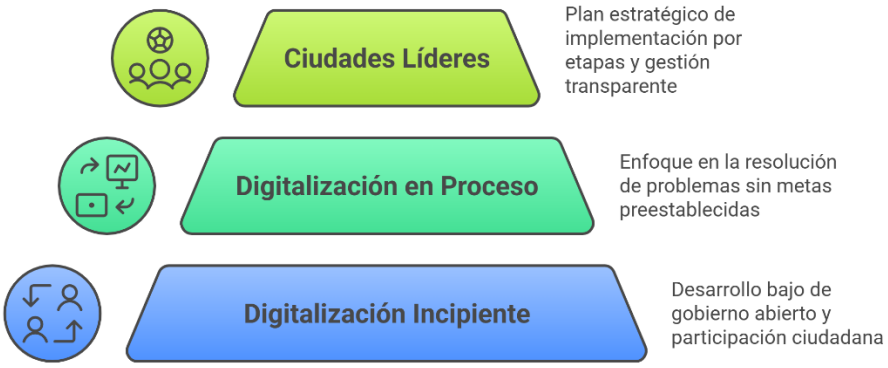
Ciudades Líderes: cuentan con un plan estratégico de implementación por etapas y un organismo responsable de la transformación digital. A través de plataformas unificadas gestionan y mejoran de manera continua los servicios disponibles, con una administración abierta y transparente. La digitalización y la gestión de datos se ponen al servicio del ciudadano para impulsar el desarrollo social y productivo, en coordinación con las metas nacionales (Cabello, 2022).

Ciudades en Proceso de Digitalización: se concentran en resolver problemas específicos sin metas predefinidas ni una autoridad local que lidere el proceso. Sus prioridades suelen estar relacionadas con la seguridad ciudadana y el ahorro energético. Generalmente, el proceso es impulsado por iniciativas público-privadas o asociaciones privadas sin fines de lucro (Cabello, 2022).

Ciudades de Digitalización Incipiente: presentan un bajo desarrollo en gobierno abierto y participación ciudadana. En ellas, los ciudadanos colaboran identificando obstáculos que enfrenta el municipio, lo que sirve de base para diseñar estrategias que impulsen la transición hacia una ciudad inteligente. En este grupo se ubican las cuatro ciudades analizadas en detalle en el estudio (Cabello, 2022).

Cabe señalar que las ciudades líderes presentan prioridades diferenciadas y, en muchos casos, desarrollan iniciativas alineadas con agendas digitales nacionales. Su tamaño, capacidad económica y autonomía las convierten en actores clave en la implementación de planes nacionales de digitalización. Además, estas urbes generan experiencia práctica en la gestión de tecnologías, como la contratación modular de servicios en la nube, que permite integrar soluciones y proveedores para atender diversas problemáticas. Este aprendizaje resulta fundamental para escalar posteriormente al resto del país (Cabello, 2022).

Figura 2.4. Jerarquía de Transformación Digital de la Ciudad



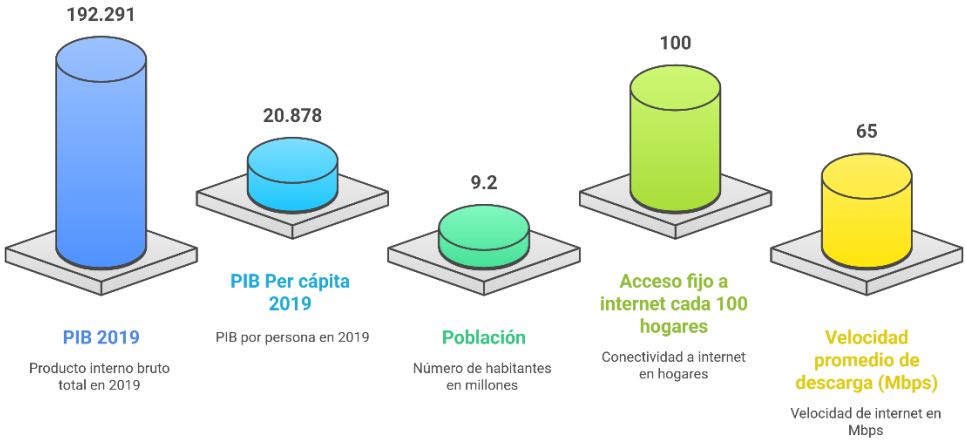
Nota: La figura 2.4 describe la jerarquía de las ciudades de acuerdo con su proceso de digitalización, Cabello (2021).

2.2.1 Características de la Ciudad de México

En 2019, la Ciudad de México (CDMX) registró un Producto Interno Bruto de 192,291 millones de dólares, cifra comparable con la de economías nacionales como Grecia, Perú o Hungría. Al igual que Buenos Aires, su población asciende a 9.2 millones de habitantes; sin embargo, considerando toda su zona metropolitana,

la cifra se eleva a cerca de 22 millones, lo que la posiciona entre las urbes más densamente pobladas del planeta (Figura 2.5) (Cabello, 2022).

Figura 2.5. Síntesis de Indicadores de la CDMX



Nota: La figura 2.5 describe algunos indicadores de la Ciudad de México, Cabello (2022).

De acuerdo con la Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH, 2020) publicada por el INEGI, la Ciudad de México ocupa el duodécimo lugar nacional en penetración de accesos fijos a internet y el segundo en velocidad de navegación. El 99.6% de los hogares contaba con conexión a internet, alcanzando una velocidad promedio de 65.39 Mbps frente a la media nacional de 35.91 Mbps registrada en el tercer trimestre de 2021.

En cuanto a la red pública, el gobierno ofrece servicio gratuito de WiFi y, en noviembre de 2021, la capital obtuvo el Récord Guinness como la ciudad más conectada del mundo (Cabello, 2022). Los 21,500 puntos de acceso gratuito sitúan a la CDMX por encima de urbes como Moscú, Seúl o Tokio. No obstante, los usuarios han señalado deficiencias en la velocidad, especialmente en zonas

céntricas. El servicio ofrece una tasa de transferencia de 200 Mbps, con perfiles de usuario de 5 Mbps de descarga y 3 Mbps de subida.

Las autoridades han destacado este proyecto como uno de los más relevantes dentro de la estrategia de ciudad inteligente (Cabello, 2022). Las iniciativas para transformar a la Ciudad de México en una urbe inteligente son lideradas por la Agencia Digital de Innovación Pública (ADIP), creada a partir de la Ley de Operación e Innovación Digital. Su función es diseñar, coordinar y supervisar políticas relacionadas con la gestión de datos, gobierno abierto, gobierno digital, gobernanza tecnológica e infraestructura (Cabello, 2022).

La ADIP desarrolla software y sistemas digitales propios a través de la Dirección General de Operación Tecnológica, que funciona como una “fábrica de software”. Esta característica constituye un diferencial respecto de otras ciudades, al permitir acelerar la creación de herramientas digitales. La Dirección se organiza en cuatro áreas: Desarrollo Tecnológico, Plataformas Móviles, Infraestructura Tecnológica y Control de Desarrollo de Software (Cabello, 2022).

La capital mantiene una estrecha coordinación con la agenda nacional. Los gobiernos local y federal se encuentran alineados en protocolos de protección de datos personales, políticas anticorrupción, control de contrataciones públicas, inhabilitación de proveedores y estandarización de soluciones tecnológicas basadas en código abierto y software libre (Cabello, 2022).

El gobierno federal ha establecido que las soluciones tecnológicas generadas por la ADIP sean replicables y adaptables en otras entidades. En este marco, se diseñó el Plan de Ciudadanía Digital, concebido como una hoja de ruta para la transformación digital y la innovación, cuyo objetivo es fortalecer la relación entre

los ciudadanos y el gobierno de la ciudad. La ADIP busca desarrollar soluciones tecnológicas para problemas públicos y sistemas digitales que respondan a las necesidades de la población, bajo principios de apertura, transparencia, eficiencia e integración.

De este modo, se fomenta la formación de un ciudadano digital capaz de utilizar las herramientas tecnológicas que ofrece el gobierno. Los programas de ciudad inteligente se inspiran principalmente en las demandas ciudadanas y en el análisis de datos disponibles (Cabello, 2022).

En cuanto a Toluca, esta ciudad capital del municipio homónimo se ubica en la zona centro-sur del Estado de México y conforma, junto con municipios como Metepec, Lerma, San Mateo Atenco, Zinacantepec, Ocoyoacac y Almoloya de Juárez, la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT). Su superficie urbana alcanza los 344 km² y ha crecido de manera constante en la última década, concentrando las funciones de gobierno. Presenta una tasa de crecimiento social anual de 3.2%, la más alta del estado (Rosales, 2021).

En términos de movilidad, Toluca dispone de infraestructura carretera regional que la conecta tanto con municipios vecinos como con estados colindantes. Además de la construcción de infraestructura y equipamiento regional, el gobierno ha priorizado la ampliación de la cobertura de telecomunicaciones (Rosales, 2021).

Bajo el enfoque de ciudad inteligente, centrado en el ciudadano, el gobierno municipal ha desarrollado la App Toluca, que permite a la población reportar desde sus teléfonos móviles problemas como baches, fallas en luminarias, deficiencias en la recolección de basura, quejas contra elementos policiales o denuncias de maltrato animal, entre otros (Toluca, 2025).

La aplicación incluye tun botón de pánico y otro de alerta de género en su primera versión, con la intención de perfeccionarse progresivamente para mejorar la seguridad y el bienestar de los usuarios. Según el último reporte, al 6 de mayo se habían registrado 2,215 descargas y 245 reportes atendidos, principalmente por las áreas de obras y servicios públicos (Toluca, 2025).

2.3 Ciudad de 15 minutos

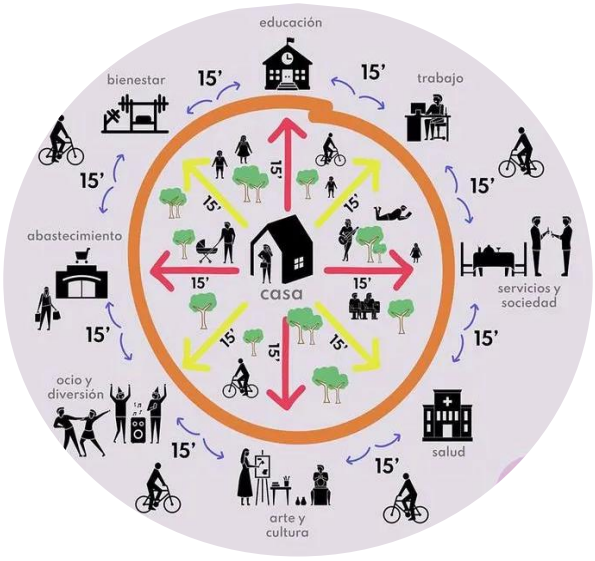
Los avances tecnológicos de computación en la nube, big data, IoT, inteligencia artificial (IA), blockchain, realidad extendida y robótica social impulsarán aún más las iniciativas de ciudades inteligentes. Sin embargo, el proceso de integración de las nuevas tecnologías no tendrá lugar sin desafíos de seguridad, financieros, de accesibilidad e integración social (Agbali, 2019).

Las aplicaciones y prácticas sostenibles de ciudades inteligentes tienen el potencial de promover la inclusión social. Por un lado, incluyen características tecnológicas como el reconocimiento de voz, dispositivos de aumento y funcionalidades táctiles y gestuales que pueden facilitar el acceso de los ciudadanos con discapacidad; por otro lado, un número cada vez mayor de responsables políticos y fabricantes se dan cuenta de que las características de accesibilidad deben integrarse en el diseño de dispositivos (Mehta,2020).

Así mismo, el acceso a funciones y destinos urbanos esenciales y una combinación de usos del suelo son dos de los componentes clave del concepto de Ciudad de 15 Minutos. Los principales destinos que son considerados por casi todos

los conceptos son las escuelas (primarias), supermercados y otros mercados de alimentos, parques y parques infantiles, instalaciones de salud y atención, así como instalaciones de ocio / recreativas como centros deportivos (Büttner,2022).

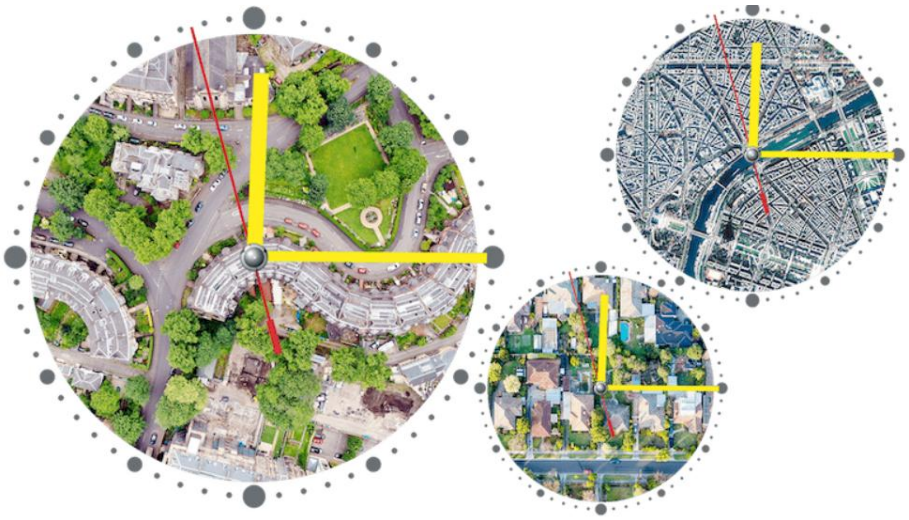
Figura 2.6. Representación gráfica de la Ciudad 15 minutos



Nota: La figura 2.6 representa la medición del acceso a los servicios, ya que la prestación de los servicios esenciales y transporte público debe encontrarse en las proximidades de la casa en un radio de tiempo o distancia predefinido, Moreno (2019).

En este sentido se definen barrios completos a los que tener acceso al menos 20 categorías de destino diferentes y al menos una categoría de destino de cada una de las seis funciones esenciales en un plazo de 20 minutos a pie, indicaría que se puede llegar a todos los destinos a menos de 200 metros o menos. En la figura 7 se representa gráficamente la accesibilidad por proximidad (Büttner,2022).

Figura 2.7. Accesibilidad por proximidad



Nota: La figura 2.7 representa la medición del acceso a seis servicios, los resultados obtenidos se representan en un mapa el cual muestra el acceso dentro de un radio de 20 minutos, mientras que otro mapa determina el análisis con un radio de 10 minutos, Moreno (2019).

El concepto de la ciudad de 15 minutos surge de una reflexión sobre el tiempo vital que las personas dedican a los desplazamientos, ya que el modelo urbano del siglo XX se diseñó bajo una lógica que fragmenta las funciones cotidianas, separando las áreas destinadas a la vivienda, el trabajo, el comercio y la educación.

Este esquema urbano impone un ritmo de vida donde el tiempo se convierte en el eje central, lo que ha motivado nuevas aproximaciones orientadas a mejorar el bienestar general de la población mediante la consideración explícita del factor temporal y de la movilidad, enfoque que se denomina cronourbanismo.

Según Moreno (2019), creador del término, se trata de transitar de una planificación centrada en la estructura física de la ciudad hacia una planificación de la vida urbana, garantizando el acceso cercano a seis necesidades esenciales: habitar, trabajar, abastecerse, cuidarse, aprender y descansar.

Figura 2.8. Diagrama del Cronourbanismo



Nota: La figura 2.8 representa el diagrama del Cronourbanismo, donde el tiempo de los desplazamientos es decisivo, Moreno (2019).

Este modelo urbano ofrece un gran potencial para reducir el esfuerzo que la ciudadanía invierte en sus actividades cotidianas, al mismo tiempo que contribuye a disminuir las emisiones de CO_2 derivadas del tráfico, los efectos negativos de la vida sedentaria y la soledad no deseada. No obstante, si no se aborda de manera integral y sistémica, existe el riesgo de que incremente las desigualdades territoriales (Moreno, 2019).

Los desplazamientos dentro de la ciudad resultan decisivos y abren la posibilidad de replantear el uso del espacio público, promoviendo la redistribución de servicios y la creación de plazas y parques en áreas antes destinadas al estacionamiento en superficie. Alcanzar una ciudad de proximidad requiere diseñar un esquema que favorezca la conectividad entre distintos núcleos urbanos y entre los barrios de una misma ciudad (Moreno, 2019).

El rediseño del espacio público debe pensarse desde la escala barrial, garantizando que las necesidades de los habitantes se encuentren satisfechas. Además de la reubicación de servicios básicos, es fundamental considerar la localización de los lugares de trabajo, ya que los desplazamientos diarios hacia ellos implican una inversión significativa de tiempo vital. La relocalización de los centros laborales busca reducir ese tiempo perdido, mejorar la calidad de vida y disminuir las emisiones de carbono (Moreno, 2019).

El tiempo que antes se destinaba a los traslados puede transformarse en tiempo de calidad para actividades sociales, familiares y culturales. De esta manera, se plantea un cambio en el ritmo de vida que abre espacio físico y mental para la creatividad, el ocio y la reflexión, alejándose del modelo urbano marcado por la inmediatez y el estrés (Moreno, 2019).

La propuesta de ciudad de proximidad se fundamenta en el modelo de ciudad compacta, caracterizado por una alta densidad y una diversidad de usos que favorecen trayectos más sostenibles (Moreno, 2019). La ciudad de los 15 minutos se nutre de este enfoque, ya que reduce los tiempos de desplazamiento entre origen y destino, incentivando el uso del transporte público, la bicicleta y los desplazamientos a pie. Sin embargo, cuando la ciudad compacta crece en exceso

y dificulta la gestión de la movilidad, surgen propuestas que abogan por modelos de crecimiento más difusos y de baja densidad (Moreno, 2019).

La ciudad del cuarto de hora constituye una respuesta a la transición urbana, pues limita la huella de carbono asociada a los viajes y promueve la movilidad activa. A través de transformaciones en espacios cotidianos como escuelas, calles y plazas de barrio, se logra que las funciones esenciales se encuentren próximas y accesibles (Moreno, 2019).

Iniciativas como convertir las escuelas infantiles en centros de barrio impulsan un cambio en la manera de concebir la distribución urbana. Procesos como la naturalización de patios escolares o el diseño de itinerarios seguros para los estudiantes modifican el paradigma funcional de la ciudad, ofreciendo un estilo de vida más tranquilo, seguro y accesible (Moreno, 2019).

2.4 Cuidad Accesible

Las ciudades suelen caracterizarse por ser espacios dinámicos y llenos de oportunidades, donde se concentran servicios que permiten satisfacer de manera más eficiente las necesidades básicas de la población en comparación con el ámbito rural. Además, constituyen escenarios que enriquecen la mente y el espíritu humano, al ofrecer convivencia, cultura, educación, arte, arquitectura, recreación, deporte, entretenimiento y, en general, múltiples formas de conexión social (Martínez, 2019).

Uno de los principales desafíos vinculados a la accesibilidad urbana es la gestión de los servicios de transporte, fundamentales para la vida cotidiana de

quienes los utilizan para trasladarse al trabajo o a la escuela. Este aspecto representa también un reto económico, pues en muchos hogares el gasto en transporte puede superar el 30, 40 e incluso el 50% de sus ingresos totales (Martínez, 2019).

A ello se suma que décadas de prácticas deficientes en la regulación y administración de concesiones han generado vicios estructurales y una marcada rigidez en el sector. Por esta razón, cualquier intento de ajuste tarifario o de innovación suele enfrentar resistencia, ya sea por parte de los usuarios o de los concesionarios. En este contexto, una ciudad inteligente debe apostar por la innovación y la mejora constante de la cobertura y calidad del transporte (Martínez, 2019).

Entre las herramientas de mercado que pueden contribuir a incrementar la competitividad de los servicios de transporte se encuentran:

- Otorgar subsidios directos a los usuarios vulnerables en lugar de establecer topes tarifarios.
- Promover la competencia entre una mayor diversidad de alternativas de transporte, incentivando la inversión en unidades y empresas.
- Desarrollar opciones de transporte de lujo, además de las de bajo costo, para diversificar la oferta y penetrar nuevos mercados.
- Flexibilizar las tarifas, permitiendo la existencia de distintos esquemas adaptados a diversos segmentos de usuarios.
- Implementar tarifas dinámicas en horas pico, con el fin de optimizar la demanda y maximizar la rentabilidad.

- Fomentar sistemas de membresías mensuales y descuentos colectivos dirigidos a empresas.
- Modernizar los sistemas mediante la integración de transporte multimodal y plataformas digitales (Martínez, 2019).

“Los beneficios a nivel local se definen por la proximidad existente entre la oferta de servicios y la demanda social.” (Fugita, 2004).



PROTOTI-POS

3

CAPITULO 3

PROTOTIPOS

PROTOTIPOS DE MODELOS MATEMÁTICOS DE ACCESIBILIDAD VIAL

El capítulo tiene como objetivo mostrar los prototipos matemático, con el fin de representar situaciones reales, las cuales han permitido analizar la accesibilidad para comprender y predecir el comportamiento del sistema. Algunos de estos modelos han aplicado formulas analíticas para construir soluciones y generar una predicción sobre el comportamiento del fenómeno de la accesibilidad vial. Los prototipos se clasifican en:

Modelos a partir de variables económicas

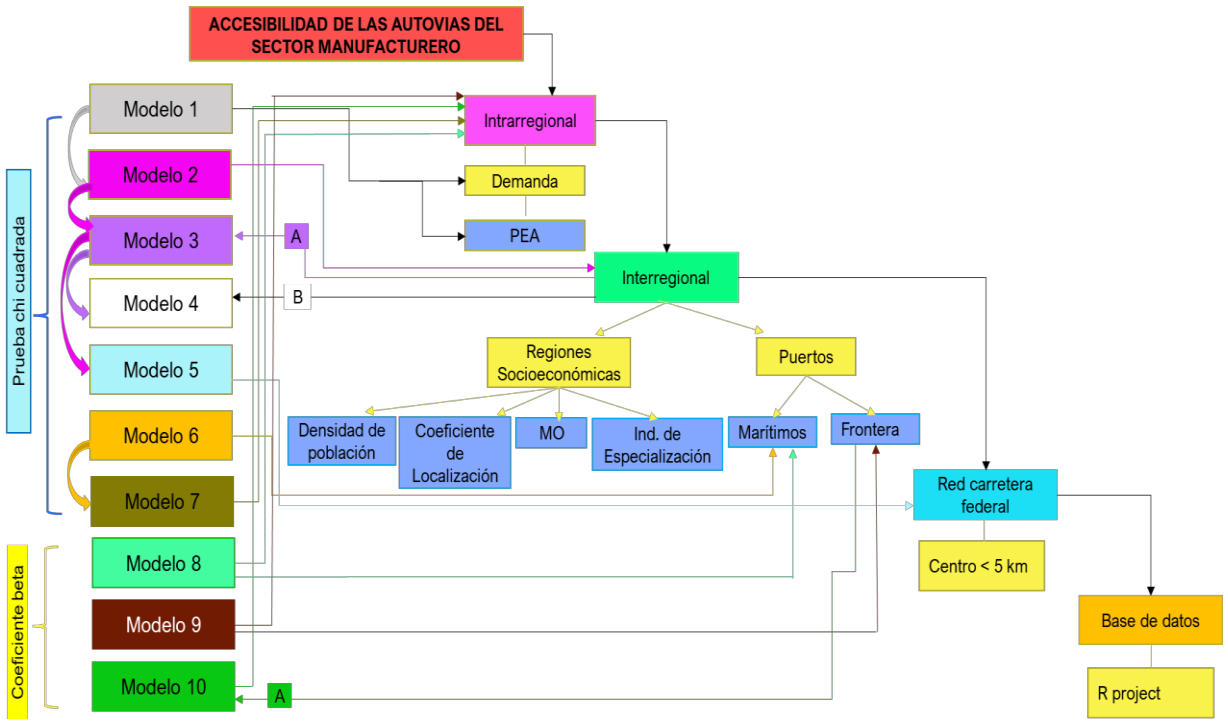
Modelos de accesibilidad a partir de variables geográficas

Modelos de accesibilidad a partir de variables en las redes viales

3.1. Modelo de accesibilidad a partir de variables socioeconómicas

Este modelo se fundamenta en los principios de la Nueva Geografía Económica, la cual sostiene que la localización industrial no responde a un proceso aleatorio, sino que obedece a decisiones estratégicas orientadas a maximizar los beneficios empresariales (Ríos, 2015). Dichos beneficios derivan de la proximidad entre la oferta y la demanda, es decir, de la accesibilidad que el centro de producción mantiene respecto al mercado, así como de factores asociados a la calidad, las mejoras en la infraestructura de transporte, la localización, los costos, la demanda y las economías de aglomeración (Fugita, 2004).

Figura 3.1. Modelo de accesibilidad de las autovías para el sector



Nota: La figura 3.1 describe la metodología aplicada a partir del análisis de accesibilidad para la Región Bajío, Ríos (2015).

3.1.1 Metodología

El primer paso consiste en delimitar la zona de estudio, seleccionada por su competitividad económica y conformada por diversos municipios que integran la denominada Región Bajío (RB). En esta delimitación se destacan las actividades principales según su contribución al producto interno bruto y su nivel de integración, además de considerar criterios como la accesibilidad, los tiempos de desplazamiento y la intensidad de las interacciones.

El análisis incorpora 61 municipios pertenecientes a seis entidades federativas, organizados en seis corredores carreteros. La RB sobresale por su marcada actividad manufacturera frente a otros sectores económicos, con especial énfasis en los corredores Celaya–Querétaro, Aguascalientes y San Luis Potosí, que presentan la mayor concentración de dicha actividad.

El segundo paso implica establecer la base matemática mediante índices regionales, tales como el tamaño del mercado, los ingresos promedio, el costo de transporte entre los puntos j y k, los costos variables de producción, el precio de los factores primarios, el costo medio de los insumos intermedios, los costos de venta, los costos de transporte de entrada y los costos fijos a nivel empresarial (Ríos, 2015).

Este modelo distingue entre la accesibilidad al mercado interregional y al intrarregional, al reconocer que ambas dimensiones generan impactos diferenciados en la localización industrial. En consecuencia, las funciones 3.1 y 3.2 se utilizan para determinar la Accesibilidad a la Demanda Interregional (Ríos, 2015).

$$MA_j = \sum_K \frac{M_K}{d_{jK}} \; ecuación \ldots\ldots 3.1 \qquad AIM_j = \sum_K \frac{d_{jK}}{M_K} \; ecuación \ldots\ldots 3.2$$

Donde:

MAj= Demanda para los bienes producidos

djk= Distancia desde el municipio j hacia los municipios Mk de la zona de estudio.

PEA= Población Económicamente Activa representa el tamaño del mercado (Mk)

$AIMj$= Potencial de accesibilidad

Holl (2004) señala que la accesibilidad intrarregional debe traducirse en un incremento de los beneficios para una región, en la medida en que ésta se conecta con mercados externos. En este sentido, se plantea la utilización del inverso de la fórmula de Harris (1954) con el objetivo de estimar el potencial de accesibilidad, considerando que, a menor tiempo de desplazamiento y mayor tamaño del mercado, el valor del potencial tiende a disminuir, lo cual refleja una mayor accesibilidad a la demanda y una reducción en los costos de transporte (Ríos, 2015).

En consecuencia, las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5 establecen la definición de la Accesibilidad a la Demanda Intrarregional.

$$AR_j = \sum_K \frac{d_{jK}}{R_K}\ ecuación \dots \dots 3.3 \qquad APM_j = \sum_K \frac{d_{jK}}{PM_K}\ ecuación \dots \dots 3.4$$

$$APFN_j = \sum_K \frac{d_{jK}}{PM_K}\ ecuación \dots \dots 3.5$$

Donde:

Se mide la accesibilidad desde los municipios de la región hacia

R_k= Las regiones económicas del país

PM_k= Los principales puertos marítimos

$APFN_j$ = Los principales puertos de la frontera norte (Ríos, 2015)

El tercer paso es conocer la accesibilidad a la Red Carretera Federal, considerando al centro geográfico se localizado a menos de 5 km mediante la formula: $\text{Si ARCF}_\text{j} \leq 5\ \text{Km}\ , \text{entonces K}_\text{j} = 1, \text{en caso contrario} = 0$

Donde: ARCF_j es la accesibilidad a la red carretera federal (Ríos, 2015)

Posteriormente se calculan con la ecuación 3.7 los determinantes socioeconómicos de localización a través de la densidad de población correspondiente al municipio j.

$$DENPOB_j = \frac{POBTOT_j}{ALOC_j}\ ecuación \dots \dots 3.7$$

Dónde:

$DENPOB_j$=Densidad de población correspondiente al municipio j.

$POBTOT_j$= Población total de las localidades urbanas en el municipio j.

$ALOC_j$= Área de las localidades urbanas en el municipio j.

La proximidad a la carretera federal constituye una ventaja estratégica para las industrias, ya que facilita el acceso tanto a los mercados como a los proveedores, reduciendo los costos de transporte asociados al abastecimiento de materias primas y a la distribución de los productos finales. En este sentido, se trata de una característica que otorga beneficios significativos a las empresas interesadas en establecerse en la región (Ríos, 2015).

La conexión de cada municipio se determinó mediante una línea recta trazada desde el centro geométrico de la localidad urbana hasta la carretera federal más cercana. En los casos en que existían dos o más alternativas de acceso, se calculó la distancia promedio. El análisis permitió identificar dos estratos: el primero corresponde a los municipios cuyo centro geométrico se ubica a menos de 5 km de la carretera, condición que se cumple en 13 de los 28 municipios estudiados (Ríos, 2015).

El cuarto paso consiste en analizar los determinantes socioeconómicos, considerando el costo de la mano de obra como un factor decisivo que puede desincentivar la instalación de empresas en regiones con mayores niveles salariales. Para ello, se incorporan cálculos en las fórmulas 3.8 y 3.9, desagregando los costos en dos categorías: salarios destinados a obreros y técnicos de producción (CPT_i), y sueldos correspondientes a empleados administrativos, contables, gerenciales y directivos (CPA_i).

$$CPT_i = \frac{PT_i}{POT_i}\ x\ \frac{1}{365}\ ecuación \dots\dots 3.8 \qquad CPT_i = \frac{PA_i}{POA_i}\ x\ \frac{1}{365}\ ecuación \dots\dots\ 3.9$$

Donde:

$PT_i\ y\ PA_i$ = Gasto que representa la mano de obra

POT_i y POA_i = Total de personas que laboraron para la empresa (Ríos, 2015)

El costo de la renta del suelo se considera una variable clave en la localización industrial, ya que las ventajas económicas dependen de la proporción territorial en relación con la densidad poblacional. Este indicador se calcula a partir de la población total y del área correspondiente a las localidades urbanas de cada municipio que integra la región (Figueiredo, 2002).

El nivel promedio de escolaridad refleja el grado de formación de la población y, en consecuencia, la cualificación de la mano de obra disponible en las regiones. Este factor permite analizar el impacto que genera el acceso a trabajadores calificados, con información obtenida del INEGI. Asimismo, el tamaño del mercado local se define en función de la Población Económicamente Activa (PEA), lo que posibilita incluir los costos laborales desagregados en dos categorías: salarios destinados a obreros y técnicos de producción, y sueldos correspondientes a empleados administrativos, contables, gerenciales y directivos (Ríos, 2015).

El costo de la mano de obra se determina a partir del promedio del gasto anual que realizan los establecimientos para remunerar el trabajo. Dicho valor resulta de dividir el gasto total en mano de obra (PT_i, PA_i) entre el número de personas empleadas en el año 2008 (POT_i, POA_i) ; posteriormente, se divide entre los días del año para obtener el costo diario (Ríos, 2015).

Finalmente, se incorpora un índice de especialización (CL_{ij}), que mide la relación entre la participación del subsector *i* en el municipio *j*. Si el tamaño del subsector en el municipio es equivalente al de la zona de estudio, no existe especialización y el valor de CL_{ij} es igual a 1. En caso de que el subsector en el

municipio sea menor, $CL_{ij} < 1$; mientras que, si es mayor, se genera una especialización de la actividad, reflejada en $CL_{ij} > 1$, tal como se expresa en la ecuación 3.10 (Ríos, 2015).

$$CL_{ij} = \frac{E_{ij}/E_i}{E_J/E_T} \; ecuación \ldots\ldots 3.10$$

Dónde:

E_{ij} = Personal ocupado total del subsector manufacturero j en el municipio i

E_i= Personal ocupado en el municipio i

E_J = Personal ocupado en la zona de estudio para dicha actividad

E_T = Personal ocupado en la zona de estudio en las actividades manufactureras

Otro de los factores socioeconómicos considerados es el *Coeficiente de Localización* (CE_{ij}), el cual expresa el grado de semejanza entre la estructura económica de una subregión y la estructura económica del patrón de referencia. Su cálculo se realiza mediante la ecuación 3.11 (Ríos, 2015).

$$CE_{ij} = \frac{1}{\sum \left| \left(E_{ij}/E_i\right) - \left(E_J/E_T\right) \right|} \; ecuación \ldots\ldots 3.11$$

Para el análisis de datos se empleó la herramienta *The R Project for Statistical Computing*, con el propósito de estimar las características regionales que explican la maximización de beneficios en el sector manufacturero. El procedimiento inició con la construcción de un modelo que únicamente consideraba variables económicas y sociales; posteriormente, se incorporaron de manera progresiva

aquellas relacionadas con la accesibilidad, con el fin de evaluar el impacto que esta variable genera dentro del análisis exploratorio (Ríos, 2015).

El estudio derivó en nueve modelos con resultados diferenciados: El Modelo 1 incluyó variables como la renta del suelo, nivel educativo, población económicamente activa (PEA), costo de la mano de obra para personal de producción, costo de la mano de obra para personal administrativo, índice de especialización y coeficiente de localización.

Los resultados mostraron que la PEA, el nivel educativo, el costo de la mano de obra para producción, el índice de especialización y el coeficiente de localización actúan como fuerzas centrípetas, mientras que la renta del suelo y el costo de la mano de obra administrativa se comportan como fuerzas centrífugas. En este sentido, el efecto negativo más relevante sobre la localización industrial proviene de los altos costos administrativos y de la renta del suelo (Ríos, 2015).

Esto sugiere que las empresas tienden a instalarse en municipios donde los costos laborales administrativos y de renta son elevados, lo que permite inferir que los inversionistas priorizan el acceso a mano de obra calificada, aun cuando ello implique mayores gastos. Sin embargo, el comportamiento de la renta del suelo resulta ambiguo, dado que se identifican altos costos en municipios periféricos con menor población, alejados de los principales centros urbanos (Ríos, 2015).

El Modelo 2 incorporó la accesibilidad a la demanda interregional, variable que arrojó un signo negativo. Esto indica que las empresas prefieren ubicarse en municipios con menor potencial de accesibilidad hacia otros mercados de la región, ya que un mayor tiempo de viaje reduce dicho potencial, incrementando la probabilidad de instalación manufacturera. No obstante, este aumento en los

tiempos de desplazamiento también implica mayores costos de transporte (Ríos, 2015).

El Modelo 3 consideró el valor inverso de la accesibilidad interregional, mostrando que la relación es inversamente proporcional al tamaño del mercado y directamente proporcional al tiempo de viaje. En otras palabras, a mayor tiempo de desplazamiento, mayores costos de transporte y menor probabilidad de instalación; aunque paradójicamente, el modelo refleja que un mayor tiempo de viaje se asocia con una mayor probabilidad de instalación (Ríos, 2015).

Para validar estos hallazgos, el Modelo 4 planteó un escenario hipotético en el que se reducen los tiempos de viaje entre municipios con alta actividad manufacturera, suponiendo que se encuentran contiguos territorialmente (Ríos, 2015).

El Modelo 5 añadió la variable de accesibilidad a la red carretera federal, asignando un valor de uno a los municipios cuyo centro geográfico se ubica a cinco kilómetros o menos de dicha red, y cero en caso contrario. Los resultados mostraron un signo positivo, lo que indica que la industria tiende a instalarse a más de cinco kilómetros de distancia de la carretera federal (Ríos, 2015).

El Modelo 6 incorporó el egreso estatal y municipal destinado a inversión pública (IPM), variable que también reflejó signo positivo, interpretándose como un incentivo para la instalación manufacturera. El capital público se traduce en mejoras patrimoniales para los municipios, lo que confirma una relación positiva entre inversión en infraestructura y desarrollo económico regional (Ríos, 2015).

El Modelo 7 incluyó la accesibilidad intrarregional hacia las ocho regiones económicas de México, así como hacia puertos marítimos y fronterizos del norte.

Los Modelos 8, 9 y 10 se enfocaron específicamente en la accesibilidad intrarregional hacia los puertos marítimos y hacia los de la frontera norte (Ríos, 2015).

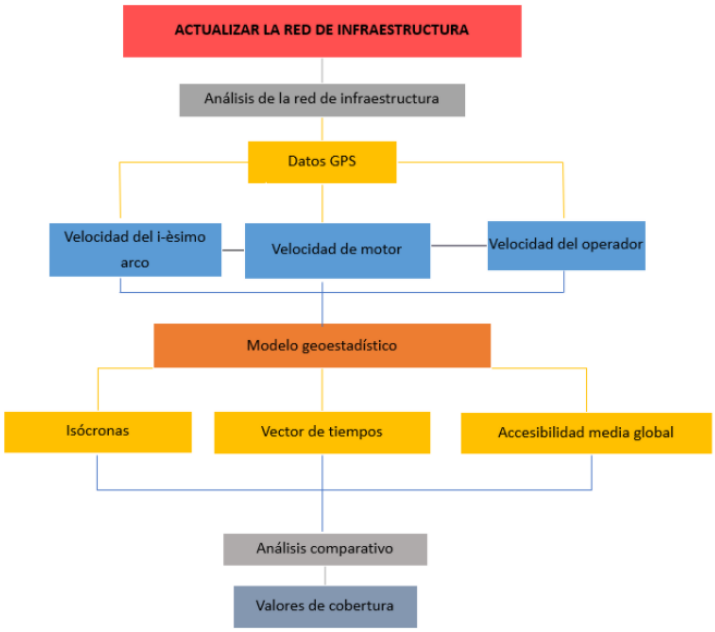
Al considerar los coeficientes estandarizados, la PEA emerge como el principal incentivo para la instalación manufacturera, lo que confirma que las empresas se ubican en municipios con mayor tamaño de mercado. El nivel educativo ocupa el segundo lugar en importancia, corroborando que la presencia de mano de obra calificada incrementa la escala de producción.

En menor medida, pero con alta significancia, el índice de especialización y el coeficiente de localización también actúan como incentivos, ya que la interacción entre empresas, insumos, recursos y trabajadores especializados favorece la instalación manufacturera y eleva los rendimientos (Ríos, 2015).

3.2. Modelo de accesibilidad a partir de variables geográficas

En este tipo de modelos, la accesibilidad se aborda desde la perspectiva de la teoría de redes, entendiéndose como la facilidad de comunicación existente entre los asentamientos humanos o las actividades (Zhu & Liu, 2004). Los enfoques clásicos de accesibilidad consideran variables de atracción entre los nodos que conforman la red y la distancia que los separa (Curl, Nelson & Anable, 2011). En este contexto, tanto las imágenes aéreas como los datos obtenidos mediante dispositivos GPS constituyen herramientas fundamentales para estimar los niveles de accesibilidad.

Figura 3.2. Modelo de accesibilidad territorial



Nota: La figura 3.2 describe la metodología aplicada para actualizar la red de infraestructura, Escobar (2014).

3.2.1. Metodología

El primer paso consistió en la puesta a punto de la red de infraestructuras y en la definición de la escala de análisis regional o urbana, para lo cual se recurrió a la obtención de fotografías aéreas mediante equipos GPS. Posteriormente, se procedió a identificar las características operativas de la red, instalando dispositivos GPS en los distintos modos de transporte vinculados a dicha infraestructura, con el propósito de registrar datos de posicionamiento satelital (Escobar, 2014).

Una vez recopilada la información, se llevó a cabo su procesamiento mediante la aplicación de diversos algoritmos de cálculo. Este procedimiento permitió generar las curvas gradientes de accesibilidad media global, entendidas

como la diferencia entre las curvas isócronas derivadas de la red viaria existente y aquellas obtenidas tras las intervenciones infraestructurales (Escobar, 2014).

De esta manera, se calcularon tres indicadores: la velocidad instantánea del automotor en cada intervalo de lectura de datos a lo largo de los arcos *i*; la velocidad promedio de operación correspondiente al arco i; y la velocidad de operación de cada arco dentro de una ruta determinada en un período de tiempo específico, expresadas en las ecuaciones 3.12, 3.13 y 3.14 respectivamente (Escobar, 2014).

$$v_i = \frac{3.6}{t}\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} ecuación \dots\dots 3.12 \qquad v_i^a = 3.6\frac{l_a}{t_2 - t_1}\ ecuación \dots\dots 3.13$$

$$\overline{v_a} = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^a}{n}\ ecuación \dots\dots 3.14$$

Donde:

v_i = velocidad en km/h

x_1, y_1 = coordenadas del punto 1 en metros

x_2, y_2 = coordenadas del punto 2 en metros

t = intervalo de tiempo en segundos entre dato y dato

v_{ai} = velocidad i en el arco a (km/h)

l_a = longitud del arco a en metros

t_1 = hora de paso en el nodo inicial

t_2 = hora de paso en el nodo final

v_a = velocidad promedio de operación del arco a

n = número de datos de velocidad registrados en el arco a, para un período de tiempo

El siguiente procedimiento consiste en estimar la accesibilidad media global también denominada accesibilidad integral a través del uso de isócronas. Estas se definen como el espacio virtual conformado por las posiciones que un objeto puede alcanzar en un tiempo (Ti), partiendo desde un punto (i) en un esquema radial, correspondiente a la red vial de la zona analizada.

La accesibilidad media global se evalúa a partir del tiempo promedio de viaje ((Tvi)), el cual mide la duración media de los desplazamientos desde el nodo (i) hacia el resto de los nodos de la red. Para su cálculo, se emplea un algoritmo de SIG que determina el menor tiempo de viaje entre un nodo específico y los demás, generando una matriz unimodal de tiempos de desplazamiento.

A partir de esta matriz se obtiene el vector de tiempos medios de viaje, calculado mediante la aplicación de la ecuación 3.15 (Escobar, 2014).

$$\overline{T_{vi}} = \frac{\sum_{j=1}^{m} t_{vi}}{(n-1)} \;\; i = 1,2,3,\dots.,n\,; j = 1,2,3,\dots,m \; ecuación \dots\dots 3.15$$

Donde:

T_{vi} = Tiempo de viaje mínimo promedio entre el nodo i y los demás nodos de la red

t_{vi} = Tiempo de viaje mínimo entre el nodo i y los demás nodos de la red

n = Número de nodos de la red

El vector de tiempos medios de viaje obtenido se vincula con las coordenadas geográficas (latitud y longitud), lo que permite aplicar un modelo geoestadístico para predecir los tiempos medios de desplazamiento en toda el área de estudio. Para calcular la accesibilidad media integral es necesario definir con precisión el nodo o

los nodos desde los cuales se realizará el análisis, generando así el vector correspondiente de tiempos medios de viaje (Escobar, 2014).

La diferencia entre ambos enfoques radica en que la accesibilidad media global ofrece una visión general de la configuración de los tiempos de viaje en un área sin necesidad de asociarlos a puntos geográficos específicos, mientras que la accesibilidad media integral sí establece dicha relación con nodos concretos (Escobar, 2014).

El análisis de accesibilidad media global permite identificar los efectos generales de las modificaciones en la red de infraestructuras, mientras que el análisis de accesibilidad media integral revela el impacto de dichas modificaciones en puntos específicos de la red, como los nodos vinculados a actividades educativas (Escobar, 2014).

El tercer paso consiste en comparar los niveles de accesibilidad y calcular las coberturas. A partir de las curvas isócronas de accesibilidad media global o integral es posible cruzar esta información con datos sociodemográficos o socioeconómicos, con el fin de estimar los valores de cobertura asociados a un tiempo medio de viaje y su relación con variables como población, número de viviendas o superficie (Escobar, 2014).

Asimismo, se pueden comparar las curvas isócronas obtenidas antes y después de la implementación de una infraestructura, con el objetivo de identificar las zonas que presentan impactos positivos o negativos. Dichos impactos pueden medirse en términos de ahorro en tiempo medio de viaje o en costos (Escobar, 2014).

El estudio de caso se desarrolló en Caldas, Bogotá, territorio con una superficie de 1.583 km², que concentra el 54.8% de la población departamental y presenta una densidad de 338 hab./km². La zona incluye los municipios de Manizales, Chinchiná, Villamaría, Neira y Palestina, siendo considerada la región más dinámica (Gobernación de Caldas, 2009).

Para el análisis se definió un área de 3.848 km², organizada en una distribución radial de 35 km con centro en el casco urbano de Palestina, donde se construye actualmente el Aeropuerto del Café (Escobar, 2014). La red vial de la Región Centro-Sur de Caldas, compuesta por 575 arcos y 446 nodos, alcanza una longitud total de 1.250 km, de los cuales más del 56% corresponden a vías primarias y secundarias.

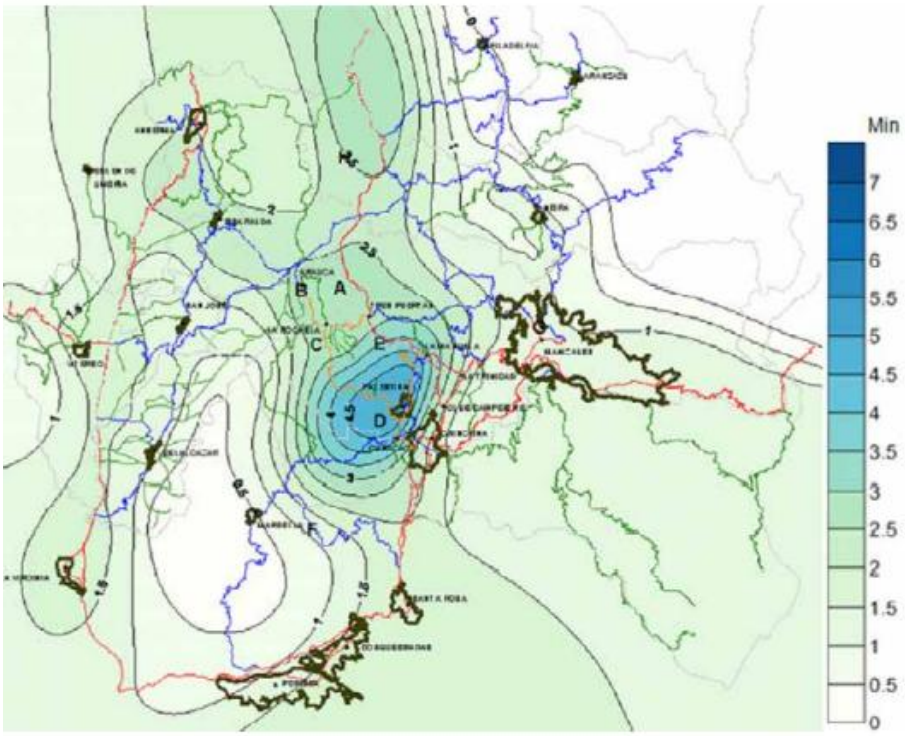
De manera similar, más del 57% de la red presenta velocidades de operación inferiores a 30 km/h, aunque la totalidad de las vías primarias superan dicho umbral (Escobar, 2014). La velocidad promedio de la red se estimó en aproximadamente 26 km/h. Las isócronas representan las áreas alcanzables en un tiempo medio de viaje desde cualquier nodo de la red, dependiendo de las características físicas y operativas de las vías (Escobar, 2014).

En la situación sin intervención, la curva isócrona mínima fue de 80 minutos y la máxima de 180 minutos. Al comparar las coberturas de las curvas isócronas antes y después de la intervención, se observó que los porcentajes de población cubierta apenas se modifican: para tiempos menores o iguales a 95 minutos, el porcentaje se mantiene constante; en el rango de 100 a 120 minutos, la cobertura aumenta alrededor de 1%; y para tiempos superiores a 120 minutos, disminuye en 1%.

Estos resultados permiten concluir que las futuras intervenciones en infraestructura no generarán un impacto significativo en términos de población cubierta por determinados tiempos de viaje (Escobar, 2014).Sin embargo, es posible calcular las curvas gradientes de accesibilidad media global, que representan la diferencia entre las curvas isócronas obtenidas con la red actual y las derivadas de las intervenciones.

Dichas curvas muestran las zonas que registran una ganancia relativa en tiempo de viaje, evidenciando reducciones de entre 2.5 y 5 minutos en el tiempo medio de desplazamiento (Escobar, 2014).

Figura 3.3. Curvas Isócronas



Nota: La figura 3.3 muestra las curvas isócronas de accesibilidad media global para el gradiente de tiempo medio de viaje entre el escenario actual y futuro, Escobar (2014).

En el análisis de cobertura de nodos de actividad se aplicó una metodología de accesibilidad con el propósito de identificar la relación entre las características operativas de la red de transporte de la ciudad de Manizales y la localización geoespacial de los centros educativos (Escobar, 2014).

La investigación se sustentó en la recopilación de información primaria durante más de un año, mediante equipos GPS que generaron más de 18 millones de registros. A partir de estos datos se calcularon los tiempos de desplazamiento necesarios para acceder a los nodos de actividad, así como las coberturas espaciales en términos de población y superficie (Escobar, 2014).

El estudio permitió determinar los sectores de la ciudad que presentan deficiencias en la cobertura de dichos nodos, así como los centros educativos cuya relación con los sistemas de transporte resulta insuficiente. En total, Manizales cuenta con 165 nodos de actividad educativa: tres de carácter nacional, uno regional y 161 de ámbito local. Todos ellos fueron georreferenciados en el SIG, lo que posibilitó la estimación de la accesibilidad media integral desde su ubicación (Escobar, 2014).

El análisis de cobertura considerando variables como área, población y número de viviendas permitió establecer conclusiones sobre la concentración de la actividad educativa en relación con las condiciones operativas de la red vial. Los resultados muestran que el 55% del área urbana, el 72% de la población y el 72%

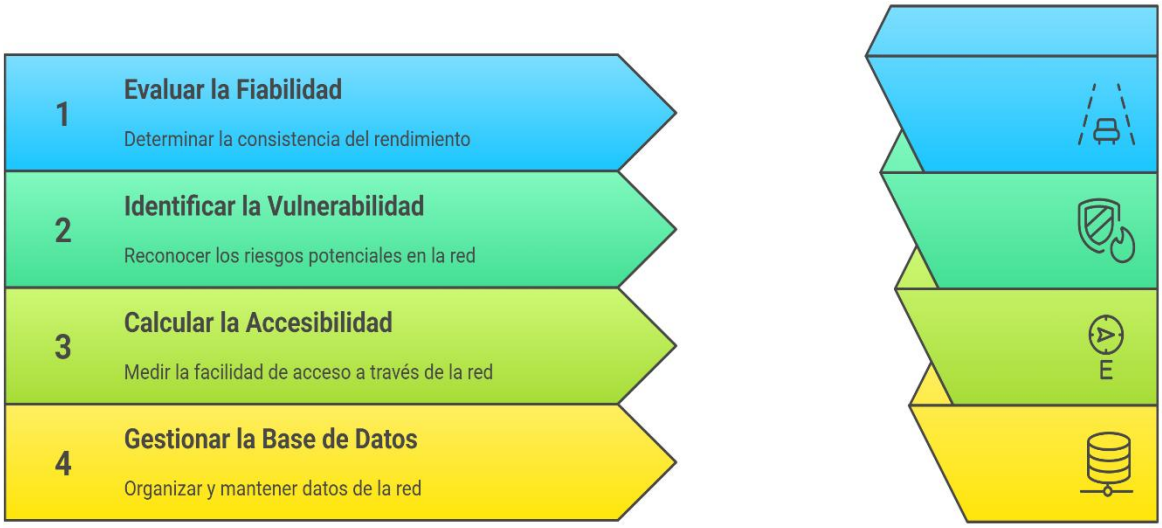
de las viviendas de la ciudad pueden acceder a un nodo educativo invirtiendo un tiempo medio de viaje de hasta cinco minutos (Escobar, 2014).

3.3 Modelo de accesibilidad a partir de redes viales

El primer modelo se orienta al análisis de las redes de carreteras urbanas congestionadas y a la probabilidad de que dichas redes alcancen un nivel de desempeño esperado. En el ámbito estratégico, tanto regional como nacional, los aspectos centrales a considerar son la accesibilidad, la cobertura territorial y la conectividad interurbana.

En el caso de redes dispersas, la vulnerabilidad adquiere mayor relevancia que la confiabilidad, debido a las posibles consecuencias negativas derivadas de su deterioro (Taylor, 2015). La metodología se estructura conforme a los estudios e indicadores presentados en la figura 3.4.

Figura 3.4. Análisis de la Red



Nota: La figura 3.4 muestra el proceso metodológico para determinar la accesibilidad de la red vial, Taylor (2015).

3.3.1 Metodología

El primer paso consiste en evaluar la fiabilidad de la red de transporte, considerando las carreteras urbanas congestionadas y la probabilidad de que la red cumpla con un estándar de rendimiento esperado. Aunque los estudios urbanos son relevantes, no constituyen la única área de interés, especialmente al analizar las implicaciones más amplias del desempeño de los sistemas de transporte (Taylor, 2015).

La fiabilidad se entiende como la probabilidad de que un par de nodos permanezca conectado, es decir, que exista una ruta activa entre ellos aun cuando uno o más enlaces de la red se vean interrumpidos. Berdica (1997) desarrollaron un procedimiento analítico para evaluar la confiabilidad de la conectividad en redes urbanas sujetas a congestión, donde la infraestructura permanece físicamente intacta, pero el rendimiento de ciertos enlaces puede deteriorarse al grado de limitar su uso (Taylor, 2015).

De este análisis surgen dos formas adicionales de confiabilidad: la del tiempo de viaje y la de la capacidad. La primera se refiere a la probabilidad de que un trayecto entre un par origen-destino se complete dentro de un intervalo de tiempo determinado (Bell e Iida, 1997). Esta medida puede verse afectada por la variabilidad de los flujos de tráfico y por el conocimiento imperfecto de los conductores al elegir rutas (Lam y Xu, 2000).

Una forma de cuantificar dicha variabilidad es el coeficiente de variación de la distribución de los tiempos de viaje (Richardson y Taylor, 1978). Estas métricas permiten evaluar la calidad del servicio ofrecido a los usuarios en condiciones

cotidianas de congestión (Yang, Lo y Tang, 2000). La confiabilidad de la capacidad, por su parte, se define como la probabilidad de que una red pueda absorber un nivel específico de demanda de viajes, incluso en situaciones de degradación provocadas por incidentes o trabajos viales (Taylor, 2015).

Chen, Lo, Yang y Tang (1999) la conceptualizan como la probabilidad de que la capacidad de reserva de la red sea suficiente para cubrir la demanda requerida ante una pérdida de capacidad. Yang, Lo y Tang (2000) sostienen que la combinación de ambas medidas tiempo de viaje y capacidad constituye una herramienta valiosa para el diseño y evaluación de redes de transporte. Taylor (2000) demostró su utilidad en la planificación de esquemas de gestión del tráfico urbano.

El segundo paso se centra en el nivel estratégico regional y nacional, donde la accesibilidad, la cobertura territorial y la conectividad interurbana son los aspectos principales. En redes dispersas, la vulnerabilidad resulta más relevante que la confiabilidad, debido a las graves consecuencias que puede generar la degradación de la red (Taylor, 2015). En comunidades rurales y remotas, las largas distancias y la ausencia de servicios alternativos incrementan los costos de interrupción para hogares, empresas y comunidades.

El concepto de vulnerabilidad se relaciona con las consecuencias de la falla de un enlace, independientemente de su probabilidad de ocurrencia. Aunque algunas fallas puedan ser poco probables, sus impactos sociales y económicos pueden ser tan significativos que justifican acciones correctivas, comparables a la contratación de un seguro frente a eventos improbables, pero potencialmente

catastróficos (Taylor, 2015). En este sentido, la confiabilidad se enfoca en la probabilidad de conexión, mientras que la vulnerabilidad se asocia con la fragilidad de la red y las consecuencias de su falla.

Berdica (2002) propone que el análisis de vulnerabilidad debe considerarse como un marco general para evaluar el desempeño de los sistemas de transporte frente a distintos tipos e intensidades de perturbaciones. De su estudio surgen tres preguntas clave:

1. ¿En qué medida afectan las interrupciones de enlaces críticos al rendimiento del sistema?

2. ¿Cómo impactan las reducciones de capacidad y los cambios en la gestión del tráfico en una subregión de la red?

3. ¿Qué efectos generan las variaciones en la demanda de viajes?

Estas cuestiones constituyen el punto de partida para metodologías de análisis de vulnerabilidad, orientadas a identificar los componentes críticos de las redes (Taylor, 2015). El estudio de vulnerabilidad amplía el marco de evaluación de riesgos al considerar áreas de alta consecuencia y baja probabilidad de ocurrencia, reconociendo que la estimación de probabilidades y consecuencias es imprecisa en muchos incidentes, pero que la sociedad puede considerar ciertos impactos como inaceptables (Evans, 1994).

Además, este enfoque permite identificar debilidades estructurales en la topología de la red y destinar recursos a su mitigación, promoviendo una gestión proactiva de los riesgos (Taylor, 2015). El tercer paso corresponde a la medición de

la accesibilidad mediante índices, entre ellos el Índice de Accesibilidad Integral de Hansen, que define la accesibilidad de una ciudad en función de su atractivo y del número de oportunidades disponibles.

La función de impedancia representa la separación entre ciudades y establece que, a mayor costo de viaje, menor accesibilidad entre ellas. Con este enfoque es posible calcular índices específicos de accesibilidad, utilizando el Índice de Hansen para evaluar los cambios en la accesibilidad, expresados en la ecuación 3.16 (Taylor, 2015).

$$A_i = \sum_j B_j f(c_{ij}) \ \ ecuación \dots\dots 3.16$$

Donde:

Bj = Atractivo de la ubicación (ciudad) j, por ejemplo, el número de oportunidades disponibles en j.

De igual manera, la función de impedancia expresa la separación existente entre dos ciudades y se define como $f(c_{ij})$, indicando que, a mayor costo de desplazamiento entre ellas, menor será el nivel de accesibilidad. La definición utilizada corresponde al enfoque convencional, es decir, el recíproco de la distancia de viaje dentro de la red, representado en la ecuación (3.17) (Taylor, 2015).

$$f(c_{ij}) = \frac{1}{x_{ij}} \ ecuación \dots\dots 3.17$$

El índice ARIA se define como una medida de lejanía basada en las distancias por carretera entre localidades pobladas y centros de servicio. Dichas distancias se emplean para asignar una puntuación de lejanía a cualquier ubicación. ARIA constituye un índice continuo cuyos valores oscilan entre 0 (alta accesibilidad) y 15

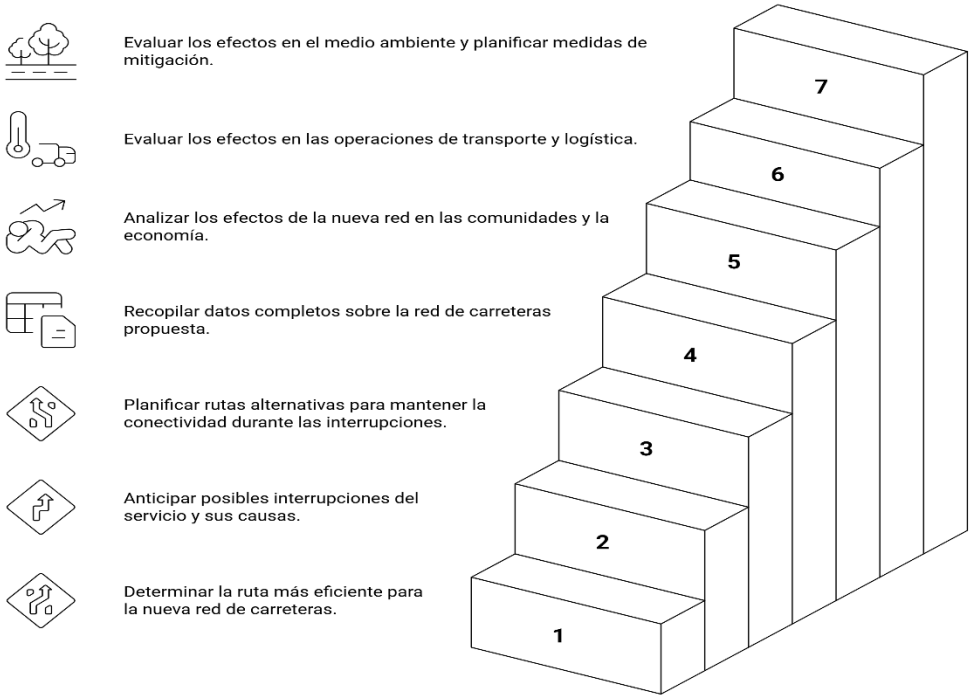
(alta lejanía), fundamentado en las mediciones de la red vial desde los asentamientos poblados hacia los centros de servicio más próximos, clasificados en cinco categorías según el tamaño poblacional (Taylor, 2015).

El último paso del análisis consiste en la construcción de una base de datos con los tramos identificados como críticos en las zonas más vulnerables de la red, definidos por presentar niveles reducidos de accesibilidad global entre las ciudades. Estos segmentos generan una disminución de al menos un cinco por ciento en la accesibilidad general (Taylor, 2015).

En el escenario más desfavorable, el cierre de un tramo provoca una reducción aproximada del 25% en la accesibilidad total, convirtiéndose en la sección más crítica de la red. Una ventaja adicional del índice de accesibilidad de Hansen es que permite identificar los efectos de los cierres de enlaces en ciudades específicas (Taylor, 2015).

El segundo modelo de accesibilidad, que reconoce a las redes viales como el elemento central para su medición, incorpora tanto las características del diseño espacial urbano como las transformaciones en los antecedentes sociales. Este método se desarrolla en una serie de pasos detallados en la figura 3.10 (Mendoza, 2021).

Figura 3.9. Metodología para cuantificar la red vial



Nota: La figura 3.10 muestra el proceso metodológico para cuantificar la accesibilidad de la red vial Mendoza, (2021).

Con lo descrito en la figura 3.10 se van a exponer las ecuaciones para los pasos 5, 6 Y 7. En su caso para las Consecuencia Socioeconómicas establecen el Modelo Numérico para el Cálculo de las Pérdidas ocasionadas por el aumento de tiempo de traslado con la ecuación 3.18:

$$T = f(d, i, j, v, u, N; IIR, Tt)\ ecuación \dots\dots 3.18$$

Donde:

T (s) = Tiempo total transcurrido para llegar del punto “A” a “B”

d (km/veh) = Distancia total recorrida por vehículo

$i =$ Indicador de la ruta alterna en estudio

j = Tipo de vehículo (Clasificación SCT)

v (km/hr) = Velocidad promedio por tipo de vehículo

u (pers/veh/día) = Usuarios promedio por tipo de vehículo por día*

N (veh/día) = Número de vehículos tipo aforados por día

IIR (m/km) = Índice de rugosidad del terreno (2 < IIR < 12)

$Tt =$ Tipo de terreno en el tramo observado (Plano, Lomerío o montañoso)

Tiempo total acumulado por los usuarios en su recorrido por una ruta cualquiera “n”, ecuación 3.19:

$$T_{(n,j)} = d_n \sum \frac{u_j N_j}{v_j} \; ; \; v_j = f(IIR_n, T_{tn}) \; ecuación \ldots\ldots 3.19$$

Tiempo total acumulado empleado por los usuarios en su recorrido típico por la ruta principal, ecuación 3.20:

$$T_{RP} = T_{(RP,j)} \; ecuación \ldots\ldots 3.20$$

Tiempo total acumulado empleado por los usuarios en su recorrido por la ruta alterna “i”, ecuación 3.21:

$$T_i = T_{(i,j)} \; ecuación \ldots\ldots 3.21$$

Diferencia de tiempo entre la ruta principal y la ruta alterna, ecuación 3.22:

$$\Delta_{Ti} = T_i - T_{RP} \; ; \quad \Delta_{t\%} = \frac{T_i}{T_{RP}} * 100\% \; ecuación \ldots\ldots 3.22$$

Donde:

Δ_{Ti} (s) = Diferencia de tiempo entre usar la ruta principal y la ruta alterna “i”

T_i (s) = Tiempo total acumulado utilizando la ruta alterna “i”

T_{RP} (s) = Tiempo total acumulado utilizando la ruta principal

$\Delta_{t\%}$ (%) = Diferencia de tiempo en porcentaje

Consecuencias por el aumento del tiempo generado al utilizar la ruta alterna “i” , ecuación 3.23:

$$C_{TT} = \frac{\Delta_{Ti} * SHP}{24 * 360} \quad ecuación \dots\dots 3.23$$

Donde:

C_{TT} ($/seg) = Pérdidas ocasionadas por el aumento del tiempo de traslado por la ruta alterna “i”

SHP ($/hr) = Valor del tiempo por motivo de trabajo de la región (Torres, Hernández, & González, 2016)

Modelo numérico para el cálculo de las pérdidas ocasionadas por la baja productividad de los afectados bajo el supuesto de que los afectados viajan diariamente durante el periodo de mantenimiento de la ruta principal por motivos laborales o de trabajo, este efecto se puede traducir de manera general en una productividad menor por parte del personal, ecuación 3.24:

$$I_p = \left(1 - D_p\right) \ ; \ I_p = f(T_I - T_{RP}) \ ecuación \dots\dots 3.24$$

Donde:

D_p (%) = Déficit de productividad

I_p (%) = Índice de productividad

Las ecuaciones que corresponden al paso 6 para el Modelo numérico para el cálculo del incremento en los costos operacionales. Dada una ruta cualquiera “n”, los costos operacionales generados por tipo de vehículo “j” al utilizar la ruta en cuestión, ecuación 3.25:

$$C_{op(n,j)} = d_n * \sum COV_j * N_j \ ecuación \dots\dots 3.25$$

Donde:

$C_{op(n,j)}$ ($/seg) = Pérdidas operacionales totales por tipo de vehículo “j” al utilizar una ruta cualquiera “n”

Costo total acumulado tendrá que multiplicarse también por el número de vehículos tipo “j” observados, ecuación 3.26:

$$COV_j = F(IIR_N, T_{tn}) \ ecuación \dots\dots 3.26$$

Donde:

COV_j ($/km/veh) = Costo operacional por kilómetro por tipo de vehículo “j”

Costo operacional generado por la ruta alterna “i”, ecuación 3.27:

$$C_{opj} = C_{opjA} + \cdots + C_{opjOTROS} \ ecuación \dots\dots 3.27$$

Costo operacional generado por la ruta principal, ecuación 3.28:

$$C_{op\ RP} = C_{op\ RP\ A} + \cdots + C_{op\ \ RP\ \ OTROS} \ ecuación \dots\dots 3.28$$

Costo generado al utilizar la ruta alterna “i” en lugar de utilizar la ruta principal, ecuación 3.29: $C_{op} = C_{opI} + \cdots + C_{opRP} \ ecuación \dots\dots 3.29$

Donde:

Cop ($/seg) = Pérdidas operacionales totales

$CopI$ ($/seg) = Pérdidas operacionales al utilizar la ruta alterna “i” en lugar de la principal

$CopRP$ ($/seg) Pérdidas operacionales al utilizar la ruta principal

El paso 7 corresponde a las Consecuencias al Medio Ambiente con el modelo numérico para el cálculo de las emisiones de CO_2 generadas, con el costo

equivalente de emisiones de CO_2 generadas por los vehículos durante su recorrido por una ruta cualquiera “n”, ecuación 3.30:

$$C_{ma(n,j)} = \frac{C_{CO2}\, d_n}{10^6} * \sum (N_j\, E_j) \;\; ecuación \dots\dots 3.30$$

Donde:

$C_{ma(n,j)}$ ($/seg) = Costo equivalente de las emisiones de CO_2 por la ruta “n”

E_j (g/km) = Emisiones promedio de CO_2 por tipo de vehículo “j”

C_{CO2} ($/ton) = Costo de mercado por dejar de producir o limpiar una tonelada de CO_2

Afectaciones al medio ambiente esperadas por el recorrido diario de los vehículos por la ruta principal, ecuación 3.31: $C_{ma\,RP} = C_{ma\,(RP,j)} \;\; ecuación \dots\dots 3.31$

Costo equivalente de las emisiones de CO_2 al ambiente generadas por los vehículos en su recorrido por la ruta alterna “i”, ecuación 3.32: $C_{mai} = C_{ma\,(i,j)} \;\; ecuación \dots\dots 3.32$

Cuantificación para el aumento de CO2 al ambiente, ecuación 3.33:

$$C_{ma} = C_{mai} - C_{ma\,RP} \;\; ecuación \dots\dots 3.33$$

Donde:

C_{ma} ($/seg) = Costo equivalente de las emisiones de CO_2 al utilizar la ruta alterna “i”

C_{mai} ($/seg) = Costo de las emisiones de CO_2 expedidas en la ruta alterna “i”

C_{maRP} ($/seg) = Costo de las emisiones de CO_2 expedidas en la ruta principal

“Las iniciativas y prácticas sostenibles implementadas en el marco de las ciudades inteligentes poseen la capacidad de fomentar la inclusión social”(Mehta, 2023).



4 METODOLOGIA

CAPITULO 4

METODOLOGIA

ESTRATEGIA INTEGRAL PARA LA INFERENCIA DE ACCESIBILIDAD URBANA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE DATOS DE MOVILIDAD EN CIUDADES INTELIGENTES

El capítulo tiene como objetivo desarrollar una metodología integral para inferir y optimizar la accesibilidad urbana a través del análisis de datos de movilidad vehicular complementados con observaciones terrestres. La propuesta metodológica se establece bajo el supuesto que el servicio de la red se ve interrumpida por diversas causas, una vez que se interrumpe el servicio genera una afectación importante en los tiempos de traslado, el costo de los mismo y en la salud de la población ante esto, el objetivo es describir el fenómeno y generar un modelo que calcule la falta de accesibilidad.

4.1 Propuesta Metodológica

La metodología forma parte de una investigación de carácter aplicativo, también denominada investigación aplicada tecnológica, práctica o empírica, como se muestra en la figura 4.1. Su rasgo distintivo es la utilización del conocimiento científico con el fin de resolver problemas prácticos, empíricos y tecnológicos, contribuyendo al progreso y beneficio de los sectores productivos de bienes y servicios de la sociedad (Razo, 2011).

Desde un enfoque cuantitativo, se establece la relación entre las concepciones de accesibilidad y las variables que inciden en este fenómeno, considerando las características de la población, fenómenos, organismos, materiales, eventos, hechos y sistemas, los cuales pueden medirse mediante puntuaciones numéricas y análisis estadísticos, con un margen determinado de error y confianza (Sampieri, 2014).

Bajo una perspectiva dialéctica, la accesibilidad se concibe como una cualidad del territorio dentro de un sistema complejo, en el que los sistemas y subsistemas se interconectan y entrelazan, constituyendo un potencial territorial que refleja la relación entre territorio y sociedad (Sampieri, 2014).

La investigación se focaliza en la definición de accesibilidad vial, entendida como la facilidad con la que las personas pueden alcanzar destinos clave dentro de un área geográfica determinada, considerando factores como tiempo, costo y condiciones ambientales. En este sentido, la capacidad y disponibilidad de las infraestructuras de transporte son elementos esenciales para determinar los niveles de accesibilidad.

Asimismo, se incorpora el enfoque tecnológico de las *Smart Cities* (Ciudades Inteligentes), concebidas como un modelo de desarrollo urbano que integra soluciones digitales y tecnológicas para mejorar la calidad de vida de los habitantes, optimizar el uso de recursos y promover la sostenibilidad (Caragliu & Del Bo, 2020).

Estas soluciones abarcan ámbitos como energía, transporte, seguridad, medio ambiente y servicios públicos, y se sustentan en la colaboración entre ciudadanos, empresas y gobiernos para generar impactos positivos en la sociedad (Rodríguez, 2023). Este planteamiento se complementa con el concepto de Ciudades de 15 minutos propuesto por Moreno (2021), que describe una configuración urbana en la cual los residentes pueden acceder a sus necesidades básicas en un máximo de 15 minutos caminando o en bicicleta.

El objetivo es acercar actividades y destinos a los usuarios, promoviendo ciudades más saludables, habitables, equitativas, sostenibles y resilientes. Para ello, se establecen cuatro principios de planificación: proximidad, diversidad (en usos del suelo y población), densidad y ubicuidad (Allam, 2022). En cuanto a los instrumentos de investigación, se emplearán tanto técnicas documentales como de campo, en función de las variables consideradas para evaluar la accesibilidad.

El modelo se aplicará en el tramo comprendido entre el centro del municipio de Atlacomulco y el centro de la ciudad de Toluca, tomando como eje de conexión la autopista Toluca–Atlacomulco. El análisis incluirá aspectos como ubicación, distancia, infraestructura vial, traslados, costos de combustible, condiciones

climáticas (temperatura, humedad, visibilidad, velocidad del viento), contaminación, tiempo, velocidad y precio de la gasolina.

La metodología se denomina Estrategia Integral para la Inferencia de Accesibilidad Urbana mediante el Análisis de Datos de Movilidad en Ciudades Inteligentes, y se desarrolla a través de varios pasos secuenciales:

1. Recolección y Preprocesamiento de Datos: Recopilar datos de series de tiempo para velocidades promedio de vehículos y distancias en diferentes ubicaciones de la ciudad. Limpiar los datos eliminando valores atípicos y errores, e interpolar valores faltantes.
2. Análisis Exploratorio de Datos (EDA): Realizar resúmenes estadísticos para entender la distribución, tendencia central y dispersión de velocidades y distancias. Graficar los datos para visualizar tendencias, patrones y anomalías, utilizando gráficos de línea para series de tiempo, histogramas para distribuciones y gráficos de dispersión para relaciones entre velocidad y distancia. Categorizar los datos basándose en el sistema de semáforos mostrado en la imagen, que podría reflejar condiciones de tráfico que impactan la accesibilidad.
3. Análisis de Correlación: Determinar la correlación entre las velocidades de vehículos y las distancias recorridas para identificar relaciones que podrían impactar la accesibilidad. Explorar correlaciones entre la hora del día, día de la semana y los valores de velocidad categórica para identificar patrones de accesibilidad en horas pico y no pico.

4. Análisis de sensibilidad: Es una técnica que permite evaluar cómo cambian los resultados de un modelo o proyecto cuando varían sus variables principales. El análisis de sensibilidad permite identificar qué variables son más importantes, medir qué tan robustos son tus resultados, evaluar riesgos, tomar mejores decisiones basadas en datos y priorizar dónde poner más atención o recursos.
5. Análisis Temporal: Analizar cómo cambia la información y las categorizaciones de tráfico con el tiempo para identificar tendencias emergentes o patrones estacionales.

Figura 4.10. Esquema representativo de la propuesta metodológica



Nota: La figura 4.1 representa el esquema de desarrollo de la propuesta metodológica de la investigación. Elaboración propia (2024).

Ante la necesidad de dar respuesta a la problemática de la accesibilidad, a través de la toma de datos mediante la programación en Python y para dar certeza, calidad a la generación de los datos obtenidos, se considera dar cumplimiento a las

normas relativas a metadatos, por ello se consideró a la norma ISO 19115-1:2014 Información geográfica- Metadatos, la cual se describe a continuación:

4.1.1 Norma internacional ISO 19115-1:2014 sobre metadatos de datos geoespaciales

Los metadatos se definen como “datos acerca de los datos” y tienen la función de describir su contenido, calidad, estado y demás características. Constituyen una herramienta esencial para localizar y comprender la información espacial disponible (ISO, 2014).

En este sentido, los metadatos espaciales especifican las fuentes documentales empleadas en la producción, los atributos de los datos, la fecha de publicación, el sistema de referencia y la periodicidad de su actualización (ISO, 2014). La generación de metadatos geográficos responde a tres objetivos fundamentales:

1. Organización y preservación de la inversión en datos realizada por una institución. Los metadatos buscan garantizar la reutilización de la información sin necesidad de recurrir al equipo que la produjo originalmente. Aunque su elaboración pueda parecer un costo adicional, el valor de los datos depende en gran medida de su adecuada documentación (ISO, 2014).

2. Difusión de la existencia de información geográfica mediante sistemas de catálogo. A través de la publicación en catálogos, las organizaciones pueden identificar datos útiles, establecer vínculos con otras entidades para compartir información y coordinar esfuerzos de mantenimiento, además de facilitar el acceso a potenciales usuarios (ISO, 2014).

3. Facilitar la transferencia y el uso de los datos: Los metadatos deben acompañar siempre a la información que describen, ya que permiten un acceso más eficiente, mejor adquisición y utilización, favoreciendo la interoperabilidad cuando provienen de distintas fuentes. Asimismo, apoyan a los usuarios y organizaciones receptoras en el procesamiento, interpretación y almacenamiento de los datos dentro de sus repositorios internos (ISO, 2014).

En consecuencia, los metadatos deben responder a las siguientes interrogantes:

Tabla 4.1. Preguntas sobre los metadatos

¿Qué describe el conjunto de datos?	¿Cuál es el título? ¿Qué área geográfica recubre? ¿A qué periodo de tiempo corresponden? ¿Cada cuanto se actualizan los datos? ¿Cómo se representan las entidades? ¿Qué modelo de datos utiliza? ¿En qué sistema de referencia se ha basado? ¿Cómo se describen las entidades geográficas en el conjunto de datos?
¿Quién ha producido el conjunto de datos?	¿Quién creó el conjunto de datos? ¿A quién se pueden dirigir las preguntas sobre el conjunto de datos?
¿Qué finalidad tienen los datos?	¿Qué problemas cree que aún hay en el conjunto de datos? ¿Qué se podría decir sobre la exactitud de las observaciones?
¿Cómo se creó el conjunto de datos?	¿Cuáles con los trabajos previstos a partir de los que se originan los datos? ¿Cómo se modificaron las fuentes documentales? ¿Existen datos similares o relacionados con este conjunto de datos?
¿Por qué se creó este conjunto de datos?	¿Qué objetivos se cumplieron al presentar los datos? ¿Cómo recomendaría que se utilizaran estos datos?
¿Cómo sería posible obtener una copia del conjunto de datos?	¿Quién distribuye los datos? ¿Cómo pueden los usuarios encargar o conseguir los datos? ¿En qué formato(s) están disponibles los datos? ¿Están disponibles en Internet? ¿Qué precio tienen los datos? ¿Qué software / hardware es necesario para utilizar el conjunto de datos? ¿Los datos, estarán disponibles tan solo durante un período limitado?
¿Quién escribió los metadatos?	¿Qué lenguaje se ha utilizado para describir el conjunto de datos? ¿Cuándo se modificaron los metadatos por última vez? ¿Existe alguna restricción legal respecto a quien puede ver o utilizar los metadatos?

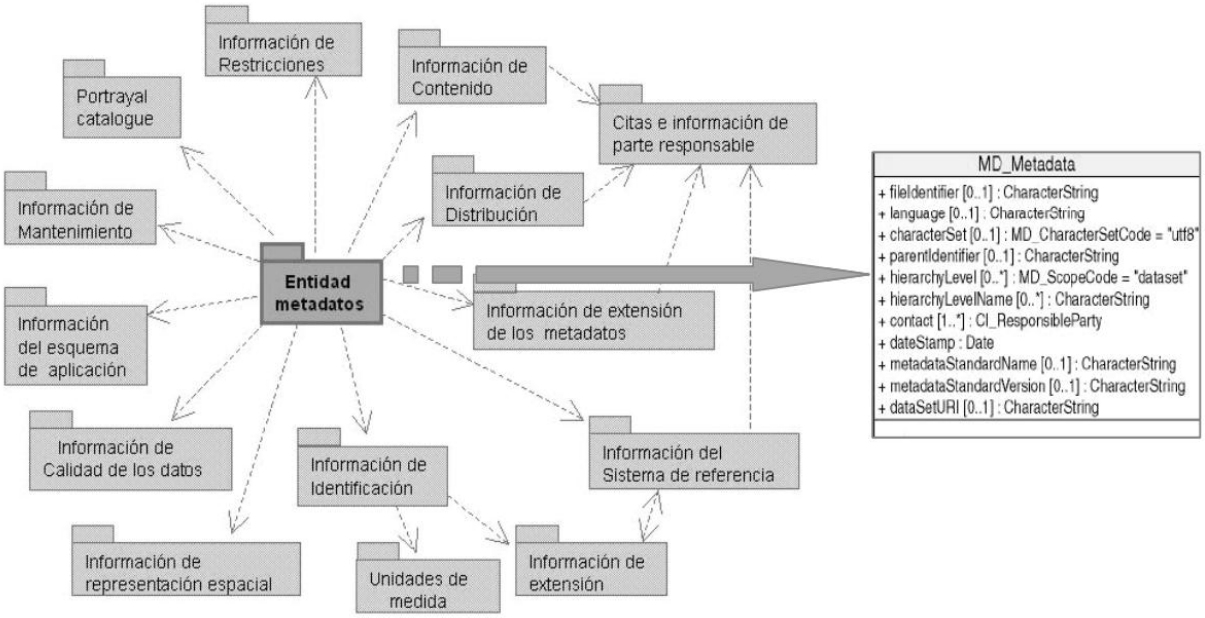
Nota: La tabla 4.1 expone las preguntas a resolver respecto a las condiciones que los metadatos cumplen en la investigación, ISO (2014).

La norma 19115 establece el esquema requerido para la descripción de la información geográfica. Incluye aspectos como la identificación de los datos, el área geográfica cubierta, la calidad, el sistema de referencia, la fecha de publicación, entre otros. Su aplicación se orienta a la catalogación de conjuntos de datos, actividades de almacenamiento y a la descripción integral de dichos conjuntos (ISO, 2014).

Asimismo, la norma define las secciones, entidades y elementos de metadatos obligatorios y condicionales. Determina el conjunto mínimo de metadatos necesarios para cumplir funciones básicas como búsqueda y localización de datos, evaluación de su pertinencia, acceso, transferencia y uso, además de elementos opcionales que permiten una documentación más detallada cuando se considere pertinente. También contempla un método de extensión de metadatos para atender necesidades específicas (ISO, 2014).

En cuanto a los datos geográficos, los metadatos se estructuran mediante paquetes UML. Cada paquete contiene una o más entidades (clases UML), que pueden estar especializadas (*subclassed*) o generalizadas (*superclassed*). Dichas entidades incluyen elementos (atributos de clase UML) que representan unidades o ítems discretos de metadatos. Dentro de cada paquete, una entidad puede vincularse con una o varias entidades adicionales, como se muestra en la figura correspondiente.

Figura 4.11. Relaciones entre paquetes y metadatos en un paquete



Nota: La figura 4.2 presenta paquetes UML, los elementos que forman las entidades pueden ser obligatorios u opcionales, ISO (2014).

Los metadatos se identifican mediante *Diagramas de Modelado UML* (figura 4.2) y un *Diccionario de Datos*, el cual específica para cada elemento la siguiente información:

Nombre (name):Etiqueta asignada a la entidad o al elemento de metadatos.

Nombre corto (short name): Denominación definida para cada elemento con fines de implementación en XML.

Definición (definition):Descripción del elemento o entidad de metadatos.

Obligación/condición (obligation/condition): Indica si la inclusión del elemento es obligatoria, opcional o condicional.

Ocurrencia máxima (maximum occurrence): Número máximo de instancias que puede tener la entidad o el elemento de metadatos.

Tipo de dato (data type): Puede ser cadena de texto, clase, asociación, entre otros. Dominio (domain): Texto libre, enumeraciones o valores específicos (ISO, 2014).

Una de las formas de definir la sintaxis de los documentos XML es a través de la tecnología denominada XML-Schema. Para cada lenguaje derivado de XML se requiere elaborar un documento conforme a esta especificación, conocido como Esquema XML, que describe la estructura de los documentos y permite su validación, asegurando que la organización sea adecuada para un contexto determinado (ISO, 2014).

El propósito de un esquema es establecer los componentes válidos de un documento XML: los elementos que pueden aparecer, sus atributos, elementos hijos, orden y número de ocurrencias, tipos de datos y valores por defecto. La implementación de esquemas XML, basada en reglas derivadas de los modelos UML de la serie 19100, garantiza que los esquemas creados cumplan con las siguientes características:

a) Interoperabilidad.

b) Previsibilidad: Los esquemas se codifican de manera uniforme para cualquier clase, atributo o asociación del mismo tipo UML.

c) Usabilidad: La codificación basada en reglas permite generar XML de forma automática o semiautomática.

d) Extensibilidad: Se contemplan extensiones para entornos web, así como para aspectos culturales y lingüísticos.

e) Polimorfismo: Capacidad de adoptar diferentes formas, facilitando la adaptación cultural y lingüística (ISO, 2014).

4.2 Descripción de la Metodología

4.2.1 Recolección y Preprocesamiento de Datos

La recolección de datos se realizó en diversas plataformas tecnológicas a través de las API key, con el propósito de obtener los datos en tiempo real de las variables ambientales, económicas y de espacio - tiempo. Para esto, se debe considerar la relación de cuatro dimensiones expuestas en la figura 2, las dos esferas longitudinales muestran a las variables económicas y espacio – tiempo; en la primer esfera espacio – tiempo, la ubicación, distancia, velocidad y tiempo los traslados son las variables que definen la accesibilidad de acuerdo con Hansen (1959), Ohnmacht (2009), Wiedener (2015) y Adeel (2016).

La segunda esfera está determinada por la dimensión económica considerando al precio de la gasolina como un factor de determinante en el costo de los traslados y las tarifas de transporte público. El costo de los traslados se considera como el pago por el servicio de transporte, es el indicador más significativo del viajero (León, 2012).

Las dos esferas transversales se consideran consecuencias de la interrupción de la vialidad, la primera es ambiental y otra de salud. Las consecuencias ambientales de la interrupción de la accesibilidad, respecto a la calidad del aire, los vehículos que usan combustibles fósiles contribuyen a la generación de emisiones contaminantes a la atmósfera con posibles efectos adversos sobre la salud de la población (Salud, 2024).

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es una medida establecida por las autoridades de una zona generalmente urbana que refleja la concentración de

contaminantes presentes en la atmósfera (Troposfera.org, 2024). Cuando la calidad del aire es óptima, las personas pueden respirar sin riesgos para su salud; en cambio, cuando es deficiente, pueden presentarse irritaciones oculares, afecciones respiratorias e incluso problemas cardíacos (Troposfera.org, 2024).

Ante niveles dañinos de contaminación, las autoridades pueden implementar medidas como restringir la circulación de vehículos contaminantes, prohibir actividades deportivas al aire libre o recomendar el uso de mascarillas (Troposfera.org, 2024).

La Organización Meteorológica Mundial (2022) señala que la calidad del aire está estrechamente vinculada con el cambio climático. El aumento de la temperatura global intensifica la contaminación atmosférica, incluso bajo escenarios de bajas emisiones, afectando tanto la salud humana como los ecosistemas, dado que los contaminantes se depositan en la superficie terrestre (Change, 2022).

En este marco, la investigación considera la temperatura como un indicador del deterioro de la calidad del aire, asociada a la falta de accesibilidad. La interrupción de las vías de comunicación incrementa la contaminación atmosférica, principalmente por emisiones de metano y la quema de combustibles fósiles, fenómenos que se encuentran estrechamente interrelacionados (Writers, 2022).

La segunda dimensión transversal corresponde a las consecuencias en la salud derivadas del tiempo prolongado en el tráfico. Según datos de *Statista* (2024), el 34% de la población mexicana invierte más de una hora en sus traslados diarios hacia el trabajo. En Toluca, la situación es crítica: los habitantes pasan alrededor de 38 horas al año en tránsito vehicular, posicionando a la ciudad en el

cuarto lugar nacional en niveles de congestión, solo detrás de CDMX, Monterrey y Guadalajara, y en el puesto 143 a nivel mundial (INRIX, 2024).

Los largos tiempos de traslado tienen efectos negativos en la salud. Un estudio de la Gaceta Médica de México (Juárez-Pérez et al., 2021) evidenció que, aunque los patrones auditivos eran normales, se asemejaban a pérdidas auditivas por ruido, asociadas a desplazamientos prolongados. Además, se identificó que los tiempos de traslado son un indicador clave de bienestar, vinculados con estrés, fatiga, debilidad, tos, mala calidad del sueño y deterioro en la percepción de la salud.

En relación con la salud cardiovascular, Saavedra (2020) explica que la materia particulada (PM) está compuesta por partículas de diversas fuentes y tamaños, incluyendo sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro de sodio, carbono negro, polvo mineral y agua. Sus principales fuentes son el tráfico motorizado, las centrales eléctricas y la calefacción industrial y residencial basada en combustibles fósiles.

Estas partículas finas pueden desplazarse más de 100 km, generando altas concentraciones en amplias áreas. La American Heart Association y la European Society of Cardiology reconocen la PM 2.5 como el principal factor de riesgo ambiental para la mortalidad y discapacidad cardiovascular global. Los contaminantes derivados del tráfico, como partículas ultrafinas y hollín, alcanzan niveles máximos en horas pico, exponiendo de manera significativa a los trabajadores que se trasladan diariamente (Saavedra, 2020).

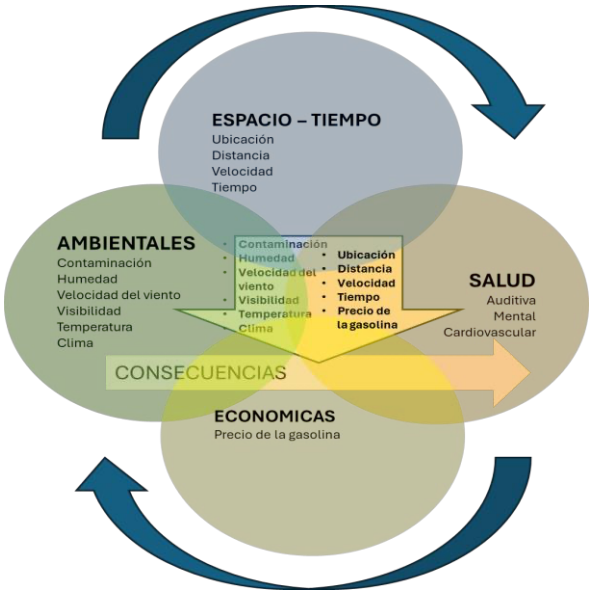
Más del 90% de la población mundial está expuesta a niveles superiores a las recomendaciones de la OMS, y la exposición a PM 2.5 incluso por pocos días incrementa entre 1 y 3% el riesgo de eventos cardiovasculares agudos como

infartos, accidentes cerebrovasculares, insuficiencia cardíaca, arritmias y muerte súbita (Saavedra, 2020).

La exposición continua a la contaminación potencia el riesgo de enfermedades crónicas como diabetes, hipertensión, alteraciones cognitivas, complicaciones en el embarazo, problemas neurológicos y enfermedades respiratorias infantiles. Los mecanismos más relevantes que vinculan la contaminación con la morbilidad cardiovascular incluyen el estrés oxidativo, la inflamación sistémica, la disfunción endotelial, la aterotrombosis y la arritmogénesis (Saavedra, 2020).

Finalmente, es importante subrayar que, además de los contaminantes químicos, existen factores ambientales no químicos como la temperatura, el ruido, el estrés, las condiciones socioeconómicas, los entornos construidos, los métodos agrícolas y los cambios climáticos inducidos por el ser humano que amplifican la asociación entre contaminación ambiental y eventos cardiovasculares (Saavedra, 2020).

Figura 4.12. Elementos de la Accesibilidad



Nota: La figura 4.3 representa la interrelación de los cuatro elementos de la accesibilidad a modo de mostrar la correlación entre variables. Elaboración propia, (2024).

Es relevante subrayar el uso de Python como herramienta para la obtención de datos en tiempo real. A lo largo de la metodología, este lenguaje ha sido empleado con el propósito de automatizar la lectura y extracción de información desde diversas plataformas mediante el uso de claves API. Python es un lenguaje de programación multiparadigma, ya que admite parcialmente la orientación a objetos, la programación imperativa y, en menor medida, la programación funcional. Se caracteriza por ser interpretado, dinámico y multiplataforma.

Este lenguaje se ha consolidado como uno de los más utilizados en aplicaciones web, desarrollo de software, ciencia de datos y aprendizaje automático. Su elección responde a su eficiencia, facilidad de comprensión y capacidad de ejecución en distintos sistemas operativos. Entre sus ventajas destaca su sintaxis sencilla y cercana al inglés, lo que facilita la lectura y comprensión de los programas (AWS, Amazon.com, 2025).

El proceso de trabajo con Python consiste en extraer conocimiento valioso a partir de los datos, enseñando a las computadoras a aprender de manera automática y a realizar predicciones precisas. Además, permite ejecutar tareas propias de la ciencia de datos, como la limpieza de información (corrección y eliminación de datos erróneos), la selección de características relevantes, la asignación de nombres significativos, el cálculo de estadísticas y la visualización de resultados mediante tablas y gráficos líneas, barras, circulares e histogramas (AWS, Amazon.com, 2025).

Python también favorece la productividad, ya que posibilita escribir programas con menos líneas de código en comparación con otros lenguajes. Su biblioteca estándar incluye módulos reutilizables para casi cualquier tarea, evitando la necesidad de programar desde cero. Asimismo, ofrece compatibilidad con otros lenguajes ampliamente conocidos, como Java, C y C++, y puede ejecutarse en múltiples sistemas operativos, entre ellos Windows, macOS, Linux y Unix (AWS, Amazon.com, 2025).

4.2.2Recopilar datos de series de tiempo

En cuanto a la recopilación de información, esta exige un método formal de carácter cuantitativo, orientado al manejo de datos numéricos estandarizados y susceptibles de ser analizados mediante técnicas estadísticas. Se basa en la medición de las propiedades de los fenómenos y en la formulación de postulados que expresan, de manera deductiva, las relaciones entre las variables estudiadas.

Dicho enfoque busca generalizar y normalizar los resultados, permitiendo así el análisis, la interpretación y la verificación o refutación de hipótesis (Razo, 2011). El proceso inicia con la delimitación precisa de un problema de investigación, sustentado en un marco teórico que sirve como referencia para la formulación de hipótesis (Razo, 2011).

Entre las investigaciones que pueden desarrollarse bajo este enfoque cuantitativo se encuentran aquellas derivadas del método científico, las cuales suelen inscribirse en corrientes como el positivismo, el neopositivismo y el

pospositivismo (Razo, 2011). En este contexto, las plataformas empleadas para la obtención de datos en tiempo real se detallan a continuación:

4.2.2.1 Mapbox

Mapbox es una plataforma dedicada a la creación de mapas en línea, utilizada por sitios web como Foursquare, Pinterest, Evernote, Financial Times, The Weather Channel y Uber Technologies. Desde su fundación en 2010, ha logrado expandirse rápidamente dentro del ámbito de la cartografía digital, posicionándose como alternativa frente a la limitada oferta de otros proveedores como Google Maps y OpenStreetMap (Company, 2023).

Además, Mapbox ha desarrollado o participado de manera significativa en diversas bibliotecas y aplicaciones de código abierto, entre las que destacan la especificación MBTiles, la herramienta de cartografía TileMill IDE, la biblioteca de JavaScript Leaflet, así como el estilo de mapas y analizador sintáctico CartoCSS (Company, 2023).

Las API de servicios web de Mapbox permiten acceder a las herramientas y servicios de Mapbox mediante programación. El uso de la API recupera la información sobre una cuenta, carga y modifica recursos. Las API de Mapbox se dividen en cuatro servicios Mapas, Navegación, Búsqueda y Cuentas. Cada uno de los servicios tiene su propia página de descripción general en esta documentación (Mapbox, 2025)

Para acceder a los puntos finales de la API de Mapbox, es necesario un token de acceso válido que conectará las solicitudes de la API a la cuenta. Se debe

proporcionar un token de acceso válido mediante el access_token parámetro de consulta en cada solicitud. Al crear un token de acceso, puede asignarle uno o más ámbitos de token. Cada ámbito le asigna un permiso diferente, lo que permite acceder a API restringidas (Mapbox, 2025)

Para el caso de estudio se consideró el tramo comprendido entre el centro de Atlacomulco y el centro de Toluca, de acuerdo con Mapbox se tiene un origen – destino a partir de las coordenadas de longitud y latitud, la programación se obtuvo de la siguiente forma:

Código en Python

```
import requests
import datetime
import json
import folium
import xml. etree. ElementTree as ET
import pandas as pd

days=["Mon","Tues","Wednes","Thurs","Fri","Satur","Sun"]
print (datetime.datetime.now())
2025-05-08 08:21:36.755333

d=datetime. datetime.now()
print(days[d.weekday()]+"day")
Thursday

key="pk.eyJ1IjoiZGF2aWRoYXN0dCIsImEiOiJjbHg2ZXJrdXkwajlnMmxwbWxmYjJiZ2NzIn0.bma63SlCoP0iO
Xj0HYzbhQ"

#origen
x1Origen=-99.87433205990637
y1Origen= 19.79974409224682
#destino
x2Destino=-99.65707023749802
y2Destino=19.292440587678588

def distancias(x1,x2,y1,y2):
    suma1=x1+x2
    suma2=y1+y2
    division1=suma1*0.5
    division2=suma2*0.5
    puntomedio=(division1,division2)
    resultado=puntomedio
    return resultado

coordenadasmedias= distancias(x1Origen,x2Destino,y1Origen,y2Destino)
print (coordenadasmedias[0], coordenadasmedias[1])
-99.76570114870219 19.546092339962705
```

```
routingProfile="driving"
puntos=[
[y1Origen, x1Origen],
[y2Destino, x2Destino]
]
origen=f"{x1Origen},{y1Origen}"
destino= f"{x2Destino},{y2Destino}"

# URL a la que se realizará la petición
url           =           f"https://api.mapbox.com/directions/v5/mapbox/{routingProfile}/
{origen};{destino}?geometries=geojson&access_token={key}


#realizar la petición Get
response=requests.get(url)

response
<Response [200]>

if response.status_code==200:
#leer la respuesta en formato JSON
    data =response.json()
    print (data)
else:
    print(f" Error en la peticion:{response.status_code}")
{'routes': [{'weight_name': 'auto', 'weight': 3831.542, 'duration': 3720.861, 'distance':
65966.188,  'legs':  [{'via_waypoints':  [],  'admins':  [{'iso_3166_1_alpha3':  'MEX',
'iso_3166_1': 'MX'}], 'weight': 3831.542, 'duration': 3720.861, 'steps': [], 'distance':
65966.188,  'summary':  'MEX  55D,  MEX  55'}],  'geometry':  {'coordinates':  [[-99.874389,
19.799578], [-99.874069, 19.799481], [-99.873414, 19.802289], [-99.867069, 19.799057], [-
99.867901,  19.792918],  [-99.841201,  19.727801],  [-99.78372,  19.643173],  [-99.768627,
19.581302], [-99.760748, 19.5746], [-99.761324, 19.560071], [-99.733718, 19.513299], [-
99.73465,  19.476958],  [-99.72558,  19.430747],  [-99.705359,  19.382071],  [-99.693335,
19.367241], [-99.654544, 19.320158], [-99.652754, 19.317845], [-99.643134, 19.303735], [-
99.641745,  19.293718],  [-99.657716,  19.292994],  [-99.65767,  19.292021],  [-99.657055,
19.292041]],  'type':  'LineString'}}],  'waypoints':  [{'distance':  19.425,  'name':  '',
'location': [-99.874389, 19.799578]}, {'distance': 44.464, 'name': 'Avenida Independencia',
'location': [-99.657055, 19.292041]}], 'code': 'Ok', 'uuid': 'up2bji54EL0vD6evGpqoeRyHLLD-
Ao9-8NHKmeC5zW3tc3Q4gyqVNw=='}

#Hacer partsing para que python lo reconozca como un diccionario
data = response.json()
response=requests.get (url)
data

{'routes': [{'weight_name': 'auto',
   'weight': 3831.542,
   'duration': 3720.861,
   'distance': 65966.188,
   'legs': [{'via_waypoints': [],
     'admins': [{'iso_3166_1_alpha3': 'MEX', 'iso_3166_1': 'MX'}],
     'weight': 3831.542,
     'duration': 3720.861,
     'steps': [],
     'distance': 65966.188,
     'summary': 'MEX 55D, MEX 55'}],
   'geometry': {'coordinates': [[-99.874389, 19.799578],
     [-99.874069, 19.799481],
     [-99.873414, 19.802289],
     [-99.867069, 19.799057],
```

```
     [-99.867901, 19.792918],
     [-99.841201, 19.727801],
     [-99.78372, 19.643173],
     [-99.768627, 19.581302],
     [-99.760748, 19.5746],
     [-99.761324, 19.560071],
     [-99.733718, 19.513299],
     [-99.73465, 19.476958],
     [-99.72558, 19.430747],
     [-99.705359, 19.382071],
     [-99.693335, 19.367241],
     [-99.654544, 19.320158],
     [-99.652754, 19.317845],
     [-99.643134, 19.303735],
     [-99.641745, 19.293718],
     [-99.657716, 19.292994],
     [-99.65767, 19.292021],
     [-99.657055, 19.292041]],
    'type': 'LineString'}}],
 'waypoints': [{'distance': 19.425,
   'name': '',
   'location': [-99.874389, 19.799578]},
  {'distance': 44.464,
   'name': 'Avenida Independencia',
   'location': [-99.657055, 19.292041]],
 'code': 'Ok',
 'uuid': 'up2bji54EL0vD6evGpqoeRyHLLD-Ao9-8NHKmeC5zW3tc3Q4gyqVNw=='}

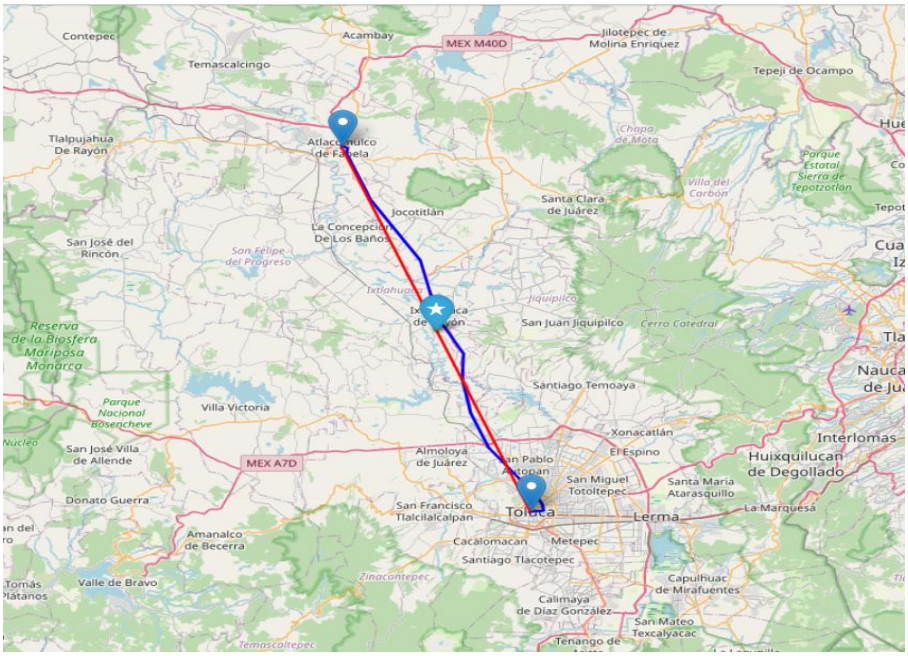
distancia= data ["routes"][0]["distance"]/1000
tiempo= data ["routes"][0]["duration"]/3600
print(distancia)
print(tiempo)
velocidad= distancia/tiempo
print(velocidad)
65.96618799999999
1.0335725
63.82347440552065

puntosXY=data ["routes"][0]["geometry"]["coordinates"] #extraemos las coordenadas de la
respuesta del servidor
puntosYX=[]
#declaramos una lista vacia que iremos llenado con un for
for punto in puntosXY:
    puntosYX.append([punto[1], punto[0]])
mapa = folium.Map (location=puntosYX[0], zoom_start=13)

# Agregar una línea que conecte los puntos
folium.PolyLine(puntosYX, color="blue", weight=2.5, opacity=1).add_to(mapa)
<folium.vector_layers.PolyLine at 0x20a99318d90>
for punto in puntos:
    folium.Marker(location=punto).add_to(mapa)

# Agregar una línea que conecte los puntos
folium.PolyLine(puntos, color="red", weight=2.5, opacity=1).add_to(mapa)
<folium.vector_layers.PolyLine at 0x20a9931bd30>
folium.Marker(location=[coordenadasmedias[1],coordenadasmedias[0]], popup='Este es
Medellín', icon=folium.Icon(icon='star')).add_to(mapa)
<folium.map.Marker at 0x20a9931b730>
Mapa
```

Figura 13.4. Mapa resultante de la programación



Nota: La figura 4.4 es el mapa extraído desde Mapbox con las coordenadas correspondientes al centro de Atlacomulco y el centro de Toluca, además trazando el punto medio del tramo. Elaboración propia, (2025).

La siguiente parte del modelo es la extracción de datos de la plataforma OpenWeatherMap, es importante destacar la aportación de la plataforma Mapbox al calcular y trazar el punto medio de la ruta con el propósito de obtener las coordenadas que servirán para la extracción de datos climáticos.

4.2.2.2 OpenWeatherMap

OpenWeatherMap es una plataforma en línea, que proporciona datos meteorológicos globales mediante API, incluyendo datos meteorológicos actuales, pronósticos, previsiones inmediatas y datos meteorológicos históricos, proporciona un pronóstico de precipitación hiperlocal minuto a minuto. El modelo de aprendizaje automático convolucional utiliza servicios de transmisión meteorológica y datos de

estaciones meteorológicas de aeropuertos, estaciones de radar terrestres, satélites meteorológicos, satélites de teledetección, METAR y estaciones meteorológicas automatizadas (OpenWeather, 2025).

Las API proporcionadas por OpenWeatherMap han dado lugar a repositorios en GitHub. Las API admiten varios idiomas, unidades de medida y formatos de datos estándar de la industria como JSON y XML. Proporciona datos ambientales globales mediante inteligencia artificial y aprendizaje automático. OpenWeather colabora con organizaciones como la Oficina Meteorológica y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA). Es miembro de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y de la Agencia Espacial Europea (ESA). La empresa también gestiona la Fundación OpenWeather, que apoya el acceso a datos abiertos, la educación y las iniciativas de sostenibilidad (OpenWeather, 2025).

La programación realizada consideró las coordenadas de latitud y longitud el punto medio del recorrido, resultado en el municipio de Ixtlahuaca, la programación resultante fue la siguiente, cabe mencionar que las lecturas se realizaron cada 30 minutos.

Código en Python

```
import requests
import datetime
import time
import xml. etree. ElementTree as ET
import pandas as pd


def clima():
    api_key="7aa3a948195f8ef1dc5979c22cd74921"
    lat= 19.546092339962705
    lon=-99.76570114870219

url=f"https://api.openweathermap.org/data/2.5/weather?lat={lat}&lon={lon}&appid={api_key}
"
    respuesta=requests.get(url)
    data_clima=respuesta.json()
```

```
    data_clima
    clima=data_clima["weather"][0]["description"]
    temperatura=data_clima["main"]["temp"]-273.15
    humidity=data_clima["main"]["humidity"]
    visibility=data_clima["visibility"]
    speed=data_clima["wind"]["speed"]
    print(clima)
    print(temperatura)
    print(humidity)
    print(visibility)
    print(speed)
    return resultado

def tomar_datos():
    #  Luego guarda los datos en donde quieras
    """Esta función contiene la lógica para tomar los datos."""
    #  Aquí puedes poner el código que toma los datos.
    fecha_hora = datetime.datetime.now()
    print(f"Datos tomados a las: {fecha_hora}")

def main():
    api_key="7aa3a948195f8ef1dc5979c22cd74921"
    lat= 19.546092339962705
    lon=-99.76570114870219
    url=
f"https://api.openweathermap.org/data/2.5/weather?lat={lat}&lon={lon}&appid={api_key}"
    respuesta=requests.get(url)
    data_clima=respuesta.json()
    data_clima
    clima=data_clima["weather"][0]["description"]
    temperatura=data_clima["main"]["temp"]-273.15
    humidity=data_clima["main"]["humidity"]
    visibility=data_clima["visibility"]
    speed=data_clima["wind"]["speed"]
    print(clima)
    print(temperatura)
    print(humidity)
    print(visibility)
    print(speed)
    repeticiones=30
    i=1
    #48 veces al dia se repetira
    repetir=True
    while repetir:
        tomar_datos()
        time.sleep(10)# el 10 lo reemplazas cada 1800
        print(clima)
        print(temperatura)
        print(humidity)
        print(visibility)
        print(speed)
        print(i)
        i=i+1
        if i >= repeticiones+1:
            repetir=False

main()
scattered clouds
21.170000000000016
48
10000
```

```
0.2
Datos tomados a las: 2025-07-04 11:10:41.481616
```

De la misma manera, la programación para obtener el nivel de contaminación del aire en una escala del 1 al 5 de acuerdo con OpenWeather, donde 1 es buena calidad del aire y 5 es calidad del aire muy mala, para generar este índice la plataforma considera datos como sobre gases contaminantes, como monóxido de carbono (CO), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), amoníaco (NH_3) y partículas ($PM_{2,5}$ y PM_{10}) (OpenWeather, 2025).

Código en Python

```
import requests
import datetime
import time
import xml. etree. ElementTree as ET
import pandas as pd


def contaminacion():
    api_key="7aa3a948195f8ef1dc5979c22cd74921"
    lat= 19.546092339962705
    lon=-99.76570114870219
    url=
    f"http://api.openweathermap.org/data/2.5/air_pollution/forecast?lat=50&lon=50&appid=
    {api_key}"
    respuesta=requests.get (url)
    data_air_pollution= respuesta.json ()
    data_air_pollution
    pollution= data_air_pollution["list"][0]["main"]["aqi"]
    print(pollution)
    return resultado


def tomar_datos():
    """Esta función contiene la lógica para tomar los datos."""
    #  Aquí puedes poner el código que toma los datos.
    fecha_hora = datetime.datetime.now()
    print(f"Datos tomados a las: {fecha_hora}")
    #  Luego guarda los datos en donde quieras.
def main():
    api_key="7aa3a948195f8ef1dc5979c22cd74921"
    lat= 19.546092339962705
    lon=-99.76570114870219
    url=
    f"http://api.openweathermap.org/data/2.5/air_pollution/forecast?lat=50&lon=50&appid=
    { api_key}"
    respuesta=requests.get (url)
    data_air_pollution= respuesta.json ()
    data_air_pollution
    pollution= data_air_pollution["list"][0]["main"]["aqi"]
    print(pollution)
```

```
    repeticiones=30
    i=1
    #48 veces al dia se repetira
    repetir=True
    while repetir:
        tomar_datos()
        time.sleep(1800)# el 10 lo reemplazas cada 1800
        print(pollution)
        print(i)
        i=i+1
        if i >= repeticiones+1:
            repetir=False


main()
2
Datos tomados a las: 2025-07-18 11:08:31.401748
```

4.2.2.3 Comisión Reguladora de Energía

La obtención de datos sobre el precio de la gasolina se realizó a través de la plataforma libre de uso de la Comisión Reguladora de Energía, la primera parte es identificar las estaciones correspondientes al tramo centro de Atlacomulco a centro de Toluca. La programación para la extracción de las estaciones es:

Código en Python

```
import requests
import xml. etree. ElementTree as ET
import pandas as pd

#url del archivo XML
url =https://publicacionexterna.azurewebsites.net/publicaciones/places
#Descargar el archivo XML
response = requests. get (url)

#Comprobar que la solicitud fue exitosa
if response.status_code ==200:
    # Analizar el contenido del archivo XML
    root = ET.fromstring (response.content)
    #crear listas para almacenar los datos
    names = []
    locations =[]
    #Recorrer los elementos del XML
    for place in root.findall ("place"):
        name= place.find ("name"). text
        location=place. find ("location").text
        names.append (name)
        locations. append (location)
    #Crear una DataFrame de pandas
    data= {"Nombre": names, "Ubicacion":locations}
    df=pd.DataFrame(data)
    #Mostrar el DataFrame
```

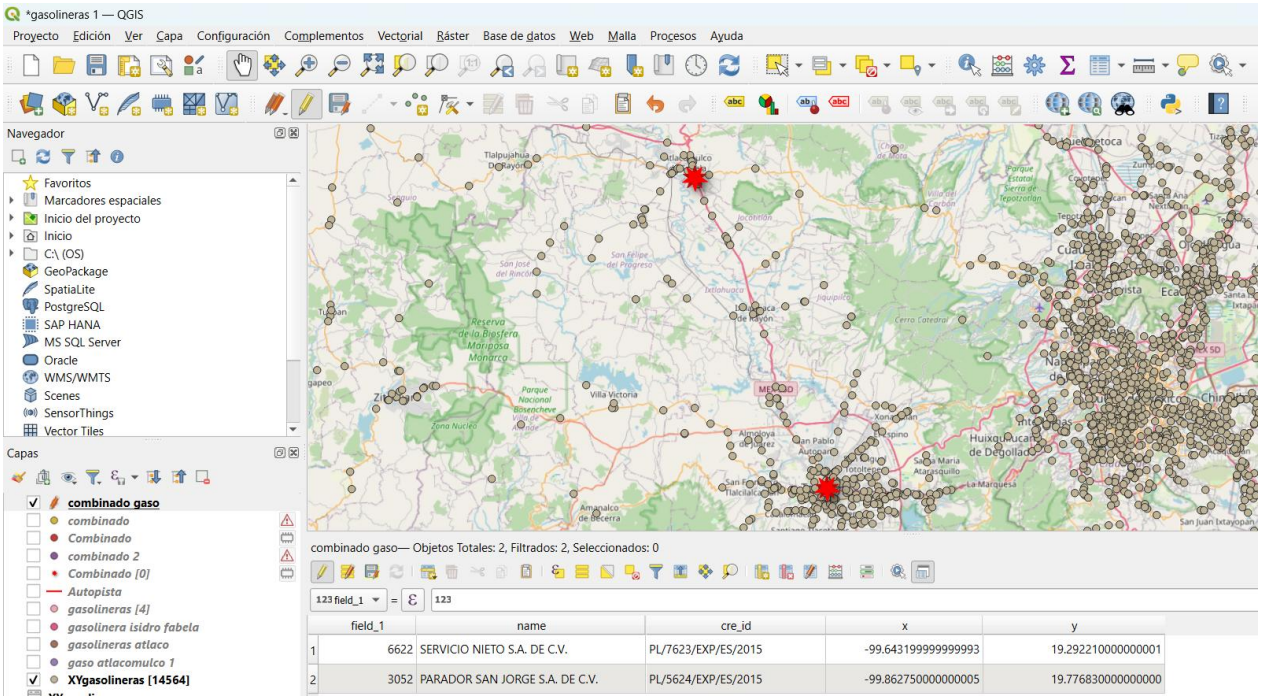
```
    print (df)
else:
    print ("No se puede descargar el archivo XML.")
df
```

No.	Nombre	Ubicación
0	ESTACION HIPODROMO, S.A. DE C.V.	\n
1	LAS MEJORES ESTACIONES, S.A DE C.V	\n
2	DIAZ GAS S.A. DE C.V.	\n
3	COMBU-EXPRESS S.A. DE C.V.	\n
4	PETROMAX S.A. DE C.V.	\n
...	...	...
14559	ESTACIÓN DE SERVICIO MAC, S.A. DE C.V.	\n
14560	SERVICIO 3 SA DE CV	\n
14561	Hidrocarburos Rivas, S.A. de C.V.	\n
14562	GRUPO MALME, S.A. DE C.V.	\n
14563	FOMENTO GASOLINERO S.A. DE C.V.	\n

14564 rows × 2 columns

Cabe destacar que, una vez obtenidas las estaciones de gasolina de todo el país, la segunda parte es identificar las estaciones correspondientes a dicho tramo, por ello se realiza un mapeo de las estaciones mediante el software QGIS, con el propósito de liga el ID de las gasolineras con su valor correspondiente, las gasolineras consideradas se muestran en la figura 4.5.

Figura 4.14. Visualización de las gasolineras a través de QGIS



Nota: La figura 4.5, muestra la ubicación de las gasolineras correspondientes al caso de estudio con el propósito de ligar la estación con el precio de la gasolina. Elaboración propia, (2025).

Las estaciones seleccionadas se encuentran en la tabla de atributos extraída de QGIS, de esta manera se establece la relación entre las gasolineras y el precio de la gasolina, que para nuestro caso de estudio se considera la gasolina magna por ser el combustible más usado para el transporte.

Código en Python

```
import requests
import xml. etree. ElementTree as ET
import pandas as pd

#url del archivo XML
url =https://publicacionexterna.azurewebsites.net/publicaciones/prices

#Descargar el archivo XML
response = requests. get (url)

#Comprobar que la solicitud fue exitosa
if response.status_code ==200:
    # Analizar el contenido del archivo XML
```

```
    root = ET.fromstring (response.content)
    #crear listas para almacenar los datos
    names = [ ]
    regular =[ ]
    premium =[ ]
    diesel =[ ]
    #Recorrer los elementos del XML
    for price in root.findall ("price"):
        name= place_id.find ("name"). text
        regular= place_id. find ("regular").text
        premium=place_id. find("premium").text
        diesel=place_id.find("diesel").text
        names.append (name)
        regular. append (regular)
        premium. append (premium)
        diesel. append (diesel)
    #Crear una DataFrame de pandas
    data= {"Nombre": names,"regular":gas_price type,"premium": gas_price type , "diesel":
gas_price type}
    df=pd.DataFrame(data)
    #Mostrar el DataFrame
    print (df)
else:
    print ("No se puede descargar el archivo XML.")
df
```

Nombre	Magna	Premium	Diesel
SERVICIO NIETO S.A. DE C.V.	23.99	25.86	25.89
PARADOR SAN JORGE S.A. DE C.V.	23.79	25.63	26.23

Cabe resaltar que se tuvo la necesidad de depurar los datos de las gasolineras y de los precios, ya que algunas estaciones no coincidían con los precios debido a errores en la plataforma, además la plataforma de la Comisión Reguladora de Energía estuvo inhabilitada por días, y se colocaron datos del día anterior.

4.2.3. Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

Este tipo de análisis se considera en la investigación, primero para la elaboración de resúmenes estadísticos para entender la distribución, tendencia central y dispersión de velocidades y distancias, segundo para graficar los datos

para visualizar tendencias, patrones y anomalías, utilizando gráficos de línea para series de tiempo, histogramas para distribuciones y gráficos de dispersión para relaciones entre velocidad y distancia, tercero categorizar los datos basándose en el sistema de semáforos mostrado en la imagen, que podría reflejar condiciones de tráfico que impactan la accesibilidad.

El Análisis Exploratorio de Datos (EDA), aborda el análisis de datos a partir de conceptos como amplitud y flexibilidad en la investigación. El análisis exploratorio es una perspectiva alternativa al enfoque confirmatorio tradicional. El objetivo es ayudar a analizar en profundidad el conjunto de datos, antes de hacer suposiciones, identificar errores, obtener una mejor comprensión de los patrones dentro del conjunto de datos, descubrir valores atípicos y/o eventos anómalos y averiguar las relaciones entre las variables (Ortega, 2023). Para ellos es necesario aplicar la serie de pasos mostrada en la figura 4.6:

Figura 4.15. Esquema de Análisis Exploratorio de Datos (EDA)



Nota: La figura 4.6 representa los pasos para la elaboración del Análisis Exploratorio de Datos (EDA), Gravitar (2023).

El análisis exploratorio de datos cumple diversos propósitos. En primer lugar, asegura que los resultados obtenidos sean válidos y aplicables a los objetivos planteados. En segundo término, facilita que los actores involucrados formulen las preguntas adecuadas durante el proceso de investigación (Ortega, 2023).

Asimismo, permite abordar cuestiones relacionadas con la desviación estándar, las variables categóricas y los intervalos de confianza. Una vez concluido, este tipo de análisis puede emplearse como base para el modelado de datos, incluyendo aplicaciones en *Machine Learning* (Ortega, 2023). Los tipos de análisis de datos exploratorios se dividen de acuerdo con la tabla siguiente:

Tabla 4.2. Tipos de análisis de datos exploratorios

Tipo de dato	Tipo de gráfico	Objetivo
Univariante: Describir los datos y encontrar patrones dentro de ellos	Diagramas de tallos y hojas	Muestran todos los valores de los datos y la forma de la distribución
	Histogramas y gráficos de barras	Cada barra representa la frecuencia o proporción de casos para un rango de valores.
	Diagramas de caja	Representan gráficamente el resumen de cinco números del mínimo, primer cuartil, mediana, tercer cuartil y el máximo.
Multivariante: Muestran la relación entre dos o más variables de datos a través de tabulaciones cruzadas o estadísticas.	Diagrama de barras agrupadas	Muestran las relaciones entre dos o más conjuntos de datos
Otros tipos comunes de gráficos multivariantes	Gráfico de dispersión	Se utiliza para trazar puntos de datos, muestra cuánto se ve afectada una variable por otra
	Gráfico multivariante:	Representación gráfica de las relaciones entre los factores y una respuesta
	Gráfico de secuencia de ejecución:	Gráfico lineal de datos trazados a lo largo del tiempo.
	Gráfico de burbujas	Visualización de datos que muestra varios círculos.
	Mapa de calor	Representación gráfica de datos donde los valores se representan por color.

Nota: La tabla 4.2 representa los tipos de análisis de datos exploratorios y las gráficas que representas dichos valores, así como la relación entre ellos, Ortega, (2023).

Los enfoques EDA se basan en el uso del principio de la Información Física Extrema (EPI). El resultado de esto es un programa de análisis exploratorio de datos (EDA), cuyas las entradas son datos reales, y cuyas salidas son las leyes naturales que gobiernan los sistemas. El alcance de los sistemas que pueden analizarse de esta manera es amplio y abarca todos los fenómenos basados en estadísticas. Los nuevos enfoques surgen del análisis de estos sistemas y transmiten el valor de la Información de Fisher a un observador. (Frieden, 2004).

Cualquier medida perturba el estado del sistema bajo medición, esta perturbación resulta de revelar al observador la ley que rige la formación de los datos. Así lo expresa el Principio EPI, que permite el cálculo de la ley. De esta manera, cada exploración en la aplicación del principio EPI los datos equivale a un proceso de descubrimiento de ley que rige esos datos. Las leyes descubiertas de esta manera por EPI van desde aquellas de la mecánica cuántica y la cosmología a los de la economía y las ciencias (Frieden, 2004).

Su objetivo es proporcionar al analista una nueva herramienta de EDA para descubrir las leyes que gobiernan sistemas desconocidos. De esta manera, el enfoque fenomenológico tradicional, que es fragmentario en alcance y naturaleza, se reemplaza por un enfoque basado en información de carácter general. Además, el enfoque basado en la información a menudo ofrece una respuesta que se aplica a una clase más amplia de sistemas que el correspondiente enfoque basado en fenómenos (Frieden, 2004).

Por lo que, la Información de Fisher puede utilizarse como una herramienta eficaz para estimar estas leyes. La Información de Fisher se aplica a todos los escenarios estadísticamente repetibles donde los datos son tomados. Así, el concepto de la Información de Fisher proporciona un concepto unificador para comprender los fenómenos. Esto se da en dos niveles distintos: el filosófico y el práctico. Por tanto, la Información de Fisher ha actuado para unificar la ciencia tanto en el nivel conceptual como en el perceptual (Frieden, 2004).

El principio EPI utiliza dos cantidades de Información de Fisher, denominadas I y J, con el propósito de formar modelos matemáticos para física. Por lo tanto, el enfoque EPI se limita a derivar la expresión matemática de efectos físicos, se deben suponer ciertas cosas sobre el efecto desconocido. Uno es conocimiento de una fuente. El otro es el conocimiento de una invariancia apropiada. De esta manera, un principio de invariancia juega un papel activo en la obtención de un valor físico (Frieden, 2004).

La ecuación 4.1 es una afirmación del principio EPI:

$$\delta I - \delta J \equiv \delta (I - J) = 0 \text{ ... ...ecuación 4.1, es decir}$$

$$K = I - J \text{ ... ...ecuación 4.2}$$

La cantidad K (ecuación 4.2) se denomina información física del sistema. Al igual que con I y J, es un funcional de las amplitudes q(x). Por su definición $J \geq I$, pero K es un pérdida o defecto de información. El cero en la ecuación 1 implica que este defecto de la información es la misma en todo el rango de perturbaciones (x). En todas las aplicaciones cuánticas de EPI, las funciones de amplitud q obedecerán a la condición cero $\mathrm{I} = \mathrm{k}\,\mathrm{J}\ \mathrm{o}\ \mathrm{I} - \mathrm{k}\,\mathrm{J} = 0, \mathrm{k} \leq 1$ (ecuación 3), con k = 1 (Frieden, 2004).

Dado que J es el valor extremo (máximo) posible de I, en estos casos el cero es el valor extremo demandado. Entonces cualquier solución que obedezca la condición cero $I - J = 0$ debe también obedecer la condición extrema. La ecuación 3, muestra que J es proporcional a I, en términos numéricos. Sin embargo, dado que J caracteriza la fuente física de los datos, además es una condición cero en el nivel macroscópico, es decir, en términos de la información en observables físicos (los datos) (Frieden, 2004).

La información J y el coeficiente k se resuelven mediante el principio de invariancia. Las formas resultantes para J resaltan ser los funcionales más simples posibles de las fuentes que son consistentes con el principio de invariancia. El principio de invariancia juega un papel central en la implementación de EPI, ya que es un principio para definir la física del sistema a través de sus amplitudes (Frieden, 2004).

Así mismo J, es el nivel en el que la información de Fisher adquiere, cuando el principio de invariancia es óptimamente fuerte. Por lo tanto, I < J con un principio de invariancia fuerte. Por definición $k = I / J$, de modo que k mide la eficiencia del proceso EPI y transfiere la Información de Fisher del fenómeno especificado por J a la salida especificada por I (Frieden, 2004).

Por tanto, k es un coeficiente de eficiencia, $0 \leq k \leq 1$. Un valor de k < 1 debería indicar que la respuesta q es sólo aproximado. También mide el grado en que el espacio de datos está entrelazado con el espacio de origen. Un caso k = 1 indica entrelazamiento completo de los dos espacios (Frieden, 2004).

Existen diversas herramientas destinadas al análisis exploratorio de datos, entre las más utilizadas se encuentran R, Python y SAS. La elección de cada una

depende de los requerimientos específicos de la investigación. En particular, R se destaca como una herramienta orientada a la visualización, ya que ofrece una amplia gama de diagramas y gráficos que facilitan la exploración de la información (Ortega, 2023).

4.2.4. Análisis de Correlación

El análisis de correlación tiene dos objetivos principales el primero es determinar la correlación entre las velocidades de vehículos y las distancias recorridas para identificar relaciones que podrían impactar la accesibilidad, así como explorar correlaciones entre la hora del día, día de la semana y los valores de velocidad categórica para identificar patrones de accesibilidad en horas pico y no pico.

En consecuencia, resulta necesario emplear un modelador adecuado para fenómenos multivariables, como las Redes Bayesianas, las cuales representan el comportamiento de un sistema a través de un conjunto de variables y sus relaciones de dependencia. A partir de este modelo es posible realizar inferencia bayesiana, es decir, estimar la probabilidad posterior de variables desconocidas con base en aquellas que sí se conocen. Dichos modelos ofrecen múltiples aplicaciones, entre ellas la clasificación, la predicción y el diagnóstico (Sucar, 2015).

Una red bayesiana es un grafo dirigido acíclico cuyos nodos representan las variables Xi del dominio (atributos) donde cada variable es independiente del resto de las variables Xi, Xj del dominio dados sus predecesores directos. Un grafo dirigido acíclico es un tipo de grafo en el que la dirección de los enlaces es relevante

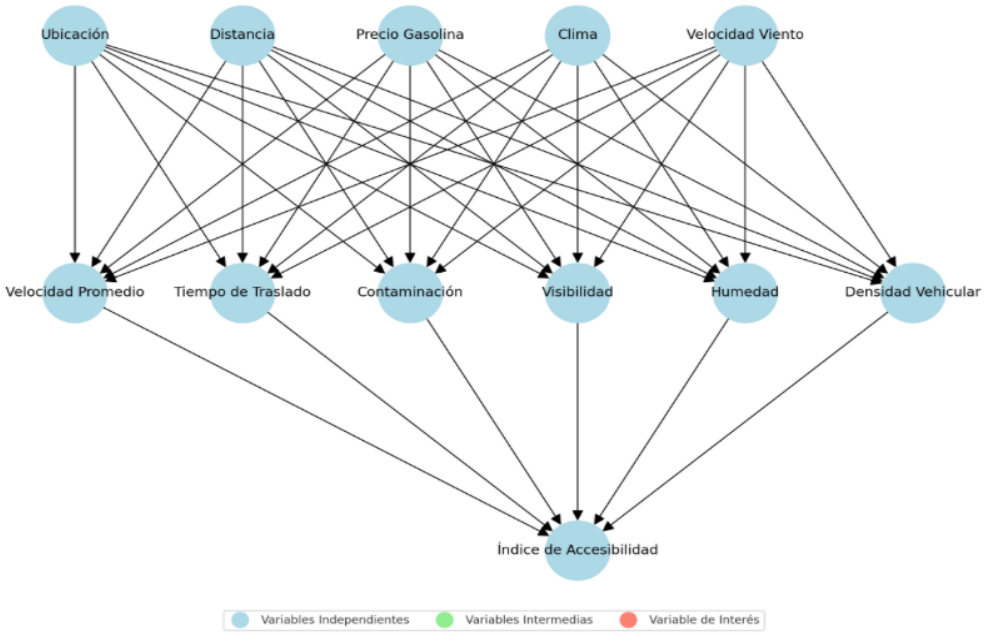
y en el que nunca puede suceder que, en un camino entre dos nodos, el nodo inicial o el final, estén repetidos (Solé, 2000).

En una Red Bayesiana, todas las relaciones de independencia condicional que se muestran en el grafo corresponden a independencias dentro de la distribución de probabilidad. Estas independencias permiten simplificar tanto la representación del conocimiento al requerir menos parámetros como el proceso de razonamiento, mediante la propagación de probabilidades (Sucar, 2015).

En esencia, una red bayesiana constituye una representación gráfica de las dependencias e independencias entre variables aleatorias, destacando especialmente las independencias condicionales (Sucar, 2015). Asimismo, estas redes pueden aportar información relevante sobre la interacción entre las variables del dominio, que en ciertos casos puede interpretarse como relaciones de causa–efecto (Sucar, 2015).

Se trata de un modelo gráfico de dependencias para el razonamiento probabilístico, en el cual los nodos representan variables aleatorias y los arcos indican relaciones de dependencia directa entre ellas. La figura 4.7 ilustra la red bayesiana que describe el fenómeno de la accesibilidad (Sucar, 2015).

Figura 4.16. Red Bayesiana correspondiente a la accesibilidad



Nota: La figura 4.7 representa la relación de las variables que describen la accesibilidad, los nodos representan variables aleatorias y los arcos relaciones de dependencia. Elaboración propia, (2025).

4.2.5. Análisis de Sensibilidad

Se propone un análisis de sensibilidad para examinar cómo los cambios en las velocidades de los vehículos afectan las puntuaciones de accesibilidad modificando artificialmente los datos de velocidad y observando el efecto en la categorización. Para ello se utilizan técnicas como simulaciones de Monte Carlo para evaluar cómo las fluctuaciones aleatorias en velocidad y distancia pueden impactar la evaluación general de la accesibilidad de la ciudad.

La simulación Monte Carlo, también denominada método de Monte Carlo o simulación de probabilidad múltiple, constituye una técnica matemática utilizada para estimar los posibles resultados de eventos inciertos. Este método fue

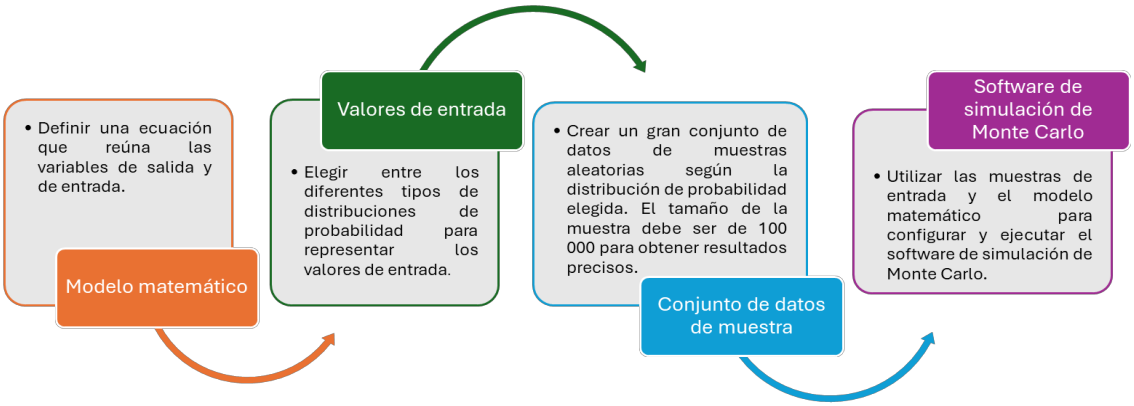
desarrollado por John von Neumann y Stanislaw Ulam durante la Segunda Guerra Mundial, con el objetivo de mejorar la toma de decisiones en contextos de incertidumbre (IBM, 2023).

Su nombre proviene de la ciudad de Mónaco, reconocida por sus casinos, en alusión al papel central que desempeña el azar en este enfoque de modelado, semejante a un juego de ruleta. Desde su creación, las simulaciones Monte Carlo se han aplicado en la evaluación del riesgo en múltiples escenarios de la vida real, incluyendo la inteligencia artificial, la predicción de precios de acciones, la estimación de ventas, la gestión de proyectos y la determinación de precios(IBM, 2023).

Frente a los modelos predictivos con entradas fijas, ofrecen ventajas como la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad y calcular correlaciones entre variables. El análisis de sensibilidad permite identificar el impacto de cada entrada sobre un resultado específico, mientras que la correlación facilita la comprensión de las relaciones entre las distintas variables de entrada (IBM, 2023).

En términos generales, la simulación Monte Carlo se emplea para analizar la respuesta de un modelo frente a entradas generadas aleatoriamente. Este procedimiento suele desarrollarse en cuatro etapas, descritas en la figura 4.8.

Figura 4.17. Pasos para la simulación de Monte Carlo



Nota: La figura 4.8 representa los pasos para el análisis de sensibilidad con la técnica de Monte Carlo. AWS, (2023).

Entre los sistemas que pueden analizarse mediante la simulación Monte Carlo se incluyen modelos financieros, físicos y matemáticos. Dado que cada simulación es independiente, este método se adapta de manera óptima a las técnicas de cálculo paralelo, lo que permite reducir de forma significativa el tiempo requerido para realizar los cálculos (MathWorks, 2024).

El principio fundamental de la simulación Monte Carlo se basa en la ergodicidad, concepto que describe el comportamiento estadístico de un punto en movimiento dentro de un sistema cerrado. En un sistema ergódico, dicho punto recorrerá eventualmente todas las posiciones posibles, lo que constituye la base del método: ejecutar un número suficiente de simulaciones para obtener resultados derivados de diferentes entradas (AWS, 2023).

La simulación Monte Carlo emplea sistemas computacionales para generar múltiples simulaciones que reproducen resultados semejantes a los de la vida real. Para ello, utiliza generadores de números aleatorios, programas capaces de

producir secuencias impredecibles que reflejan la incertidumbre inherente a los parámetros de entrada (AWS, 2023).

La diferencia principal entre Monte Carlo y el machine learning radica en su enfoque: mientras el aprendizaje automático utiliza grandes volúmenes de datos de entrada y salida para entrenar modelos que identifiquen correlaciones, Monte Carlo se apoya en muestras de datos de entrada y en un modelo matemático previamente definido para estimar las salidas probables de un sistema (AWS, 2023).

En este sentido, los modelos de machine learning pueden emplearse para validar y confirmar los resultados obtenidos mediante simulaciones Monte Carlo. En un análisis de Monte Carlo se consideran tres componentes: variables de entrada, variables de salida y un modelo matemático. El sistema introduce variables independientes en el modelo, las simula y genera variables dependientes (AWS, 2023).

Las entradas corresponden a valores aleatorios que influyen en los resultados, y pueden expresarse como rangos de muestras aleatorias para que el método reproduzca diferentes escenarios. Las variables de salida representan los resultados del análisis y suelen visualizarse en histogramas o gráficos que muestran la distribución continua de los valores en el eje horizontal. De este modo, se obtiene un modelo matemático que describe la relación entre las variables de entrada y salida en forma de ecuación (AWS, 2023).

Las distribuciones de probabilidad en Monte Carlo son funciones estadísticas que representan un rango de valores dentro de límites determinados. Estas permiten predecir la ocurrencia de variables inciertas, que pueden ser discretas o continuas. En el caso de las distribuciones discretas, se expresan mediante números enteros o secuencias finitas, cada uno con una probabilidad mayor que cero (AWS, 2023).

Entre las distribuciones más comunes que se modelan en Monte Carlo se encuentran:

- Distribución normal: También llamada curva de campana, de forma simétrica, que describe la mayoría de los fenómenos reales. La probabilidad es mayor en torno a la mediana y disminuye hacia los extremos (AWS, 2023).
- Distribución uniforme: Representa variables aleatorias con igual probabilidad. En un gráfico, aparece como una línea horizontal plana dentro del rango válido (AWS, 2023).
- Distribución triangular: Utiliza valores mínimo, máximo y más probable para definir la variable aleatoria, concentrando la mayor probabilidad en el valor más probable (AWS, 2023).

4.2.6. Análisis Temporal

El análisis temporal se considera para saber cómo cambia la Información de Fisher y las categorizaciones de tráfico con el tiempo para identificar tendencias emergentes o patrones estacionales. Una serie temporal se define como una

secuencia de datos recopilados de manera continua a lo largo del tiempo. Este tipo de información resulta útil para identificar tendencias y patrones (Gonzalo, 2023).

En este contexto, la estadística se constituye como la disciplina científica encargada de recolectar, organizar, analizar y presentar datos con el fin de extraer conclusiones. Las series temporales suelen estudiarse mediante métodos estadísticos, ya que permiten detectar comportamientos y regularidades que de otro modo pasarían inadvertidos (Gonzalo, 2023).

Las series temporales representan un componente esencial dentro de la estadística, dado que los datos obtenidos en distintos momentos ofrecen una perspectiva singular sobre las tendencias y patrones de comportamiento. Su análisis posibilita la identificación y medición de dichas tendencias, lo que contribuye a la toma de decisiones fundamentadas en la información acumulada a lo largo del tiempo (Gonzalo, 2023).

Además, las series temporales permiten realizar proyecciones futuras, brindando a los profesionales la capacidad de anticiparse y prepararse ante posibles cambios. Los principales componentes de una serie temporal se ilustran en la figura 4.9 (Gonzalo, 2023).

Figura 4.18. Componentes de una serie temporal



Nota: La figura 4.9 representa los componentes de una serie temporal para su análisis. Gonzalo, (2023).

La descomposición de una serie temporal consiste en separar sus componentes principales. Este proceso se desarrolla en tres etapas:

1. Identificación de la tendencia: Permite reconocer la evolución general de la serie.
2. Detección de la estacionalidad: Revela los patrones periódicos presentes en los datos.
3. Detección del ruido: Identifica las variaciones aleatorias de la serie.

Una vez aislados los componentes, es posible analizarlos de manera individual mediante distintas herramientas, lo que facilita una mejor comprensión de la serie y la predicción de su comportamiento futuro. Previo al análisis, resulta indispensable recopilar y depurar los datos de forma adecuada(Gonzalo, 2023).

Esto implica seleccionar las variables relevantes, definir un intervalo temporal apropiado y corregir valores faltantes o erróneos. Asimismo, es necesario identificar y tratar los valores atípicos y anomalías. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la imputación de medias y la interpolación, aunque también puede optarse por eliminar registros incompletos, con el riesgo de perder información valiosa (Alvares, 2024).

Por ello, la elección del método debe ajustarse al conjunto de datos y a los objetivos de la investigación. Además, la transformación y normalización de los datos es recomendable, dado que las series suelen presentar tendencias no lineales, estacionalidad u otros patrones que dificultan el análisis (Alvares, 2024).

El análisis exploratorio de datos (EDA) desempeña un papel esencial en la interpretación de series temporales, ya que permite examinar patrones, tendencias y características de los datos para extraer información significativa. A través del EDA es posible detectar valores atípicos, identificar estacionalidad, comprender la distribución y orientar decisiones sobre análisis posteriores o técnicas de modelado (Alvares, 2024).

Se recomienda visualizar las series temporales para reconocer su comportamiento, tendencias y posibles irregularidades. La descomposición en sus tres componentes tendencia, estacionalidad y residual facilita el estudio de cada uno por separado, lo que contribuye a identificar patrones subyacentes y mejorar la precisión de los pronósticos (Alvares, 2024).

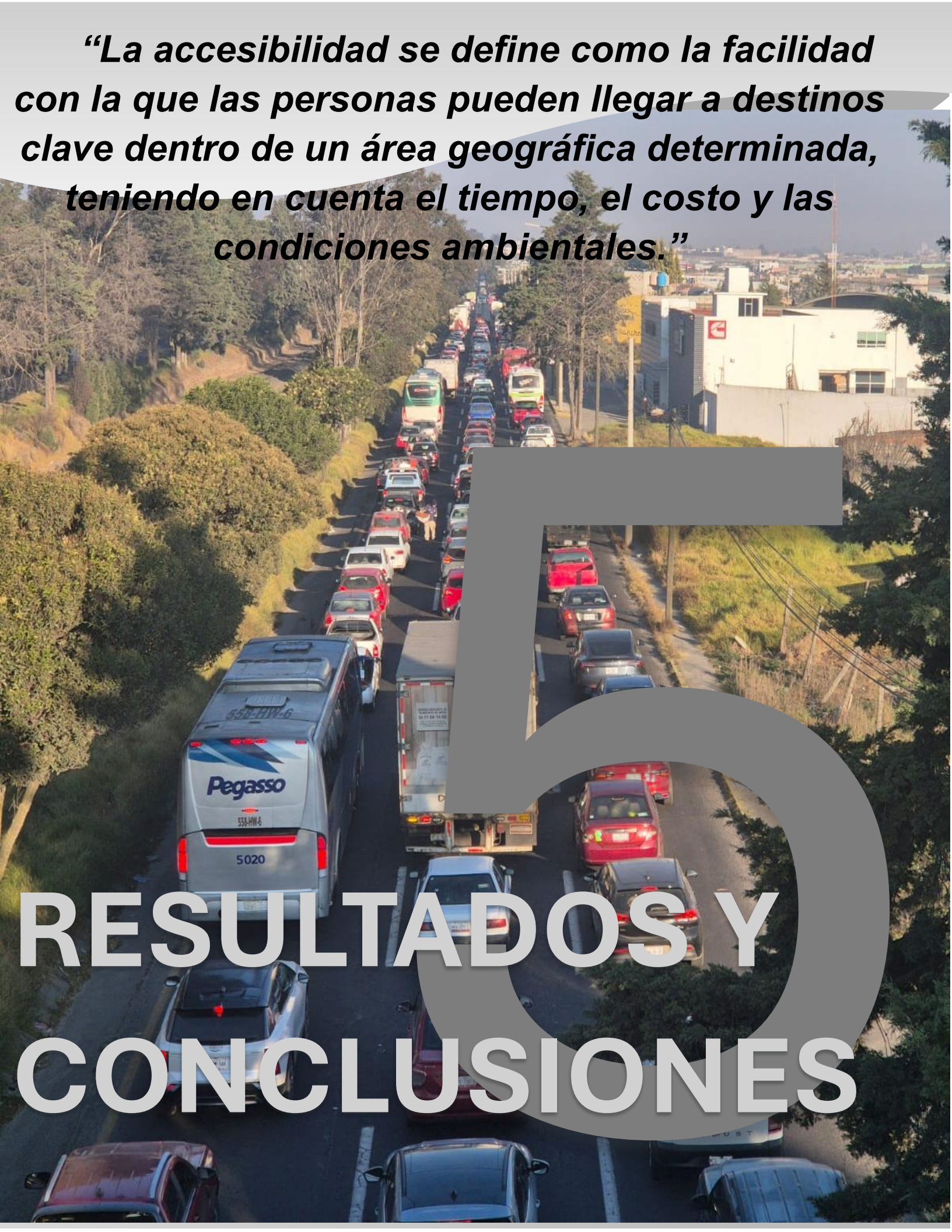
Posteriormente, es necesario calcular medidas estadísticas como la media, mediana, desviación estándar, asimetría y curtosis, que permiten describir la tendencia central, la variabilidad y la forma de la distribución. También debe evaluarse la relación entre una serie y sus valores pasados mediante la función de autocorrelación, la cual ayuda a detectar estacionalidad u otras dependencias temporales (Alvares, 2024).

Un aspecto clave es la estacionariedad, condición fundamental en muchos modelos de series temporales. Una serie estacionaria mantiene constantes su media, varianza y autocorrelación a lo largo del tiempo. Para verificar este supuesto se aplican pruebas como la Dickey-Fuller aumentada. En caso de no cumplirlo, se pueden aplicar transformaciones como la diferenciación o la eliminación de tendencia (Alvares, 2024).

Finalmente, los valores atípicos deben considerarse cuidadosamente, ya que pueden distorsionar las medidas estadísticas, reducir la precisión de los pronósticos o señalar eventos inusuales. Su detección puede realizarse mediante técnicas estadísticas o enfoques de aprendizaje automático (Alvares, 2024).

En conclusión, el análisis exploratorio de series temporales requiere una combinación de técnicas visualización, medidas estadísticas, descomposición, autocorrelación y detección de valores atípicos para lograr una comprensión integral de los datos. La aplicación conjunta de estas herramientas permite obtener una visión holística y tomar decisiones fundamentadas sobre análisis posteriores y modelos predictivos (Alvares, 2024).

“La accesibilidad se define como la facilidad con la que las personas pueden llegar a destinos clave dentro de un área geográfica determinada, teniendo en cuenta el tiempo, el costo y las condiciones ambientales.”



5

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

CAPITULO 5

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

RESULTADOS OBTENIDOS UNA VEZ APLICADA LA METODOLOGIA PROPUESTA.

El capítulo tiene como objetivo mostrar los resultados obtenidos a partir de la investigación y mediante la aplicación de la metodología propuesta, las conclusiones muestran los resultados obtenidos del modelo matemático a partir de su aplicación.

5.1. Resultados

Una vez realizada y aplicada la metodología descrita en el capítulo 4 , a partir del análisis de variables, se obtuvo un modelo matemático que combina un enfoque multivariable y espaciotemporal, considerando la accesibilidad como una función que depende de variables físicas, ambientales, económicas y de infraestructura vial. La accesibilidad se define como la facilidad con la que las personas pueden llegar a destinos clave dentro de un área geográfica determinada, teniendo en cuenta el tiempo, el costo y las condiciones ambientales.

Este modelo establece la relación entre el índice de accesibilidad y el tiempo de viaje afectado por el factor de atenuación espacial alpha, se proponen el índice de accesibilidad A_i para una ubicación i se define como:

$$A_{\mathrm{i}} = \sum_{\mathrm{j}} \left[O_{\mathrm{j}} \cdot exp \frac{(-\beta^1 T_{\mathrm{ij}} - \beta^2 C_{\mathrm{ij}} - \beta^3 E_{\mathrm{ij}})}{(1 + D_{ij}^{\alpha})} \right] \ldots\ldots\ldots ecuación\ 5.1$$

Donde:

O_j = Oportunidades (empleo, salud, educación) en el destino j.

T_{ij} = Tiempo de viaje entre i y j.

C_{ij} = Costo del viaje (combustible, peaje, transporte público).

E_{ij} = Factores ambientales (calidad del aire, temperatura, humedad).

D_{ij} = Distancia geográfica.

β_1, β_2, β_3 = Coeficientes calibrados empíricamente.

α = Parámetro de atenuación espacial.

Una función exponencial describe la relación entre una variable de entrada y una de salida, en la cual se aplican multiplicaciones sucesivas a un valor inicial para obtener el resultado correspondiente a cada entrada. Estas funciones pueden representar tanto procesos de crecimiento como de decrecimiento. Su aplicación es amplia, ya que se emplean para modelar fenómenos como el crecimiento poblacional, celular y financiero, así como la depreciación de bienes, el decaimiento radiactivo y el consumo de recursos.

Se realizó una primera simulación con datos sintéticos, es decir la información fue generada artificialmente mediante algoritmos que imitan las características y patrones de los datos reales para la accesibilidad, utilizándose para entrenar modelos de Machine Learning, se realizaron pruebas con Python ahorrando tiempo y recursos.

Estos datos artificiales conservan las propiedades estadísticas siendo cruciales en campos como el tráfico donde los datos reales son escasos , considerando variables como el tiempo de viaje, costo, factores ambientales y distancia geográfica. La simulación evalúa cuatro escenarios distintos mediante un modelo matemático y visualiza los resultados en una gráfica.

Código en Python

Simulación del Índice de Accesibilidad Urbana

Este cuaderno muestra cómo modelar y visualizar el **índice de accesibilidad** en función del tiempo de viaje usando una función matemática multivariable. Se consideran factores como oportunidades disponibles, tiempo de traslado, costo del viaje, factores ambientales y distancia geográfica.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

Definición de parámetros y función del modelo

```
# Oportunidades y variables base
Oj = 100 # oportunidades
Tij = np.linspace(5, 60, 100) # tiempo de viaje (min)
Cij = Tij * 0.1 # costo proporcional
Eij = np.random.normal(loc=1.0, scale=0.1, size=len(Tij))  # factores ambientales
Dij = Tij # distancia proporcional

# Función del índice de accesibilidad
def calcular_Ai(Oj, Tij, Cij, Eij, Dij, beta1, beta2, beta3, alpha):
    numerador = Oj * np.exp(-beta1 * Tij - beta2 * Cij - beta3 * Eij)
    denominador = 1 + Dij ** alpha
    return numerador / denominador
```

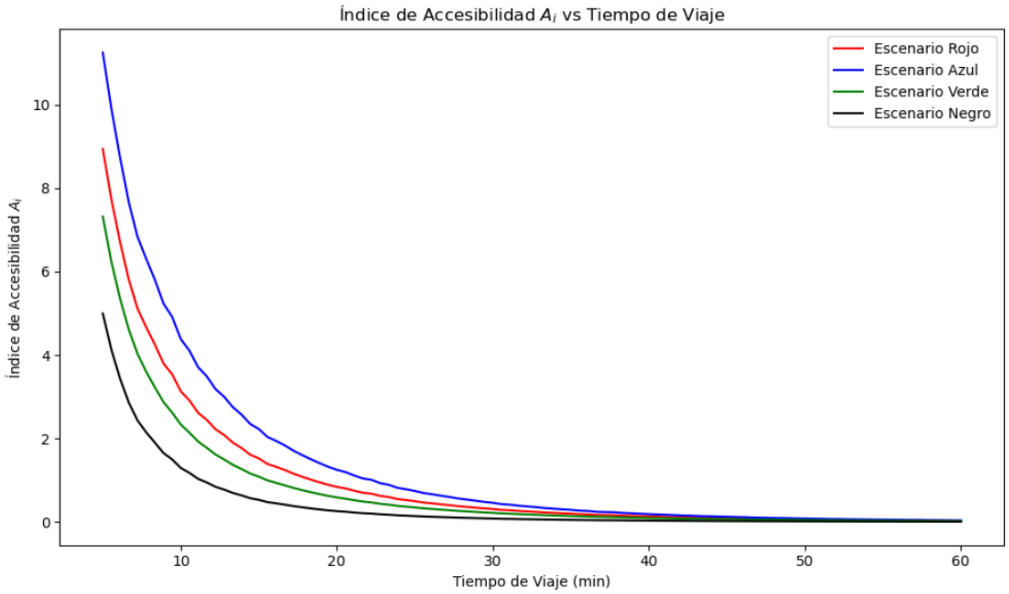
Simulación de cuatro escenarios

```
Ai_rojo = calcular_Ai(Oj, Tij, Cij, Eij, Dij, 0.05, 0.03, 0.1, 1.2)
Ai_azul = calcular_Ai(Oj, Tij, Cij, Eij, Dij, 0.06, 0.02, 0.1, 1.0)
Ai_verde = calcular_Ai(Oj, Tij, Cij, Eij, Dij, 0.04, 0.04, 0.05, 1.4)
Ai_negro = calcular_Ai(Oj, Tij, Cij, Eij, Dij, 0.05, 0.03, 0.1, 1.6)
```

Visualización del índice de accesibilidad

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(Tij, Ai_rojo, label='Escenario Rojo', color='red')
plt.plot(Tij, Ai_azul, label='Escenario Azul', color='blue')
plt.plot(Tij, Ai_verde, label='Escenario Verde', color='green')
plt.plot(Tij, Ai_negro, label='Escenario Negro', color='black')

plt.xlabel('Tiempo de Viaje (min)')
plt.ylabel('Índice de Accesibilidad $A_i$')
plt.title('Índice de Accesibilidad $A_i$ vs Tiempo de Viaje')
plt.legend()
plt.grid(False)
plt.tight_layout()
plt.show()
```



La gráfica muestra cómo disminuye el índice de accesibilidad conforme aumenta el tiempo de viaje, en diferentes escenarios con parámetros diversos. Cada curva representa un escenario con parámetros distintos que podrían reflejar variaciones en infraestructura, costos o condiciones ambientales.

Mediante el algoritmo se pretende conocer el comportamiento del modelo con datos sintéticos, en este modelo considera un vector tiempo Tij, la línea crea una variable Tij un array de NumPy que contiene exactamente 100 números, distribuidos uniformemente, que van desde 5 hasta 60 (ambos inclusive). Estos valores representan 100 posibles tiempos de viaje, medidos en minutos.

La ecuación 2 , significa que la variable Cij está siendo asignada con un valor del 10% (0.1) del valor de la variable Tij. El costo proporcional aclara que esta operación calcula un costo que es directamente proporcional a Tij. Los factores ambientales Eij se generan a partir de números aleatorios que siguen experimentos probabilísticos con una distribución normal o gaussiana utilizando la biblioteca NumPy.

$$Cij = Tij * 0.1 \dots\dots\dots ecuación\ 5.2$$

En el contexto de problemas de optimización o modelos de transporte/movilidad, la notación $Dij = Tij$ significa que la distancia o el costo de viaje entre dos puntos o zonas i y j (representado por Dij) se considera igual al tiempo de viaje entre esos mismos puntos (Tij).

Comúnmente Dij se describe a la matriz de distancias, donde cada elemento es la distancia física entre el punto i y el punto j. Mientras Tij se refiere a la matriz

de tiempos, donde cada elemento es el tiempo (por ejemplo, en minutos u horas) que se tarda en viajar del punto i al punto j.

La relación $Dij = Tij$ de proporcionalidad directa simplificada, asume que el tiempo de viaje es directamente proporcional a la distancia, con un factor de proporcionalidad implícito de 1 (o que las unidades de tiempo y distancia son las mismas o intercambiables para los propósitos del modelo), haciendo una suposición de que el tiempo y la distancia son intercambiables en una relación simple, lo cual es una simplificación común en ciertos modelos de transporte.

La función del índice de accesibilidad, Ai, define un modelo matemático, relacionado con modelos de interacción/movilidad geográfica. Calcula una puntuación (Ai) basada en varios parámetros de entrada, combinando un efecto multiplicativo en el numerador y un efecto de amortiguación en el denominador.

La función calcula un valor numérico (Ai) utilizando una fórmula específica. La estructura sugiere que Ai representa una medida de accesibilidad, atracción o potencial de interacción entre ubicaciones, donde el número de oportunidades Oj es el origen o demanda en un lugar. Tij, Cij, Eij son medidas de impedimento o costo entre dos puntos, variables de fricción, $beta1, beta2, beta3, alpha$ son parámetros que modulan la influencia de los diferentes factores de impedimento.

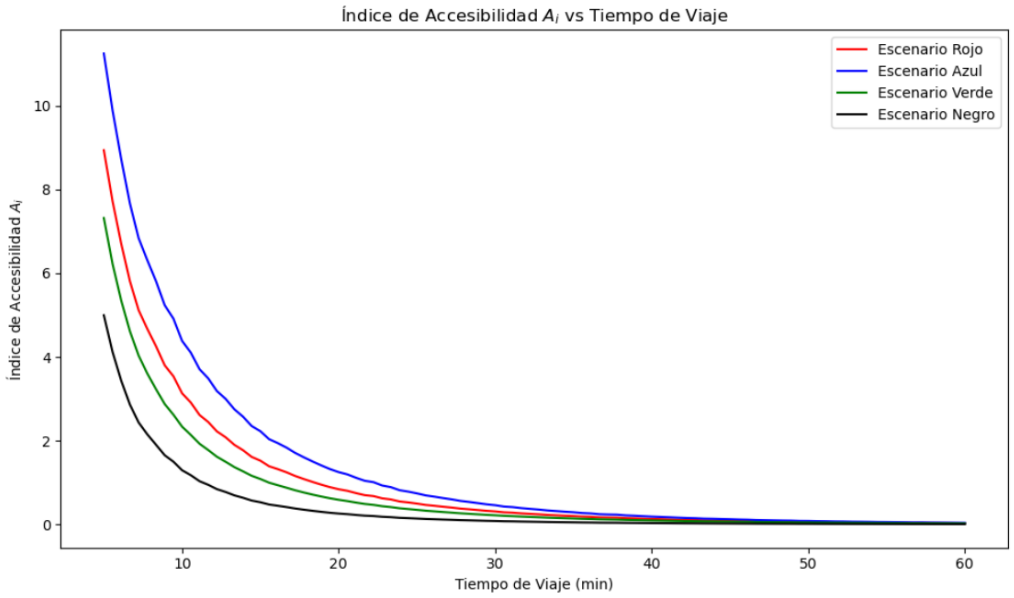
Es una función exponencial que modela cómo la atracción de Oj disminuye exponencialmente a medida que aumentan los costos o impedimentos (Tij, Cij, Eij), ponderados por sus respectivos parámetros beta. Un signo negativo

(-) dentro del exponente significa que, a mayor tiempo, menor es el valor del índice de accesibilidad.

El código realiza la simulación de cuatro escenarios representados en la figura 5.1, para el índice de accesibilidad Ai, cada una con diferentes conjuntos de parámetros, para calcular y almacenar cuatro valores distintos: $Ai_rojo,\ Ai_azul,\ Ai_verde\ y\ Ai_negro$. La curva en color azul tiene un coeficiente beta1 (β_1) más alto para el tiempo de viaje (0.06) en comparación con el rojo (0.05), lo que significa que el tiempo de viaje tiene un mayor impacto negativo en la accesibilidad en el escenario azul.

De tal manera que los escenarios verde y negro presentan las mejores condiciones respecto al tiempo, y en consecuencia mejores condiciones en el índice de accesibilidad, esto permite interpretar los resultados, a medida que aumenta el tiempo de viaje, el índice de accesibilidad disminuye.

Figura 5.1 Gráfica donde se comparan los cuatro escenarios



Una vez que se comprobó la eficiencia del modelo con datos sintéticos y se obtuvieron los resultados esperados, realizo otra simulación utilizando datos urbanos típicos obtenidos de plataformas como Google Maps, Outscraper, Rutas Punto a Punto – SCT, OpenWeather. Se evaluaron diez escenarios variando los parámetros del modelo. El resultado es un conjunto de puntos que muestran cómo disminuye el índice de accesibilidad al aumentar el tiempo de viaje bajo diferentes condiciones. Este modelo puede aplicarse para evaluar la accesibilidad urbana a diversos servicios, tales como:

- Servicios públicos (hospitales, escuelas, administración pública).
- Servicios privados (comercios, bancos, oficinas).
- Planeación de infraestructura (ciclovías, optimización del transporte público).
- Salud urbana y planificación climática (corredores de calidad del aire, mapas de estrés por movilidad).

5.1.1. Simulación del Índice de Accesibilidad Urbana

Esta investigación presenta un ejemplo de simulación numérica del Índice de Accesibilidad Urbana, considerando variables como el número de oportunidades, tiempo de viaje, costo, factores ambientales y distancia geográfica. La simulación evalúa diez escenarios distintos mediante un modelo matemático y visualiza los resultados en una gráfica.

Código en Python (explicado)

Simulación del Índice de Accesibilidad Urbana

Este cuaderno muestra cómo modelar y visualizar el índice de accesibilidad en función del tiempo de viaje usando una función matemática multivariable. Se

consideran factores como oportunidades disponibles, tiempo de traslado, costo del viaje, factores ambientales y distancia geográfica.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
```

Función del modelo

```
# Función del índice de accesibilidad
def calcular_Ai(Oj, Tij, Cij, Eij, Dij, beta1, beta2, beta3, alpha):
    numerador = Oj * np.exp(-beta1 * Tij - beta2 * Cij - beta3 * Eij)
    denominador = 1 + Dij ** alpha
    return numerador / denominador
```

Lectura de parámetros

```
df = pd.read_csv('escenarios04.csv')
print("Datos básicos:")
print(df)
```

```
Datos básicos:
Escenarios    Oj  Tiempo  Costo                    Unnamed: 4   E  \
0            1  268      60    159       automóvil Menos de 1800   9
1            2  268      80    197                     1801-2700   8
2            3  268      73    223                     1271-3700  11
3            4  268      78    240                   Mas de 3701  16
4            5  268      80    142               autobus 3 ejes   17
5            6  268      78    163               autobus 4 ejes   18
6            7  268      73    139                  motocicleta   16
7            8  268      80    198                       pick up  13
8            9  268      70    223       automóvil con remolque   11
9           10  268      65    249  automóvil con dos remolques   10

   Distancia  alpha
0       65.9   0.38
1       65.9   0.51
2       65.9   0.46
3       65.9   0.51
4       65.9   0.51
5       65.9   0.49
6       65.9   0.51
7       65.9   0.51
8       65.9   0.44
9       65.9   0.41
```

Asignación de variables a partir de datos

```
Oj_1 = df.Oj
Tij_1 = df.Tiempo
Cij_1 = df.Costo
Eij_1 = df.E
Dij_1 = df.Distancia
alpha = df.alpha
escenarios = np.array([1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10])
```

Cálculo de A para distintos escenarios

```
Ai_rojo_1=calcular_Ai(Oj_1, Tij_1, Cij_1, Eij_1, Dij_1, 0.05, 0.005, 0.0, alpha)
Ai_rojo_1
```

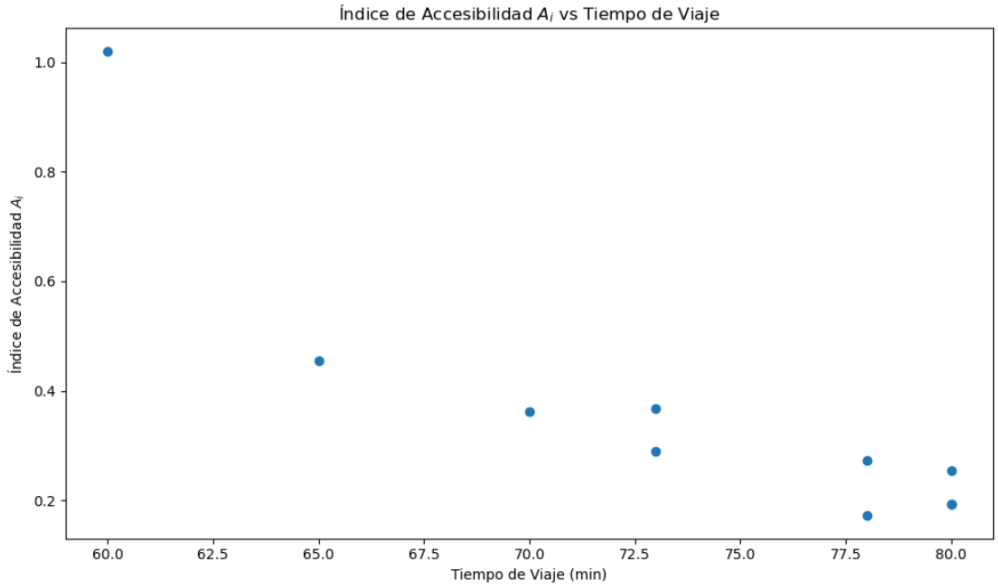
```
0    1.019344
1    0.193665
```

```
2    0.290390
3    0.172627
4    0.254966
5    0.273337
6    0.367283
7    0.192700
8    0.362833
9    0.455524
dtype: float64
```

Figuras

```
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(Tij_1, Ai_rojo_1)
plt.xlabel('Tiempo de Viaje (min)')
plt.ylabel('Índice de Accesibilidad $A_i$')
plt.title('Índice de Accesibilidad $A_i$ vs Tiempo de Viaje')
#plt.legend()
plt.grid(False)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

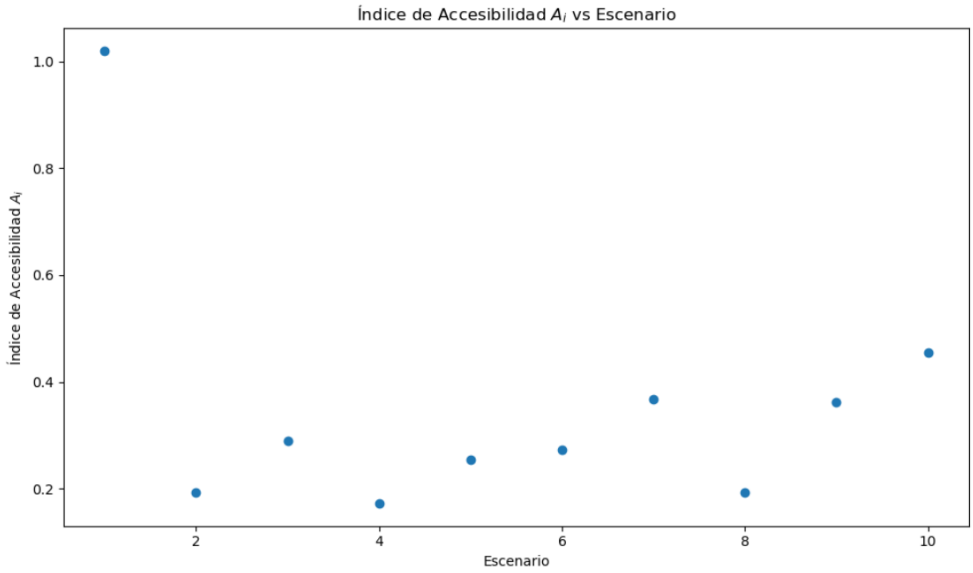
Gráfica Resultante: Índice de accesibilidad vs tiempo de viaje




```
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(escenarios, Ai_rojo_1)

plt.xlabel('Escenario')
plt.ylabel('Índice de Accesibilidad $A_i$')
plt.title('Índice de Accesibilidad $A_i$ vs Tiempo de Viaje')
#plt.legend()
plt.grid(False)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Gráfica Resultante: Índice de accesibilidad vs Escenarios



A continuación, se presentan los resultados correspondientes a los diez escenarios planteados, los cuales consideran distintas posibilidades tomando como caso de estudio el tramo de la autopista Toluca–Atlacomulco, con una extensión de 52 km y conformada por cuatro carriles dos en cada sentido que atraviesan los municipios de Atlacomulco, Jocotitlán, Ixtlahuaca, Almoloya de Juárez y Toluca (Movilidad, 2024).

Esta vialidad se enlaza con otras autopistas estratégicas, como el Libramiento Ruta de la Independencia Bicentenario y la Toluca–Zitácuaro Ramal a Valle de Bravo, lo que permite integrar la Zona Metropolitana del Valle de Toluca con la región norte del Estado de México. Asimismo, facilita la conexión hacia el occidente y norte del país mediante las autopistas Atlacomulco–Guadalajara y Arco Norte, respectivamente (Movilidad, 2024).

Esta carretera es una de las señaladas como una de las más peligrosas y con más accidentes en el Valle de Toluca, apodada la "Calzada de las Cruces", debido a la alta siniestralidad, incluyendo múltiples percances mortales y peatones,

especialmente por la falta de infraestructura peatonal y la neblina estacional. Los accidentes se concentran también en accesos y entronques como los de San Pablo Autopan, Mina México, y cerca de la caseta del Dorado, con factores como baches, cruces improvisados y exceso de velocidad (Rodríguez, 2025).

En los últimos tres años, en la carretera Toluca-Palmillas se reportaron más de dos mil accidentes viales, de acuerdo con la organización civil Eco Renacimiento (2024). Un promedio de tres accidentes mortales por semana se registraba anteriormente, solo superada por Paseo Tollocan. La carretera Toluca-Palmillas es una vía de alta peligrosidad en el Estado de México, donde la combinación de tráfico, falta de infraestructura y condiciones climáticas genera un alto número de incidentes viales (Rodríguez, 2025).

En la carretera Toluca-Palmillas se registra tránsito diario promedio anual de 27 mil 800 vehículos, un número que no permite cruzar a los peatones de manera segura. A lo largo de esta carretera existen cuatro puentes peatonales que se ubican a una distancia de poco más de un kilómetro entre sí, por ello hay quienes deciden arriesgar su vida y cruzar corriendo antes de caminar tal distancia (Rodríguez, 2025).

En el año 2024, se reportaron por parte de los Servicios de Urgencias 96 colisiones, de este número 36 resultaron con víctimas, 24 con decesos y 32 solo lesionados. Aunado a esto, vecinos de la zona indican que quienes utilizan los puentes se han enfrentado a la inseguridad que se genera principalmente en dos de ellos, los cuales se encuentran ubicados a la altura de San Pablo Autopan y San Carlos Autopan. La mayoría de estos puentes además de ser muy largos, no cuentan con alumbrado (Rodríguez, 2025).

Todos los escenarios se componen del número de oportunidades, es decir las oportunidades de realizar el trayecto mencionado por motivos de trabajo, los data sets fueron obtenidos a través de la plataforma de Outscraper. El tiempo de viaje se determinó a partir de datos de Google Maps.

Se estableció el rango de tiempo en minutos para las horas pico y las horas valle, así mismo se obtuvo el tiempo promedio dependiendo de los rangos, los colores también fueron obtenidos de Google Maps como un semáforo de velocidad, dependiendo del tiempo de recorrido, es decir entre más lento, el color se hace más oscuro, los datos obtenidos son:

Tabla 5.1. Tiempos obtenidos para el modelo

Horario	Rango de tiempo	Tiempo promedio
5:00	50-70	60
7:00	60-100	80
9:00	55-90	73
11:00	55-100	78
13:00	60-100	80
15:00	55-100	78
17:00	55-90	73
19:00	60-100	80
21:00	55-85	70
23:00	55-75	65

El costo del combustible se obtuvo de la plataforma SCT Rutas punto a punto, considerando el costo de combustible más la tarifa de la caseta. La distancia del tramo es de 65.9 Km, cabe resaltar que el modelo se basó principalmente en determinar el índice de accesibilidad vs el tiempo de viaje.

Un factor relevante es el parámetro de atenuación espacial llamado aplha (α). Este parámetro se refiere a la medida de la pérdida de intensidad de una señal

(como ondas electromagnéticas, luz o sonido) a medida que se propaga a través de un medio físico o el espacio libre. Esta reducción de energía es proporcional a la distancia recorrida y se debe a varios factores, incluyendo la dispersión, la absorción y la expansión geométrica del frente de onda, generalmente se utiliza para modelar cómo la influencia o la conectividad disminuye con la distancia física o espacial (Martínez, 2017).

Este concepto es aplicado a Telecomunicaciones y es fundamental para el diseño y planificación de radioenlaces y redes de fibra óptica, ya que determina el alcance y la calidad de la comunicación, en Acústica para entender cómo disminuye la intensidad del sonido con la distancia en diferentes medios.

Un aspecto clave en estos sistemas es la Pérdida de Potencia, en este caso la atenuación se expresa comúnmente en decibelios (dB) o como un coeficiente de atenuación (usualmente en unidades de dB/unidad de longitud). Un valor más alto indica una mayor pérdida de señal a lo largo de una distancia determinada.

Realizando una homologación en los conceptos la perdida de la potencia es la accesibilidad, es decir, la accesibilidad se pierde a mayor tiempo de viaje , entonces se divide el tiempo entre la distancia, el tiempo serán los decibelios, a mayor tiempo de recorrido menor es la accesibilidad, por lo tanto, dividendo el tiempo entre la distancia sería similar a la unidad de longitud de onda, es decir si se obtiene un valor alto indica una mayor pérdida de la accesibilidad a lo largo de cierta distancia.

Justamente, alpha se expresa en la ecuación 5.3 como tiempo/ distancia, es decir en la ecuación 5.4 , alpha está en función del inverso de la velocidad, si el tiempo en minutos es mayor a la distancia en km entonces alfa es mayor a la unidad,

pero si el tiempo es menor a la distancia alfa es menor a la unidad y la accesibilidad aumenta.

$$\alpha = \frac{t}{d} \dots\dots\dots ecuación\ 5.3$$

$$\frac{1}{v} \dots\dots\dots ecuación\ 5.4$$

Sin embargo, se debe considerar una constante de escala para alpha, en el caso de tiempos de recorridos cortos. En movilidad laboral, un desplazamiento temporal para bienestar, 30-45 min es ideal, un trayecto de esta duración permite un equilibrio adecuado entre el tiempo dedicado al trabajo y el tiempo personal, lo que se traduce en una mayor satisfacción y bienestar general, en términos de potencia de la red este coeficiente representa la reducción estimada de los decibelios, donde el sonido puede ser perjudicial para la salud auditiva con exposición prolongada.

Para México el tiempo promedio es alto, 71 min en transporte público; y si es tiempo de trabajo, se considera si es con transporte de la empresa o transporte público, en este sentido, si divide el tiempo ideal de viaje de un trabajador, es decir 30 minutos entre el tiempo de viaje en México de 71 minutos, se obtiene una constante de escala del alpha para la accesibilidad para tiempos cortos, para esta investigación se obtiene un coeficiente de ajuste de 0.422535211.

$$constante\ de\ escala\ = \frac{30}{71} = \ 0.422535211 \dots\dots\dots ecuación\ 5.5$$

Con este coeficiente de mejora lo que se pretende es obtener “beneficios” para tiempos de viaje pequeños. Entonces el parámetro de atenuación espacial alpha se establece para tiempos de viaje cortos como:

$$Alpha\ (\alpha) = \left(\frac{tiempo\ ideal}{tiempo\ promedio\ en\ México}\right) * \left(\frac{tiempo\ de\ trayecto}{distancia\ del\ trayecto}\right) \ldots\ldots ecuación\ 5.6$$

$$constante\ de\ escala = (\ tiempo\ ideal\ /\ tiempo\ promedio\ en\ México) \ldots\ldots\ldots ecuación\ 5.7$$

Los factores ambientales (E) (calidad del aire, temperatura, humedad), fueron incluidos en el modelo considerando la temperatura del punto medio del tramo, es decir en este caso el municipio de Ixtlahuaca, los datos obtenidos se tabularon a partir de la variación de la temperatura durante el día:

Tabla 5.2.Datos considerados para los factores ambientales

Horario	E (temperatura)
5:00	9
7:00	8
9:00	11
11:00	16
13:00	17
15:00	18
17:00	16
19:00	13
21:00	11
23:00	10

Los coeficientes calibrados empíricamente $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, son valores numéricos ajustados a valores mínimos incluso cerca del cero, con el fin de ajustar los datos obtenidos debido a la complejidad del fenómeno y el análisis de los datos, garantizando que los resultados del modelo coincidan con precisión con el fenómeno observado. Los parámetros $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ controlan la sensibilidad del modelo a cada factor (tiempo, costo, etc.).

Estos coeficientes de fricción o sensibilidad que determinan la importancia de $Tij, Cij\ y\ Eij$, respectivamente, en la reducción de la interacción (un valor negativo en el exponente significa que cuanto mayor es el valor, menor es la interacción) y alpha como un parámetro de impedancia que controla cómo la distancia Dij afecta la interacción.

Por lo tanto, el numerador utiliza la función exponencial para modelar cómo los costos de viaje ($Tij,\ Cij,\ Eij$) reducen la accesibilidad o atracción del origen Oj, el denominador utiliza el exponencial para modelar cómo la distancia Dij disminuye la interacción (común en los modelos de gravedad, donde la fuerza disminuye con la distancia al cuadrado o a alguna potencia alpha).

Cada coeficiente de calibración $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, representa en el modelo; β_1 sensibilidad al tiempo de viaje (T_{ij}), β_2 sensibilidad al costo de viaje (C_{ij}), β_3 sensibilidad a factores ambientales (E_{ij}), por ejemplo, la temperatura y α atenuación espacial (potencia de la distancia (D_{ij}), en el denominador.

Si se toman los 10 escenarios con $(O_j = 268)$, tiempos, costos, factores ambientales (E_{ij}), distancia (D=65.9) km y α específicos por escenario, si se comparan los coeficientes del modelo de la primera simulación con los de la segunda, el único escenario rojo en la segunda simulación tiene valores de $\beta_1 = 0.05,\ \beta_2 = 0.005\ y\ \beta_3 = 0.0$.

El escenario azul$(\beta_1 = 0.06)\ (más\ alto\ que\ el\ rojo), manteniendo\ \beta_2, \beta_3$ en la primera simulación. En promedio el cambio (azul vs. rojo) es de −52.04% (desviación estándar ≈ 3.42%). Esto confirma empíricamente que incrementar β_1 de

0.05 a 0.06 reduce de forma marcada el índice (A_i), especialmente en escenarios con tiempos más altos.

Es decir β_1 domina el cambio, debido a la estructura del numerador como un exponente, un aumento de beta escala el numerador, esto ocurre en todos los escenarios, por lo que el impacto de β_1 crece linealmente con el tiempo (T_{ij}). Así mismo, β_2 establece el costo en la calibración, las contribuciones al exponente por costo van de −0.71 a −1.245, según el rango de costos en los 10 escenarios. Ese rango significa que el factor de costo por sí mismo reduce el numerador.

Finalmente, β_3 (ambiental), no afectaron el numerador , sin embargo, si se calibrara ($\beta_3 > 0$), el efecto sería exponencial e incremental con (E_{ij}), igual que con tiempo y costo. Entonces, la función calcula una medida de interacción que es directamente proporcional a la atracción del origen e inversamente proporcional a la distancia y a otros costos asociados al viaje, la tabla 5.3 resume los valores que toman los coeficientes betas.

Tabla 3.3 Tabla de valores para Beta

Coeficiente	Rango observado / usado	Interpretación	Impacto principal
β_1 (tiempo de viaje)	0.05 – 0.06	Incrementar de 0.05 a 0.06 provoca una reducción promedio de −52.04% en A_i.	El efecto crece linealmente con el tiempo T_{ij}.
β_2 (costo)	0.005 fijo; contribuciones al exponente entre −0.71 y −1.245 según costos	Establece la penalización por costo en la calibración.	Reduce el numerador; efecto moderado pero consistente.
β_3 (ambiental)	0.0 en la simulación actual; potencial >0	No afecta actualmente. Si se calibrara >0, tendría efecto exponencial con E_{ij}.	Podría añadir penalización incremental proporcional a factores ambientales.

- β_1 es el parámetro más sensible: Pequeños cambios generan grandes variaciones en accesibilidad.
- β_2 mantiene un rango de efecto negativo moderado, dependiente del costo de los escenarios.
- β_3 aún no calibrado, pero su inclusión podría modificar significativamente el modelo al introducir factores ambientales.

5.1.2. Resultados para los escenarios I-X

El estudio evalúa la accesibilidad de la autopista Toluca–Atlacomulco bajo diferentes condiciones de viaje, variando principalmente; tiempo de viaje (T_{ij}), costo de viaje (C_{ij}), parámetro de atenuación espacial (α), factor ambiental (E_{ij}), relacionado con la temperatura, tipo de vehículo y horario. En todos los escenarios, el número de oportunidades (O_j = 268) y la distancia del tramo (65.9 km) permanecen constantes.

La accesibilidad (A_i) depende de la interacción entre tiempo, costo, condiciones ambientales y tipo de vehículo. Los principales hallazgos respecto al escenario con mayor accesibilidad, es decir el mejor escenario es el I, a las 05:00 hrs, un índice de accesibilidad de A_i = 1.0193440, esto debido a un mejor desempeño por menor tiempo de viaje (60 min), menor costo del viaje, mejores condiciones ambientales (temperatura baja antes del amanecer) y menor atenuación espacial.

Por el contrario, el escenario con el peor desempeño es el IV, a las 11:00 hrs. con un índice de accesibilidad A_i = 0.1726270, su desempeño es bajo por mayor

costo, tiempo relativamente alto, temperatura más elevada y factor de atenuación mayor, una vez estudiados todos los escenarios se puede decir que: el horario temprano (05:00 hrs) ofrece las mejores condiciones de accesibilidad por baja congestión, menor temperatura y bajo costo.

La accesibilidad empeora hacia el mediodía, especialmente a las 11:00 hrs., debido al aumento de temperatura, costos y tiempos. Por la tarde–noche, la accesibilidad varía por tipo de vehículo, pero mejora nuevamente en horarios tardíos como las 23:00 hrs. El tipo de vehículo y su costo influyen considerablemente en el resultado final.

Respecto al parámetro α (alpha) es un factor que controla cuánto “penaliza” la accesibilidad la distancia, el costo, el tiempo de viaje o cualquier variable que dificulte el desplazamiento. En modelos de accesibilidad gravitacional o potencial, α ajusta la sensibilidad del modelo ante la separación espacial. Esto significa que cuando α aumenta, la accesibilidad disminuye más rápido con la distancia o el costo.

Tabla 5.4. Comparativa general de los escenarios I–X

Escenario	Horario	Oportunidades (Oj)	Tiempo (T_{ij}, min)	Costo (C_{ij})	Distancia (D_{ij} km)	α	Factor ambiental (E_{ij})	Accesibilidad (A_i)	Posición
I	05:00	268	60	159	65.9	0.3847	9	**1.019344**	**1°**
II	07:00	268	80	197	65.9	0.5129	8	0.193665	8°
III	09:00	268	73	223	65.9	0.4648	11	0.29039	5°
IV	11:00	268	78	240	65.9	0.5129	16	**0.172627**	**10°**
V	13:00	268	80	142	65.9	0.5129	17	0.254966	7°
VI	15:00	268	78	163	65.9	0.4969	18	0.273337	6°
VII	17:00	268	73	139	65.9	0.5129	16	0.367283	3°
VIII	19:00	268	80	198	65.9	0.5129	13	0.1927	9°
IX	21:00	268	70	223	65.9	0.4488	11	0.362833	4°
X	23:00	268	65	249	65.9	0.4167	10	0.455524	2°

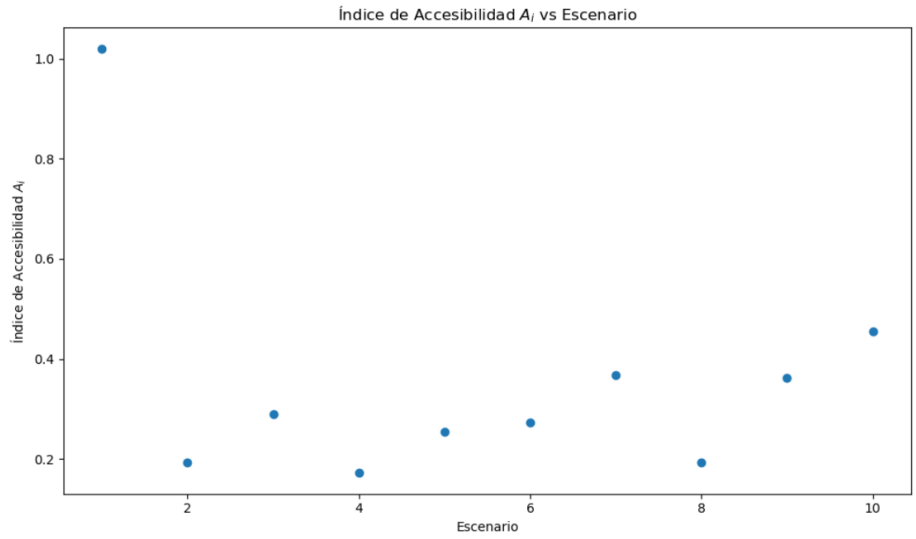
Mejor escenario: Escenario I (05:00 hrs), mayor accesibilidad (A_i = 1.0193440).

Peor escenario: Escenario IV (11:00 hrs), menor accesibilidad (A_i = 0.1726270).

La accesibilidad tiende a bajar entre 07:00 y 13:00 hrs. Se recupera por la tarde, especialmente en: Escenario VII (17:00 hrs), escenario IX (21:00 hrs), y el escenario X (23:00 hrs).

La figura 5.2 muestra los escenarios propuestos y se considera como el mejor el escenario al primero con un índice de accesibilidad más alto, por el contrario, el escenario cuatro tiene el índice más desfavorable.

Figura 5.2. Índice de accesibilidad vs Escenarios



Comparando los índices de accesibilidad, uno con el parámetro de atenuación espacial sin ninguna modificación y otro con la constante de escala, para tiempos cortos, aunque los tiempos de recorrido son de más de 30 minutos, se realizaron las pruebas para corroborar si el índice de accesibilidad aumenta.

Impacto directo de α en los resultados

Si establecemos un valor de penalización, se puede establecer que a un α más alto es igual a mayor penalización, cuando α toma valores altos, el modelo se vuelve más sensible a los factores negativos del viaje (costo, tiempo, distancia). Se reduce notablemente el valor del índice de accesibilidad A_i. Pequeños incrementos en tiempo o costo producen caídas grandes en accesibilidad.

Se observa, en el escenario II (α = 0.5129), donde la accesibilidad baja a 0.193665, incluso cuando el tiempo y el costo no son los peores. En el escenario IV, también con α = 0.5129 y temperatura alta, donde el índice cae al peor valor 0.172627.

5.2. Conclusión de los resultados

El modelo matemático obtenido combina un enfoque multivariable y espaciotemporal para definir la accesibilidad como una función de variables físicas, ambientales, económicas y de infraestructura vial. El índice de accesibilidad se define mediante una ecuación que incluye oportunidades, tiempo de viaje, costo, factores ambientales y distancia geográfica, modulados por coeficientes beta y el parámetro de atenuación espacial alpha.

Se realizó una primera simulación utilizando datos sintéticos, generados con algoritmos para imitar las características de datos reales, lo cual permitió entrenar modelos de Machine Learning y ahorrar recursos. Esta simulación inicial evaluó cuatro escenarios distintos, demostrando cómo el índice de accesibilidad disminuye a medida que aumenta el tiempo de viaje bajo diferentes parámetros.

En este primer acercamiento, la función de accesibilidad es un modelo de interacción geográfica que utiliza una función exponencial en el numerador para reflejar cómo la atracción de oportunidades disminuye con los costos y un efecto de amortiguación en el denominador basado en la distancia.

El código Python implementa el cálculo del índice de accesibilidad y simula cuatro escenarios (Rojo, Azul, Verde, Negro) con diferentes coeficientes beta y parámetros alfa. La variable se define como un arreglo de 100 tiempos de viaje, que van de 5 a 60 minutos, y el costo se asigna como el 10% del tiempo de viaje.

La curva del escenario azul presenta un coeficiente más alto (0.06), lo que indica que el tiempo de viaje tiene un mayor impacto negativo en la accesibilidad en comparación con otros escenarios. Respecto a los coeficientes betas β_1 (tiempo) es el coeficiente más dominante en la calibración actual: aumentar de 0.05 a 0.06 reduce el índice de accesibilidad de 45–55% según el tiempo del escenario, β_2 (costo), aunque no cambió, ya impone una reducción importante en el numerador. Si se aumentara (β_2), el impacto sería comparable o mayor que el de β_1 en escenarios con altos costos.

Por lo tanto, se estima la sensibilidad marginal del índice de accesibilidad de cada variable (tiempo, costo, ambiente) con tus datos reales, y usa regresión/optimización para ajustar ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) que mejor reproduzcan el índice de accesibilidad observado, estos valores se estiman a través de su comportamiento determinados en la tabla 5.3.

Los valores de β_1 establecen pequeños cambios que generan grandes variaciones en accesibilidad, para β_2 se mantiene un rango de efecto negativo

moderado, dependiente del costo de los escenarios, β_3 aún no calibrado, pero su inclusión podría modificar significativamente el modelo al introducir factores ambientales. Después de verificar la eficiencia del modelo con datos sintéticos, se realizó otra simulación utilizando datos urbanos típicos obtenidos de plataformas como Google Maps y OpenWeather.

Este modelo puede aplicarse para evaluar la accesibilidad urbana a servicios públicos, servicios privados, planificación de infraestructura y salud urbana. La simulación evaluó diez escenarios con datos del tramo Toluca a Atlacomulco, una carretera conocida por su alta siniestralidad y condiciones de tráfico complejas.

La simulación numérica consideró oportunidades, tiempo de viaje (obtenido de Google Maps), costo (combustible más peaje) y factores ambientales (temperatura). Se utiliza el parámetro de atenuación espacial alpha, que modela cómo la influencia o conectividad disminuye con la distancia, análogo a la pérdida de potencia en telecomunicaciones.

Sin embargo, para tiempos de recorrido cortos, se introduce un coeficiente de ajuste de 0.422535211 para la constante de escala del parámetro alpha, basado en la división del tiempo ideal de viaje (30 minutos) entre el promedio en México (71 minutos).

Por lo tanto, se concluye que para el escenario I, con un tiempo de viaje de 60 minutos y factor ambiental (temperatura) de 9°C, presenta el índice de accesibilidad más alto (1.0193440), representando las condiciones ideales. Por el contrario, para el escenario IV, a las 11:00 am (temperatura de 16 y 78 minutos de viaje), el índice disminuyó a 0.1726270, siendo el peor escenario de accesibilidad.

El escenario I es considerado el mejor por tener el índice de accesibilidad más alto, mientras que el escenario IV tiene el índice más desfavorable. Los resultados confirman que el índice de accesibilidad disminuye conforme aumenta el tiempo de viaje, aunque los escenarios IX y X mejoran significativamente su índice al disminuir el tiempo de trayecto respecto a otros horarios.

La comparación final de los índices de accesibilidad con y sin la constante de escala para tiempos cortos demuestra un aumento en los índices en cada escenario propuesto. En consecuencia, se desarrolló y comprobó un modelo matemático multivariable y espaciotemporal capaz de cuantificar la accesibilidad en función de variables físicas, ambientales, económicas y de infraestructura vial, demostrando su eficacia mediante simulaciones con datos sintéticos y reales.

Los resultados evidencian que el índice de accesibilidad disminuye considerablemente a medida que aumenta el tiempo de viaje entre origen y destino, resaltando la importancia de optimizar los tiempos de desplazamiento para mejorar la movilidad urbana.

Coeficientes como la constante de escala, así como el parámetro de atenuación espacial , tienen un efecto significativo en las puntuaciones de accesibilidad, permitiendo ajustar el modelo a diferentes contextos y condiciones urbanas. Las condiciones ambientales, como temperatura y calidad del aire, influyen en el índice de accesibilidad, lo cual refleja la necesidad de considerar factores ambientales en la planificación de movilidad y servicios urbanos.

La adaptación del modelo con datos reales obtenidos de plataformas como Google Maps, Outscraper y SCT, demuestran su utilidad para evaluar escenarios

específicos, facilitando decisiones relacionadas con la infraestructura, el transporte y la salud urbana.

La comparación de múltiples escenarios, modificando variables como el tiempo de viaje, costos y condiciones ambientales, revela que condiciones óptimas y mejoras en infraestructura tienen un impacto positivo en la accesibilidad, mientras que condiciones adversas deterioran significativamente el índice.

El modelo puede ser empleado para la planificación urbana, optimización de rutas, evaluación de servicios públicos y privados, así como para el diseño de estrategias de movilidad sustentable y adaptación al cambio climático.

La investigación demuestra que un enfoque integrado y flexible, considerando variables físicas, ambientales y sociales, es fundamental para medir y mejorar la accesibilidad urbana, contribuyendo a una movilidad más eficiente, equitativa y sustentable.

CONCLUSIONES GENERALES

Conclusiones Generales

La presente investigación logró desarrollar, implementar y validar un modelo matemático multivariable y espaciotemporal para evaluar la accesibilidad urbana, integrando dimensiones físicas, económicas, ambientales y de infraestructura vial.

El capítulo 1 demuestra que la accesibilidad vial es un concepto complejo, evolutivo y multidimensional, influido por factores físicos, sociales, económicos y territoriales. Los autores revisados coinciden en que la accesibilidad no es solo distancia o tiempo, sino una interacción entre oportunidades, estructura urbana, transporte y condiciones socioeconómicas.

El análisis revela que las ciudades latinoamericanas enfrentan un círculo vicioso de expansión urbana descontrolada, dependencia del automóvil, periferias desconectadas, desigualdad territorial y altos costos temporales y monetarios para poblaciones vulnerables. La revisión teórica justifica la necesidad de construir modelos integrales que midan la accesibilidad con precisión y orienten decisiones hacia ciudades más equitativas, conectadas y sostenibles.

La accesibilidad se reconoce hoy como un factor esencial para la inclusión social, pues determina el acceso equitativo a servicios, empleo y actividades. La falta de accesibilidad genera desigualdades profundas, especialmente en zonas periféricas donde coinciden: dispersiones urbanas, dependencia del automóvil, altos costos de transporte, infraestructura deficiente y servicios públicos insuficientes.

Asimismo, el capítulo evidencia que el territorio urbano contemporáneo ha sido moldeado por un modelo de crecimiento disperso, donde las poblaciones vulnerables quedan relegadas a zonas lejanas con escasas oportunidades y mayores tiempos de traslado, lo cual constituye un elemento central de desigualdad socioespacial.

El análisis también resalta que la accesibilidad está vinculada al derecho a la ciudad, entendida como la posibilidad de todas las personas de desplazarse de manera segura, digna y autónoma, utilizando infraestructuras peatonales, ciclistas, transporte público y vialidades adecuadas. La accesibilidad, por tanto, es un componente clave del bienestar urbano y de la equidad social.

El capítulo concluye que medir la accesibilidad permite identificar desigualdades territoriales, evaluar impactos de infraestructura, optimizar redes de transporte y orientar políticas públicas. Su complejidad conceptual justifica la necesidad de modelos integrales capaces de incorporar múltiples variables físicas, sociales y económicas, lo cual fundamenta la construcción del modelo matemático desarrollado en la investigación.

En el capítulo 2 se concluye que las Smart Cities permiten mejorar la accesibilidad mediante tecnologías como sensores, IA, big data, IoT, plataformas digitales y sistemas de transporte inteligentes. Las ciudades inteligentes no solo buscan eficiencia, sino bienestar, sostenibilidad y equidad. Los modelos como la Ciudad de 15 Minutos destacan que acercar los servicios a la población reduce tiempos de viaje, contaminación y estrés.

Las Ciudades Inteligentes constituyen un modelo de transformación urbana basado en la integración de tecnologías digitales, sistemas de información y datos en tiempo real para mejorar la movilidad, la eficiencia de los servicios y la calidad de vida de los habitantes. Este enfoque incorpora plataformas, sensores, inteligencia artificial, redes de conectividad y herramientas digitales que permiten optimizar el funcionamiento de los sistemas urbanos, especialmente aquellos relacionados con la movilidad y la accesibilidad.

Asimismo, se evidencia que las Smart Cities no se limitan al uso de tecnología, sino que requieren un modelo integral con seis dimensiones fundamentales: gobernanza, movilidad, medio ambiente, economía, calidad de vida y ciudadanía, según el marco propuesto por Giffinger. Estas dimensiones estructuran los subsistemas urbanos y orientan la implementación de soluciones que buscan eficiencia, sostenibilidad e inclusión social.

El capítulo también concluye que la adopción de tecnologías inteligentes en ciudades de América Latina es desigual y heterogénea, influida fuertemente por la capacidad económica, institucional y tecnológica de cada metrópoli. Mientras urbes como Buenos Aires, Medellín, Santiago y Ciudad de México muestran mayor avance gracias a marcos institucionales robustos, infraestructura digital y programas estratégicos, otras ciudades apenas inician procesos de digitalización con proyectos aislados o pilotos.

A partir del análisis, se identifica que la movilidad inteligente es uno de los componentes más críticos dentro del concepto de ciudad inteligente, debido a su impacto directo en la accesibilidad urbana. Las soluciones implementadas como

gestión del tráfico, transporte público digitalizado, sensores, semaforización inteligente, integración modal, plataformas de datos abiertos y aplicaciones ciudadanas tienen el potencial de reducir congestión, mejorar tiempos de traslado y aumentar la seguridad.

También se muestra que modelos emergentes como la Ciudad de 15 Minutos replantean la organización urbana hacia la proximidad, la reducción del tiempo de desplazamiento y la descarbonización del transporte. Este enfoque prioriza la redistribución equitativa de servicios esenciales dentro de distancias caminables o ciclables, reafirmando que la accesibilidad es un elemento central para la sostenibilidad y el bienestar social.

En relación con México, el análisis concluye que la Ciudad de México se posiciona como una de las metrópolis más avanzadas del país gracias a la labor de la Agencia Digital de Innovación Pública, su conectividad digital, la expansión del WiFi público y el desarrollo de plataformas que integran servicios gubernamentales y datos abiertos. Estas iniciativas fortalecen los procesos de digitalización y contribuyen a mejorar la movilidad, la seguridad y la participación ciudadana.

El capítulo establece que, aunque las ciudades inteligentes representan una oportunidad para transformar la movilidad y mejorar la accesibilidad, también enfrentan retos significativos: desigualdades territoriales, limitada disponibilidad de recursos, dificultades de gobernanza, interoperabilidad tecnológica y riesgos de ampliar brechas sociales si la tecnología no se implementa con enfoque de equidad.

En el capítulo 3, se concluye que existen múltiples modelos para medir accesibilidad, cada uno útil para diferentes fines, algunos modelos con variables económicas explican cómo el acceso a mercados, mano de obra y costos influye en la localización industrial, los modelos con variables geográficas usan SIG, fotografías aéreas y redes viales para medir tiempos reales, velocidades y accesibilidad media global.

Los modelos basados en redes viales evalúan confiabilidad, vulnerabilidad y desempeño de la red ante interrupciones o congestión. Este capítulo demuestra que ningún modelo por sí solo captura toda la complejidad del fenómeno, y por ello se requiere un enfoque multivariable. La revisión fundamenta la creación del modelo final de la tesis, basado en interacción entre tiempo, costo, distancia, factores ambientales y estructura vial.

En este sentido se menciona que la accesibilidad vial es un fenómeno que no puede ser medido mediante un único enfoque, sino que requiere la integración de distintos modelos matemáticos desarrollados en contextos económicos, geográficos y de redes viales. Cada grupo de modelos aporta elementos esenciales para comprender la dinámica territorial y las condiciones que favorecen o limitan la movilidad en una región.

En primer lugar, los modelos basados en variables socioeconómicas muestran que la accesibilidad está relacionada con factores como el tamaño del mercado, el costo de la mano de obra, la especialización productiva y la proximidad a redes carreteras. Estos modelos evidencian que la localización industrial responde a la combinación de costos de transporte, disponibilidad de recursos y conectividad

territorial, y que la accesibilidad influye directamente en la competitividad económica regional.

En segundo lugar, los modelos basados en variables geográficas destacan la importancia de la red vial, la velocidad de operación, las isócronas y la distancia efectiva recorrida. Estos modelos utilizan herramientas como SIG y datos GPS para medir la accesibilidad desde una perspectiva operativa y espacial, permitiendo identificar zonas donde la infraestructura mejora o limita la conectividad. Además, la accesibilidad media global e integral se posiciona como un método robusto para evaluar los impactos de intervenciones viales.

Por otra parte, los modelos basados en redes viales incorporan elementos como la confiabilidad de la red, la vulnerabilidad de los enlaces, los tiempos de viaje bajo condiciones de congestión y los efectos de interrupciones en puntos críticos. Este enfoque revela que las fallas en secciones claves pueden reducir significativamente la accesibilidad general, lo que los convierte en herramientas indispensables para la gestión del riesgo, la planificación del transporte y la toma de decisiones en infraestructura estratégica.

En conjunto, los resultados del capítulo demuestran que cada familia de modelos captura dimensiones distintas pero complementarias: la económica, la espacial-operativa y la estructural de la red. Esto confirma que la accesibilidad es un fenómeno multicausal que requiere modelos híbridos capaces de integrar variables físicas, económicas, ambientales, sociales y de infraestructura.

El capítulo justifica la construcción de un modelo matemático multivariable, como el propuesto en la investigación, que sintetice los aportes de los tres enfoques revisados. El análisis realizado permite fundamentar que un modelo integral ofrece mayor capacidad para representar escenarios reales, evaluar condiciones de movilidad y apoyar la planificación urbana y vial con mayor precisión.

Las conclusiones del capítulo 4 muestran que la metodología desarrollada integra datos reales en tiempo casi real, obtenidos mediante APIs (Mapbox, OpenWeather, CRE), aplica técnicas estadísticas como análisis exploratorio de datos (EDA), análisis temporal, análisis de correlación, análisis de sensibilidad, utiliza Python para automatizar la extracción y procesamiento de datos urbanos.

También se concluye que la calidad del dato en México es limitada, por lo que se requieren ajustes, depuración y combinaciones de fuentes. La metodología permitió construir un modelo sólido, reproducible y adaptable que puede servir en otros contextos urbanos.

Se demuestra que la accesibilidad debe comprenderse como un fenómeno complejo, influido por condiciones físicas del territorio, dinámicas de transporte, variaciones temporales y elementos ambientales. Por ello, la metodología integra variables como velocidad, distancia, tiempo, clima, contaminación y costos, lo cual permite caracterizar la accesibilidad de manera más completa que los enfoques tradicionales basados únicamente en distancia o tiempo.

La recolección y preprocesamiento de datos constituye un componente crítico, debido a la necesidad de limpieza, depuración, interpolación y estructuración. El capítulo evidencia que la calidad del dato en México es limitada, fragmentada y con acceso restringido, por lo que la investigación se apoya en plataformas como Mapbox, OpenWeather y CRE, utilizando Python para automatizar consultas y reducir errores.

El análisis exploratorio de datos (EDA) se establece como una etapa fundamental, pues permite detectar patrones, anomalías, valores atípicos y relaciones entre variables, garantizando la coherencia antes de formular el modelo matemático final. Su implementación mediante histogramas, gráficos de dispersión, análisis de tendencia y técnicas de inferencia confirma su valor para describir la dinámica de accesibilidad en el corredor Toluca–Atlacomulco.

Por otra parte, el análisis temporal fortalece la comprensión del fenómeno, facilitando la detección de estacionalidad, tendencias y variaciones recurrentes que afectan la movilidad diaria. La aplicación de técnicas de series de tiempo permite identificar dependencias entre horarios, condiciones ambientales y desempeño vial, ofreciendo un soporte analítico sólido para interpretar patrones urbanos.

El capítulo concluye que la metodología propuesta no solo permite evaluar la accesibilidad actual, sino que constituye una base replicable para análisis futuros, adaptable a otros contextos urbanos y escalas territoriales. Su carácter integral que combina datos reales, algoritmos, análisis multivariable y estándares como la norma ISO 19115 garantiza trazabilidad, calidad y validez técnica en la construcción del índice de accesibilidad utilizado en el modelo.

Los resultados obtenidos en el capítulo 5, permiten afirmar que el modelo propuesto constituye una herramienta eficaz para analizar el comportamiento real de la accesibilidad en entornos urbanos complejos, especialmente en corredores viales de alta demanda y siniestralidad, como el tramo Toluca–Atlacomulco.

En primer lugar, el trabajo demuestra que el tiempo de viaje es la variable determinante en la accesibilidad, pues su relación exponencial con el índice A_i produce disminuciones significativas ante incrementos incluso moderados del tiempo. Esto confirma que la accesibilidad no solo depende de la distancia física, sino del desempeño dinámico de la red vial, el flujo vehicular y las condiciones operativas en cada momento del día.

Asimismo, se comprobó que el costo del viaje, asociado al precio del combustible, uso de casetas y tipo de vehículo, ejerce un impacto relevante en la reducción del índice de accesibilidad. Esta relación refleja las implicaciones económicas de la movilidad en la vida cotidiana de los usuarios, especialmente en territorios donde la infraestructura vial es la única alternativa de conexión regional.

Los factores ambientales, como la temperatura y la calidad del aire, también mostraron influencia significativa en la accesibilidad, lo que evidencia que la movilidad urbana no puede analizarse de forma aislada de las condiciones climáticas y de salud pública. A medida que aumentan la temperatura y la contaminación atmosférica, la accesibilidad disminuye, coincidiendo con estudios que vinculan el tráfico, las emisiones y la salud de la población.

La incorporación del parámetro de atenuación espacial (α) representó una contribución teórica y metodológica importante, ya que permitió modelar cómo la “pérdida de accesibilidad” crece con el tiempo y la distancia de manera similar a la atenuación de señal. Su ajuste mediante una constante de escala mejoró la precisión del modelo en escenarios de tiempos cortos, reforzando su versatilidad y capacidad de adaptación a distintos contextos.

Estos resultados confirman que la accesibilidad es un fenómeno altamente sensible a la dinámica urbana, temporal y ambiental, y que su medición debe considerar múltiples capas de información, más allá de la tradicional relación distancia–tiempo.

Otro aporte de gran relevancia fue el uso de datos reales obtenidos mediante APIs (Mapbox, OpenWeather, CRE, Google Maps, Outscraper), lo cual permitió aproximar la simulación a un entorno operativo real. Sin embargo, el estudio también evidenció limitaciones estructurales en México referentes a la disponibilidad, calidad y actualización de datos públicos, lo que dificulta investigaciones de movilidad basadas en evidencia.

Finalmente, la investigación confirma que es posible construir modelos matemáticos robustos y replicables, que apoyen la toma de decisiones en movilidad, planeación urbana, infraestructura y salud pública. El estudio demuestra que la accesibilidad urbana es un componente estratégico para el bienestar social y debe ser priorizada en políticas públicas orientadas a la equidad, la sostenibilidad y la eficiencia territorial.

En suma, el modelo desarrollado constituye una base sólida para futuras investigaciones que integren inteligencia artificial, análisis predictivo y datos en

tiempo real, con el objetivo de optimizar la movilidad urbana y mejorar la calidad de vida de la población.

Comentarios finales y sugerencias para trabajos futuros

Se destaca que el modelo se calibró con datos sintéticos y urbanos, demostrando su aplicabilidad para evaluar la accesibilidad en contextos urbanos y de movilidad. La investigación implico grandes retos respecto al uso de varias herramientas tecnológicas como Python, la cual sirvió de soporte para la obtención de datos, sin embargo, uno de los limites principales es la poca disponibilidad de plataformas que cumplan con las normas de metadatos, por ende, la extracción de dichos datos se hace muy compleja y costosa, ya que se necesita mucha infraestructura computacional para correr, almacenar y procesar los datos.

México no cuenta con las plataformas adecuadas que contengan los datos actualizados, con respecto a los siniestros ocurridos en las vialidades, el acceso a los datos proporcionados por el gobierno es limitado y constantemente cambian de dirección debido a ajustes gubernamentales. Los datos obtenidos para el modelo se tuvieron que adecuar a plataformas de acceso libre y de fácil extracción mediante api keys.

Por lo que se sugiere para la obtención de datos fiables, considerar realizar algunas mediciones de campo para la toma de velocidad, tener acceso libre a aforos actualizados para investigaciones futuras, pues el estudio del tráfico, la accesibilidad y la conectividad ameritan un estudio profundo y robusto, con el propósito de mejorar la calidad de vida de la población.

Disminuir los tiempos de traslado de las personas debe ser una prioridad, estudios recientes han demostrado que pasar largos periodos de tiempo en el tráfico eleva el estrés, genera ansiedad y en consecuencia enfermedades cardiovasculares, por lo que la accesibilidad a la ciudad debe ser tema de suma importancia para los tomadores de decisiones.

Se recomienda incorporar datos en tiempo real, como información en vivo de plataformas como Google Maps, para mejorar la precisión del modelo. Extensión del modelo a áreas rurales o de menor infraestructura para evaluar su funcionalidad en distintos contextos geográficos.

Añadir variables adicionales, como la congestión del tráfico, eventos climáticos específicos o cambios urbanos, para obtener análisis más dinámicos. Diseño de herramientas de visualización interactiva para facilitar la interpretación de resultados a gestores urbanos y planificadores.

Finalmente, el objetivo general y los específicos establecidos en la investigación se han alcanzado, la tesis plantea un punto de partida para futuras investigaciones mediante el uso de herramientas tecnológicas innovadoras y el uso de plataformas de acceso libre, se espera que sirva para futuros estudios de accesibilidad con el uso de inteligencia artificial y redes neuronales.

Bibliografía

Allam, Z. (2022). The Theoretical, Practical, and Technological Foundations of the 15-Minute City Model: Proximity and Its Environmental, Social and Economic Benefits for Sustainability. *Energies*, 19-52.

Alphabet. (7 de Mayo de 2024). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps: https://www.google.com.mx/maps/preview

Alvares, C. M. (23 de Abril de 2024). *FasterCapital* . Obtenido de FasterCapital : https://fastercapital.com/es/contenido/Analisis-de-series-temporales--analisis-de-datos-de-series-temporales-con-tecnicas-Mifor.html

Arregui. (16 de Enero de 2022). *Universidade da Coruña* . Obtenido de Universidade da Coruña : https://gei-cal.github.io/JB-Calculo1-UDC/capitulos/02/06.Dicotomia.html

AWS. (3 de Abril de 2023). *AWS*. Obtenido de AWS: https://aws.amazon.com/es/what-is/monte-carlo-simulation/#:~:text=Las%20simulaciones%20de%20Monte%20Carlo%20son%20una%20t%C3%A9cnica%20matem%C3%A1tica%20que,de%20una%20elecci%C3%B3n%20de%20acci%C3%B3n.

Change, U. N. (7 de Septiembre de 2022). *United Nations Climate Change* . Obtenido de La calidad del aire disminuye a medida que se acelera el cambio climático: https://unfccc.int/es/news/la-calidad-del-aire-disminuye-a-medida-que-se-acelera-el-cambio-climatico

Cuernavaca, O. U. (2019). *Tiempo de traslado.* Cuernavaca : Indicador Clave 16 .

Frieden, B. R. (2004). *Science from Fisher Information: A Unification.* United States : Cambridge University Press.

Furchgott, R. (6 de Mayo de 2017). *Filling in Map Gaps With Waze Games*. Obtenido de The New York Times : https://archive.nytimes.com/wheels.blogs.nytimes.com/2010/05/06/filling-in-the-map-gaps-with-waze-games/

Gonzalo, C. (11 de Mayo de 2023). *Comunicación Social* . Obtenido de Comunicación Social : https://www.carlosgonzalo.es/que-es-una-serie-temporal-para-que-sirve/

Gravitar. (23 de Septiembre de 2023). *Gravitar* . Obtenido de Gravitar : https://gravitar.biz/bi/eda/

Herrera, M. A. (2016). *Estructura urbana, El influjo industrial en el espacio urbano de Ocotlán, Jalisco.* Zapopan: Universidad de Guadalajara.

IBM. (2 de Marzo de 2023). *TOPICS* . Obtenido de TOPICS: https://www.ibm.com/mx-es/topics/monte-carlo-simulation

INEGI. (2002). *Guía de conceptos, uso e interpretaciónde la Estadística sobre la Fuerza Laboral en México.* México: Instituto Nacional de Estadística,Geografía e Informática.

INRIX. (2022). *Global Traffic Scorecard.* United States .

Juárez-Pérez et al., C. A. (2021). Tiempos de traslado al trabajo y hallazgos auditivos en la población adulta de la Ciudad de México. *GACETA MÉDICA DE MÉXICO*, 378 - 384.

Karunanithi AT, C. H. (2008). *Detección y evaluación de cambios en el régimen ecosistémico a partir de información de Fisher.* Estados Unidos : Ecologia social .

Lastra, M. S., Pérez, C. G., & García, V. R. (2019). Cómo nos movemos en la Ciudad de México . *Movilidad y transporte* , 1-39.

León, J. A. (2012). *Modelos de calidad del servicio de los autobuses urbanos .* México: Academia Espanola .

MathWorks. (12 de Febrero de 2024). *MathWorks*. Obtenido de MathWorks: https://la.mathworks.com/discovery/monte-carlo-simulation.html

Moreno, C. (2021). Introducing the “15-Minute City”: Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities. *Smart Cities 2021*, 93 - 111.

Nikola, I. (2017). Consejos practicos para trabajar con proveedores de datos externos . *Revista Instituto de Ingenieros de Transporte* , 28-35.

Ortega, C. (12 de Agosto de 2023). *QuestionPro*. Obtenido de QuestionPro: https://www.questionpro.com/blog/es/analisis-exploratorio-de-datos/

Razo, C. M. (2011). *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis .* México: Pearson .

Rivera, V. M., & Zaragoza, M. L. (2007). *ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE , VOL1: CONCEPTOS BÁSICOS.* Queretaro : Instituto Mexicano del Transporte .

Robles, S. A. (25 de Enero de 2022). *Ubiqum Code Academy* . Obtenido de Ubiqum Code Academy : https://ubiqum.com/es/resources/es-python-el-lenguaje-del-futuro/

Rodrigo, J. A. (2020 de Marzo de 2020). *cienciadedatos.net*. Obtenido de cienciadedatos.net: https://cienciadedatos.net/documentos/pystats05-correlacion-lineal-python

Rodríguez, I. R. (2023). *Conectando el Futuro: Ciudades Inteligentes, IoT y la Transformación de la Sociedad Urbana.* Málaga: uma.

Saavedra, D. S. (2020). Contaminación del aire y enfermedades cardiovasculares. *Sociedad Interamericana de Cardiologia* , 78-102.

Salud, O. P. (2 de Mayo de 2024). *OPS* . Obtenido de Organización Panamericana de la Salud : https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire

Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación .* México: Mc Graw Hill.

Solminihac, H. d., Echaveguren, T., & Chamorro, A. (2019). *Gestión de Infraestructura Vial .* Chile: Alfaomega.

Torres, C. A. (2010). *Metodología de la investigación .* Colombia : Pearson .

Troposfera.org. (25 de Abril de 2024). *Troposfera.org*. Obtenido de ¿Qué es la Calidad del Aire?: https://www.troposfera.org/conceptos/calidad-aire/

Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis.* United States : Addison & Wesley.

Vargaz, L. (12 de Junio de 2023). *Guía ninja del Big Data y la Inteligencia Artificial*. Obtenido de Guía ninja del Big Data y la Inteligencia Artificial: https://datos.ninja/tutorial/discretizacion-de-variables-en-python/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20significa%20discretizar%20los%20datos,podr%C3%A1s%20encontrarlo%20referido%20como%20binning.

Velázquez, B. R., & Levi, L. L. (2015). *Espacio, paisaje, región, territorio y lugar: la diversidad en el pensamiento contemporáneo.* México: Universidad Nacional Autónoma de Méxic.

Writers, I. S. (22 de Septiembre de 2022). *IQAir* . Obtenido de ¿Causa la contaminación atmosférica el cambio climático?: https://www.iqair.com/mx/newsroom/does-air-pollution-cause-climate-change

Yates, D. (2005). *The Practice of Statistics.* New York: Freeman.