



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Geografía



Maestría en Análisis Espacial y Geoinformática

*Accesibilidad espacial de la infraestructura vial de la Zona
Metropolitana de Toluca*

Tesis que presenta:

Jorge Luis Valdés Atencio

Para obtener el grado de:

Maestro en Análisis Espacial y Geoinformática

Comité Tutorial

Dr. Edel CadenaVargas	Tutor
Dra. Raquel Hinojosa Reyes	Tutora adjunta
Dr. Julio Amézquita López	Tutor Externo

Toluca de Lerdo, México
Octubre de 2024

Contenido

	<i>Introducción</i>	1
1.	<i>Fundamentos teóricos</i>	3
1.1	Geografía del transporte	3
1.1.1	Relación de la estructura espacial y el transporte	6
1.1.2	Escalas en la organización espacial	7
1.1.3	Métodos y enfoques de la geografía del transporte	9
1.2	Teoría de redes o grafos	10
1.2.1	Tipos de análisis de redes de transporte	13
1.3	Accesibilidad	20
1.3.1	La accesibilidad, la estructura espacial y la desigualdad	22
1.3.3	Mediciones de la accesibilidad	24
1.4	Marginación	31
1.5	Autocorrelación espacial	35
1.5.1	Índices de autocorrelación espacial	37
1.5.1.1	Índice de Moran Global	38
1.5.1.2	Autocorrelación Espacial Local (LISA y Moran Local)	40
1.5.1.3	Modelos de regresiones	41
2.	<i>Antecedentes</i>	44
3.	<i>Metodología</i>	50
3.1	Enfoque y tipo de investigación	50
3.2	Universo de estudio	50
3.3	Etapas de la investigación	51
3.3.1	Recopilación de la información	52
3.3.2	Análisis del contexto de la Zona Metropolitana de Toluca	52
3.3.2.1	Análisis de la población	53
3.3.2.2	Análisis de la cobertura de suelo y áreas urbanas	54
3.3.2.3	Análisis de las actividades económicas	55
3.3.2.4	Movilidad laboral de la ZMT	56
3.3.3	Análisis de la red de transporte	56

3.3.3.1	Cálculo de indicadores estáticos	57
3.3.3.2	Cálculo de indicadores dinámicos	58
3.3.4	Análisis de la marginación	62
3.3.4.1	Selección de los indicadores para el cálculo del índice de marginación	63
3.3.4.2	Aplicación del método VIM	66
3.3.5	Análisis de Autocorrelación espacial	67
3.3.5.1	Ajustes en el cambio de la escala de la variable de accesibilidad	68
3.3.5.2	Creación de la matriz de pesos espaciales	69
3.3.5.3	Cálculo de los promedios espaciales	69
3.3.5.4	Cálculo de los índices de autocorrelación	70
3.3.5.5	Análisis de los resultados	71
3.3.6	Determinación de áreas de mejora	72
3.4	Tipos de datos	73
3.4.1	Datos Cartográficos.	73
3.4.2	Datos estadísticos.	73
3.5	Softwares utilizados	73
4.	<i>La Zona Metropolitana de Toluca</i>	74
4.1	Delimitación y ubicación	74
4.2	Población	78
4.3	Cobertura de usos de suelo y áreas urbanas	82
4.4	Actividades económicas	85
4.5	Movilidad laboral de la ZMT	92
5.	<i>Resultados</i>	102
5.1	Caracterización de la red vial de transporte de la Zona Metropolitana de Toluca	102
5.1.1	Clasificación de los Sistemas Viales	104
5.1.2	Descripción de la infraestructura vial de la ZMT	109
5.1.2.1	Estado de las vías	118
5.1.3	Análisis estático de la infraestructura vial	121
5.1.3.1	Densidad vial	121
5.1.3.2	Suficiencia vial	125
5.1.3.3	Conectividad vial	129

5.1.4	Análisis dinámico de la infraestructura vial	131
5.1.4.1	Tiempos promedio de recorrido	132
5.1.4.2	Accesibilidad vial	136
5.2	Marginación de la Zona Metropolitana de Toluca	140
5.3	Accesibilidad vial y marginación de la ZMT	144
5.3.1	Relación por asociación espacial del índice de accesibilidad y el índice de marginación	144
5.3.1.1	Índice de Moran Univariante –Escala de Marginación	144
5.3.1.2	Índice de Moran Univariante – Accesibilidad vial	146
5.3.2	Dependencia espacial entre marginación y accesibilidad vial	148
5.4	Determinación de áreas de mejora	149
	<i>Conclusiones</i>	154
	<i>Referencias bibliográficas</i>	160
	<i>Anexos</i>	178

Índice de tablas

Tabla 1.	Enfoques de la geografía del transporte	5
Tabla 2.	Escalas y organización espacial del transporte	8
Tabla 3.	Propiedades y métricas del análisis gráfico	14
Tabla 4.	Propiedades y métricas del análisis estático	14
Tabla 5.	Propiedades y métricas del análisis dinámico	15
Tabla 6.	Tipos de análisis de la oferta de redes	17
Tabla 7.	Revisión de medidas de accesibilidad	25
Tabla 8.	Concepto de marginación de COPLAMAR y CONAPO y variables de los índices de marginación	32
Tabla 9.	Indicadores para el cálculo del índice de marginación, metodología Mancino	33
Tabla 10.	Características de los modelos de regresión convencional y de rezago espacial	42
Tabla 11.	Parámetros de interpretación de pruebas	43
Tabla 12.	Variables del CNPV utilizadas para el cálculo de los indicadores de marginación	64
Tabla 13.	Indicadores utilizados para el cálculo del índice de marginación, 2020	65
Tabla 14.	Criterios de clasificación de valores normalizados	67
Tabla 15.	Criterios para la asignación de grados de marginación con el método VIM	67
Tabla 16.	Nueva escala de medición de la accesibilidad	69
Tabla 17.	Criterios de autocorrelación espacial con el I de Moran	71
Tabla 18.	Etapas de desarrollo de la Zona Metropolitana de Toluca 1900 - 2020	77
Tabla 19.	Estadísticas demográficas en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca, 2010 y 2020	80
Tabla 20.	Estadísticas de la superficie urbanizada en la ZMT, en los años 2009, 2013, 2017 y 2021	84
Tabla 21.	Estadísticas de establecimientos económicos y empleos estimados por sectores SCIAN en la Zona Metropolitana de Toluca, 2022	85
Tabla 22.	Estadísticas de la relación de unidades económicas por habitante en las secciones electorales de la ZMT, 2022	89
Tabla 23.	Desplazamientos laborales por orígenes y destinos en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	93
Tabla 24.	Longitud de vías construidas en la República de México (1925, 1965, 2004 y 2020)	102

Tabla 25.	Longitud de carreteras construidas en el Estado de México y la República de México, 2004 y 2020.	103
Tabla 26.	Clasificación vial según el manual técnico de Carreteras 2018	105
Tabla 27.	Tipologías de vías según Norma Técnica de Domicilios del Estado de México, 2020	108
Tabla 28.	Características de la red vial de la ZMT, 2020	109
Tabla 29.	Carreteras y vialidades estructurantes de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	113
Tabla 30.	Estadísticas de la densidad vial de las secciones electorales en la ZMT por municipios, 2020	122
Tabla 31.	Clasificación de la densidad vial en la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	124
Tabla 32.	Estadísticas de índices de suficiencia vial por municipios en la ZMT, 2020	127
Tabla 33.	Clasificación del índice de suficiencia vial	128
Tabla 34.	Grados de conectividad vial	130
Tabla 35.	Grados de tiempos promedio de transporte	132
Tabla 36.	Grados de accesibilidad vial de la ZMT	136
Tabla 37.	Resumen de grados de marginación	141
Tabla 38.	Porcentaje de secciones electorales agrupados por municipio y grado de marginación en la ZMT, 2020	142
Tabla 39.	Resultados del modelo de regresión convencional y de rezago espacial	149

Índice de figuras

Figura 1.	Elementos de la geografía del transporte	4
Figura 2.	Tipos de estructura espacial urbana	7
Figura 3.	Modelos de la geografía del transporte	10
Figura 4.	Representación de un grafo	11
Figura 5.	Representación del modelo de una red de calles urbanas	12
Figura 6.	La accesibilidad y su estructura espacial	23
Figura 7.	Patrones de asociación en autocorrelación espacial	37
Figura 8.	Tipos de contigüidad de la matriz de pesos espaciales	38
Figura 9.	Patrones del I de Moran en el gráfico de dispersión	40
Figura 10.	Metodología general de la investigación	51
Figura 11.	Indicadores implementados en los análisis de la red vial de transporte	57
Figura 12.	Procedimiento para el método de Network Analyst de Arcgis	59
Figura 13.	Procedimiento para determinar el índice de marginación	63
Figura 14.	Procedimiento para medir la autocorrelación espacial	68
Figura 15.	Comparación entre la cantidad de vehículos motorizados y la población en los municipios de la ZMT, 2020	99
Figura 16.	Tendencia en la evolución de las carreteras en la República de México	103
Figura 17.	Relación entre función, forma y uso de una vía urbana	107
Figura 18.	Registros fotográficos de principales ejes viales de la ZMT, 2023	117
Figura 19.	Registros fotográficos de deterioros de vialidades en la ZMT, 2023	118
Figura 20.	Mantenimiento de baches en vialidad López Portillo	121
Figura 21.	Diagrama de caja de la densidad vial (Km/Km ²) de las secciones electorales en la ZMT, 2020	123
Figura 22.	Histograma del Índice de Engel de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	126
Figura 23.	Gráfico de dispersión del I de Moran y mapa LISA de la marginación, 2020	146
Figura 24.	Gráfico de dispersión del I de Moran y mapa LISA de la accesibilidad vial, 2020	148

Índice de mapas

Mapa 1.	Ubicación de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	75
Mapa 2.	Delimitación de la Zona Megalopolitana del Valle de México, 2017	76
Mapa 3.	Porcentaje poblacional en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	79
Mapa 4.	Densidad poblacional en las secciones electorales de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	81
Mapa 5.	Cobertura de usos de suelo de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	82
Mapa 6.	Incremento de la cobertura en las áreas urbanizadas de la ZMT, en los años 2009, 2013, 2017 y 2021	83
Mapa 7.	Unidades económicas por habitantes en las secciones electorales de la ZMT, 2022	88
Mapa 8.	Densidad de unidades comerciales en las secciones electorales de la ZMT, 2022	89
Mapa 9.	Densidad de unidades manufactureras en las secciones electorales de la ZMT, 2022	91
Mapa 10.	Densidad de servicios educativos en las secciones electorales de la ZMT, 2022	92
Mapa 11.	Frecuencias y destinos principales de los desplazamientos laborales con origen en el municipio de Toluca, 2020	95
Mapa 12.	Frecuencias y destinos principales de los desplazamientos laborales con origen en el municipio de Metepec, 2020	96
Mapa 13.	Frecuencias y destinos principales de los desplazamientos laborales con origen en el municipio de Zinacantepec, 2020	97
Mapa 14.	Frecuencias y orígenes principales de los desplazamientos laborales (ida) con destino al municipio de Toluca, 2020	98
Mapa 15.	Ubicación de las principales infraestructuras de transporte de carretera y aérea de la ZMT, 2020	100
Mapa 16.	Ubicación de las principales infraestructuras de transporte ferroviaria de la ZMT, 2020	101
Mapa 17.	Carreteras y vialidades estructurantes de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	111
Mapa 18.	Vialidades principales de la ZMT en el municipio de Toluca, 2020	112
Mapa 19.	Densidad vial en las secciones electorales de la ZMT, 2020	125
Mapa 20.	Suficiencia vial por secciones electorales en la ZMT, 2020	128
Mapa 21.	Conectividad vial por secciones electorales en la ZMT, 2020	130

Mapa 22.	Tiempos promedio de recorrido por secciones electorales en la ZMT, 2020	134
Mapa 23.	Tiempos promedio de recorrido municipales en la ZMT, 2023	135
Mapa 24.	Escenario 1 de Accesibilidad vial en las secciones electorales de la ZMT, 2020	138
Mapa 25.	Escenario 2 de accesibilidad vial municipal en la ZMT, 2023	139
Mapa 26.	Grado de Marginación de las secciones electorales en la Zona Metropolitana de Toluca, 2020	142
Mapa 27.	Áreas prioritarias de atención de la Accesibilidad vial y Marginación	150

Introducción

La evolución de la geografía como ciencia ha ido de la mano del avance de las tecnologías de la información geográfica, aportando confiabilidad, objetividad y rigurosidad a los estudios realizados mediante la aplicación del análisis espacial para resolver problemáticas y conflictos en determinadas zonas urbanas, siendo estos resultados insumos para tomar decisiones de la planeación y el ordenamiento territorial.

Uno de los aspectos claves, que ha sido objeto de estudio en la planificación de las ciudades o áreas urbanas, es la infraestructura vial para el transporte y la movilidad. Esta infraestructura es considerada elemento clave de todo sistema territorial, que permite la articulación con el resto de los componentes del territorio y define las dinámicas e interrelaciones generadas en el espacio urbano.

Para la evaluación de la infraestructura vial han surgido conceptos que hacen referencia a la accesibilidad (Escalera, 2022; Escobar y Urazán, 2014; Garrocho y Campos, 2006; Rodrigue et al., 2013; entre otros), a través del cual diseñan metodologías para su medición y cálculo del grado de servicio en una determinada infraestructura con respecto a las necesidades de su población para una movilidad idónea, lo cual es un reto teniendo en cuenta las dinámicas crecientes de los espacios urbanos.

De acuerdo con Hansz et al. (2018), la accesibilidad presenta un enfoque que se centra en el potencial con el que cuentan las personas para acceder, utilizando la oferta de servicios de transporte, para actividades sociales y económicas. En ese sentido, de estos elementos dependerá la eficiencia del sistema y su capacidad de adaptación a la realidad social y tecnológicamente cambiante (Dupuy, 1998).

En vista de lo anterior, mediante esta investigación se buscó analizar la organización espacial de la infraestructura vial (carreteras regionales y vialidades urbanas) y determinar el grado de eficiencia en la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT), así como establecer su relación con el nivel de desigualdad social en la zona, e identificar áreas prioritarias para la mejora de la accesibilidad.

Los objetivos específicos fueron 1) caracterizar la red vial de transporte de la Zona Metropolitana de Toluca; 2) Determinar la eficiencia de dicha red y su distribución espacial en la Zona Metropolitana de Toluca; 3) Diseñar y calcular un índice de desigualdad social y establecer su distribución espacial en la Zona Metropolitana de Toluca, a través del uso de un índice de marginación; 4) Medir estadística y espacialmente la asociación entre ambos indicadores, teniendo en cuenta los métodos de correlación espacial; 5) Identificar las áreas prioritarias de mejora de la red vial de la zona elegida.

Las hipótesis que guiaron el desarrollo fue que el grado de eficiencia de la red de transporte de carreteras en la ZMT es deficiente y adicionalmente presenta un patrón de distribución espacial no aleatorio. El grado de marginación de la región es mayor a medida que se acerca a la periferia del territorio, lo cual genera un patrón de distribución espacial no aleatorio. Existe una relación de dependencia inversa entre la accesibilidad vial y los niveles de marginación social en la ZMT, donde a mejor sea el grado de accesibilidad vial, más bajo será el nivel de marginación.

La investigación se desarrolló a partir del método hipotético deductivo, debido a que se partió de principios teóricos y generalizaciones para realizar el análisis, a través del enfoque cuantitativo y considerando técnicas de análisis espacial a través del cálculo de indicadores.

El trabajo se organiza teniendo en cuenta los siguientes apartados: introducción a los aspectos generales de la investigación, seguido del primer capítulo, compuesto por los fundamentos teóricos de la investigación. El segundo capítulo es concerniente a los antecedentes de investigación. En el tercer capítulo se hace referencia a la metodología implementada en la investigación. El cuarto capítulo especifica el contexto de la Zona Metropolitana de Toluca. En el capítulo cinco se presentan los resultados de la investigación, los cuales se subdividen en caracterizar la red vial de transporte en la ZMT, el análisis de marginación en la ZMT, la autocorrelación espacial de las variables de accesibilidad y la marginación en la ZMT, y la determinación de áreas de mejora en la ZMT. Por último, están las conclusiones y referencias bibliográficas de la investigación.

1. Fundamentos teóricos

Para el desarrollo de la presente investigación, se consideraron algunos de los referentes teóricos en el área de la geografía del transporte, el principio de accesibilidad y sus formas de medición, así como la aplicación de la accesibilidad en el marco de la teoría de grafos para el análisis de redes de transporte y, por último, aspectos referentes a la marginación y la autocorrelación espacial.

Cabe destacar que, para el marco referente a la geografía del transporte, teoría de redes y accesibilidad, se utilizaron como principales fuentes a autores como Rodrigue et al (2013), Buzai y Baxendale (2003), Graizbord (2008), Madrid y Ortiz (2005), y Seguí y Petrus (1991); en lo que respecta al marco de la marginación, se destacan principalmente los aportes de CONAPO (2020) y Mancino (2018, 2019); por último, en el marco de autocorrelación espacial, se destacan Miller (2004), Celemín (2009), Anselin y Rey (2014), Santana y Aguilar (2019) y Ramírez y Rosales (2023).

1.1 Geografía del transporte

De acuerdo con Rodrigue et al. (2013), la geografía del transporte surgió a partir de una revolución cuantitativa en los años 50 (mediados del s XX) derivada de la geografía económica, la cual fue consecuencia de tratar de comprender el incremento de la movilidad en las personas y mercancías generadas por la dinámica económica de la industria, el libre comercio y el uso eficiente de los recursos a nivel mundial.

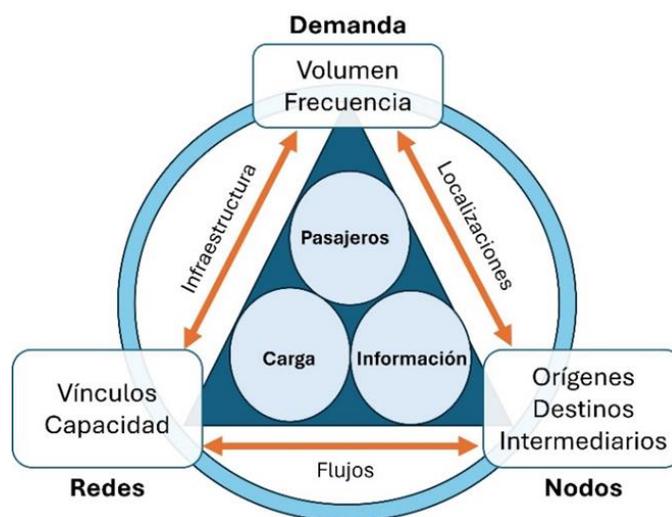
Una de las teorías base de la geografía del transporte es la teoría de la localización espacial, la cual tiene como objetivo explicar, describir y predecir las localizaciones de los fenómenos humanos en el territorio soportado por autores como A. Weber, T. Palander, E. Hoover, A. Losch o W. Isard (Bosque et al., 2012). Para la década de los 60's se empezaron a considerar los costos de transporte como factor indispensable de la teoría de la localización, y la geografía del transporte comenzó a depender de métodos cuantitativos como el análisis de redes e interacciones espaciales (Rodrigue et al., 2013), destacando a autores como P. Haggett, W. Bunge o R.L. Morrill, entre otros, quienes retomaron los estudios pioneros de

Christaller en los años 30 con la localización de actividades urbanas/comerciales (Bosque et al., 2012).

No obstante, desde los años 70, la globalización disminuyó la atención al transporte en la geografía económica, aunque su importancia en la movilidad y el comercio era reconocida. En los 90, la geografía del transporte se renovó, destacando la interrelación entre movilidad, producción y distribución en el espacio geográfico desde un enfoque sistémico y reconociendo de esta forma la complejidad que tienen las relaciones en cada uno de los elementos que conforman los sistemas de transporte (Rodrigue et al., 2013). Dentro de sus elementos se consideran (ver figura 1):

- **Nodos de transporte:** son los puntos de acceso de un sistema de transporte. Pueden considerarse orígenes, transbordos (intermediarios) o destinos.
- **Redes de transporte:** estas son las rutas e infraestructuras que soportan y dan forma a los movimientos, por ejemplo, las redes de carreteras o rutas marítimas.
- **Demanda de transporte:** este elemento hace referencia a la demanda de los servicios de transporte y los modos en los que se soportan los movimientos, generando así interacciones a través de una red de transporte.

Figura 1. Elementos de la geografía del transporte



Fuente: adaptado de Rodrigue et al (2013)

En ese sentido, Rodrigue et al. (2013) define la geografía del transporte como: “(...) una subdisciplina de la geografía que se ocupa de los movimientos de mercancías, personas e

información. Trata de comprender su organización espacial, relacionando las limitaciones y atributos espaciales con el origen, el destino, la amplitud, la naturaleza y la finalidad de los movimientos.”

Según Johnston et al. (citado por Graizbord, 2008), la geografía del transporte analiza los diferentes fenómenos de movilidad y transporte que se presentan en un determinado espacio, y la forma como estos se organizan, distribuyen o relacionan estructural y funcionalmente con las actividades humanas.

Por otro lado, Graizbord (2008) hace énfasis que en la historia de la geografía del transporte se han adoptado diversos enfoques: el operativo-constructivo, histórico, cuantitativo y conductista (ver tabla 1), que permiten resolver los problemas asociados al transporte.

Tabla 1. Enfoques de la geografía del transporte

Enfoque	Descripción	Pensadores destacados
Método construcción-operación	Se hace referencia a los sistemas de transporte, las relaciones entre rutas, la forma del terreno, los costos de construcción de la infraestructura y el equipamiento de la red vial.	White (1977)
Histórico	Se enfoca en el crecimiento y expansión de los sistemas de transporte teniendo en cuenta el contexto tecnológico, social y económico de un lugar.	Turton, 1991; Vance Jr, 1991
Cuantitativo	Incorpora técnicas y métodos cuantitativos para el análisis de redes y la comprensión de la forma y funcionalidad del sistema de transporte. A su vez, se complementa con modelos estadísticos y de investigación de operaciones para la generación de escenarios a través de simulaciones. Este enfoque se puede analizar en escalas urbanas, regional y subregional.	Taaffe y Gauthier (1973), Haggett y Chorley (1969)
Conductista	Analiza aspectos de la oferta y demanda en la generación de viajes individuales. Enfatiza la movilidad como principio y propone un enfoque multidisciplinario para explicar el comportamiento espacial de los individuos y grupos sociales. Este enfoque se puede analizar en escalas urbanas, regional y subregional.	Hurst (1974) y Kain (1962)

Fuente: adaptado con base en Graizbord (2008).

Por su parte, Seguí y Petrus (1991) dividen en 3 categorías los enfoques de la geografía del transporte, destacando el enfoque cuantitativo, el social y la dimensión temporal de los

estudios de transporte (cronogeográfico). El primer enfoque prioriza los estudios regionales en materia de interacción espacial, análisis de las estructuras y eficiencia de las redes y calibración de modelos cuantitativos.

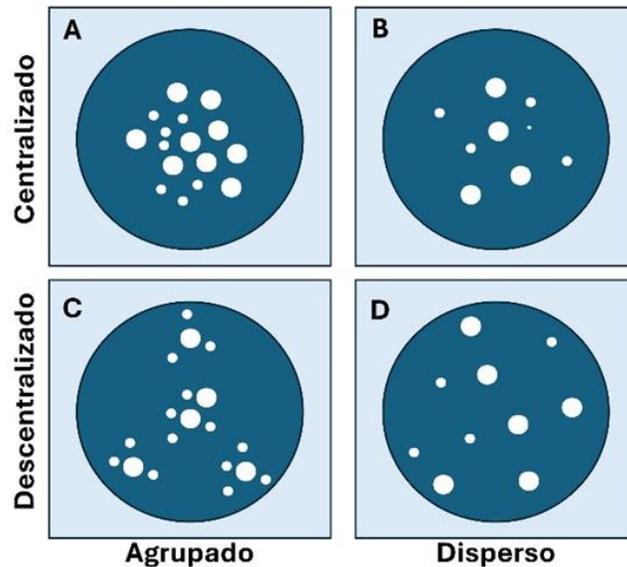
El enfoque social, por su parte, se caracteriza por estudios a microescala del comportamiento del individuo o de grupos sociales con respecto a las restricciones del transporte y al estudio de desigualdades a nivel espacial. Por último, el enfoque cronogeográfico hace referencia a la dimensión del tiempo, relacionándola con la movilidad diferencial (por sexo, edad, geografía del bienestar y desigualdades).

1.1.1 Relación de la estructura espacial y el transporte

De acuerdo con Rodrigue et al. (2013), el transporte presenta relación con las diversas estructuras espaciales que se pueden presentar en el espacio urbano, ya que la forma y ubicación espacial de las infraestructuras de transporte y las relaciones generadas a través de estas influyen en la forma que va adquiriendo la ciudad o el área urbana. En la figura 2, se pueden destacar los diferentes tipos de estructura urbana: agrupada-centralizada (A), dispersa-centralizada (B), agrupada-centralizada (C) y dispersa-descentralizada (D); siendo la que más tendencia tiene en la actualidad el tipo C, con altos niveles de agrupamiento y descentralizada. Lo cual es una característica de las áreas o zonas urbanas multicéntricas donde los tiempos de viaje son relativamente estables, pero cada vez más largos, predominando el uso del automóvil.

Considerando lo anterior, es importante analizar la estructura del espacio urbano, comprendiendo así las relaciones que surgen a través de la ordenación de la infraestructura del transporte y la distribución de las actividades en el espacio, ya que puede afectar la dispersión o expansión de los espacios urbanos, como, por ejemplo, las metrópolis que crecen de forma rápida y descontrolada favoreciendo al transporte motorizado.

Figura 2. Tipos de estructura espacial urbana



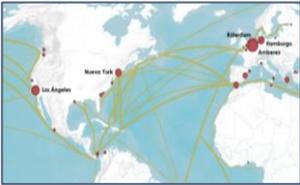
Fuente: adaptado de Rodrigue et al. (2013)

1.1.2 Escalas en la organización espacial

En la geografía del transporte existen dos conceptos esenciales: sitio y situación. El primero define los atributos geográficos del espacio estudiado y el segundo las relaciones de un lugar específico. La situación es dinámica y cambia teniendo en cuenta el grado de desarrollo de los sistemas de transporte y la accesibilidad de un lugar, lo que influye en mayores o menores relaciones entre las ubicaciones. En ese sentido, la geografía del transporte auxilia en la localización de las actividades humanas y, por ende, en la forma de cómo se organiza el espacio (Rodrigue et al., 2013).

Cabe destacar que las formas en cómo se organiza el espacio dependen de la escala en que se manejen los elementos estructurantes de los sistemas de transporte, lo cual puede influir en los cambios económicos, sociales y ambientales de determinado territorio. Estas escalas pueden ser a nivel global, regional o local. En la tabla 2 se especifican algunas características de las escalas de análisis mencionadas.

Tabla 2. Escalas y organización espacial del transporte

Escala	Elementos	Descripción
<p>Global</p> 	<p>Nodos: Puertos y aeropuertos.</p> <p>Enlaces: Rutas aéreas y marítimas</p> <p>Relaciones: Comercio y producción</p>	<p>El transporte soporta la economía mediante el comercio internacional, ampliando los mercados y creando mayores oportunidades entre los diferentes países, pero, a su vez, generando desigualdades económicas para otros.</p>
<p>Regional</p> 	<p>Nodos: ciudades, áreas metropolitanas.</p> <p>Enlaces: Carreteras, líneas férreas, canales.</p> <p>Relaciones: Sistemas urbanos y áreas de influencia.</p>	<p>Se organizan mediante un conjunto de ciudades o sistemas urbanos, las cuales se desarrollan en función del nivel de actividad de cada centro urbano con respecto a la distancia entre estas.</p>
<p>Local</p> 	<p>Nodos: Actividades comerciales, empleos, etc.</p> <p>Enlaces: Sistema vialidades y tránsito.</p> <p>Relaciones: Desplazamientos y distribuciones.</p>	<p>Se analizan principalmente las necesidades de movilidad de la población, ya sea trabajo, ocio, comercio o residencia; y de mercancías, donde los principales nodos son las zonas de trabajo. Cada una de estas necesidades configura la organización espacial urbana.</p>

Fuente: adaptado con base en Rodrigue et al. (2013), Merino (2022), BID (2013), Centro Mario Molina (2014a)

1.1.3 Métodos y enfoques de la geografía del transporte

Para inicios del siglo XXI, los estudios en geografía del transporte eran escasos y se enfocaban principalmente en escalas interurbanas y no a escalas urbanas para el estudio de la movilidad y el transporte (Graizbord, 2008). Sin embargo, en la actualidad se evidencia un incremento de estos estudios, considerando diferentes enfoques y métodos, para comprender

la realidad compleja que viven las ciudades o áreas urbanas y la forma como interactúan los sistemas de transporte en estas.

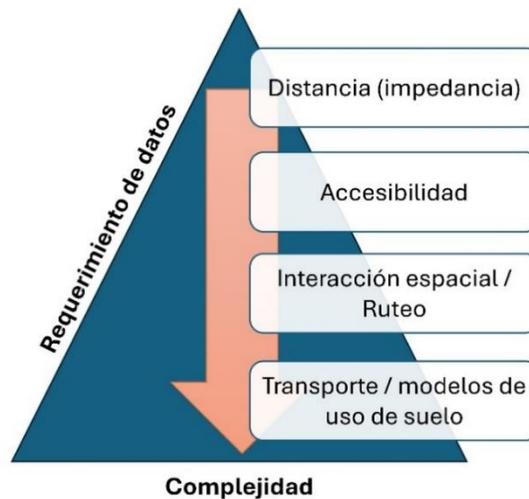
Rodrigue et al. (2013) menciona que los métodos aplicados en la geografía del transporte son dependientes de la complejidad de los datos para su implementación en modelos cuantitativos, lo que quiere decir que a medida que se consideren más datos y más variables para el análisis de los sistemas de transporte, mayor será la complejidad del modelo.

Dentro de los modelos comunes para el estudio de los sistemas de transporte, se encuentran los enfocados en la distancia (o impedancias), en accesibilidad, en interacciones espaciales y en modelos de transporte y uso de suelo:

- **Distancia:** es el elemento principal de la geografía del transporte. Esta métrica puede ser analizada en diferentes formas: a través de la distancia euclidiana (línea recta); la distancia de transporte, que considera un conjunto de actividades como carga, descarga o transbordo; o una distancia logística que abarca todas las tareas necesarias para un movimiento.
- **Accesibilidad:** es una medida que se basa en los conceptos de localización y distancia, y es definida por la capacidad que tiene un sitio al ser alcanzado por diferentes lugares.
- **Interacción espacial:** este modelo surge para analizar la relación entre la oferta y demanda del transporte y se materializa mediante el movimiento realizado entre un origen o destino, ya sea por personas, carga o información.
- **Modelos de transporte y uso de suelos:** este modelo evalúa las relaciones entre el transporte y su estructura espacial.

En la figura 3, es posible ver diferentes enfoques de modelos para evaluar sistemas de transporte. Cada uno de estos modelos dependerá de los datos del modelo anterior en jerarquía, por ejemplo, no es posible evaluar la accesibilidad sin tener datos de distancias.

Figura 3. Modelos de la geografía del transporte



Fuente: adaptado de Rodrigue et al (2013)

Para finalizar, y considerando los enfoques mencionados, la utilización de técnicas en la investigación en la geografía del transporte han crecido en complejidad, especialmente con el avance de las tecnologías de la información, lo que ha proporcionado herramientas analíticas sofisticadas que permiten generar resultados más rigurosos para el análisis de necesidades territoriales en materia de transporte y en beneficio de una mejor toma de decisiones para el desarrollo de estos.

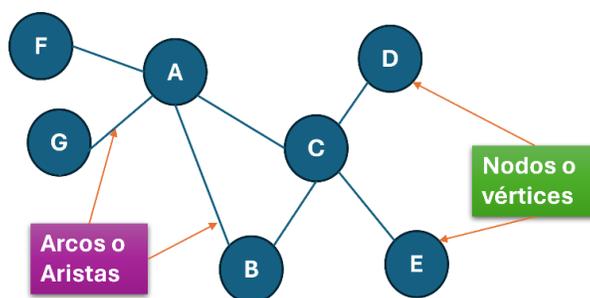
1.2 Teoría de redes o grafos

Coupy (citado por Chiaradia et al. 2013); Lotero y Hurtado (2014) y Harary (1969) sostienen que Euler, al resolver analíticamente el problema del primer viajante de comercio, inventó la codificación de redes, la teoría de grafos y el análisis de redes de transportes en el siglo XVIII (Seguí y Petrus, 1991).

De acuerdo con Rodrigue et al. (2013), la teoría de grafos es una rama de la matemática que se encarga de cómo se pueden codificar las redes y medir sus propiedades. En ese sentido, el análisis de redes, basado en la teoría de grafos, se representa en un sistema de redes a través de un conjunto de nodos (puntos) que están interconectados a través de un conjunto de enlaces (arcos). Por su parte, Gross et al. (citado por Etherington, 2012), menciona que los

grafos están integrados por una sucesión de vértices y una serie de aristas que son vinculadas entre pares de vértices. Los pares de vértices se enlazan por medio de una única arista; siendo los vértices adyacentes, esta secuencia ordenada de aristas se conoce como camino (ver figura 4).

Figura 4. Representación de un grafo



Fuente: Elaboración propia

Con el paso del tiempo, estas aplicaciones matemáticas se fueron extendiendo en el ámbito de estudio de las ciencias sociales y geográficas, pudiendo representar de esta forma ciudades, centroides, estaciones, puertos y demás objetos espaciales, haciendo referencia a los nodos; las carreteras, cables, canales, rutas o flujos de información representaban a los arcos o líneas (Cardozo et al., 2009).

Por ejemplo, en la geografía, desde su aplicación a inicios de los años 60 a través de Garrison, se utilizaron para estudios morfométricos de redes, con el fin de explicar su estructura y desarrollo (Torres, 2018). Posteriormente, fue asociada por Hagget para modelar las relaciones entre las redes de transporte y sus asentamientos en función de las propiedades topológicas como la conectividad y accesibilidad (Cardozo et al., 2009; Torres, 2018). No obstante, también se aplica en áreas como la psicología, sociología y antropología para hacer referencias a relaciones “no materiales” como en las redes sociales (Madrid y Ortiz, 2005).

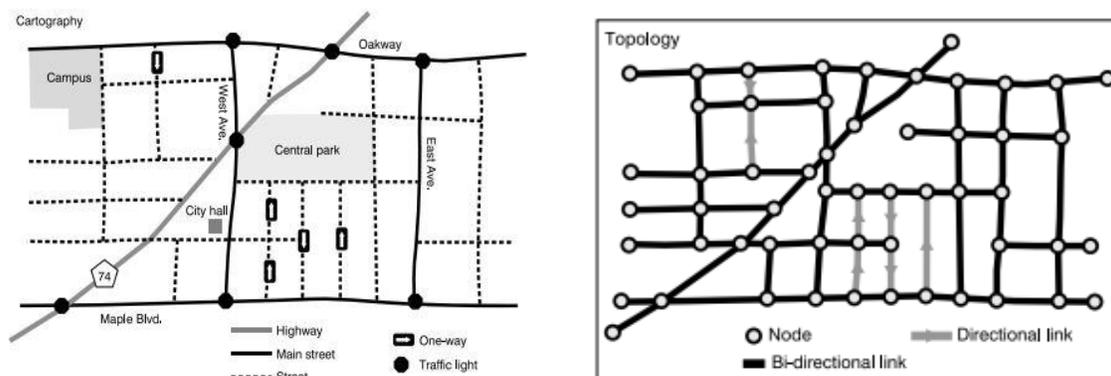
En la actualidad esta teoría se pone en práctica mediante el uso de grafos aplicados a los sistemas de información geográfica y otras tecnologías de la información, que facilitan y agilizan los procesos de análisis y toma de decisiones en las diversas áreas del conocimiento. En ese sentido, constituyen una herramienta de abstracción de la realidad (ver figura 5) para

evaluar relaciones funcionales e interacciones entre infraestructuras de transporte, asentamientos y actividades humanas (Cardozo et al., 2009), lo cual es de utilidad para esta investigación.

Figura 5. Representación del modelo de una red de calles urbanas

(a) Cartografía de una red urbana

(b) Representación topológica de una red urbana



Fuente: Rodrigue et al (2013)

La teoría de grafos permite describir de manera cuantitativa la distribución y vínculos de los factores del sistema; por ende, ésta proporciona herramientas que facilitan la cuantificación de las propiedades del sistema y contribuye a la inferencia del comportamiento o desempeño del sistema en estudio. En consecuencia, permite la representación formal y el análisis de las redes y sus características (Heckmann et al., 2015).

De la misma forma, Dupuy (1998) y Condori et al. (2016) expresan que esta teoría también se puede aplicar a instrumentos de evaluación basados en el uso de índices topológicos¹ para medir la accesibilidad de los diferentes tipos de redes, facilitando la descripción o explicación con los diferentes fenómenos espaciales para la organización del territorio.

¹ La topología hace referencia a la disposición de los nodos y enlaces de la red, la cual tiene relevancia en las representaciones de ubicación, dirección y conectividad de determinado modelo (Rodrigue et al., 2013).

1.2.1 Tipos de análisis de redes de transporte

De acuerdo con Seguí y Petrus (1991); Dupuy (1998); Hernández e Hinojosa (2018); Hernández-Torres et al. (2020), las redes de transporte son un elemento estructurante de los sistemas de transporte y de la organización espacial de un territorio. A través de las redes de transporte, se articula y manifiesta la movilidad de la población para la satisfacción de necesidades y se da el surgimiento de diferentes tipos de relaciones económicas, sociales, políticas en los territorios (Rodrigue et al., 2013), lo que hace importante su análisis para la comprensión de determinados fenómenos territoriales.

Como manifiestan Seguí y Petrus (1991), estas relaciones pueden ser de forma equilibrada, siempre y cuando las redes posibiliten intercambios a diferentes escalas (locales, regionales, internacionales); o desequilibradas y desestructuradas, incrementando las desigualdades territoriales y concentrando las relaciones entre pocos territorios. Así mismo, el análisis de estas se puede presentar con dos enfoques: por un lado, se puede investigar la red de intercambios comerciales que vincula los centros de producción y consumo, y por otro, se puede analizar la configuración espacial de esta red y su papel en el sistema de transporte.

Según Madrid y Ortiz (2005), existen diferentes técnicas que se pueden aplicar para el análisis de las redes de transporte, dentro de las cuales se encuentra el análisis gráfico, el cual utiliza las construcciones de grafos para simplificar la estructura de la red y generar observaciones de forma más sencilla; el análisis estructural, que corresponde al análisis estático que tiene por objetivo identificar y describir los elementos básicos de la red (nodos, arcos, longitud total, longitud media, área y densidad) y definir el grado de conexión a través de diferentes índices; por último, el análisis dinámico que está determinado por el estudio funcional de la red, a partir de la cohesión, accesibilidad, centralidad, jerarquía y comportamiento de los flujos. En las tablas 3, 4 y 5 se detallan las diferentes propiedades y métricas de las técnicas mencionadas, respectivamente.

Tabla 3. Propiedades y métricas del análisis grafico

Propiedad	Descripción	Formula	Variables
Razón de sinuosidad (S)	Esta razón permite clasificar el tipo de red en relación con su forma real, teniendo en cuenta las variaciones que puede tener la longitud del grafo con respecto a la longitud real, y saber si el grafo se aparta de la realidad.	$S = \frac{Lg}{Lr}$	Lg: Longitud del grafo Lr: Longitud real

Fuente: Elaboración propia con base en Madrid y Ortiz (2005)

Tabla 4. Propiedades y métricas del análisis estático

Propiedad	Descripción	Formula	Variables
Densidad de la red (D)	Esta medida presenta una relación entre la suma total de la longitud de los arcos de la red entre el área total de la superficie analizada.	$D = \frac{\sum Long}{AreaTot}$	$\sum Long$: Suma de la longitud de arcos. $AreaTot$: Área de la superficie
Grado de conexión de una red	El grado de conexión de una red se fundamenta en la relación entre el número de arcos y nodos. Entre más nodos y arcos presenta una red, mayor conexión tendrá y favorecerá a los flujos de esta. Existen diferentes índices que pueden medir esta relación: beta, gamma, el número ciclomático y el alfa.	<p>Índice Beta (β)</p> $\beta = \frac{No. Arcos}{No Nodos}$ <p>Índice Gamma (γ)</p> $\gamma = \frac{2a}{N(n-1)}$ <p>% Porcentaje de γ</p> $\gamma = \frac{a}{3(n-2)} * 100$ <p>Número ciclomático (NC)</p> $NC = (a - (n - 1))$ <p>Índice Alfa (α)</p>	<p>$No. Arcos; a$: Número de arcos.</p> <p>$No Nodos; N$: Número de nodos.</p> <p>$n-1$: Número de nodos menos 1</p> <p>$n-5$: Número de nodos menos 5</p>

Propiedad	Descripción	Formula	Variables
		$\alpha = \frac{NC}{2(n-5)}$	
Cohesión (Cs)	La cohesión se define a partir de la existencia de relaciones indirectas entre los nodos de la red, identificando las relaciones entre nodos y señalando su grado de cohesión. Esta medida se toma a través de la matriz topológica de conectividad, sumando las filas de la matriz de conectividad y dividiéndolo por el número de relaciones posibles entre los nodos.		

Fuente: Elaboración propia con base en Madrid y Ortiz (2005)

Tabla 5. Propiedades y métricas del análisis dinámico

Propiedad	Descripción	Formula	Variables
Accesibilidad	La accesibilidad es la mayor o menor cantidad de aristas y nodos que se requiere para transportarse desde un nodo de referencia a cualquiera de los restantes. Para calcularla es necesario utilizar la matriz de accesibilidad, y utilizar el valor asociado (mayor valor de la fila) y el número shimbel (sumatoria de los números de la fila en la matriz, siendo el más accesible el de menor valor).	Índice Omega (Ω_i)	Accesibilidad
		$\Omega_i = \frac{SHI - SHI_i}{SHI^i - SHI_i}$	Ω_i : índice omega del nodo i
		Dispersión del grafo (g)	SHI : número shimbel del nodo i
		Dg= Medida real del grafo (longitud, tiempo o número de aristas)	SHI_i : número shimbel más bajo
		Longitud media del grafo (Lmg)	SHI^i : número shimbel más alto
		$Lmg = \frac{Dg}{N}$	Longitud media del grafo
		Media de los recorridos (MedR)	Dg: Dispersión del grafo
		$MedR = \frac{SHI}{N}$	N: Número de nodos
Centralidad	El análisis de centralidad se basa en la distribución de los nodos especiales de la red (ciudades) y posteriormente a partir de la atracción que ejercen unos nodos sobre otros	Índice Rn (distribución de los nodos)	Distribución de los nodos
			d: distancia media entre cada núcleo y su vecino más próximo

Propiedad	Descripción	Formula	Variables
	(modelos de gravedad).	$Rn = 2d * \sqrt{\frac{N}{S}}$	N: Número de núcleos S: Superficie donde estos se asientan
		Atracción de nodos	Atracción de nodos
	Proporción de personas de A que compran en B, en relación con las que compran en C =	$\frac{Pob B}{Pob C} * \frac{(di A a C)^2}{(di A a B)^2}$	Pob B: Población de B Pob C: Población de A di A a C: Distancia de A a C di A a B: Distancia de A a B
		Área de influencia	Área de influencia
		$Dx = \sqrt{\frac{Dxy}{1 + \frac{Py}{Px}}}$	x: cada uno de los nodos satélites y: cada nodo central Dx: punto de ruptura entre x y y Dxy: distancia entre punto central y uno de los satélites Px: población del nodo satélite Py: población del nodo central
Jerarquía	Este tipo de análisis explica las posibles regularidades de la organización estructural del territorio y analiza los flujos y vínculos de funciones comerciales y de servicios en un área urbana. Uno de los pioneros de este tipo de análisis fue Christaller, con la teoría de los lugares centrales.		

Fuente: elaboración propia con base en Seguí y Petrus (citado en Madrid y Ortiz, 2005)

Por su parte, Seguí y Petrus (1991) también realizan una clasificación de las técnicas de análisis de redes con base al tipo de estudio: la demanda y la oferta. De acuerdo con Islas et

al. (2002), la primera trata del estudio de los deseos de los consumidores y usuarios del sistema de transporte (personas o mercancías), los cuales pueden depender de variables como el precio del servicio, el ingreso de los usuarios, la calidad del servicio, el modo del transporte, el objetivo de viaje y la distancia a desplazarse, entre otros.

Así mismo, otra clasificación menciona los estudios de oferta, en los cuales se utilizan métricas básicas como la longitud de las líneas, kilómetros recorridos, niveles de ocupación, duración y frecuencia de los viajes, entre otras (Seguí y Petrus, 1991). Según Escalona (1989), estos estudios se aplican principalmente en países en vías de desarrollo, donde la demanda parece ser dependiente de la oferta de las redes, la cual casi siempre es insuficiente para cubrir las necesidades reales de la población.

Los estudios de oferta de redes de transporte se pueden analizar a través de las densidades reales y potenciales. Estos se analizan junto con las configuraciones espaciales y estructuras de las unidades geográficas estudiadas. En la tabla 6 se detallan algunas métricas utilizadas (Seguí y Petrus, 1991):

Tabla 6. Tipos de análisis de la oferta de redes

Tipos de análisis	Métricas
Indicadores de trazado	<p>Índice de rodeo: Relaciona el grado de desviación de una red real con respecto a una condición óptima.</p> <p>Velocidad media. Este puede considerarse como un indicador de servicio de la red en determinada zona. Es igual a la suma de los cocientes entre la distancia mínima en línea recta, entre los vértices de la red, y el tiempo real empleado entre los vértices.</p>
Indicadores de densidad real	<p>Densidad de la red: Mide los Km de la red por unidad de superficie (Km²). Este indicador es ampliamente utilizado como indicador del grado de desarrollo de un territorio.</p> <p>Densidad de núcleos por Km²: Mide para conocer la concentración de los núcleos poblacionales en una determinada unidad geográfica. Sirve como complemento a la medida anterior.</p>

Tipos de análisis	Métricas	
Indicadores de densidad potencial	Km de red / número de habitantes	
	Km de red / por población económicamente activa	
	Km de red / número de empresas industriales o valor de la producción industrial o de los servicios.	
	Km de red / número de poblaciones.	Así como se puede considerar la medida total de longitud de la red, también se puede considerar la longitud de las líneas de transporte público.
Técnicas de correlación múltiple	Los anteriores índices (densidad real y potencial) pueden relacionarse con un conjunto de variables físicas (superficie y altitud media), demográficas (población total, densidad y población potencial), económicas, entre otras, mediante la correlación múltiple (por ejemplo, el análisis factorial), permitiendo conocer los desequilibrios territoriales entre los que oferta la red viaria.	
Análisis de otras variables en la oferta de redes	Calidad de los medios de transporte	Tiempo de viaje en función de la longitud de líneas de transporte, la velocidad comercial, la congestión y la frecuencia del servicio.
		Horas de servicio del sistema de transporte
		Número de paradas del transporte público.
	Movilidad de las redes	Kilómetros recorridos en relación con la demanda (viajeros/ Km recorrido)
		Índice dinámico de densidad del tráfico. Calcula las necesidades del transporte y aprovechamiento de las redes.
	Ocupación de las redes	Relación entre la oferta de Km recorridos y demanda potencial del área urbana o región (Km recorridos/ población) Oferta de viajes realizados por línea y su relación con el número de pasajeros. índice de ocupación de la red. Expresa la relación entre el número de pasajeros transportados y la oferta media de la red.
		Número de accidentes por kilómetros recorrido

Tipos de análisis	Métricas
Accesibilidad de las redes	<p data-bbox="769 296 1430 457">La accesibilidad mide la cantidad de servicio prestado y su relación con la superficie analizada, así como su población. Normalmente se utiliza en áreas urbanas y regionales. Este indicador puede medir la jerarquía de una zona a partir de 3 indicadores:</p> <p data-bbox="769 499 1206 531">Número de líneas por zona estudiada</p> <p data-bbox="769 569 1255 600">Número de zonas que conectan las líneas</p> <p data-bbox="769 638 1299 669">Jerarquía de las zonas según su accesibilidad</p> <p data-bbox="769 707 1419 806">La relación de estos tres indicadores determina el peso del área analizada a partir del análisis de su oferta y las necesidades de la población estudiada.</p>

Fuente: elaboración propia con base en Seguí y Petrus (1991)

Con el avance de las nuevas tecnologías de la información geográfica, también se ha incorporado al análisis de redes de transporte a través de la herramienta de Network Analyst de ArcGIS, la cual permite la creación de modelos geométricos de redes a través de nodos (Junctions) y ejes (Edges), representando de forma eficiente la circulación vehicular para la resolución de problemas de análisis de ruta, ubicación de redes, análisis de la entidad más cercana, análisis de un área de servicio y análisis de matrices origen-destino (Barrientos, 2007; Curtin, 2007).

Con esta herramienta se destacan trabajos como los de Granda et al. (2022); Naranjo y Gutiérrez (2016), para el estudio de accesibilidad de nodos y plataformas logísticas; Jiménez y Torrecillas (2020), para el diseño de redes multimodales de transporte; Godoy y Garnica (2012); Torres (2018), para la descripción de áreas funcionales y la organización de las redes de transporte en un territorio, entre otros.

Para finalizar, según Miralles y Albet (citados por Seguí y Petrus, 1991), aseguran que la teoría de grafos representa un enfoque efectivo para identificar deficiencias en las redes de transporte o comprender un sistema de transporte particular en un determinado territorio; evaluando así mejoras en la accesibilidad mediante la modificación de la estructura, la

evaluación de escenarios o la redistribución de la red; y proponiendo estrategias pertinentes para la planificación de los sistemas de transporte y ciudades. Cabe destacar que estas mejoras en un sistema urbano pueden representar una mejor ubicación de los equipamientos, actividades económicas y sus infraestructuras para una mejor cobertura de los servicios.

1.3 Accesibilidad

De acuerdo con Rodrigue et al. (2013), la accesibilidad presenta una relación directa con el desarrollo de sistemas de transporte, teniendo en cuenta que los sistemas de transporte que operan eficientemente proporcionan niveles elevados de accesibilidad, mientras los menos eficientes presentan niveles más bajos. En ese sentido, la accesibilidad puede considerarse como un elemento clave de la geografía del transporte, teniendo en cuenta que es una expresión directa de la movilidad.

El concepto de accesibilidad puede presentar diferentes definiciones, acorde con su utilización en múltiples disciplinas con diferentes enfoques (Escalera, 2022; López, 2015). Desde el punto de vista de la planeación territorial y la geografía, se definió desde la aparición del urbanismo a mediados del siglo XIX, como resultado de las transformaciones sociales y económicas de la revolución industrial (Garnica-Monroy, 2012), donde se consideraba un enfoque físico a partir de la localización de elementos en el espacio geográfico, soportados a través de teorías regionales y positivistas como el estado aislado (Escalera, 2022).

Uno de los primeros en abordar el concepto de accesibilidad fue Hansen, quien la definió como una medida de la distribución espacial de las actividades de acuerdo con una localización, ajustada por la capacidad y el deseo de la población en superar esa separación espacial (Garnica-Monroy, 2012; Hansz et al., 2018), empezándose a usar como un instrumento desde la planeación territorial para medir la interacción espacial desde los diversos componentes en un territorio.

De acuerdo con Seguí y Petrus (1991), esta interacción espacial se puede dar en diferentes ámbitos (locales, regionales, nacionales o internacionales), la cual es definida mediante vínculos sociales o económicos de un determinado territorio, donde se presentan, a su vez,

intereses estratégicos y políticos que se materializan en el intercambio de flujos de bienes, servicios y personas movilizados a través de redes de transporte.

Rodrigue et al. (2013) define la accesibilidad como la evaluación y medida de capacidad de un lugar para alcanzar o ser alcanzado por diferentes localizaciones, lo cual considera la influencia de los elementos del sistema de transporte como las infraestructuras viales y su configuración espacial en el territorio (López-Escolano y Pueyo-Campos, 2019).

Adicionalmente, hace referencia a que este concepto presenta dos componentes principales: la localización, que es un punto localizado en el espacio en relación con las infraestructuras de transporte, y la distancia, que es una medida (en tiempo o longitud) que se deriva de la conectividad entre las localizaciones a través de la infraestructura de transporte disponible. Así mismo menciona dos tipos de accesibilidad: topológica, que se mide a través de un sistema de nodos y caminos (red de transporte); y contigua, que se mide sobre la superficie, teniendo en cuenta que la accesibilidad puede ser un atributo de cada ubicación.

Por su parte, Cagmani (2004) considera la accesibilidad como un fundamento de la organización del espacio urbano interno, que además contribuye a la minimización de los obstáculos del espacio en función de la movilidad e intercambios, con el objeto de garantizar locaciones con ventajas, haciéndolas más competitivas a nivel de localización a favor de las actividades económicas, productivas, residenciales y renta del suelo, otorgando disponibilidad de servicios, productos e información sin incurrir en gastos innecesarios de tiempos y costos de transporte. Otros autores como Batty (2009) la definen como una medida de oportunidad de un lugar, con el costo de desarrollar esa oportunidad.

Por último, Garrocho y Campos (2006) mencionan que la accesibilidad contiene dos componentes básicos: uno físico relacionado con la distancia geográfica, expresado en una medida de proximidad espacial, y un componente social que existe entre el usuario potencial (población) y los servicios que ofrece un territorio y por tanto su utilización eficiente y oportuna (satisfacción de necesidades).

1.3.1 La accesibilidad, la estructura espacial y la desigualdad

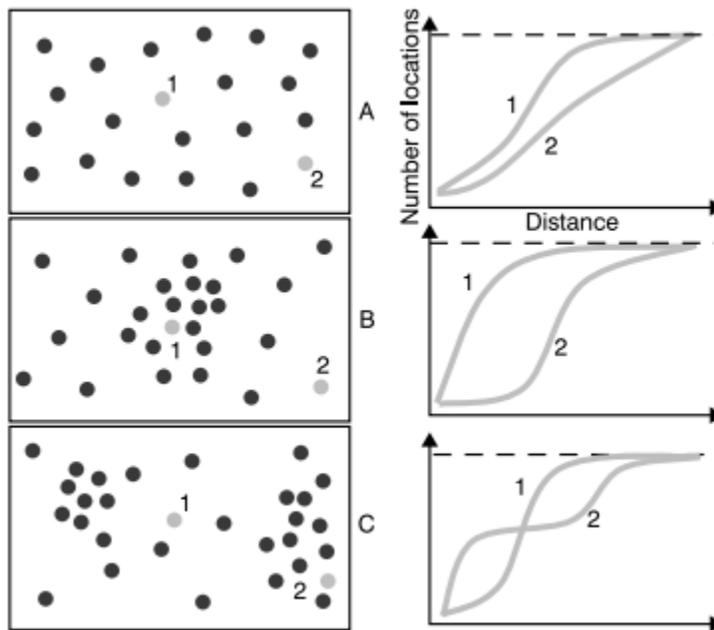
La accesibilidad sirve como un indicador que precisa la estructura espacial de un territorio, considerando, también, las desigualdades derivadas de la distancia entre las distintas ubicaciones con respecto a otros lugares (Rodrigue et al, 2013), teniendo en cuenta que, en el espacio geográfico, los territorios presentan diversas limitaciones topográficas, de infraestructuras, sociales y económicas; por ende, las condiciones, estructura y relaciones de cada territorio son diferentes.

Por ejemplo, en la figura 6 se consideran distintas estructuras espaciales, donde dos lugares de igual relevancia tienen accesibilidades diferentes. En el caso de la estructura espacial A, la ubicación uno presenta más accesibilidad que la ubicación dos. A medida que incrementa la distancia en línea recta, el punto uno tiene mayor acceso a un mayor número de actividades o localizaciones que el punto dos. Sin embargo, para que el punto dos acceda a un mayor número de localizaciones es necesaria una mayor distancia recorrida. En la estructura B, se evidencia una mayor accesibilidad en el punto uno debido a su cercanía y concentración a un mayor número de actividades que el punto dos. Por último, la estructura C indica, inicialmente, una mayor concentración de actividades del punto dos hasta cierta distancia, y posteriormente el punto uno supera esta concentración de actividades después de superar determinada distancia (Rodrigue et al, 2013).

De acuerdo con la figura 6, en una determinada estructura espacial, cada ubicación presenta ventajas competitivas con respecto a otra; por ende, cada ubicación presenta una accesibilidad diferente.

Otros autores mencionan a la accesibilidad como una medida para analizar desigualdades en un territorio (Allen, 2018), midiendo el impacto económico y social en diferentes áreas geográficas (Seguí y Petrus, 1991). De esta forma, a través de la accesibilidad se pueden configurar patrones en el espacio, lo que implica diferentes oportunidades para cada persona o grupo de personas según su ubicación, evidenciando así la desigualdad de un territorio según el enfoque que se estudie.

Figura 6. La accesibilidad y su estructura espacial



Fuente: Rodrigue et al (2013)

Autores como Ferreira y Walton (2004) señalan que hay una relación causal entre la desigualdad de un país y la cantidad y calidad de infraestructura que posee, lo que evidencia la importancia de la comprensión de esta temática en el desarrollo de áreas urbanas. En ese sentido, la medida de accesibilidad como métrica de la desigualdad permite generar insumos para las administraciones territoriales con el fin de promulgar e implementar políticas públicas destinadas a la reducción de desigualdades, Por ejemplo, en el acceso al transporte público, acceso al trabajo o el acceso a los diferentes servicios que se ofrecen en las áreas urbanas (Bosque et al., 2012).

Particularmente, en Latinoamérica existen preocupaciones para identificar desigualdades, teniendo en cuenta enfoques de bienestar social en la salud, educación y acceso a la vivienda, desigualdad en el acceso a los servicios públicos, agua, electricidad y vialidad y transporte (Bosque et al., 2012). Lo cual se reafirma con autores como Allen (2018), donde menciona el enfoque de equidad social para la medición de desigualdades, analizando la forma como se distribuyen los beneficios o costos (impactos) en un determinado territorio, y buscando

generar igualdad de oportunidades entre las poblaciones más favorecidas y las más vulnerables.

1.3.3 Mediciones de la accesibilidad

La medición de la accesibilidad como herramienta de la geografía del transporte y la planificación territorial es pertinente y juega un papel muy importante a la hora de formular y diseñar políticas para estos fines, contribuyendo de forma eficiente en la toma de decisiones basadas en datos relevantes y reales sobre determinadas problemáticas (Adhvaryu y Kumar, 2021).

En la literatura existe una gran variedad de definiciones de accesibilidad, y de igual forma existe diversidad de metodologías para medirla, las cuales dependen en gran forma del problema específico a abordar, los objetivos de análisis, las herramientas y la disponibilidad de información para el estudio (Hansz et al., 2018).

En ese sentido, se han caracterizado una serie de métodos para estimar la accesibilidad como los indicadores de: (1) separación espacial, (2) de oportunidades acumulativas, (3) de interacción espacial, (4) de utilidad, (5) espacios temporales (Garrocho y Campos, 2006). Por su parte, Salonen y Toivonen (2013) sostienen que las medidas de distancia son fundamentales en la estructura de los indicadores de accesibilidad.

En la tabla 7 se muestran algunas métricas de la accesibilidad de acuerdo con el aporte de varios autores de la literatura consultada; en esta tabla se especifica la fuente, el concepto que lo identifica, el enfoque para el cual fue diseñado, la medida dada por la fórmula matemática para su cálculo, y las variables donde se indica cada fórmula.

Tabla 7. Revisión de medidas de accesibilidad

Autores	Enfoque / método	Expresión matemática	Descripción	Variables
Rodrigue et al., (2013);López-Escolano y Pueyo-Campos (2019);	Sostienen que la cuantificación de la accesibilidad es un instrumento para la planificación espacial y del transporte con base a las distancias entre ubicaciones, permitiendo de esta forma valorar el territorio.	<p>Accesibilidad geográfica</p> $A(G) = \sum_i^n \sum_j^n dij/n$	Permite observar la accesibilidad como la sumatoria de todas las distancias de cada localización entre el total de localizaciones. Al reducir el valor de accesibilidad de un lugar, se considera más accesible. Este indicador es inversamente proporcional a la accesibilidad de un lugar.	<p>dij: Distancias entre cada localización</p> <p>n: Número de localizaciones</p>
		<p>Accesibilidad potencial</p> $A(P) = \sum_i^n Pi + \sum_j^n Pj /dij$	Este indicador guarda una relación directamente proporcional a la accesibilidad, es decir, entre más elevado sea el valor de este indicador, mayor es la accesibilidad a la locación.	<p>dij: Distancia entre i y j</p> <p>Pj: Atributos del lugar j</p> <p>Pi: Atributos del lugar i</p>
Godoy y Garnica (2012); Torres, (2018); Torres y Garnica (2022).	Sugieren la utilización de métricas de accesibilidad para poder caracterizar la infraestructura vial de áreas urbano-rurales.	<p>Accesibilidad relativa</p> $IA_i = \sum_{j=1}^n \frac{IR_{ij}}{II_{ij}}$	Este índice muestra la distribución espacial de las infraestructuras y su impacto o eficiencia en el territorio.	<p>IA_i: Índice de accesibilidad de la cabecera corregimental <i>i</i></p> <p>IR_{ij}: Impedancia real a través de la red entre las poblaciones <i>i</i> y <i>j</i>;</p>
		<p>Interacción espacial</p>	Este índice evalúa el peso que puede tener un destino y	<p>II_{ij}: impedancia ideal.</p> <p>I_{ij}: Movimiento entre la</p>

Autores	Enfoque / método	Expresión matemática	Descripción	Variables
Principi (2012); Buzai y Baxendale (2003); Mieres, (2004)	Estos estudios analizan, en escalas regionales, la estructura espacial a partir de los vínculos de las redes, con el fin de mejorar los vínculos espaciales para el desarrollo	Accesibilidad ideal $AI_i = \sum_{j=1}^n di_{ij}$	Este índice calcula un valor distancia global por unidad territorial, evidenciando mejores condiciones para las unidades territoriales con menor valor, ya que se pueden recorrer en menor tiempo en una distancia euclidiana.	<p>cabecera corregimental i y j</p> <p>K: Constante determinada empíricamente que tienen en cuenta aspectos socioeconómicos y características propias del tipo de desplazamiento.</p> <p>P_i: Población del asentamiento i</p> <p>P_j: Población del asentamiento j</p> <p>d_{ij}^b: Impedancia del desplazamiento entre i y j, afectado por b que depende del motivo del desplazamiento.</p> <p>AI_i : Accesibilidad ideal para la localidad i</p> <p>$\sum_{j=1}^n di_{ij}$: Sumatoria de las distancias ideales entre la localidad i y cada una de las localidades del área de estudio j</p>

Autores	Enfoque / método	Expresión matemática	Descripción	Variables
	regional, teniendo en cuenta indicadores de conectividad, accesibilidad e integración espacial.	Accesibilidad real	Este índice es parecido al índice anterior, solo que se mide sobre las vías de comunicación existentes.	AR_i : Accesibilidad real para la localidad i
$AR_i = \sum_{j=1}^n dr_{ij}$		$\sum_{j=1}^n dr_{ij}$: Sumatoria de las distancias reales entre la localidad i y cada una de las localidades del área de estudio j		
Calidad de comunicación		Es un indicador de eficiencia de una localidad con respecto a su red. Es favorable cuando más se acerca al valor máximo. Al ser siempre $AI < AR$ el valor de este será entre $0 \leq ICC_i \leq 1$	AI_i : Accesibilidad ideal para la localidad i	
$ICC_i = \frac{AI_i}{AR_i}$		AR_i : Accesibilidad real para la localidad i ICC_i : Índice de calidad de comunicación		
Índice de trayectoria		Con este indicador se indica la eficiencia en la posición que cada unidad territorial ocupa en la red. Este presenta resultados $IT_i \geq 1$, indicando el porcentaje de longitud mayor que se aparta la situación real de la ideal.	AI_i : Accesibilidad ideal para la localidad i	
$IT_i = \frac{AR}{AI_i}$	AR_i : Accesibilidad real para la localidad i	IT_i : Índice de trayectoria		
Potencial de la población		Este índice mide la interacción potencial de una unidad territorial con respecto al total de las localidades. Se calcula a	P_i : Es la población de una localidad	
P_j : Es la población cada una				

Autores	Enfoque / método	Expresión matemática	Descripción	Variables
Garrocho y Campos (2006) ; Talavera y Valenzuela (2014); Andrade et al. (2018); Gonzáles (2019)	En estos estudios, los autores consideran la accesibilidad como un indicador de desempeño urbano en el área de la salud, y proponen un indicador calculado a partir de la oferta de las unidades médicas y su capacidad, la demanda de la población (por unidades territoriales) y de la distancia euclidiana entre los anteriores elementos.	$PI_i = P_i + \sum_{j=1}^n \frac{P_j}{d_{ij}}$	partir del tamaño de la población en la unidad analizada.	<p>de las otras localidades de la región</p> <p>d_{ij}: Es la distancia entre las localidades i y j.</p> <p>PI_i: Es el potencial de interlocalidades para la localidad i</p>
		<p>Accesibilidad para la oferta en salud</p>	Estima la accesibilidad de la oferta de las unidades de salud. Entre mayor sea el valor del cálculo, mayor será el grado de accesibilidad que tenga la unidad de servicios (base a la oferta).	<p>I_j: Índice de accesibilidad para las unidades de servicios de salud.</p> <p>S_j: Nivel de atención de los servicios disponibles.</p> <p>Otot: Demanda total en la zona de estudio ubicada en las AGEB</p> <p>C_{ij}: Costo de transporte.</p> <p>- b: Fricción de distancia</p>
		<p>Accesibilidad para la demanda en salud</p>	Estima la accesibilidad de la demanda (población de las unidades territoriales). Entre mayor sea el valor del cálculo, mayor es el grado de accesibilidad de las unidades del área de estudio	<p>I_i: Índice de accesibilidad para el grupo de población objetivo (Población localizada a través de los centroides de las AGEB).</p> <p>S_j: Nivel de atención de los</p>
		$I_j = \sum_i \left(\frac{S_j}{O_{tot}} \right) * C_{ij}^{-b}$		
		$I_i = \sum_j \left(\frac{S_j}{O_{tot}} \right) * C_{ij}^{-b}$		

Autores	Enfoque / método	Expresión matemática	Descripción (con base a la demanda).	Variables servicios disponibles.
Garrocho y Campos, (2006), Garnica-Monroy (2012); Hansz et al. (2018), Scheurer y Curtis, (2007); Miller, (2020)	En estos estudios se realizan revisiones literarias, donde coinciden en diversas métricas para el cálculo de la accesibilidad. Dentro de estos enfoques metodológicos se caracterizan principalmente: la separación espacial, las oportunidades acumulativas, la interacción espacial, y los indicadores de utilidad. Cabe destacar que las	Indicadores de separación espacial	Estima el recorrido promedio de las zonas de origen a los puntos de destino. Denso vínculo entre el punto de acceso a los servicios de transporte.	Otot: Demanda total en la zona de estudio ubicada en las AGEB
		$A_i = \frac{\sum_j dij}{b}$	Estima el tiempo de transporte de distancia para cada origen.	C _{ij} : Costo de transporte.
		Indicador de oportunidad acumulativa	Limitación: no considera características de usuarios, ni la conducta espacial.	- b: Fricción de distancia
		$A_i = \sum_t O_i * t$	Considera la oferta como factor de atracción y los costos de transporte, estos últimos sensibles a las variaciones.	d: Distancia entre el origen y el destino
		Indicador de interacción espacial		b: sensibilidad de la demanda ante los cambios en costos de transporte
				t: Umbral de tiempo o distancia
				O _i : Destino que está dentro del umbral
				O _j : Atractividad de la unidad de servicio
				d _{ij} : Costo de transporte entre el origen y el destino
				b: Fricción de la distancia debido al comportamiento

Autores	Enfoque / método	Expresión matemática	Descripción	Variables
	fórmulas de estos enfoques pueden variar respecto a la fuente, sin embargo, los tipos de enfoque coinciden.	$A_i = \frac{\sum_j O_j}{d_{ij}^b}$ <p data-bbox="768 386 953 444">Indicadores de Utilidad</p> $A_n = E \left[\begin{matrix} Max U_j n \\ j \in C \end{matrix} \right]$ $= \ln \sum_{j \in C} \exp(V_j n)$	Se basa en la utilidad individual percibida que reportaría cada unidad de servicio a cada usuario.	espacial de los usuarios n: Individuos j: Destinos C: Grupo de destinos

Fuente: elaboración propia

Según la revisión realizada, es claro que existen múltiples formas de calcular la accesibilidad. Para efectos de implementar en la presente investigación, se utilizó un método referente al cálculo de la accesibilidad por indicadores de separación espacial, aplicando conceptos de Principi (2012), Buzai y Baxendale (2003) y Mieres (2004), referentes a las impedancias reales e ideales y el índice de la trayectoria, así como las fórmulas de accesibilidad relativa que evalúan una red de transporte terrestre de acuerdo a los estudios de Godoy y Garnica (2012); Torres, (2018) y conceptos relacionados con la accesibilidad geográfica de Rodrigue et al. (2013), las cuales presentan los mismos principios.

1.4 Marginación

De acuerdo con Moreno et al. (2018), América Latina es una de las regiones con mayor desigualdad a nivel mundial, las cuales son producidas por el sistema capitalista. Lo que ha llevado a esta temática a convertirse en una prioridad social y por ende ser estudiada en diversas investigaciones (Caravaca y Cruz, 1993; Rodríguez, 2018; Lustig, 2020; Saraví, 2020), que han incluido gran variedad de técnicas y métricas para medir la desigualdad, como por ejemplo el índice de marginación (IM), el índice de vulnerabilidad (IV), el índice de rezago social (IRS), el índice de pobreza monetaria, la pobreza multidimensional, el índice de desarrollo humano (IDH), el coeficiente de Gini, entre otros (Peláez, 2017). Estas métricas tienen en común que reducen en un índice las desigualdades sociales (Cadena, 2021), las cuales sirven para describir las discrepancias de un territorio que impactan la calidad de vida de ciertos grupos sociales (Moreno et al., 2018).

Peláez (2017) manifiesta que, en México, uno de los principales problemas es el acceso limitado de la población a los servicios de salud, educación, justicia y al trabajo, lo cual deriva en condiciones de vulnerabilidad, impactando negativamente en la calidad de vida de las personas. En ese sentido, a nivel nacional se han realizado esfuerzos para identificar estas problemáticas, utilizando diferentes métricas, una de ellas a través del índice de marginación y otras medidas de desigualdad (Vulnerabilidad, Rezago social) (Ortega, 2005; Camberos y Bracamontes, 2007; Nava y Pineda, 2010; Pineda, 2010; Morales-Hernández, 2015; Mancino et al., 2018; CONEVAL, 2020; CONAPO, 2020, 2021; Cadena, 2019, 2021).

De acuerdo con Nava y Pineda (2010), el concepto de marginación tiene sus inicios en los años 60 (siglo XX), cuando José Nun se refiere a ella como la proporción de la población que no tiene posibilidades de tener un empleo en condiciones de expansión económica, lo cual condiciona desfavorablemente a la población y origina la exclusión y el alejamiento de los beneficios del sistema económico.

Es así como en los años 70 en México se crearon instituciones como la Coordinación General del Plan Nacional de Zonas Deprimidas y Grupos Marginados (COPLAMAR) y el Consejo Nacional de Población (CONAPO), las cuales incluyeron el concepto de marginación y

elaboraron indicadores de medición para las entidades federativas del país. Cabe destacar que CONAPO propuso una versión mejorada del índice de COPLAMAR. En la tabla 8, se evidencian las diferencias de estos indicadores.

Tabla 8. Concepto de marginación de COPLAMAR y CONAPO y variables de los índices de marginación

Crterios	COPLAMAR	CONAPO
Definición de marginación	Son marginados aquellos grupos que han quedado al margen de los beneficios de la riqueza generada, pero no necesariamente al margen de la generación de esa riqueza.	La marginación es un fenómeno estructural que excluye a grupos sociales del proceso de desarrollo y al no disfrute de los beneficios. En esta se consideran cuatro dimensiones: vivienda, ingresos monetarios, educación y distribución de la población.
Variables del índice	9 variables: (1) bajos niveles de ingreso, (2) altos niveles de subempleo, (3) alto porcentaje de población rural agrícola, (4) incomunicación con las localidades, (5) alimentación inadecuada, (6) bajos niveles de escolaridad, (7) bajos niveles de salud y dificultad de acceso a los servicios médicos, (8) viviendas inadecuadas sin servicios, y (9) escasos accesos a bienes.	9 variables: (1) porcentaje de la población alfabeta de 15 años o más, (2) porcentaje de la población sin primaria completa de 15 años o más, (3) porcentaje de ocupantes de vivienda particulares sin agua entubada, (4) porcentaje de ocupantes de vivienda particulares sin drenaje y servicio sanitario exclusivo, (5) porcentaje de ocupantes de vivienda particulares con piso de tierra, (6) porcentaje de ocupantes de vivienda particulares sin energía eléctrica, (7) porcentaje de viviendas con algún nivel de hacinamiento, (8) porcentaje de la población en localidades con menos de 5,000 habitantes, (9) porcentaje de la población ocupada con ingresos de hasta dos salarios mínimos.
Método de clasificación	Dalenius y Hodges	Dalenius y Hodges.
Insumos	Año base 1970, variables del IX Censo Nacional de Población y Vivienda	Variables del CNVP 1990,2000 y estimaciones del censo de población 2005 INEGI
Método estadístico	Componentes principales	Componentes principales

Fuente: elaboración propia con base en Nava y Pineda (2010) y CONAPO (2020)

A partir de sus inicios, la marginación se ha medido en diferentes niveles de desagregación. Las primeras escalas consideradas para su representación fueron por entidades federativas y municipales, siendo los únicos niveles de desagregación accesibles para el periodo de 1994.

A medida que se actualizaron los censos y sus respectivas escalas de trabajo (localidades, áreas geoestadísticas básicas y colonias), el nivel de desagregación espacial del indicador fue mayor. Actualmente, el mayor nivel de desagregación permite el cálculo de la marginación urbana, el cual se representa por áreas geoestadísticas básicas-AGEB y municipios (CONAPO, 2020).

No obstante, se han destacado autores como Mancino et al. (2018), que implementaron una metodología diferente para el cálculo del índice de marginación, a través de la estandarización de indicadores con variables contenidas en el Censo Nacional de Población y Vivienda 2010, donde se desagregó el índice a nivel de sección electoral, teniendo en cuenta el método de componentes principales y la clasificación Dalenius y Hodges, que agrupa en 5 grados el índice calculado (muy alto, alto, medio-bajo y muy bajo). Dentro de los indicadores considerados por Mancino et al. (2018), se encuentran (ver tabla 9):

Tabla 9. Indicadores para el cálculo del índice de marginación, metodología Mancino

Dimensión	No	Indicadores socioeconómicos
Educación	1	Porcentaje de población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela
	2	Porcentaje de población de 15 años o más sin educación básica completa.
Salud	3	Porcentaje de población sin derechohabiencia ² a los servicios de salud
Vivienda	4	Porcentaje de viviendas particulares habitadas sin agua entubada dentro de la vivienda
	5	Porcentaje de viviendas particulares habitadas sin drenaje conectado a la red pública o fosa séptica.
	6	Porcentaje de viviendas particulares habitadas sin escusado con conexión de agua
	7	Porcentaje de viviendas particulares habitadas con piso de tierra
	8	Porcentaje de viviendas particulares habitadas sin refrigerador

Fuente: elaboración propia con base en Mancino (2018)

² La población sin derechohabiencia hace referencia al grupo de personas que no cuentan con el derecho de prestaciones por parte de las instituciones de seguridad social.

Por otro lado, este índice ha tenido cambios en la implementación de su metodología de cálculo con respecto a versiones anteriores, en donde se agregan nuevas variables, dimensiones, o realizando ajustes en la técnica de análisis. Considerando este último, uno de los cambios más recientes para el cálculo del índice de marginación por CONAPO (2020) fue el ajuste del método de componentes principales al método de medición de distancias ponderadas (DP2).

Aunque ambas técnicas permiten generar un indicador a través de varias variables o dimensiones, la técnica DP2 genera un indicador sintético que permite la comparación de las unidades de observación a lo largo del tiempo. En contraste al método de componentes principales, que solo permite la comparación de la métrica con respecto a sus poblaciones en un determinado momento, como manifiestan autores como Gutiérrez-Pulido y Gama-Hernández (2010) y Cárdenas (2010).

Pese a lo anterior, también se evidencian esfuerzos de diferentes autores (Aparicio, 2004; Cortés y Vargas, 2013) que buscan encontrar solución a las limitantes del método de componentes principales, sin embargo, estas iniciativas reducen las preferencias del índice de marginación con respecto al deterioro de algunas propiedades que lo resaltan frente a otros, como la estandarización de las variables (Peláez, 2017). No obstante, Peláez (2023) insiste en demostrar que el índice de marginación a través de componentes principales puede medirse a través del tiempo.

En la actualidad, para CONAPO (2020), la marginación sigue siendo un fenómeno que mide la concentración de las carencias de servicios en la población, y representa, de esta forma, un indicador de la desigualdad territorial, el cual es una de las principales herramientas para la focalización y estrategias de las políticas públicas en México.

Así mismo, para su cálculo considera un conjunto de dimensiones en las cuales agrupa un total de 11 variables. Estas dimensiones son educación, salud, vivienda y disponibilidad de bienes y servicios. Destacando el anexo de las variables de disponibilidad TIC (celulares e internet) con respecto a las metodologías anteriores.

Para finalizar, es de resaltar la importancia de medir la desigualdad, permitiendo identificar las brechas en los territorios con respecto a la carencia de servicios por parte de la población, lo cual ha sido una herramienta para la mejora de la planeación en las entidades públicas en México con la implementación de índices, como el de marginación, para el desarrollo económico y social del territorio.

1.5 Autocorrelación espacial

El objetivo de la geografía es analizar las problemáticas que se dan en el espacio geográfico, así como las relaciones y las intensidades entre las variables que participan en esos problemas (Higueras, 2003). Para ello, se han utilizado diversos indicadores que revelan la intensidad de estas relaciones, así como el patrón de las asociaciones de forma desagregada, como es el caso de los indicadores locales de asociación espacial-LISA (Anselin, 1995), las estadísticas G de Getis y Ord, la regresión geográfica ponderada de Brunson, Fotheringham y Charlton y la interacción espacial, entre otros (citados por Miller, 2004).

Todas estas medidas se basan en un principio fundamental de la geografía, denominada la ley de Tobler: *“Todo está relacionado con todo, pero las cosas cercanas se relacionan más”* (citado por Waters, 2017). En ese sentido, esta ley es fundamental para las técnicas analíticas espaciales básicas y para las concepciones analíticas del espacio geográfico (Miller, 2004).

Una de las primeras técnicas utilizadas para el análisis del espacio geográfico es la autocorrelación espacial (Goodchild y Haining, 2005), la cual anexa la variable “espacio” a los análisis econométricos tradicionales. Esta surge dentro del campo de la econometría espacial, que se encarga del estudio de la interacción y estructura espacial en modelos de regresión, siendo estudiada inicialmente con los términos de dependencia espacial, asociación espacial, interacción o interdependencia espacial (Celemín, 2009).

De acuerdo con Oyana y Margai (2016) y Goodchild (citado por Siabato y Guzmán-Manrique, 2019), la autocorrelación espacial refleja el grado en que los objetos o actividades en una unidad geográfica son similares a los objetos o actividades en unidades geográficas próximas. Además, Vilalta y Perdomo (citado por Celemín, 2009), comentan que la

importancia de este método está en su capacidad para el estudio de la forma en que se propaga un fenómeno por medio de unidades geográficas.

En ese sentido, Miller (2004) menciona que dos entidades geográficas están relacionadas espacialmente, cuando existe una autocorrelación mínima, sea positiva o negativa. Ahora bien, esta asociación no indica necesariamente causalidad, ya que dos entidades o variables pueden estar involucradas causalmente, o puede que existan otras variables detrás que causan la asociación. Sin embargo, esta correlación no es causalidad, sino que proporciona una evidencia de esta.

Cabe destacar que, para la época de los años 70, las técnicas para medir y analizar la autocorrelación espacial eran rudimentarias, proporcionando un único valor para un conjunto de datos espaciales, indicando la intensidad general de la asociación. Sin embargo, con el paso del tiempo se afianzaron diversas técnicas y métodos estadísticos para facilitar el análisis de las relaciones espaciales y la identificación de patrones, como es el caso de los métodos de análisis exploratorio, el uso de bases de datos tecnológicas, los métodos de interpolación, los modelos de interacción espacial y el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la geovisualización de los datos, entre otros (Miller, 2004).

En países como México, existe gran variedad de estudios que buscan identificar patrones espaciales y determinar las relaciones existentes entre variables para la comprensión de problemáticas, a través de métodos como la autocorrelación espacial. Entre estos se destacan autores como Santana et al. (2020); Santana et al.(2021); De las Heras y Cadena (2022) quienes realizan estudios enfocados a temáticas de salud para determinar patrones en la población afectada por enfermedades como la Covid-19, la neumonía y el cáncer de mama en México, respectivamente; Hernández (2012) ; Santana y Aguilar (2019), quienes lo aplican a la mortalidad por homicidios en el Estado de México; Fuentes y Hernández (2015), que lo aplican a estudios de accidentes de tránsito y distribución de subcentros de trabajo en la ciudad de Juárez; Garrocho y Campos (2013), quienes realizan una comparativa de indicadores espaciales y no espaciales a través de autocorrelación espacial para demostrar la

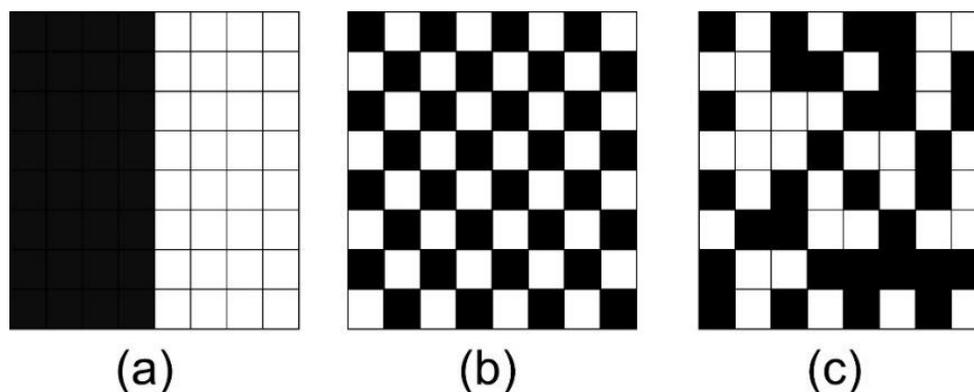
utilidad de los indicadores espaciales; y Navarrete et al. (2020), quienes estudian la geodemografía de los ninis³ en la Zona metropolitana de Ciudad de México, entre otros.

1.5.1 Índices de autocorrelación espacial

De acuerdo con Celemín (2009), existen varias posibilidades que una medida de autocorrelación puede tener en unidades espaciales contiguas:

- **Autocorrelación espacial positiva:** en esta, las unidades espaciales contiguas presentan valores próximos, lo que indica un agrupamiento de estas o la formación de clústeres (Figura 7a).
- **Autocorrelación espacial negativa:** Indican que las unidades espaciales contiguas tengan valores muy diferentes, lo que tiende a una dispersión de estas (Figura 7b).
- **Sin autocorrelación:** En esta no se presenta ninguno de los casos anteriores, ya que no presenta un comportamiento definido; por lo tanto, se genera una forma aleatoria (Figura 7c). Esto implica que la presencia o ausencia de un atributo en un lugar determinado no influye en la medida de sus vecinos.

Figura 7. Patrones de asociación en autocorrelación espacial



Fuente: elaboración propia con base en Siabato y Guzmán-Manrique (2019)

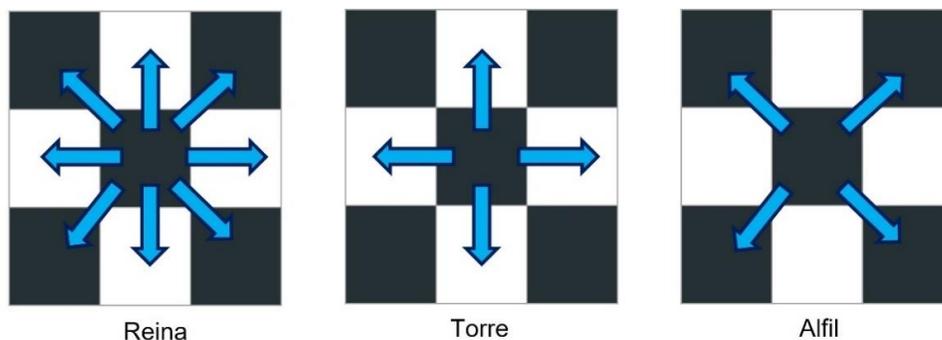
³ De acuerdo con Navarrete et al (2020), en este estudio los ninis representan a los jóvenes de 15 a 24 años que no trabajan, no asisten a la escuela y no cuentan con capacidades diferentes.

De esta forma, la autocorrelación espacial se interpreta entonces como “*un índice estadístico descriptivo que permite medir las formas y las maneras como se distribuyen los fenómenos analizados en el espacio geográfico*”. (Siabato y Guzmán-Manrique, 2019)

Adicionalmente, para el cálculo de la autocorrelación espacial, se considera la utilización de relaciones espaciales para crear una matriz de pesos o ponderaciones espaciales, cuyos valores son una función en medida de criterios de contigüidad en la matriz de datos originales (Torre, Alfil o Reina) (ver figura 8).

Cabe destacar que las características de contigüidad se basan en un principio que indica que dos unidades espaciales pueden compartir un borde en común de longitud diferente de cero (Anselin, 2020).

Figura 8. Tipos de contigüidad de la matriz de pesos espaciales



Fuente: elaboración propia con base en Celemín (2009)

Teniendo en cuenta los anteriores insumos, se crearon los siguientes índices:

1.5.1.1 Índice de Moran Global

De acuerdo con Goodchild, este índice es la métrica más utilizada para determinar la autocorrelación espacial y fue establecida por Moran en 1950 (citado por Celemín, 2009). Esta medida está determinada por el coeficiente de Pearson con una matriz de pesos definida por el usuario. Esta presenta valores en un rango de -1 y 1; donde -1 indica una dispersión perfecta, +1 una correlación perfecta y cero (0) un patrón espacial aleatorio (ver figura 9).

Sin embargo, de acuerdo con Siabato y Guzmán-Manrique (2019), en la práctica se sugiere que un fenómeno sea aleatorio en el espacio cuando se encuentra en un rango de $-0.35 < I < 0.35$. Por otra parte, cuando el I de Moran presenta valores mayores de 0.35 ($I > 0.35$) y menores de -0.35 ($I < -0.35$), se piensa que existen patrones tipo clúster para valores positivos y disperso para valores negativos.

Este índice está dado por la siguiente fórmula (Celemin, 2009; Santana y Aguilar, 2019):

Índice de Moran

Donde:

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

N = número de unidades espaciales indexados por i y j

X = valores de los atributos considerados en las áreas i y j

\bar{x} = media muestral (media de x)

w_{ij} = valor de la matriz de proximidad para la región i con la región j en función de la distancia.

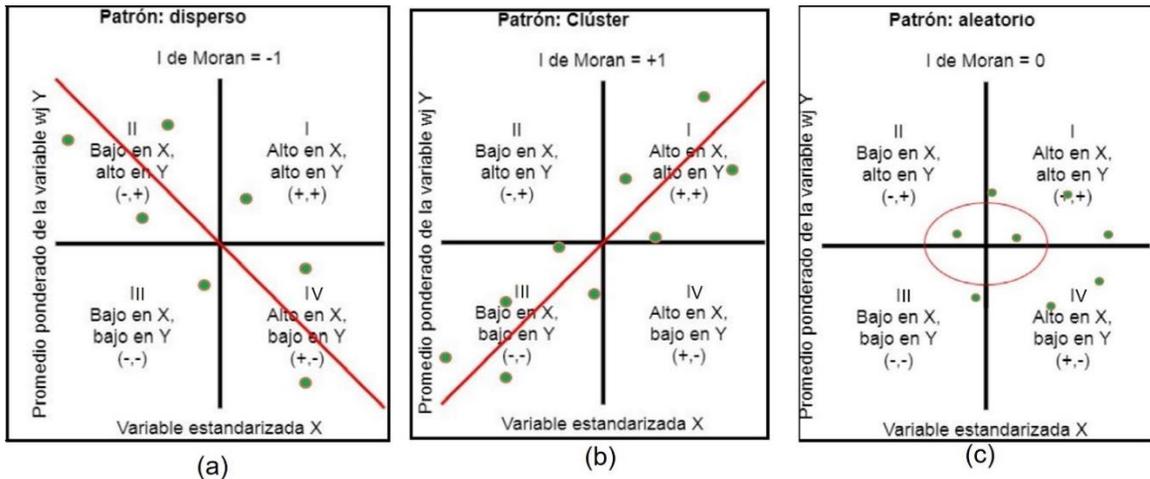
En la figura 9, es posible visualizar los principales patrones que muestra el I de Moran en un gráfico de dispersión, de acuerdo con la medida dada. El diagrama de dispersión presenta 4 cuadrantes (I al IV), siendo el primero (I) el que está ubicado en la parte superior derecha, siguiendo un orden ascendente en sentido inverso a las agujas de un reloj. Así mismo, en el eje de las abscisas (x), se encuentran los valores estandarizados de una variable para cada unidad espacial, y en el eje de las ordenadas (y) están los valores estándar de la media de las unidades contiguas de la misma variable (para análisis univariado) u otra variable (para análisis bivariado) (Celemin, 2009).

Así mismo, cada cuadrante presenta una interpretación (Celemin, 2009):

- **Cuadrante I:** se identifican las unidades espaciales con valores superiores a la media que cuentan vecinos con valores altos (clúster alto-alto).
- **Cuadrante III:** se presenta la situación inversa al cuadrante 1. Se identifican unidades espaciales con valores bajos a la media y que cuentan con vecinos con valores bajos (clúster bajo-bajo).

- **Cuadrante II:** en este se presentan los casos con valores altos (superiores a la media) con vecinos que tienen valores inferiores a la media (situación alto–bajo)
- **Cuadrante IV:** este cuadrante presenta un escenario opuesto al cuadrante II (situación bajo-alto).

Figura 9. Patrones del I de Moran en el gráfico de dispersión



Fuente: Santana y Aguilar (2019)

1.5.1.2 Autocorrelación Espacial Local (LISA y Moran Local)

Este indicador se empezó a implementar en los años 90, teniendo en cuenta su aplicación en las condiciones locales de las unidades espaciales (Santana y Aguilar, 2019). De acuerdo con De Corso y Pinilla (2017), los indicadores de asociación espacial local (LISA) se pueden generar de forma gráfica a través de mapas que muestran las unidades espaciales con valores significativos. Así mismo, permite calcular el I de Moran local para cada observación de un estadístico I y la sumatoria total de cada estadístico genera como resultado el estadístico de asociación espacial global.

De lo anterior, se puede inferir el nivel de significancia estadística para cada valor del estadístico y evaluar si existe similitud o diferencia en los valores en una ubicación geográfica específica (Santana y Aguilar, 2019).

De acuerdo con Moreno y Vayá (2002), este índice está dado por la siguiente fórmula para cada unidad espacial:

Índice de Moran Local

Donde:

$$I_i = \frac{Z_i}{\sum_i Z_i^2 / N} \sum_{j \in J_i} W_{ij} Z_j$$

Z_i : Valor correspondiente a la i de la variable normalizada

J_i : Conjunto de regiones vecinas a i .

W_{ij} : Pesos de la matriz espacial W

N : Tamaño muestral

Los valores estandarizados se pueden interpretar de la siguiente forma:

- Cuando $Z(I_i) > 0$, significa que el clúster presenta valores similares alrededor de i .
- Cuando $Z(I_i) < 0$, significa que el clúster presenta valores disímiles alrededor de i .

Para finalizar, el índice presenta la misma clasificación (alto-alto, bajo-bajo, alto-bajo y bajo-alto) de los diagramas de dispersión del I de Moran Global, visualizado a través de un mapa, permitiendo observar patrones espaciales o clústeres para compararlas con estadísticas globales.

1.5.1.3 Modelos de regresiones

Autores como Ramírez y Rosales (2023), Borrego (2018), Oyana y Margai (2016) y Anselin y Rey (2014), coinciden en que los modelos de regresión espacial son enfoques diseñados para proporcionar una explicación a un fenómeno mediante uno o más factores que lo explican (relación de causalidad). Inicialmente, desde su aplicación, los modelos tradicionales no consideraban la influencia del espacio. Sin embargo, en la actualidad se considera la variable “espacio” para explicar la dependencia que tiene una variable en el territorio estudiado. Dentro de los tipos de modelos más comunes, se pueden encontrar los modelos convencionales (MCO), los modelos de rezago espacial y el modelo de error espacial. En la tabla 10, se observan las características generales de los modelos a considerar.

Tabla 10. Características de los modelos de regresión convencional y de rezago espacial

Modelo	Descripción	Formula
Convencional (MCO)	No se examinan variables espaciales. Los parámetros y la bondad de ajuste se analizan con econometría tradicional.	$y = \beta X + \varepsilon$ Donde, y = Observación de una variable dependiente. X= Observación de una variable explicativa. β = coeficiente de regresión que mide la influencia de la variable independiente en la variable dependiente ε = error
Rezago espacial (LM (Lag))	Este modelo incluye el impacto del espacio con la asociación de las unidades geográficas con respecto a sus vecinos. Lo que sugiere una verificación del grado de dependencia espacial que tiene el fenómeno estudiado.	$y = \rho WY + \beta X + \varepsilon$ Donde, y: observación de una variable dependiente. X: observación de una variable explicativa. β : coeficiente de regresión que mide la influencia de la variable independiente en la variable dependiente ε : error WY: variable dependiente espacialmente retardada. ρ : está definido por $(\omega_{min}^{-1}, \omega_{max}^{-1})$ donde ω_{min} y ω_{max} representan el máximo y mínimo autovalor de la matriz W.

Fuente: Elaboración propia con base en Ramírez y Rosales (2023).

Adicionalmente, para la interpretación de los modelos de regresión se consideran algunas pruebas diagnósticas, que permiten darle validez estadística al modelo. Estas pruebas se

pueden realizar sobre los parámetros, sobre los errores y la heterocedasticidad del modelo. En función del valor de los ρ valores se decide aceptar o rechazar las hipótesis planteadas (ver tabla 11).

Tabla 11. Parámetros de interpretación de pruebas

Diagnóstico	Hipótesis	Decisión
Sobre los parámetros	$H_0: B_0, B_1, \dots, B_n = 0$ $H_a: B_0, B_1, \dots, B_n \neq 0$	Si los ρ valores son menores que 0.05 se rechaza la hipótesis nula (H_0) a favor de la hipótesis alternativa (H_a)
Normalidad de errores	$H_0: \text{Los errores son normales}$ $H_a: \text{Los errores no son normales}$	
Heterocedasticidad (Breusch- Pagan)	$H_0: \text{Hay homocedasticidad}$ $H_a: \text{Hay heterocedasticidad}$	

Fuente: Ramírez y Rosales (2023).

2. Antecedentes

El análisis de escenarios de la accesibilidad espacial para resolver problemáticas de infraestructuras de transporte y movilidad es un instrumento que ha tomado fuerza en la planificación y organización de los territorios, permitiendo afianzar diferentes métodos y metodologías para su estudio.

A nivel internacional es posible encontrar estudios de accesibilidad que plantean objetivos diversos (en países como Australia, Polonia, España, Chile, Brasil, Perú, Argentina, Ecuador, Colombia, entre otros), por ejemplo: mejorar la movilidad de las personas y su relación con los sistemas de transporte e infraestructuras (Arias y Correa, 2015; Matus et al., 2019; Ubilla, 2017; Curtis et al., 2012; Talavera y Valenzuela, 2012, 2014; Montoya et al., 2019; Belogi y Mera, 2022); o caracterizar y comprender las estructuras espaciales y funcionalidades en áreas rurales y urbanas (Severino, 2011; Godoy y Garnica, 2012; Condori et al., 2016; Torres, 2018; Chiaradia et al., 2013; Cooper y Chiaradia, 2020); o mejorar los servicios para el fácil acceso de la población (en el caso de la salud, la educación o el trabajo) y reducir la pobreza, marginación o vulnerabilidad (Herger y Sassera, 2018; Masot y Segovia, 2018; Mario et al., 2020; Bosisio y Moreno, 2022; Flores et al., 2022).

Resaltan algunos autores que desarrollaron estudios semejantes a la presente investigación. A nivel internacional, se destaca el caso de Buzai y Baxendale (2003), Mieres (2004) y Principi (2012), quienes desarrollaron un análisis de integración en la accesibilidad e interacciones espaciales a escala regional a través de la utilización del potencial dinámico, teniendo en cuenta desde el punto de vista metodológico, mediciones simples de proximidad sobre el espacio ideal y real, considerando así la fricción espacial de las redes de transporte en regiones de Argentina y evaluando la conectividad y accesibilidad potencial de las zonas estudiadas.

Por otro lado, Severino (2011) resaltó en sus estudios aspectos conceptuales y metodológicos para el análisis de la estructura espacial y asentamientos a través de la sintaxis espacial, considerando la configuración espacial y los cambios de las redes de calles de Santiago

(Chile) y Zaragoza (España), siendo estas una expresión morfológica por excelencia del espacio construido y la base estructural del crecimiento urbano.

Siguiendo con los estudios comparativos entre Chile y España, se destacan Matus et al. (2019), quienes realizaron un análisis de la conectividad vial urbana (como medida de accesibilidad) para la planeación urbana, hicieron una modelización en las zonas de estudio en Valparaíso (Chile) y Valencia (España) por medio de uso de grafos de la red. Por su parte, Ubilla (2017) se enfocó en la conectividad vial de las áreas rurales en comunas de Chile, variando su método a través del uso de índices topológicos como el de Koing y Shimbel para la conectividad y, para la accesibilidad, el índice de Rodeo e isócronas para determinar áreas de fricción.

En Perú, Condori et al. (2016) realizaron un estudio de la organización espacial de las redes mediante la teoría de grafos utilizando matrices de adyacencia y accesibilidad topológica (accesibilidad, conectividad y centralidad), y correlacionaron los resultados con indicadores de desarrollo socioeconómico de la población y el índice de desarrollo humano (IDH).

Belogi y Mera (2022), abordaron la forma como se estructuran las oportunidades para el acceso a los bienes y servicios urbanos en Argentina, identificando desigualdades socioespaciales; así como Salonen y Toivonen (2013), quienes estudiaron la desigualdad de la accesibilidad entre los distintos modos de viajes, considerando pertinentes estos estudios para la evaluación de la sostenibilidad ambiental y social respecto a la disposición del transporte y el uso del suelo.

Por su parte, Curtis et al. (2012) y Zakowska et al. (2012) desarrollaron metodologías para medir la accesibilidad de los sistemas de transporte urbano. Cabe destacar que estos han servido como instrumentos de planificación urbana y toma de decisiones gubernamentales de áreas metropolitanas en los países de Australia y Polonia para la reestructuración de la forma urbana y la comprensión de la accesibilidad del transporte público en áreas específicas. Así mismo, Talavera y Valenzuela (2012; 2014) estudiaron la accesibilidad para el transporte público, pero específicamente para el mejoramiento de la capacidad de atracción peatonal y análisis de accesibilidad del metro ligero en España.

Adicionalmente, Adhvaryu y Kumar (2021) resaltaron la utilidad del análisis de la accesibilidad en función de la ausencia de sistemas eficientes respecto a la infraestructura pública como mecanismo de mejora en las prácticas de planificación urbana en la India. Los autores consideraron efectivo integrar los enfoques de desarrollo urbano e infraestructura pública como sistemas interconectados, creando soluciones para que las ciudades tengan mejores comportamientos en estos asuntos.

En Colombia, se desarrollaron guías metodológicas para el análisis de accesibilidad a través de indicadores básicos de transporte (densidad de la red, índice de Engel, conectividad) e interacción espacial de los asentamientos, así como el estudio de áreas de servicio, flujos de tráfico, tiempos medios de recorrido y medidas de interacción espacial (Godoy y Garnica, 2012). Se destacan otros estudios técnicos enfocados en temas de transporte, movilidad y accesibilidad para el desarrollo de planes de ordenamiento territorial (Departamento Nacional de Planeación, 2020), así como otros para estudiar la organización y caracterización espacial del territorio en zonas rurales (Torres, 2018) y redes de transporte en zonas urbanas (Amézquita-López et al., 2021).

Entre otros aspectos, Hossain y Cooper (2021) resaltaron llevar la dimensión de la red espacial de transporte al entorno económico desde análisis retrospectivos de la accesibilidad, considerando datos históricos de la red. Mediante estas mediciones del análisis de redes espaciales, se permitió la cuantificación de la accesibilidad, así como el flujo en la eficiencia de la red. Lo que se puede complementar con otras mediciones como la centralidad, los cambios de uso de la tierra, entre otros (Cooper y Chiaradia, 2020).

Para el caso específico de México, la mayoría de los estudios de accesibilidad encontrados se enfocan principalmente en temáticas de sistemas de transporte (redes de carreteras) y servicios, desarrollados principalmente a escala urbana-metropolitana. No obstante, también se han desarrollado estudios con base en problemáticas rurales, con el fin de incrementar la accesibilidad en las poblaciones más dispersas.

Es el caso de CONAPO, IMT y CentroGeo (2022); González et al. (2022); CONEVAL (2018), que desarrollaron indicadores de accesibilidad con base a la distancia y, teniendo en

cuenta el sistema de transporte terrestre de las zonas estudiadas, con el fin de ofrecer métricas que ayudarían a la planeación territorial en la creación de políticas públicas que mejoren la calidad de vida de la población más vulnerable o marginada.

Por su parte, García et al. (2017) determinaron la existencia de la relación entre la accesibilidad geográfica de un territorio y la calidad de vida de los habitantes de Baja California (México), concluyendo que las localidades con mayor accesibilidad en la red de carreteras presentan menores niveles en el índice de marginación urbana. Así mismo, Hernández e Hinojosa (2018) diseñaron indicadores de accesibilidad basados en la infraestructura de carretera y otro en la localización de la población en el Estado de Chihuahua, concluyendo sobre la importancia que presenta la infraestructura de transporte en las políticas de desarrollo regional.

De la misma forma, CONAPO (2016) realizó una clasificación de la condición de ubicación geográfica y la proporción de la población rural que vive a menos de 2 km de carretera transitable en México. A través de este estudio se estableció el nivel de cercanía a las localidades urbanas e infraestructura vial, teniendo en cuenta las pendientes de la superficie como condicionantes de la accesibilidad. Así mismo se definieron jerarquías a las localidades por cantidad de personas y equipamientos.

Adicionalmente, Garnica-Monroy (2013) analizó las características de la red vial, la conectividad de la estructura vial y la accesibilidad espacial, para hacer más eficientes los procesos de planeación del transporte en Tuxtla, Chiapas. Estos concluyeron que los efectos de la red se trasladan hasta escenarios sociales, donde la poca accesibilidad de una zona aísla y enajena a sus habitantes.

Por otro lado, De la Peña (2012); García (2022); Hernández-Torres et al. (2020), enfocaron sus estudios en el análisis de redes de carreteras y calles a nivel nacional y metropolitano (respectivamente), usando medidas de accesibilidad topológica en función de los diferentes modos de transporte, determinando así la eficiencia de la red en el sistema de transporte.

En cuanto a Calonge (2016), su estudio se enfocó en la accesibilidad urbana y los medios de transporte de la Zona Metropolitana de Guadalajara, analizando como la población efectúa su movilidad a diversos espacios de acuerdo con el desarrollo de sus actividades básicas. Concluyendo así que en las zonas no centrales de las metrópolis existe gran carencia de servicios, comercios y trabajos, y los sistemas de transporte se materializan por rutas desorganizadas de microbuses. Adicionalmente, el uso del automóvil se utiliza estratégicamente para acceder a actividades como el trabajo o los servicios de salud.

También se destacan estudios a nivel rural como el de Villena (2016), quien hace evidente que la accesibilidad es un factor de mejora para las localidades más pobladas de la región. Sin embargo, también destaca otros factores determinantes de la accesibilidad, como los políticos, socioeconómicos y de inversión. Adicionalmente, menciona el aislamiento de la población en la zona de estudio debido a la falta de infraestructura y servicios en áreas rurales.

Otro tipo de estudios se ha enfocado en la medición de la accesibilidad, considerando su proximidad de la población con la infraestructura de salud. Como es el caso de Gonzáles (2019), quien estableció una relación entre la accesibilidad geográfica de los servicios de salud y la condición de pobreza, mencionando que la accesibilidad geográfica a los servicios de salud en la periferia sur de la Ciudad de México es deficiente, poniendo en desventaja a la población más pobre. Así mismo, Garrocho y Campos (2006) diseñaron un indicador de accesibilidad para unidades de servicios médicos en ciudades mexicanas, lo cual permite medir el desempeño urbano (oferta), la calidad urbana (demanda) y la brecha entre los servicios de salud prestados a la población mexicana mayor.

Hay que resaltar que los estudios de mayor alcance a nivel nacional determinan las relaciones funcionales entre la accesibilidad y diferentes variables socioeconómicas, impactando sobre el desarrollo territorial, la calidad de vida y la desigualdad social del territorio y la población; entre estos se destacan esfuerzos de entidades como CONEVAL (2018), CONAPO e IMT (2022), que diseñan métricas de accesibilidad para tener herramientas e insumos en la toma de decisiones y mejorar las políticas públicas del territorio para el desarrollo de la población.

A nivel local resaltan otros estudios conceptuales y metodológicos (Millán, 2018; Valera, 2019) que estudian temáticas de movilidad y transporte en Toluca. Destacan el esfuerzo de instituciones como la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México, las cuales aplican técnicas de análisis espacial para infraestructuras específicas de movilidad de ciclovías y peatonales.

Adicionalmente, se resaltan los estudios de Pineda (2010), quien analizó la relación entre accesibilidad territorial y desigualdad social en el Estado de México, utilizando análisis estadísticos con SPSS. En este se determinaron tres grados de accesibilidad en el Estado de México (alta, media y baja) y se consideró que la zona de estudio presentó para el año 2010, en su mayoría, una accesibilidad alta con respecto a su infraestructura vial. Determinando de esta forma que entre mayor accesibilidad territorial son menores las desigualdades sociales y la marginación de un territorio.

Para finalizar, se destaca que los estudios de mayor alcance (a escala nacional) buscaron establecer relaciones funcionales entre la accesibilidad y diferentes variables socioeconómicas, que determinan el desarrollo territorial, la calidad de vida y la desigualdad social del territorio y la población; destacando esfuerzos de entidades como CONEVAL (2018), CONAPO e IMT (2022). En ese sentido, se considera la importancia del análisis de accesibilidad espacial desde la planeación de transporte y la movilidad como un instrumento para comprender las dinámicas crecientes de un territorio y, con base en esto, tomar medidas que permitan a las respectivas autoridades organizar y articular los elementos estructurantes de un territorio de forma organizada y pertinente, de acuerdo con las necesidades de su población, y promoviendo el desarrollo sostenible con base a la justicia espacial.

3. Metodología

En este apartado se hace énfasis en la metodología aplicada de la investigación. Este permitió tener claridad del tipo de investigación, las técnicas e instrumentos necesarios con los que se ejecutaron los objetivos, teniendo en cuenta las bases teóricas estudiadas.

3.1 Enfoque y tipo de investigación

La investigación se desarrolló a partir del método hipotético deductivo, debido a que se partió de principios teóricos y generalizaciones para analizar un caso. Dicho análisis tuvo un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo, analítico y correlacional, teniendo en cuenta que se usaron técnicas de análisis espacial a través del cálculo de indicadores. Así se identificaron carencias en la organización espacial del área objeto de estudio y de su red vial de transporte, así como las desigualdades sociales expresadas a través de la marginación. Adicionalmente, se determinó la existencia de asociaciones espaciales mediante los indicadores analizados.

3.2 Universo de estudio

La delimitación espacial de esta investigación se desarrolló en el Estado de México, específicamente en la zona Metropolitana de Toluca (ZMT), la cual está integrada por 16 municipios: Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2015).

Cabe destacar que, para el nivel de desagregación de la zona de estudio, se utilizaron las secciones electorales⁴. De acuerdo con Cadena y De la Rosa (2019), las secciones electorales son polígonos rurales, urbanos y mixtos que permiten la focalización de políticas públicas, toda vez que abarcan el conjunto del territorio nacional y la información estadística disponible y no tienen datos faltantes. En comparación con las AGEB, localidades y

⁴ En la Zona Metropolitana de Toluca se cuenta con un total de 707 secciones electorales de acuerdo con los datos del Instituto Nacional Electoral para el año 2020 (INE, 2020).

manzanas, las secciones electorales son las unidades espaciales que cuentan con una mejor calidad y cantidad de información disponible para desarrollar un producto investigativo.

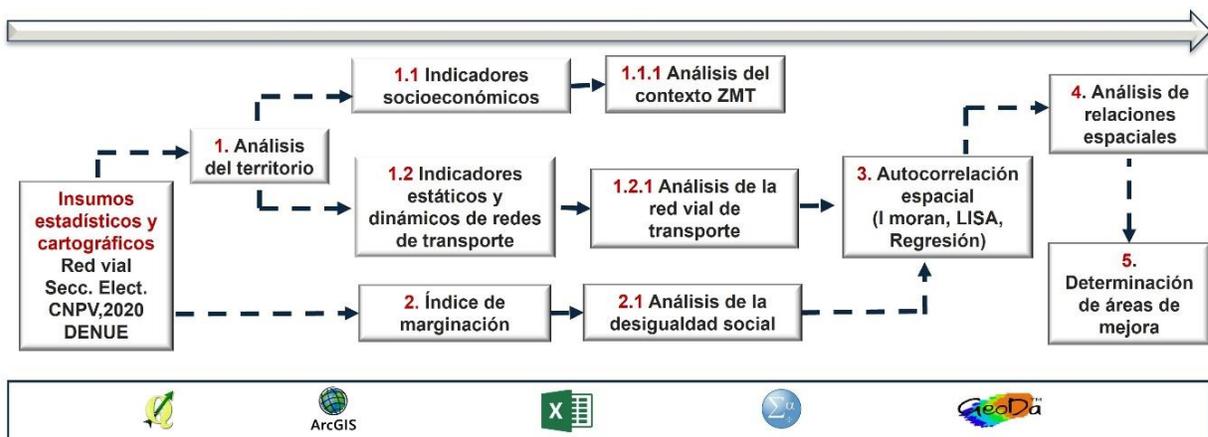
Esta investigación se realizó en el marco del periodo 2020, considerando que los datos disponibles para el desarrollo de la propuesta corresponden a ese periodo de tiempo.

3.3 Etapas de la investigación

En la figura 10, se evidencia la metodología general desarrollada en la investigación. En esta se consideraron las fases del estudio realizado, que inició con la recopilación de los insumos necesarios en la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT). Posteriormente se desarrolló una descripción del contexto de estudio y el análisis de la red vial de transporte para determinar su eficiencia, teniendo en cuenta indicadores de accesibilidad. Seguidamente, se procedió con un análisis de la desigualdad social en la ZMT por medio del cálculo del índice de marginación.

Con los indicadores de accesibilidad vial y marginación se generaron medidas de autocorrelación espacial para determinar el nivel de asociación de estas variables y, por último, se determinaron áreas de priorización de la accesibilidad, teniendo en cuenta los resultados obtenidos.

Figura 10. Metodología general de la investigación



Fuente: elaboración propia con base en Godoy y Garnica, 2012; Torres, 2018; Mancino et al (2018); Anselin y Rey (2014)

A continuación, se hace énfasis en los procedimientos realizados en cada una de las fases mencionadas:

3.3.1 Recopilación de la información

Para esta investigación se utilizaron fuentes secundarias de libros e informes técnicos de estudios en la temática abordada, información pública de entidades territoriales, como es el caso del Gobierno del Estado de México, y fuentes estadísticas y archivos georreferenciados a través del Marco geoestadístico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020b) y el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas-DENUE (INEGI, 2022), el Censo Nacional de Población y Vivienda 2020-CNPV (INEGI, 2020a) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad -CONABIO para los años 2009, 2013, 2017 y 2021 (INEGI, 2009, 2013, 2017, 2021).

También se consideraron revisiones de artículos científicos a través de búsqueda de información en revistas especializadas y motores de búsqueda como Google Scholar, Dialnet, Redalyc, Scielo, Researchgate, Scopus, Science Direct, entre otros.

3.3.2 Análisis del contexto de la Zona Metropolitana de Toluca

Se consideró una descripción del contexto general de la Zona Metropolitana de Toluca, a través de un análisis de la población y su distribución en el territorio, un análisis de las coberturas y usos de suelo, así como el crecimiento de áreas urbanas; por último, un análisis de la concentración de las principales actividades económicas.

Para ello, se utilizaron técnicas de análisis a través de los indicadores demográficos y de distribución de la población y empresas, haciendo uso de información georreferenciada del Censo Nacional de Población y Vivienda de los años 2010 y 2020 (INEGI, 2010, 2020a), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad – CONABIO, en los periodos 2009, 2013, 2017, 2021 (INEGI, 2009, 2013, 2017, 2021), el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas-DENUE para el año 2022 (INEGI, 2022).

Dentro de los indicadores considerados, se utilizó la tasa anual de crecimiento de la población y la densidad poblacional (Palacios-Prieto et al., 2004), porcentajes de participación de cobertura de suelos, tasas anuales de crecimiento de áreas urbanas, porcentaje de participación de actividades económicas y la densidad de los servicios económicos con respecto a la población de las secciones electorales.

3.3.2.1 Análisis de la población

Para analizar la población, se extrajo la información de la población por municipios y secciones electorales del CNPV en los años 2010 y 2020 (INEGI, 2010; 2020a), con el fin de determinar la tasa anual de crecimiento y la densidad poblacional. Con la tasa anual de crecimiento media se buscó cuantificar el aumento o la disminución anual de la población por secciones electorales en los periodos 2010 y 2020 (ver fórmula 1).

$$(1) \quad T_c = \left(\sqrt[t]{P_2/P_1} - 1 \right) * 100$$

Donde:

Tc: Tasa de crecimiento demográfico

P1: Población inicial de la sección electoral

P2: Población final de la sección electoral

T: Número de años comprendidos en el periodo de referencia

Por otro lado, con la densidad poblacional se buscó identificar las secciones electorales con bajas y altas densidades en el periodo 2020. Las bajas densidades indicarán escasos asentamientos humanos en la zona, y las altas densidades mayor población y presiones sobre el suelo (ver fórmula 2).

$$(2) \quad D_p = \frac{P}{S}$$

Donde:

D_p : Densidad poblacional de la sección electoral

P: Población total de la sección electoral

S: Superficie de la sección electoral

3.3.2.2 Análisis de la cobertura de suelo y áreas urbanas

Para el análisis de cobertura de usos de suelo, se utilizó información espacial de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - CONABIO en los años 2009, 2013, 2017, 2021 (INEGI, 2009, 2013, 2017, 2021). Para el año 2021, se cartografió la distribución de las coberturas y usos de suelo, con el fin de determinar la participación de las coberturas existentes. Previamente, se realizó una reclasificación de los atributos a 6 categorías: (1) agricultura y cultivos, (2) áreas urbanizadas, (3) bosque-vegetación, (4) cuerpos de agua, (5) desprovisto de vegetación y (6) otro tipo de vegetación.

Adicionalmente, se calcularon las áreas de las clasificaciones de cobertura de suelo, con ayuda del software SIG, y se determinó el porcentaje de participación de estas en la ZMT, con ayuda de la siguiente fórmula:

$$(3) \quad \%Cob_s = \frac{Sup\ Suelo_s}{Sup\ total} \times 100$$

Donde:

$\%Cob_s$: Porcentaje de cobertura de suelo (según el tipo)

$Sup\ Suelo_s$: Superficie del suelo (según tipo)

$Sup\ total$: Superficie total de la ZMT

Después se extrajeron las áreas urbanas de las coberturas de suelo, para los años 2009, 2013, 2017 y 2021, con el fin de determinar la tasa de crecimiento de estas y compararlas con la tasa de crecimiento de la población. Para ello, se utilizó la siguiente fórmula:

$$(4) \quad TC_{Urb} = \left(\sqrt[t]{A_2/A_1} - 1 \right) * 100$$

Donde:

TC_{Urb} : Tasa de crecimiento demográfico urbana

A_1 : Área urbana inicial

A_2 : Área urbana final

t : Número de años comprendidos en el periodo de referencia

3.3.2.3 Análisis de las actividades económicas

Para el análisis de las actividades económicas, se extrajeron los datos espaciales (puntos) de las unidades económicas de la Zona Metropolitana de Toluca del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), en el periodo 2022 (INEGI, 2022). Una vez identificados los puntos de la ZMT, se clasificaron los atributos de las unidades de negocio por código de actividad económica de dos (2) dígitos, según el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, México SCIAN (INEGI, 2018).

Adicionalmente, se calcularon los totales de unidades económicas y empleos estimados de estas, para determinar su porcentaje de participación en la Zona Metropolitana de Toluca. Cabe destacar que los resultados se agruparon por secciones electorales.

Dentro de los indicadores considerados para cartografiar, se encontraron la relación de unidades económicas por habitantes en las secciones electorales (fórmula 5) y la densidad de unidades económicas (fórmula 6). Este último, considerando los servicios económicos más representativos en cuanto al impacto del empleo estimado en la ZMT.

$$(5) \quad UExPob_{secc} = \frac{Num.de UE_{sec}}{Pob \times secc} \times 100$$

Donde:

$UExPob_{secc}$: Relación de unidades económicas por habitantes en cada sección electoral.

$Num. de UE_{sec}$: Número de unidades económicas por sección electoral.

$Pob \times secc$: Total de habitantes por sección electoral.

$$(6) \quad D_{ue} = \frac{Num. de UE_s}{Sup_{secc}}$$

Donde:

D_{ue} : Densidad de unidades económicas (unidades económicas / Km²).

$Num. de UE_s$: Número de unidades económicas por tipo de servicio.

Sup_{secc} : Superficie de la sección electoral.

3.3.2.4 Movilidad laboral de la ZMT

En este apartado se consideraron algunos datos generales para la descripción de la movilidad laboral en la ZMT. Para este se utilizó la Muestra Censal del CNPV 2020 en la ZMT (INEGI, 2020c), extrayendo los datos del Estado de México y la Ciudad de México (orígenes y destinos). Así mismo, se utilizó la variable de cantidad de desplazamientos de trabajo en la ZMT hacia los principales municipios del Estado de México y la Ciudad de México, teniendo en cuenta la disponibilidad de los datos a escala municipal y las principales dinámicas económicas (comercial, industrial y educativa) que presenta la ZMT.

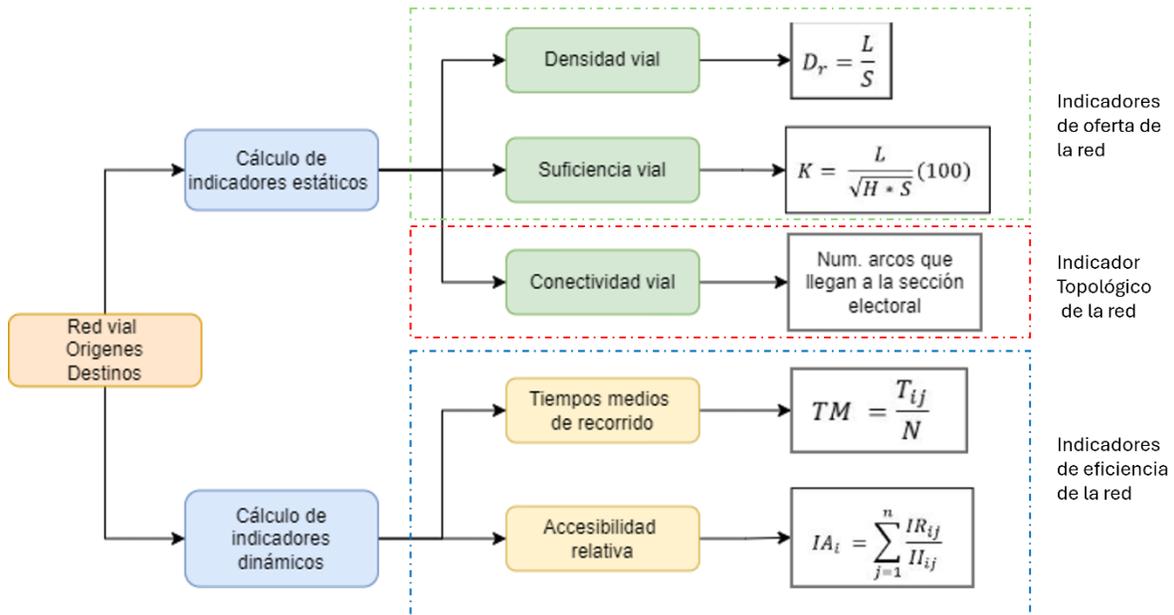
Como insumo, se analizaron los datos de la matriz origen-destino de desplazamientos laborales, representando un total de 16 orígenes de los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca y 36 destinos más representativos del Estado de México y la Ciudad de México (ver anexo 1). Cabe destacar que esta matriz representó el 97% del volumen de viajes realizados desde la ZMT hasta todos los municipios del Estado y Ciudad de México. Además, se analizaron frecuencias descriptivas de la muestra censal del CNPV 2020, como el tipo de medio de transporte utilizado.

3.3.3 Análisis de la red de transporte

En esta fase se utilizaron como base teórica los conceptos de geografía del transporte, la teoría de grafos o de redes (Rodrigue et al., 2013; Buzai y Baxendale, 2003; Graizbord, 2008; Madrid y Ortiz, 2005; Seguí y Petrus, 1991) y el principio de accesibilidad para el cálculo de indicadores de accesibilidad con base al enfoque de indicadores por separación espacial, según la metodología implementada por Godoy y Garnica (2012) y Torres (2018), midiendo de esta forma el nivel de eficiencia de la red vial en el sistema.

Los análisis realizados a la infraestructura vial en la ZMT fueron de tipo estático y dinámico. Los primeros tuvieron por objeto medir el nivel de conexión en la estructura de la red vial (carreteras y vialidades). Mientras, el segundo implicó un análisis de los tiempos de desplazamientos estimados y accesibilidad de la red vial (carreteras y vialidades) a través del transporte motorizado (automóvil) de la población en la región, lo que influye en las relaciones territoriales y la forma como se concentra o dispersa la población.

Figura 11. Indicadores implementados en los análisis de la red vial de transporte



Fuente: elaboración propia

3.3.3.1 Cálculo de indicadores estáticos

Dentro de los indicadores estáticos para analizar la oferta de las redes de transporte, se encuentran la densidad, la suficiencia vial y la conectividad, teniendo en cuenta las siguientes fórmulas (Godoy y Garnica, 2012; Torres, 2018):

(7) Densidad vial

$$D_r = \frac{L}{S}$$

Donde:

Dr: Densidad media de la red vial.

L: Longitud de la red vial existente en cada sección electoral en kilómetros

S: Superficie de cada sección electoral en kilómetros cuadrados

(8) Suficiencia vial

$$K = \frac{L}{\sqrt{H * S}} (100)$$

Donde:

K: Índice de Engel.

L: Longitud de la red en kilómetros.

(7) Densidad vial

Donde:

$$D_r = \frac{L}{S}$$

Dr: Densidad media de la red vial.

L: Longitud de la red vial existente en cada sección electoral en kilómetros

S: Superficie de cada sección electoral en kilómetros cuadrados

H: Número de habitantes.

S: Superficie de la unidad de análisis (secciones electorales) en kilómetros cuadrados.

(9) Índice de conectividad Número de arcos que llegan a cada sección electoral

El cálculo de los indicadores de densidad y suficiencia vial se realizó con ayuda del software SIG (ArcMap), donde se extrajeron los datos de la sumatoria de la longitud de la red vial en kilómetros (capa de la red de calles y carreteras de la ZMT) por sección electoral. Adicionalmente, se utilizaron los atributos del área de las secciones electorales (capa de secciones del INE) y los datos de la cantidad de población por sección electoral (obtenida en el CNPV desagregado por sección electoral), para remplazarlos en las respectivas fórmulas.

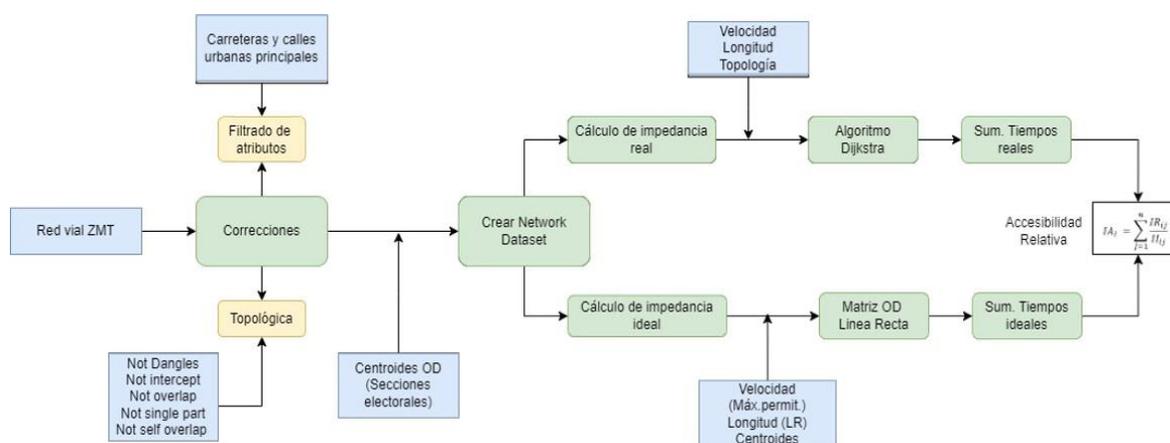
Para el caso del indicador de conectividad, con ayuda de software SIG, se halló la cantidad de ejes que entran y salen por sección electoral, determinando así el grado de conexión que tiene la red en cada sección electoral.

3.3.3.2 Cálculo de indicadores dinámicos

En el cálculo de los indicadores dinámicos, se aplicó el método de Network Analyst de ArcGIS, el cual es una herramienta que permite la creación de un modelo de redes de transporte para modelar movimientos, abarcando como insumo principal la red de carreteras de la Zona Metropolitana de Toluca. En la figura 12, se evidencia un esquema del procedimiento utilizado.

Para su aplicación se necesitó, previamente, preparar la información espacial de la zona de estudio, extrayendo los datos espaciales de la Red de Caminos 2020 del INEGI (IMT-SCT-INEGI, 2020) y depurando la información a través de correcciones topológicas y el filtrado de las carreteras y calles principales en la ZMT. Adicionalmente, con la capa de secciones electorales de México (INE, 2020), se extrajeron las de la ZMT y se definieron los centroides de estas, que representaron los orígenes y destinos de la población en el modelo desarrollado. Cabe destacar que se obtuvieron 707 centroides, teniendo en cuenta el número de secciones en el área de estudio. Adicionalmente se establecieron distancias de tolerancia de los centroides a las vías, considerando que no siempre los centroides eran cercanos a las vías de transporte, para efectos de ejecutar el modelo de Network Analyst.

Figura 12. Procedimiento para el método de Network Analyst de ArcGIS



Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se crea un “Network Dataset”, el cual es un conjunto de elementos de la red (ejes y nodos) que representan las calles y carreteras (arcos o ejes) y los cruces o intercepciones de la red vial de transporte (nodos). Este conjunto de datos permite que las líneas y puntos de la red se interconecten para así generar el cálculo de rutas en el modelo.

Hay que considerar que el método de Network Analyst utiliza el algoritmo de Dijkstra, el cual sirve para resolver el problema de la ruta más corta de un origen a un destino (ESRI,

2011). En ese sentido, la impedancia real de transporte se calculó para cada uno de los puntos de origen a cada punto destino, considerando la posible ruta más corta de la red analizada.

Después de crear el “Network Dataset”, se procedió a calcular las impedancias reales e ideales. La impedancia es la resistencia o la fricción generada por un desplazamiento y se puede representar en unidades de tiempo (minutos), distancia (metros, kilómetros) o costos de transporte (\$). Estas pueden ser reales o ideales (Buzai y Baxendale, 2003; Godoy y Garnica, 2012; Torres, 2018). A continuación, se describe el procedimiento para el cálculo de las impedancias.

Cálculo de impedancia ideal (Tiempos ideales)

Las impedancias ideales representan los tiempos ideales para movilizarse desde un punto de origen a un punto de destino, en línea recta y a una velocidad máxima permitida. Con respecto a este último, hay que considerar que para las áreas urbanas se tiene permitida una velocidad máxima permitida de 50 Km/h, mientras que fuera de zonas urbanas es de 80 Km/h.

Se generó así una matriz de origen-destino (O-D), calculando los tiempos ideales en línea recta y de acuerdo con las velocidades máximas permitidas en espacios urbanos y fuera de estos, con la siguiente fórmula (Godoy y Garnica, 2012):

$$(10) \quad T_{ij} (\text{min}) = \frac{D_i}{V_{mp}} \times 60 \quad \text{Donde:}$$

T_{ij} (min): Tiempo del origen i al destino j

D_i : Distancia en línea recta del origen i al destino j

V_{mp} : Velocidad máxima permitida.

En ese sentido, se calculó el promedio de los tiempos ideales de transporte para cada punto de origen, desde cada origen a todos los posibles destinos, representado con la siguiente fórmula (Godoy y Garnica, 2012; Torres, 2018):

$$(11) \quad II = T_{ij}/N \quad \text{Donde:}$$

II: Impedancia ideal promedio (Tiempos ideales de transporte)

T_{ij} : Tiempo de desplazamiento desde una sección electoral i a cada una de las secciones electorales j en línea recta

N : Número de secciones electorales.

Cálculo de impedancia real (Tiempos reales)

Por otro lado, las impedancias reales representan los tiempos promedio reales de transporte desde un punto de origen a todos los puntos de destino (centroides por sección electoral), utilizando la red vial de transporte analizada, a una velocidad variable que depende de la jerarquía vial de la vialidad o carretera. Hay que resaltar que para su cálculo el modelo considera la velocidad media estimada de la Red Nacional de Caminos 2020, la longitud de los tramos y la topología establecida en éste.

Para el cálculo de los tiempos en la red vial, se emplea la siguiente fórmula para calcular los tiempos por tramo de red (Godoy y Garnica, 2012):

$$(12) \quad T_s (\text{min}) = \frac{D_i}{V_m} \times 60 \quad \text{Donde:}$$

T_s (min): Tiempo del segmento vial en minutos; D_i : Distancia del segmento vial; V_m : Velocidad media en el segmento vial.

Así mismo, la simulación de la red consideró la velocidad de los tramos, atributo disponible en la información geoespacial estimada por la Red Nacional de Caminos (RNC), las cuales tienen una jerarquía definida de acuerdo con el tipo de vialidad.

Posteriormente, se realiza el cálculo de la impedancia real. Se cuenta con la siguiente fórmula (Godoy y Garnica, 2012; Torres, 2018):

$$(13) \quad IR = T_{ij}/N \quad \text{Donde:}$$

IR: Impedancia real promedio (Tiempos reales de transporte)

T_{ij} : Tiempo de desplazamiento desde una sección electoral i a cada una de las secciones electorales j en sobre la red de transporte

N : Número de secciones electorales.

Cálculo de la accesibilidad

Para el cálculo de la accesibilidad vial para cada sección electoral se utiliza la fórmula de la accesibilidad relativa aplicada por Godoy y Garnica (2012) y Torres (2018):

$$(14) \quad \text{Accesibilidad relativa} \quad IA_i: \text{Índice de accesibilidad vial de las secciones electorales } i$$

$$IA_i = \sum_{j=1}^n \frac{IR_{ij}}{II_{ij}}$$

IR_{ij} : Impedancia real a través de la red entre las secciones electorales i y j ;

II_{ij} : impedancia ideal.

Una vez realizado este cálculo, los datos de tiempos y accesibilidad se encuentran en la capa de puntos de las secciones electorales (centroides). Finalmente, estos se trasladan a la capa de polígonos y se implementa una clasificación de los datos por cortes naturales en 5 categorías (muy baja, baja, media, alta y muy alta), para así desarrollar el análisis de los grados de accesibilidad vial con su respectiva cartografía.

Por último, se compararon los resultados de la modelación de un primer escenario (cálculos con base a la RNC 2020) con los tiempos de transporte calculados a partir de ArcGIS Online (ESRI, 2023) en un segundo escenario, aplicando la misma metodología del análisis de la red de transporte del primer escenario.

3.3.4 Análisis de la marginación

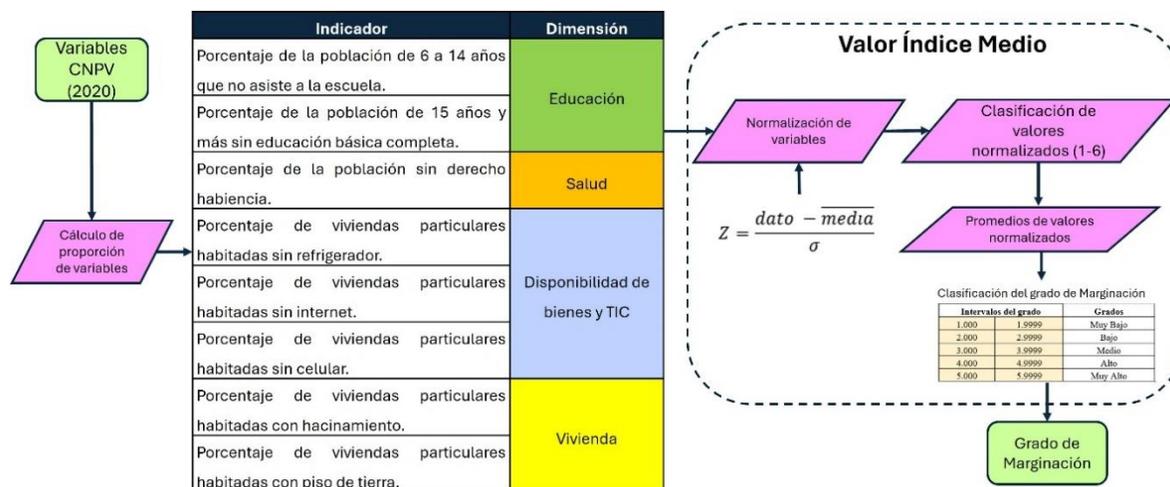
Se establecieron medidas del grado de marginación de las secciones electorales con el fin de analizar el nivel de desigualdad existente en la Zona Metropolitana de Toluca, considerando

los aportes de la metodología de Mancino (2019) y Mancino et al. (2018), y las variables y dimensiones consideradas por CONAPO (2020) para calcular el índice de marginación.

Es de resaltar que en la metodología de Mancino (2018) se aplica el método de componentes principales y en la metodología de CONAPO (2020) el método de distancias ponderadas (DP2), sin embargo, en este procedimiento se aplicó el método Valor Índice Medio (VIM). De acuerdo con García (1989), este proporciona una metodología útil para clasificar unidades geográficas y obtener un índice con base a diferentes variables aportadas, lo que es muy útil sobre otras técnicas multivariantes para análisis regionales.

La medición de los resultados se estableció en 5 grados de marginación: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, con un nivel de desagregación por sección electoral para efectos de comparar los resultados de la variable junto con los resultados del cálculo de la accesibilidad vial. En la figura 13, se evidencia un esquema aplicado para el cálculo del índice de marginación.

Figura 13. Procedimiento para determinar el índice de marginación



Fuente: elaboración propia

A continuación, se detalla el proceso general para el cálculo de la marginación, los cuales se dividen en dos pasos: (a) la selección de los indicadores y (b) la aplicación del método valor índice medio (VIM).

3.3.4.1 Selección de los indicadores para el cálculo del índice de marginación

En la selección de indicadores, se identificaron 8 indicadores que abarcan 4 dimensiones: Educación, Salud, Vivienda y Disponibilidad de bienes y TIC. Estos indicadores están contenidos en las metodologías aplicadas en CONAPO (2020) y Mancino et al. (2018), y los insumos para sus cálculos son variables que se encuentran en el Censo Nacional de Población y Vivienda de México-CNPV (ver tabla 12).

Tabla 12. Variables del CNPV utilizadas para el cálculo de los indicadores de marginación

Tema	Nombre de la variable	Mnemónico
Población	Población de 6 a 11 años	P_6A11
Población	Población de 12 a 14 años	P_12A14
Educación	Población de 6 a 11 años que no asiste a la escuela	P6A11_NOA
Educación	Población de 12 a 14 años que no asiste a la escuela	P12A14NOA
Población	Población de 15 años y más	P_15YMAS
Educación	Población de 15 años y más sin escolaridad	P15YM_SE
Educación	Población de 15 años y más con primaria incompleta	P15PRI_IN
Educación	Población de 15 años y más con secundaria incompleta	P15SEC_IN
Población	Población total	POBTOT
Servicios de salud	Población sin afiliación a servicios de salud	PSINDER
Vivienda	Viviendas totales particulares habitadas	TVIVPARHAB
Vivienda	Viviendas particulares habitadas que no disponen de agua entubada en el ámbito de la vivienda	VPH_AGUAFV
Vivienda	Viviendas particulares habitadas que no disponen de drenaje	VPH_NODREN
Vivienda	Viviendas particulares habitadas que disponen de excusado o sanitario	VPH_EXCSA
Vivienda	Viviendas particulares habitadas con piso de tierra	VPH_PISOTI
Vivienda	Viviendas particulares habitadas que disponen de refrigerador	VPH_REFRI
Vivienda	Viviendas particulares habitadas que no disponen de energía eléctrica	VPH_S_ELEC
Vivienda	Viviendas particulares habitadas que disponen de Internet	VPH_INTER

Tema	Nombre de la variable	Mnemónico
Vivienda	Viviendas particulares habitadas que disponen de teléfono celular	VPH_CEL
Vivienda	Ocupantes en viviendas particulares habitadas	OCUPVIVPAR
Vivienda	Promedio de ocupantes en viviendas particulares habitadas	PROM_OCUP
Vivienda	Promedio de ocupantes por cuarto en viviendas particulares habitadas	PRO_OCUP_C

Fuente: elaboración propia con base en CONAPO (2020) y Mancino et Al. (2018)

Posteriormente se procedió a calcular los indicadores identificados con las variables contenidas en el Censo Nacional de Población y Vivienda (ver tabla 12) desagregadas por sección electoral. Para este procedimiento se utilizaron las fórmulas contenidas en la tabla 13.

Tabla 13. Indicadores utilizados para el cálculo del índice de marginación, 2020

Código	Indicador	Dimensión	Fórmula	Número de. Formula
IND1	Porcentaje de la población de 6 a 14 años que no asiste a la escuela.	Educación	$\left(\frac{P6A11NOA + P12A14NOA}{P_6A11 + P_12A14}\right) * 100$	(15)
IND2	Porcentaje de la población de 15 años y más sin educación básica completa.	Educación	$\left(\frac{P15YM_SE + P15PRI_IN + P15SEC_IN}{P_15YMAS}\right) * 100$	(16)
IND3	Porcentaje de la población sin derecho-habienencia.	Salud	$\left(\frac{PSINDER}{POBTOT}\right) * 100$	(17)
IND4	Porcentaje de viviendas particulares habitadas con piso de tierra.	Vivienda	$\left(\frac{VPH_PISOTI}{TVIVPARHAB}\right) * 100$	(18)
IND5	Porcentaje de viviendas particulares habitadas sin refrigerador.	Disponibilidad de bienes y TIC	$\left(\frac{TVIVPARHAB - VPH_REFRI}{TVIVPARHAB}\right) * 100$	(19)
IND6	Porcentaje de viviendas particulares habitadas sin internet.	Disponibilidad de bienes y TIC	$\left(\frac{TVIVPARHAB - VPH_INTER}{TVIVPARHAB}\right) * 100$	(20)

Código	Indicador	Dimensión	Fórmula	Número de. Formula
IND7	Porcentaje de viviendas particulares habitadas sin celular.	Disponibilidad de bienes y TIC	$\left(\frac{TVIVPARHAB - VPH_{CEL}}{TVIVPARHAB}\right) * 100$	(21)
IND8	Porcentaje de viviendas particulares habitadas con hacinamiento.	Vivienda	$\left(\frac{PRO_{OCUP_C}}{OCUPVIVPAR}\right) * 100$	(22)

Fuente: elaboración propia con base en CONAPO (2020) y Mancino et Al. (2018)

Calculados los indicadores para la elaboración del índice de marginación, se sometieron a un análisis exploratorio de datos, utilizando el software GEODA, donde se calcularon estadísticos descriptivos (Media, Min, Max, Desviación estándar), para determinar su validez estadística mediante un análisis por histogramas y valores atípicos.

3.3.4.2 Aplicación del método VIM

Posterior al análisis exploratorio de los datos y validados los indicadores, se realizó una normalización de los datos mediante un índice Z, teniendo en cuenta la fórmula 23 para variables de costo (entre mayor sea el indicador, peor será la situación deseada). Este procedimiento de normalización permitió que los datos analizados en el modelo se acercaran a un comportamiento normal.

$$(23) \quad Z = \frac{\text{dato} - \overline{\text{media}}}{\sigma} \quad \text{Donde:}$$

Dato = puntuación o valor a normalizar,

Media = media de la distribución original

σ = desviación estándar de la variable

Una vez normalizados los datos, se procedió a realizar una categorización o clasificación de los valores normalizados por sección electoral a valores de 1 a 6, teniendo en cuenta los siguientes rangos de desviación típica (ver tabla 14):

Tabla 14. Criterios de clasificación de valores normalizados

Clasificación	Rango de desviación
1	Menores a -1
2	Entre -1 y -0.5
3	Entre -0.5 y 0
4	Entre 0 y 0.5
5	Entre 0.5 y 1
6	Mayores de 1

Fuente: elaboración propia

Seguidamente, se promediaron los valores categorizados para hallar el índice de valor medio de la marginación por sección electoral y se organizaron los resultados para asignar los grados de marginación de acuerdo con los siguientes criterios de clasificación (ver tabla 15):

Tabla 15. Criterios para la asignación de grados de marginación con el método VIM

Intervalos de la escala de marginación	Grado de marginación
1.000	1.9999 Muy Bajo
2.000	2.9999 Bajo
3.000	3.9999 Medio
4.000	4.9999 Alto
5.000	5.9999 Muy Alto

Fuente: elaboración propia

Finalmente, después de asignados los grados de marginación por cada sección electoral, se representaron los resultados espacialmente mediante la elaboración cartográfica, para así desarrollar el análisis de marginación en la Zona Metropolitana de Toluca.

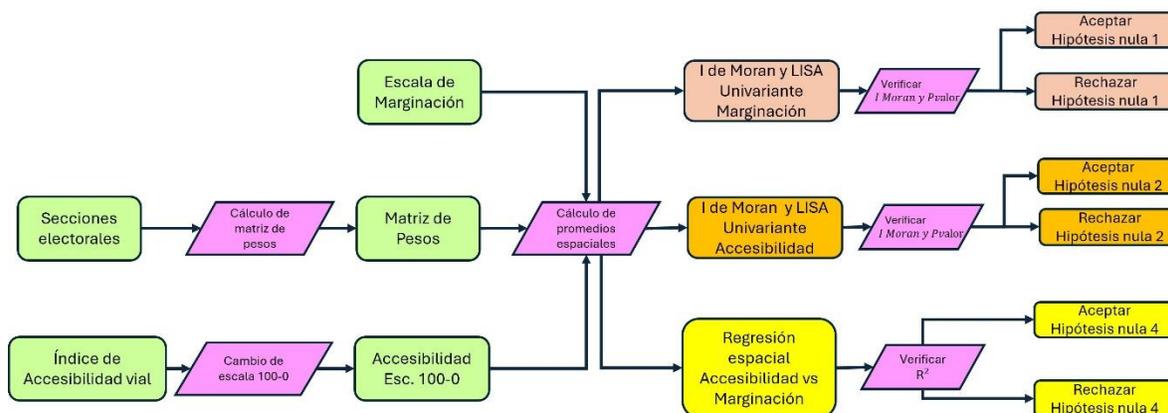
3.3.5 Análisis de Autocorrelación espacial

En esta fase se buscó determinar la asociación y dependencia entre los índices de accesibilidad vial y los grados de marginación calculados por secciones electorales. Para ello,

se utilizaron métricas de autocorrelación aplicadas en el software GEODA como el I de Moran global, indicadores locales de asociación espacial (LISA) y la aplicación de un modelo de regresión espacial, permitiendo identificar patrones de comportamiento y asociaciones entre las variables analizadas en la zona de estudio.

En la figura 14, se muestra un esquema general del procedimiento utilizado en el cálculo de métricas de autocorrelación espacial. Para ello, se plantearon las siguientes mediciones: (1) asociación espacial univariada de la marginación, (2) asociación espacial univariada de la accesibilidad y (3) asociación espacial por dependencia entre la accesibilidad y la marginación.

Figura 14. Procedimiento para medir la autocorrelación espacial



Fuente: elaboración propia

A continuación, se explica el proceso en detalle para determinar la autocorrelación espacial de las variables de accesibilidad vial y marginación, resaltando las siguientes fases para el análisis de autocorrelación espacial: (a) examinar datos, (b) establecer matrices de pesos, (c) cálculo de promedios espaciales, (d) ver gráfica de Moran, (e) calcular significancia estadística y (f) calcular LISA.

3.3.5.1 Ajustes en el cambio de la escala de la variable de accesibilidad

Al examinar los datos de las variables a estudiar, se observó que, en el caso de la accesibilidad, su índice no coincidía con la escala de su grado. Por ende, se optó a aplicar

una técnica para ajustar la escala de las variables y facilitar la comparación entre los índices de accesibilidad y marginación en el análisis de autocorrelación espacial. En ese sentido, al índice de accesibilidad se le asignó una nueva escala de valores entre 100 y 0, de tal forma que coincidieran con el grado de su clasificación.

En el caso del índice de accesibilidad, el menor valor del índice (1.29) significa un grado “muy alto”; por ende, en la nueva escala este representa un valor de 100. Por el contrario, el mayor valor del índice (2.06) significa un grado “muy bajo”, por lo que la nueva escala de este representó un valor de 0.

Tabla 16. Nueva escala de medición de la accesibilidad

Índice de accesibilidad	Grados de accesibilidad	Nueva escala de medición
1.29	Muy alto	100
1.48	Alto	
1.67	Medio	⇓
1.87	Bajo	
2.06	Muy Bajo	0

Fuente: elaboración propia

3.3.5.2 Creación de la matriz de pesos espaciales

Posteriormente, con las escalas ajustadas de las variables, se creó una matriz simétrica de pesos espaciales, identificando el número de vecinos que tenía cada sección electoral y se conectó mediante una relación de contigüidad tipo reina (en todas las direcciones) de primer grado. En esta matriz se presentaron 707 observaciones, con una media de 5.36 vecinos por sección electoral. Para ello se utilizó el software GEODA.

3.3.5.3 Cálculo de los promedios espaciales

El cálculo de los promedios espaciales se aplicó automáticamente con el software GEODA. Los promedios espaciales representaron la suma de los valores ponderados de las secciones electorales vecinas que estaban alrededor de la localización central.

3.3.5.4 Cálculo de los índices de autocorrelación

Dentro de los indicadores de autocorrelación utilizados para determinar los patrones de distribución espacial de las variables, se utilizó el I de Moran (ver fórmula 24), determinando así el tipo de relación y el nivel de intensidad de la asociación espacial; y el indicador de Asociación espacial local-LISA (ver fórmula 25) para estimar cómo cambia la autocorrelación espacial a nivel local e identificación de los clústeres en la ZMT.

Cabe destacar que las métricas anteriores se calcularon con ayuda de la herramienta GEODA, la cual tuvo en cuenta una matriz de contigüidad y los valores de las variables de accesibilidad y marginación por sección electoral. A continuación, se evidencian las fórmulas 24 y 25 para el cálculo de las métricas establecidas:

(24) I de Moran

$$I = \frac{N}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

N: número de unidades espaciales indexados por i y j

X: valores de los atributos considerados en las áreas i y j

\bar{x} : media muestral (media de x)

w_{ij} : valor de la matriz de proximidad para la región i con la región j en función de la distancia.

(25) Índice de Moran Local

$$I_i = \frac{Z_i}{\sum_i Z_i^2 / N} \sum_{j \in J_i} W_{ij} Z_j$$

Donde:

Z_i = Valor correspondiente a la i de la variable normalizada

J_i = Conjunto de regiones vecinas a i.

W_{ij} = Pesos de la matriz espacial W

N= Tamaño muestral

Por otro lado, para efectos de determinar el nivel de relacionamiento por dependencia entre la variable de marginación con respecto a la accesibilidad vial, se aplicó un análisis

comparativo entre un modelo de regresión convencional y un modelo de rezago espacial (ver tabla 10), de acuerdo con los procedimientos de Anselin (2005), Anselin y Rey (2014) y Ramírez y Rosales (2023) en la aplicación del software GEODA, para identificar la incidencia del factor espacial en la dependencia de las variables estudiadas.

3.3.5.5 Análisis de los resultados

Las relaciones de asociación espacial de las variables estudiadas, de forma univariada, consideraron los siguientes criterios para su interpretación:

Tabla 17. Criterios de autocorrelación espacial con el I de Moran

Autocorrelación espacial positiva	Autocorrelación espacial Negativa	Ausencia de autocorrelación espacial
Patrón clúster	Patrón disperso	Patrón aleatorio
	I de Moran teórico	
Si $I > 0$	Si $I < 0$	Si $I = 0$
	I de Moran en la práctica	
Si $I > 0.35$	Si $I < -0.35$	$-0.35 \leq I \leq 0.35$

Fuente: Siabato y Guzmán-Manrique (2019)

Adicionalmente, se contrastaron las medidas de significancia del estadístico de Moran (p valores) para determinar la validez estadística de las autocorrelaciones, de acuerdo con las siguientes condiciones:

- Si p valores < 0.05 , se rechaza la hipótesis nula (H_0) a favor de la hipótesis alternativa (H_a)
- Si p valores > 0.05 , se acepta la hipótesis nula (H_0) en contra de la hipótesis alternativa (H_a)

Por su parte, para interpretar las relaciones de dependencia espacial entre la marginación (y) y la accesibilidad vial (x), se consideró un indicador de ajuste relativo (pseud R^2). Según Anselin (2005) y Anselin y Rey (2014), esta medida es la correlación al cuadrado entre la variable dependiente observada y los valores predichos ajustados a los datos espaciales, la

cual se puede utilizar como una medida para determinar el nivel de bondad del modelo espacial.

Los valores de pseudo R^2 pueden oscilar entre 0 y 1 y, entre más cercanos a 1, las variables analizadas son más adecuadas para explicar el modelo espacial estructurado. Sin embargo, en la práctica, un valor superior a 0.3 se puede interpretar razonable para la demostración de dependencia espacial en las variables estudiadas (socioeconómicas), lo cual es verificado en diversos estudios desarrollados por Navarrete et. Al (2020), Sánchez (2012), Anselin (2005), Hernández y Chaparro (2022), German-Soto y Barajas (2014). Adicionalmente, autores como Anselin y Rey (2014), Borrego (2018), LeSage y Kelley (2009), Moreno, R. y Vayá (2000, 2002) sugieren comparar los resultados del modelo espacial con un modelo base, utilizando pruebas adicionales como significancia estadística de las variables a través del p-valor, el criterio de verosimilitud (Likelihood), el criterio de Akaike (AIC) y el criterio de Schwarz (SC), complementando así los resultados.

3.3.6 Determinación de áreas de mejora

Por último, para seleccionar las zonas geográficas prioritarias de atención, se establecieron clasificaciones de prioridad en función de la combinación de los grados menos favorables para la población en las variables de accesibilidad y marginación estudiadas:

- **Prioridad 1:** se incluyeron las áreas que presentan grados “bajos y muy bajos” de accesibilidad vial, en conjunto con grados de marginación “altos y muy altos”. Estas representaron las áreas menos favorecidas con respecto a las variables estudiadas.
- **Prioridad 2:** se incluyeron las secciones electorales que presentan grados “bajos y muy bajos” de accesibilidad vial y grados de marginación “medios, bajos y muy bajos”.
- **Prioridad 3:** se establecieron las áreas o secciones que presentan grados “medios, altos y muy altos” de accesibilidad vial y grados “altos y muy altos” de marginación.
- **Prioridad 4:** en esta categoría se consideraron las secciones con grados “medios, altos y muy altos” de accesibilidad vial y grados “medios, bajos y muy bajos” de marginación. Estas representaron las áreas más favorecidas con respecto a las variables estudiadas.

3.4 Tipos de datos

3.4.1 Datos Cartográficos.

En el desarrollo de la investigación se utilizaron archivos vectoriales de puntos del INEGI, del Directorio Nacional de Unidades Económicas (DENUE) del periodo 2022 (INEGI, 2022); archivos vectoriales lineales como es el caso de la Red vial de la Zona Metropolitana de Toluca (2020) generada de la Red Nacional de Caminos-RNC (IMT-SCT-INEGI, 2020), archivos vectoriales de polígonos como la división política (Estados, Municipios) del Marco Geoestadístico de México 2020 (INEGI, 2020b), las secciones electorales del Instituto Nacional Electoral de México (INE) del año 2020 (INE, 2020), y las coberturas de usos de suelo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - CONABIO para los años 2009, 2013, 2017 y 2021 (INEGI, 2009, 2013, 2017, 2021).

Cabe destacar que el sistema de coordenadas geográficas a utilizar será WGS84 / UTM Zona 14 N (EPSG: 32614), teniendo en cuenta el área de influencia de la zona de estudio y para facilitar medidas de distancia con precisión.

3.4.2 Datos estadísticos.

En la investigación, principalmente se utilizaron datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) a través del Censo Nacional de Población y Vivienda-CNPV (INEGI, 2020), el Directorio Nacional de Unidades Económicas-DENUE (INEGI, 2022), el Instituto Nacional Electoral (INE), la Secretaría de Comunicación y Transporte (SCT, 2020) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) para el periodo 2020 y 2022.

3.5 Softwares utilizados

En la investigación se utilizaron herramientas de software que permitieron el desarrollo de mapas y el análisis espacial con redes de transporte como ESRI ArcMap 10.8.2, ArcGIS Online y QGIS 3.22.10; adicionalmente, para efectos del análisis estadístico de datos se utilizaron los softwares SPSS 26 y GEODA 1.18. En el caso de este último, con soporte SIG para el análisis exploratorio de datos espaciales.

4. La Zona Metropolitana de Toluca

A través de este capítulo se muestra la Zona Metropolitana de Toluca, haciendo referencia a aspectos como la ubicación y delimitación, su población, actividades económicas y usos de suelo, la organización socioespacial y la movilidad laboral.

4.1 Delimitación y ubicación

En México, las zonas metropolitanas están definidas como:

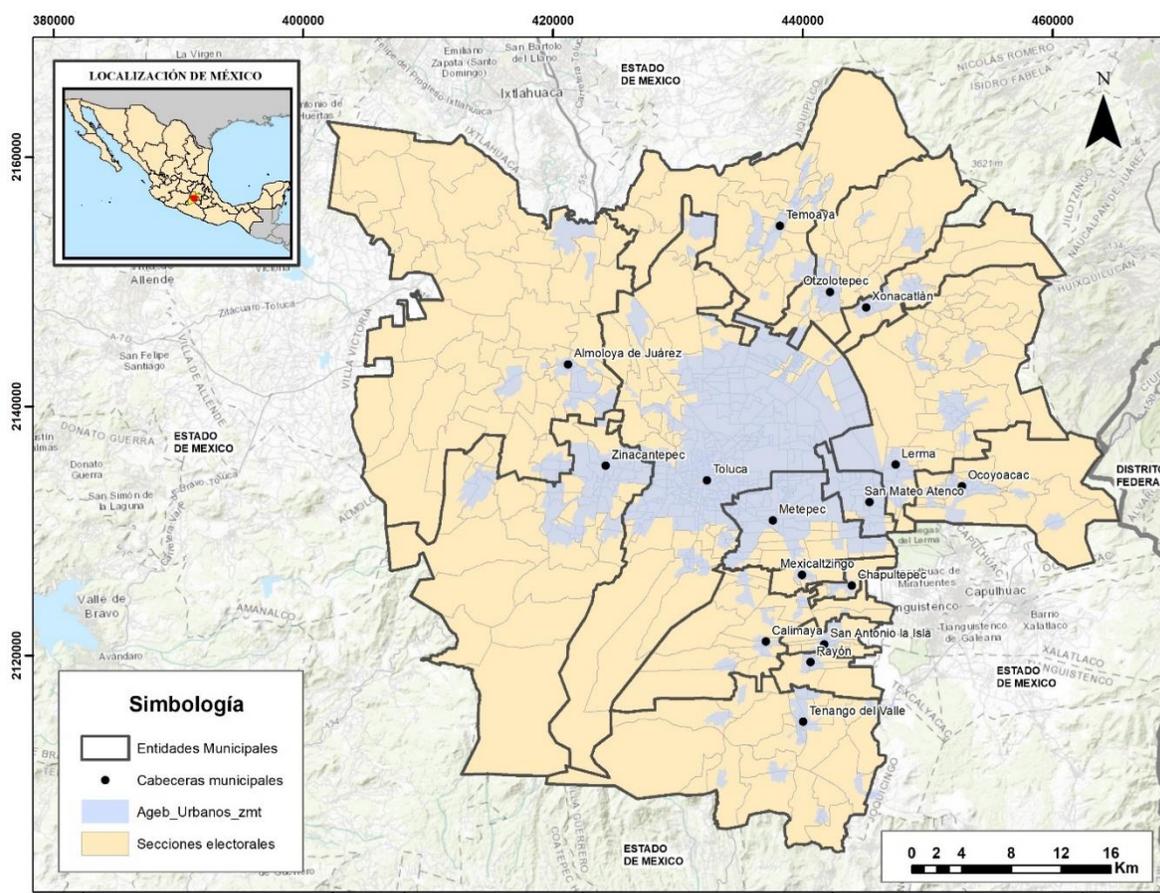
“el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 100 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan los límites del municipio, incorporando dentro de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica. También se incluyen aquellos municipios que por sus características particulares son relevantes para la planeación y política urbana de las zonas metropolitanas en cuestión” (SEDATU, CONAPO e INEGI, 2015).

En ese sentido, a nivel nacional se resaltan criterios para la delimitación de zonas metropolitanas como la población aglomerada, la extensión del área urbanizada, el ámbito territorial definido, la integración económica y social y la complejidad de las funciones desempeñadas (Centro Mario Molina, 2014b). De acuerdo con estos criterios, SEDATU, CONAPO e INEGI (2015) definieron la Zona Metropolitana de Toluca como un área metropolitana localizada en el Estado de México, integrada por 16 municipios: Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec (ver mapa 1); donde Toluca representa a la capital del Estado de México.

Cabe destacar que esta delimitación ha variado con el tiempo desde hace 15 años, emitiendo 4 delimitaciones oficiales por diversas entidades. La primera en el año 2009, de acuerdo con el decreto estatal 13 de la H. “LVII” del Estado de México, en la cual se define la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y se delimita con 22 municipios. La segunda definición en el año 2010 por SEDESOL, CONAPO e INEGI, considerando 15 municipios, teniendo en cuenta criterios de conurbación y funcionalidad. La tercera fue realizada por la Comisión

Nacional de Vivienda (CONAVI) en el año 2014, donde se construye bajo la visión de consolidación de las ciudades mexicanas a través de criterios de continuidad urbana, considerando 22 municipios de manera amplia y 15 municipios de manera estricta (Centro Mario Molina, 2014). Por último, se encuentra la delimitación oficial de SEDATU, CONAPO e INEGI para el año 2015, en la que se definieron 16 municipios en la ZMT.

Mapa 1. Ubicación de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020

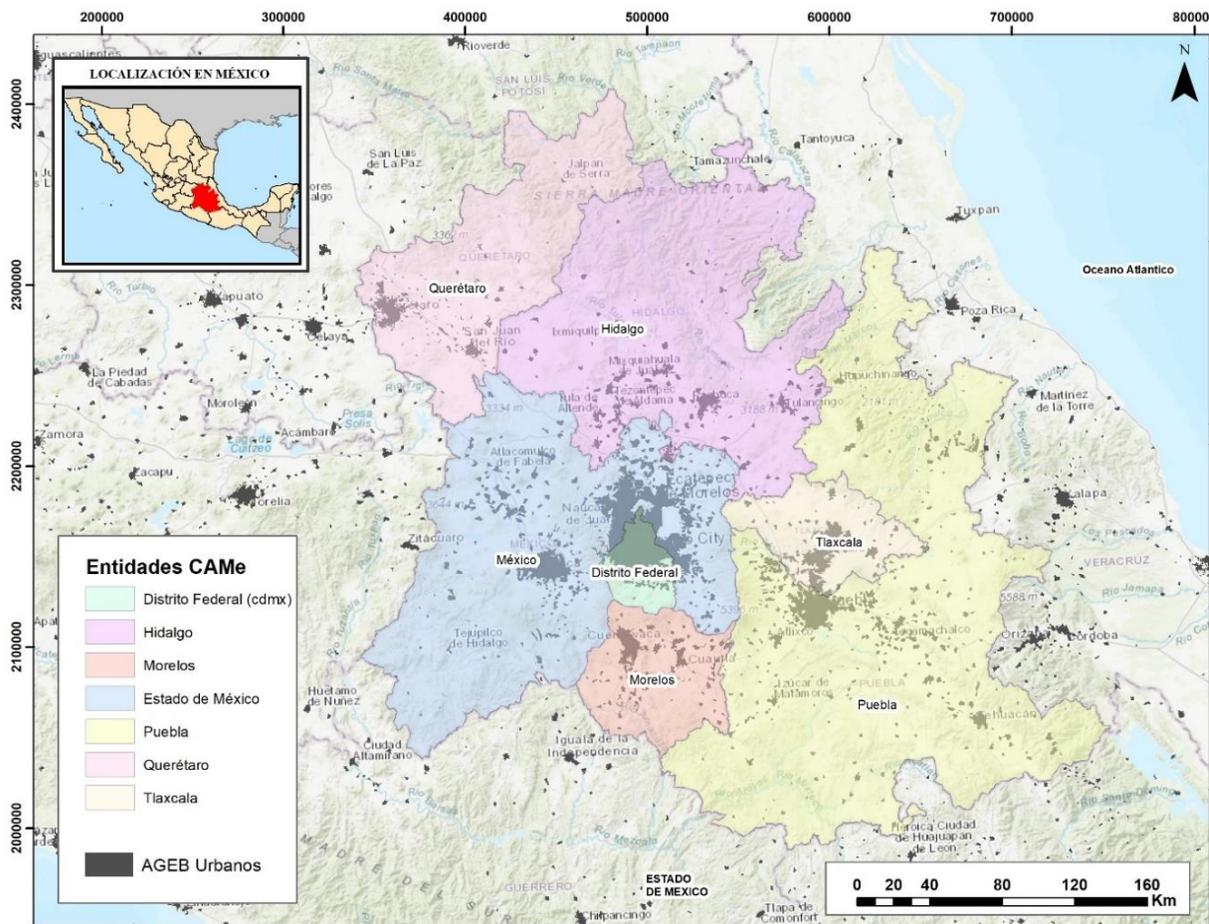


Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020), INE (2020)

De acuerdo con el Centro Mario Molina (2014b), la zona metropolitana es resultado de un proceso de extensión de áreas urbanizadas de los municipios contiguos a la ciudad central de Toluca, formando así una unidad funcional; siendo de esta forma la concentración urbana de mayor jerarquía en el Estado de México. En la cual se destaca una gran dinámica económica (comercial e industrial) que ha sobrepasado los límites municipales y extendido su influencia

a otras ciudades cercanas, incluyendo otras zonas metropolitanas, como la del Valle de México (Ciudad de México), formando así la Zona Megalopolitana del Valle de México (ver mapa 2).

Mapa 2. Delimitación de la Zona Megalopolitana del Valle de México, 2017



Fuente: elaboración propia con base en Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME, 2017)

Históricamente, el desarrollo de la ZMT se puede agrupar en varias etapas (ver tabla 18):

Tabla 18. Etapas de desarrollo de la Zona Metropolitana de Toluca 1900 -2020

Periodo	Características del periodo
1900 -1940	Este periodo se caracterizó porque la cantidad de población se presentó estable y la agricultura prevaleció como principal actividad económica. Adicionalmente, para la época de 1930, se empezaron a implementar programas públicos para la mejora de la conectividad a través de la construcción de carreteras.
1940 – 1990	<p>La ciudad de Toluca empezó a extender su zona urbana hacia el oriente debido al crecimiento industrial, iniciando un proceso de conurbación con Lerma. Para 1960 se iniciaron esfuerzos para la construcción del corredor industrial Toluca-Lerma, transformando la vocación de la ciudad a tipo industrial y habitacional. Así mismo, se iniciaron procesos de consolidación de servicios como el mercado de Juárez y la terminal de camiones.</p> <p>Para 1970, se dio el primer fenómeno de conurbación con Toluca y Metepec y se desarrollaron otros proyectos para mejorar la conectividad, como las carreteras de Toluca-Valle de Bravo, Toluca-Ixtlahuaca, Toluca-Ixtapan y Toluca-Metepec, convirtiendo a la ciudad central (Toluca) como un impulsor de desarrollo para los municipios aledaños.</p> <p>Adicionalmente, para los años 80, la metropolización influyó en el desarrollo del sector terciario y se crearon políticas para incentivar la creación de zonas industriales, lo que influyó en la creación de nuevos corredores como Las Torres, la ampliación de la carretera Naucalpan-Toluca, la finalización del corredor México-Toluca y la construcción del Aeropuerto Internacional Lic. Adolfo López Mateos.</p>
1990 - 2010	En esta época, el proceso de conurbación continuó disperso y desorganizado, anexándose las conurbaciones de Ocoyoacac, San Mateo de Atenco, Almoloya de Juárez y Otzolotepec, y consolidándose el concepto de Zona Metropolitana. Así mismo, la industria se refuerza como la principal actividad de la zona, creciendo así la población y generando mayor demanda de trabajos. Otro aspecto que influyó en el crecimiento de la población fueron las migraciones desde la Ciudad de México a razón del terremoto de 1985.
2010 -2020	Se consolidó aún más la dinámica económica y social de la ZMT y su influencia con un área de influencia mayor como la Zona Metropolitana del Valle de México, por lo que incrementan las áreas urbanizadas en la mayor parte de la ZMT. Adicionalmente, se intenta mejorar la conectividad de esta mediante la construcción de proyectos como el tren intermunicipal de pasajeros con Ciudad de México y el mejoramiento de las vías férreas para el transporte de carga.

Fuente: elaboración propia con base en Centro Mario Molina (2014b)

Lo anterior deja claro que una de las constantes que ha tenido la ZMT para su desarrollo ha sido la consolidación de las actividades industriales y comerciales, lo que impulsó la construcción de obras de infraestructura y el crecimiento de la población y las áreas urbanas.

Sin embargo, esto también llevó a uno de los principales problemas en la ZMT: el crecimiento acelerado, disperso y desorganizado de sus áreas urbanas (Centro Mario Molina, 2014b; Jardon, 2014; Sánchez y Hernández, 2015; Liévanos, 2016; Aguirre, 2018), generando así presiones económicas, sociales y ambientales, lo cual también es resultado de una falta de articulación y gobernanza entre los organismos públicos de la región (Venancio, 2016).

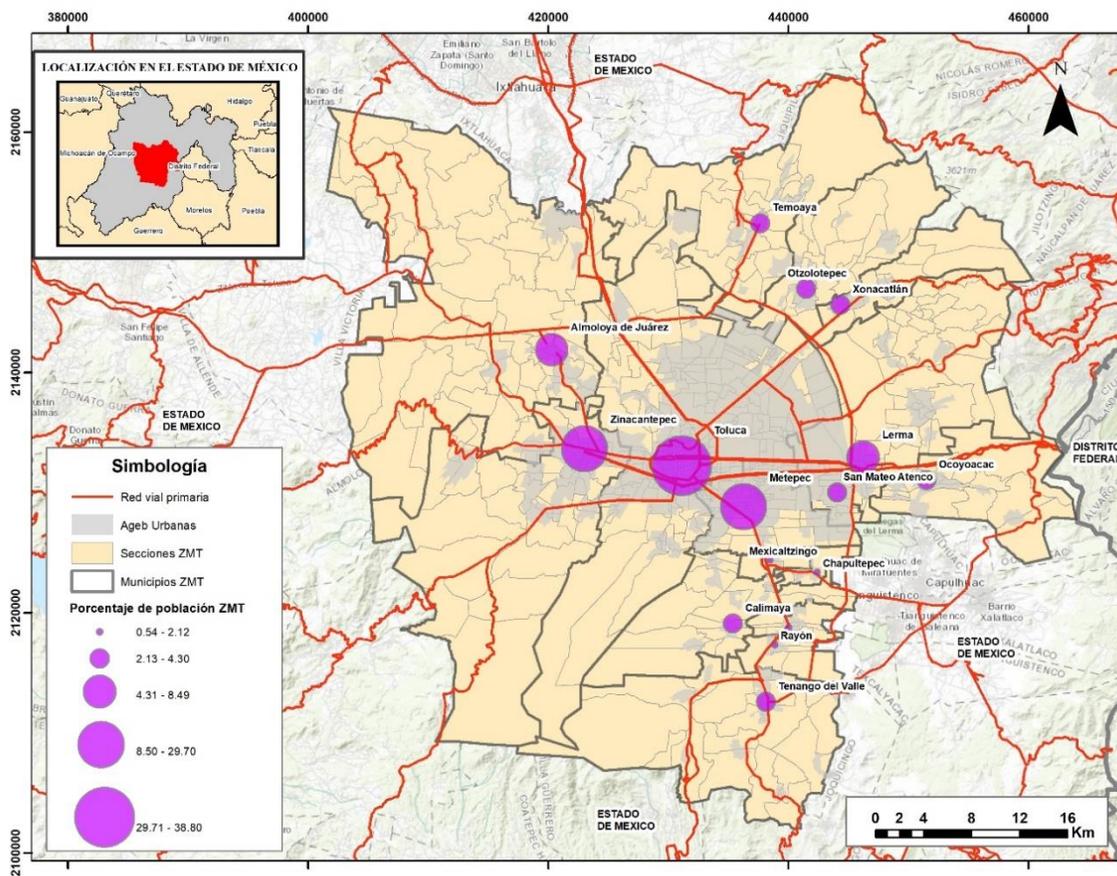
4.2 Población

Según datos del Censo Nacional de Vivienda-CNPV (INEGI, 2020a), para el periodo 2020, la Zona Metropolitana de Toluca tuvo una población de 2 millones 354 mil 155 habitantes, distribuidos en un área de 2 mil 405 Km², representando una densidad poblacional de 978.9 habitantes/Km². Lo cual estuvo por encima del promedio nacional equivalente a 64 habitantes/Km² (ver tabla 19) en el mismo periodo.

En 2020, la mayor cantidad poblacional se encontró en el municipio de Toluca, con un total de 91 mil 310 habitantes, equivalente al 38% de la población de la Zona Metropolitana de Toluca. Seguido por el Municipio de Metepec (242 mil 328 habitantes), Zinacantepec (203 mil 206 habitantes), Almoloya de Juárez (174 mil 520 habitantes) y Lerma (162 mil 496 habitantes). El resto de los municipios presentó una población menor a 100 mil y superior a 12 mil habitantes (ver mapa 3).

Por otro lado, se presentaron mayores densidades poblacionales en los municipios de San Mateo de Atenco, Metepec y Toluca con densidades de 4 mil 386 habitantes/Km², 3 mil 560 habitantes/Km² y 2 mil 124 habitantes/Km² respectivamente. Lo anterior considerando que el área de San Mateo de Atenco y Metepec no sobrepasan los 70 Km², mientras que Toluca tiene un aproximado de 429 Km² en toda su extensión (ver tabla 19).

Mapa 3. Porcentaje poblacional en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020a), INE (2020)

En cuanto a la dinámica de crecimiento de la ZMT, desde el año 2010 hasta el año 2020, ésta ha presentado un incremento anual de 1.57%, equivalente a 340 mil 64 habitantes. Evidenciando un mayor incremento poblacional en los municipios de San Antonio la Isla (4.1%), Calimaya (3.6%), Xonacatlán (3.3), San Mateo de Atenco (3.0%), Chapultepec (2.7%) y Otzolotepec (2.4%). En contraste, con el decremento poblacional generado en el municipio de Rayón (-0.1%), el cual pasó de 12 mil 748 a 12 mil 624 habitantes (ver tabla 19).

Tabla 19. Estadísticas demográficas en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca, 2010 y 2020

Municipio	Población total 2010	Población total 2020	Superficie municipal	Tasa de crecimiento anual de la población 2010-2020	Densidad poblacional 2020
	Habitantes	Habitantes	Km ²	Porcentaje	Habitantes/Km ²
San Mateo de Atenco	72,579	97,122	22.14	2.96	4,386.72
Metepec	214,162	242,328	68.06	1.24	3,560.51
Toluca	819,561	911,310	428.94	1.07	2,124.56
San Antonia de Isla	22,152	32,954	18.21	4.05	1,809.67
Chapultepec	9,676	12,607	10.47	2.68	1,204.11
Mexicaltzingo	11,712	13,807	11.85	1.66	1,165.15
Xonacatlán	46,331	63,874	64.287	3.26	993.58
Otzolotepec	78,146	98,829	116.39	2.38	849.12
Lerma	134,799	162,496	208.97	1.89	777.60
Ocoyoacac	61,805	68,908	107.25	1.09	642.50
Zinacantepec	167,759	203,206	317.91	1.94	639.19
Calimaya	47,033	67,094	107.19	3.62	625.94
Rayón	12,748	12,624	23.08	-0.10	546.97
Temoaya	90,010	98,069	204.99	0.86	478.41
Tenango del Valle	77,965	94,407	212.9	1.93	443.43
Almoloya	147,653	174,520	482.39	1.69	361.78
Total	2,014,091	2,354,155	2,405.02	1.57	978.85

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2010, 2020a, 2020b)

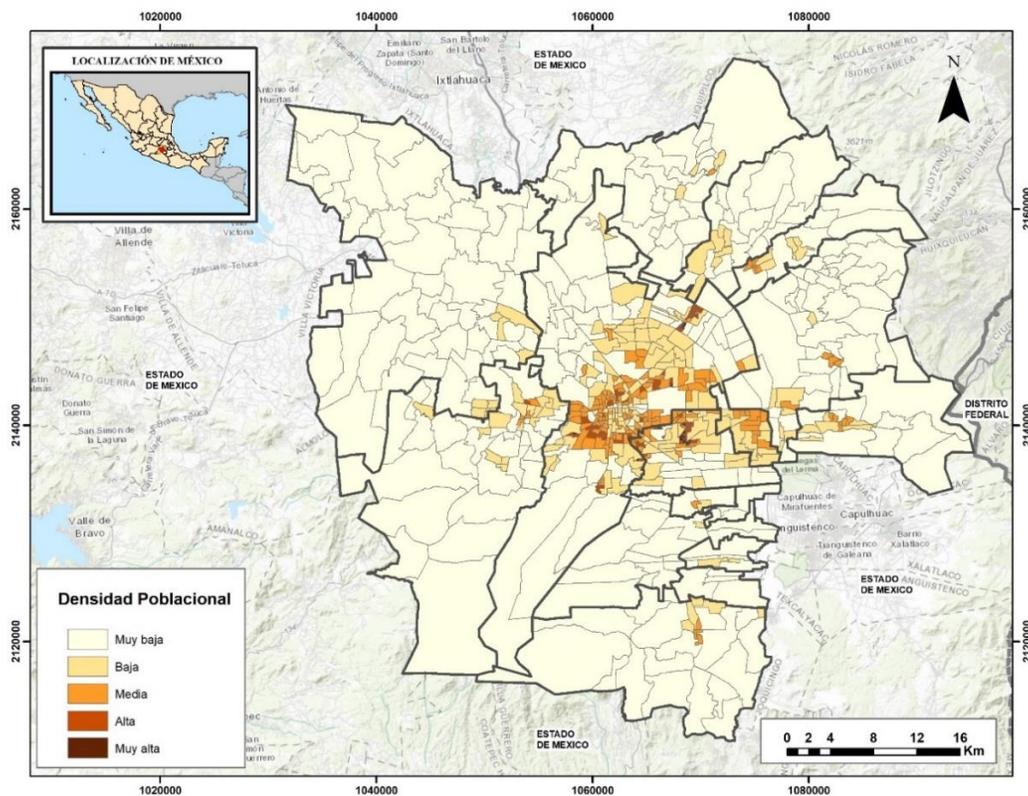
Las estadísticas anteriores indican que la dinámica de crecimiento poblacional de la Zona Metropolitana de Toluca siguió en aumento en la mayor parte de los municipios⁵, debido a

⁵ A excepción de los municipios de Toluca, Metepec, Ocoyoacac y Temoaya, donde su incremento fue inferior al incremento de la tasa media de crecimiento anual de la ZMT y en Rayón, donde se redujo la población.

que resultaron con tasas de crecimiento anuales superiores al 1.57% de la media regional. No obstante, en los municipios de Toluca y Metepec (mayor participación poblacional), presentaron un incremento poblacional por debajo de la media regional de la ZMT, durante el periodo analizado (2010 y 2020).

De acuerdo con el mapa 4, en la ZMT se ha observado una mayor concentración en la densidad poblacional de la zona central, oriental y nororiental de la región. De acuerdo con los datos del INE, para el periodo 2020, se evidenciaron concentraciones muy altas de la población en las secciones electorales centrales del municipio de Toluca, teniendo un rango entre 0.5 habitantes / Ha y 257 habitantes / Ha. Adicionalmente, también destacan secciones de los municipios de Metepec, Zinacantepec y Tenango del Valle con densidades máximas de 444.9 habitantes/Ha, 122.4 habitantes/Ha y 102.8 habitantes/Ha respectivamente.

Mapa 4. Densidad poblacional en las secciones electorales de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020



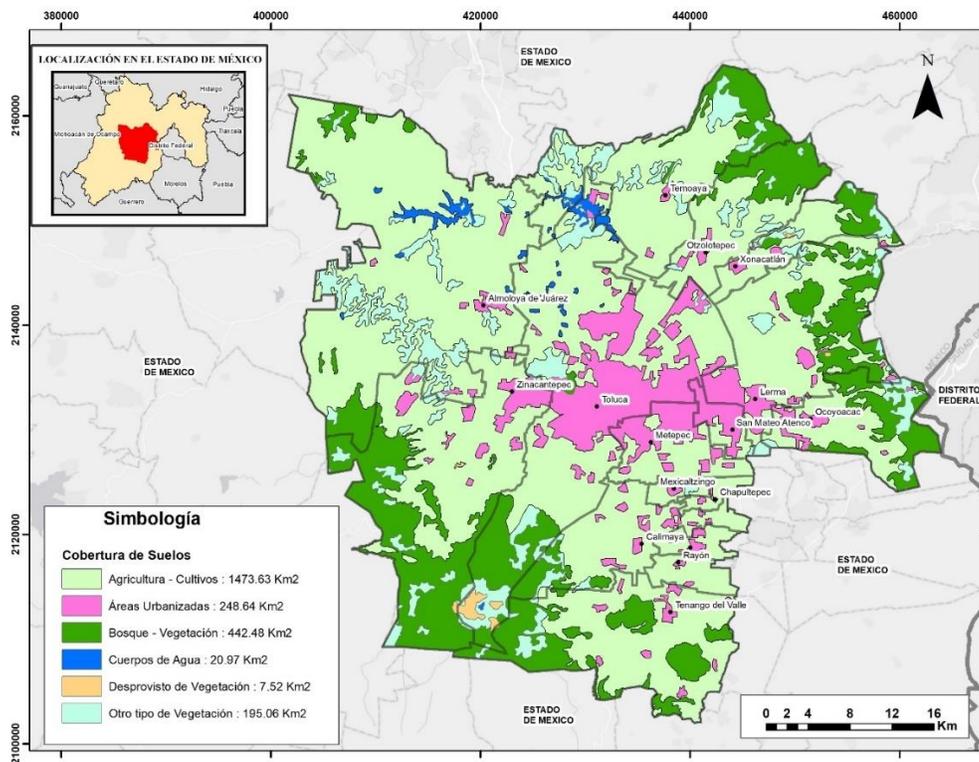
Fuente: elaboración propia con base en INE (2020) e INEGI (2020a)

4.3 Cobertura de usos de suelo y áreas urbanas

De acuerdo con López y Plata (2009), en México las actividades humanas son uno de los principales factores de impacto en los cambios ambientales y el crecimiento de las ciudades. En ese sentido, toma relevancia el estudio de los cambios de uso y cobertura de suelo, lo que permite analizar y comprender los procesos de degradación de usos ambientales en el territorio, así como la identificación e implementación de estrategias para el control de estas actividades que se generan en el espacio geográfico (Centro Mario Molina, 2014b).

Los datos del Consejo Nacional de Biodiversidad-CONABIO (INEGI, 2021) muestran que para el año 2021, la Zona Metropolitana de Toluca presentó una mayor distribución en los suelos con cobertura agrícola y cultivos (61.7%), seguido de suelos con cobertura de bosque y vegetación abundante (18.5%), áreas urbanas (10.3%), Otro tipo de vegetación (8.2%), cuerpos de agua (0.9%) y suelos desprovistos de vegetación (0.3%) (ver mapa 5).

Mapa 5. Cobertura de usos de suelo de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020

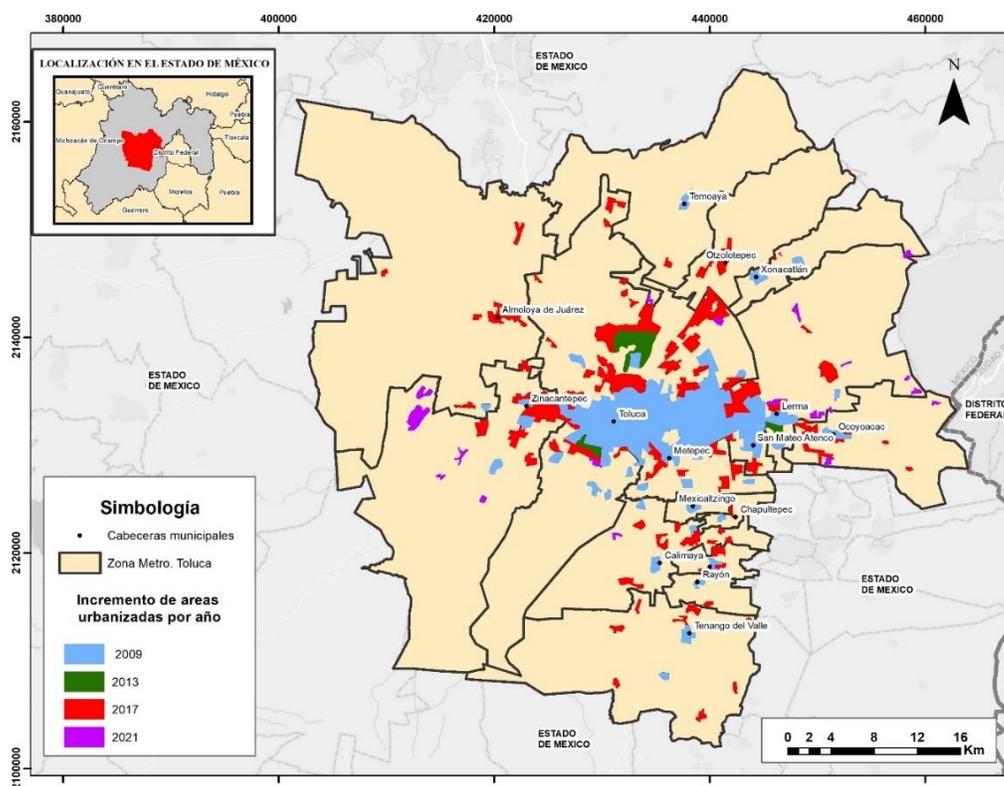


Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2021) e INE (2020)

De la anterior distribución en la cobertura de suelos en la ZMT, se resalta la forma como se distribuyen las áreas urbanas en la zona central de la metrópolis y se dispersa en algunas partes de la periferia, representando un 10.3% de la superficie total en el periodo 2021. Todo esto incide en uno de los principales problemas de la ZMT: el crecimiento disperso y desordenado de las áreas urbanas, y el impacto generado por las actividades antrópicas al resto del territorio.

En el mapa 6, se evidencia la dinámica de crecimiento que han tenido las áreas urbanas en la zona metropolitana, resaltando el incremento disperso en el año 2017 (rojo) en la mayor parte del municipio de Toluca, y en menor parte en zonas dispersas en el resto de los municipios de la ZMT.

Mapa 6. Incremento de la cobertura de áreas urbanizadas de la ZMT, en los años 2009, 2013, 2017 y 2021



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2009, 2013, 2017, 2021).

En la tabla 20, se observan las cifras del incremento de las áreas urbanas para los años 2009 a 2021. Se resalta un crecimiento considerable en 4 años (15.11%), pasando de una participación del 5.63% del total del área de la ZMT en el año 2013 a un 9.89% del total del área de la ZMT en el periodo 2017. Sin embargo, para el periodo 2017-2021, la tasa de crecimiento anual se redujo representativamente al 1.10%.

Por su parte, la tasa de crecimiento del área urbana calculada entre los periodos 2009 y 2021 representó un incremento del 5.98%, la cual es mucho mayor que la tasa de crecimiento de la población en los periodos 2010-2020 (1.57%), lo que indica mayores crecimientos dispersos de las áreas urbanas en comparación con el crecimiento de la población.

Tabla 20. Estadísticas de la superficie urbanizada en la ZMT, en los años 2009, 2013, 2017 y 2021

Periodo	Superficie del área urbanizada	Proporción de la superficie con respecto al total de la ZMT	Tasa de crecimiento anual de la superficie urbanizada
	Km ²	Porcentaje	Porcentaje
2009	123.80	5.15	
2013	135.50	5.63	2.28
2017	237.95	9.89	15.11
2021	248.64	10.34	1.10

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2009, 2013, 2017, 2021)

Es relevante destacar que, desde el Gobierno del Estado de México-GEM (GEM, 2005), las Administraciones Municipales y la Secretaría de Desarrollo Urbano y Metropolitano (GEM, 2019), han implementado estrategias para abordar los desequilibrios territoriales ocasionados por el predominio del modelo de urbanización y para promover la sostenibilidad de las ciudades a través de la planificación de zonas metropolitanas. Teniendo como objetivo regular la expansión urbana sin perturbar los equilibrios del ecosistema, considerando diferentes ejes: desarrollo social, económico y ambiental, los cuales están orientados, a su vez, a los Objetivos de la Agenda 2030.

4.4 Actividades económicas

De acuerdo con datos del DENU (INEGI, 2022) y el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, México SCIAN (INEGI, 2018), para el periodo 2022, la Zona Metropolitana de Toluca contó con un total de 114 mil 857 unidades económicas en toda su extensión. Estas se clasificaron mayoritariamente en actividades comerciales (al por menor y por mayor), con un 49.07% del total, seguido de otros servicios excepto actividades gubernamentales (13.65%), servicios de alojamiento temporal y preparación de alimentos y bebidas (10.88%) y actividades de la industria manufacturera (10.37%) (ver tabla 21).

Tabla 21. Estadísticas de establecimientos económicos y empleos estimados por sectores SCIAN en la Zona Metropolitana de Toluca, 2022

No	Actividad económica	Código SCIAN	Establecimientos económicos	Proporción de establecimientos económicos	Empleos	Proporción de empleos
			Unidades económicas	Porcentaje	Número de empleos	Porcentaje
1	Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza	11	52	0.05	258	0.03
2	Minería	21	30	0.03	635	0.09
3	Generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, suministro de agua y de gas natural	22	157	0.14	2,829	0.38
4	Construcción	23	372	0.32	7,662	1.04
5	Industria manufacturera	31-33	11,905	10.37	130,922	17.73
6	Comercio	43-46	56,359	49.07	236,309	32.00
7	Transportes, correos y almacenamiento	48-49	516	0.45	20,554	2.78

No	Actividad económica	Código SCIAN	Establecimientos económicos	Proporción de establecimientos económicos	Empleos	Proporción de empleos
			Unidades económicas	Porcentaje	Número de empleos	Porcentaje
8	Información en medios masivos	51	367	0.32	4,484	0.61
9	Servicios financieros y de seguros	52	1,688	1.47	11,393	1.54
10	Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles	53	1,276	1.11	5,977	0.81
11	Servicios profesionales, científicos y técnicos	54	1,938	1.69	13,909	1.88
12	Corporativos	55	8	0.01	298	0.04
13	Servicios de apoyo a los negocios y manejo de residuos, y servicios de remediación	56	2,336	2.03	27,353	3.70
14	Servicios educativos	61	2,699	2.35	62,983	8.53
15	Servicios de salud y de asistencia social	62	4,479	3.90	29,604	4.01
16	Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos	71	1,328	1.16	8,618	1.17
17	Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	72	12,499	10.88	55,837	7.56

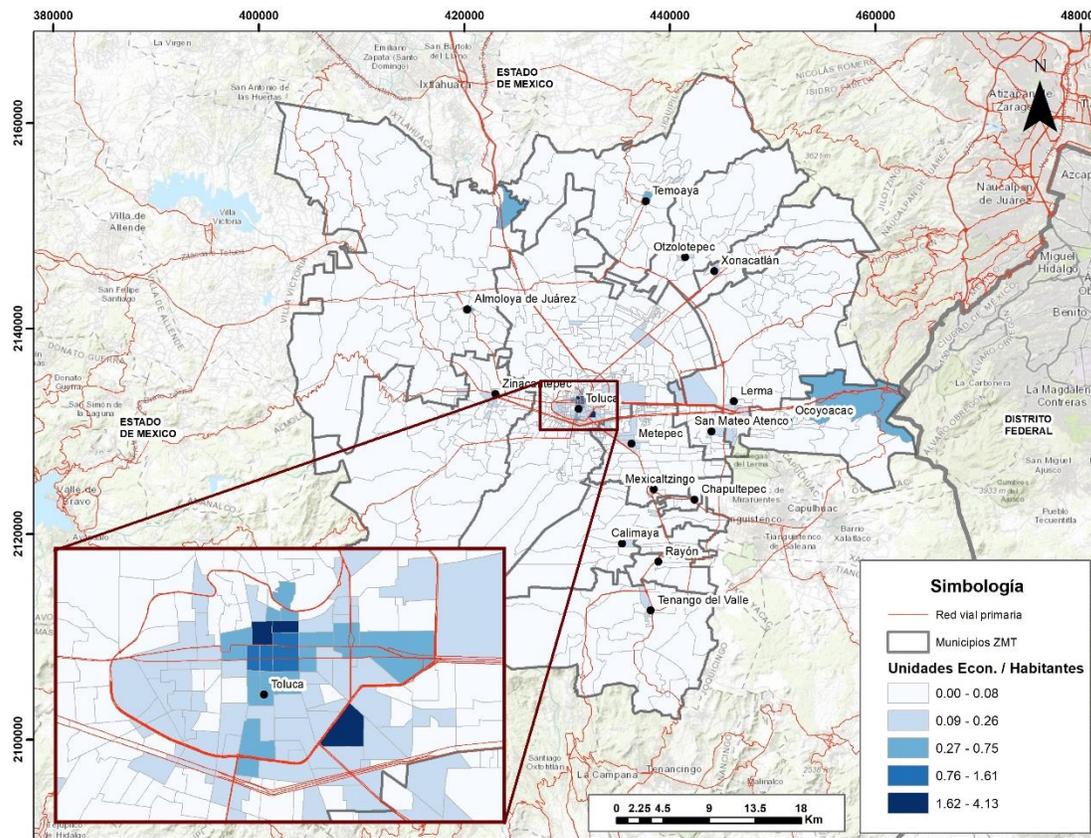
No	Actividad económica	Código SCIAN	Establecimientos económicos	Proporción de establecimientos económicos	Empleos	Proporción de empleos
			Unidades económicas	Porcentaje	Número de empleos	Porcentaje
18	Otros servicios excepto actividades gubernamentales	81	15,682	13.65	59,351	8.04
19	Actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales	93	1,166	1.02	59,460	8.05
Total			114,857	100.00	738,436	100.00

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2018, 2022)

Entre las actividades económicas que tienen un mayor impacto respecto a la cantidad de empleos generados en la Zona Metropolitana de Toluca, se encuentran el comercio con un total de 236 mil 309 empleos estimados (32% del total en la ZMT), la industria manufacturera con 130 mil 922 empleos (17.73% del total de empleos) y los servicios educativos con 62 mil 983 empleos (8.53% del total de empleos).

En el mapa 7, se observó la relación de las unidades económicas por habitantes en las secciones electorales de la ZMT para el año 2022. Destacando una mayor relación de unidades económicas por habitante en escasas 8 secciones electorales (1.1% de las secciones), ubicadas en la parte central de la ZMT en el municipio de Toluca, sobre las vialidades de Miguel Hidalgo y Paseo Tollocan, entre Isidro Fabela y Pino Suarez, en las cercanías del centro de Toluca y la central principal de camiones de la región. Esta categoría presenta una relación entre 0.75 y 4.13, lo que quiere decir que en estas secciones se ubicaron entre 75 y 413 unidades económicas por cada 100 habitantes (ver tabla 22).

Mapa 7. Unidades económicas por habitantes en las secciones electorales de la ZMT, 2022



Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020); INE (2020); INEGI, (2022)

Así mismo, se resaltaron 140 secciones electorales (19.9% de secciones de la ZMT) que presentaron una relación entre 9 y 75 unidades económicas por cada 100 habitantes (0.09 y 0.75). Estos se ubican principalmente alrededor del centro de Toluca, alrededor del circuito vial interno Paseo Tollocan, Paseo Matlazincas, López Portillo y Alfredo del Mazo, extendiéndose al municipio de Metepec, a lo largo de la vialidad Pino Suarez (ver mapa 7 y tabla 22).

Adicionalmente, se evidenció esta relación en algunas secciones dispersas en las zonas urbanas de los municipios de Zinacantepec, Almoloya de Juárez, Temoaya, Otzolotepec, Xonacatlán, Lerma, San Mateo, Mexicaltzingo, Calimaya, Tenango del Valle y Ocoyoacac. Así mismo, se resaltan 2 secciones en la periferia de Ocoyoacac y Almoloya que presentaron relaciones entre 27 y 75 unidades económicas por cada 100 personas que habitan en la zona

(0.27 -0.75), ubicándose sobre los corredores funcionales de México-Toluca (La Marquesa) y Toluca-Atlacomulco.

Por último, la relación de unidades económicas por habitantes más baja (entre 0 y 8 unidades económicas por cada 100 habitantes) se agrupa en el 78.9% de las secciones electorales de la ZMT (ver tabla 22), distribuyéndose en el resto de la región.

Tabla 22. Estadísticas de la relación de unidades económicas por habitante en las secciones electorales de la ZMT, 2022

Rango de la relación de unidades económicas por habitante	Secciones electorales	Proporción de secciones electorales
Porcentaje	Número de secciones	Porcentaje
0 - 0.08	558	78.9
0.09 – 0.26	123	17.4
0.27 – 0.75	17	2.5
0.76 – 1.61	5	0.7
1.62 – 4.13	3	0.4
Total	707	100.0

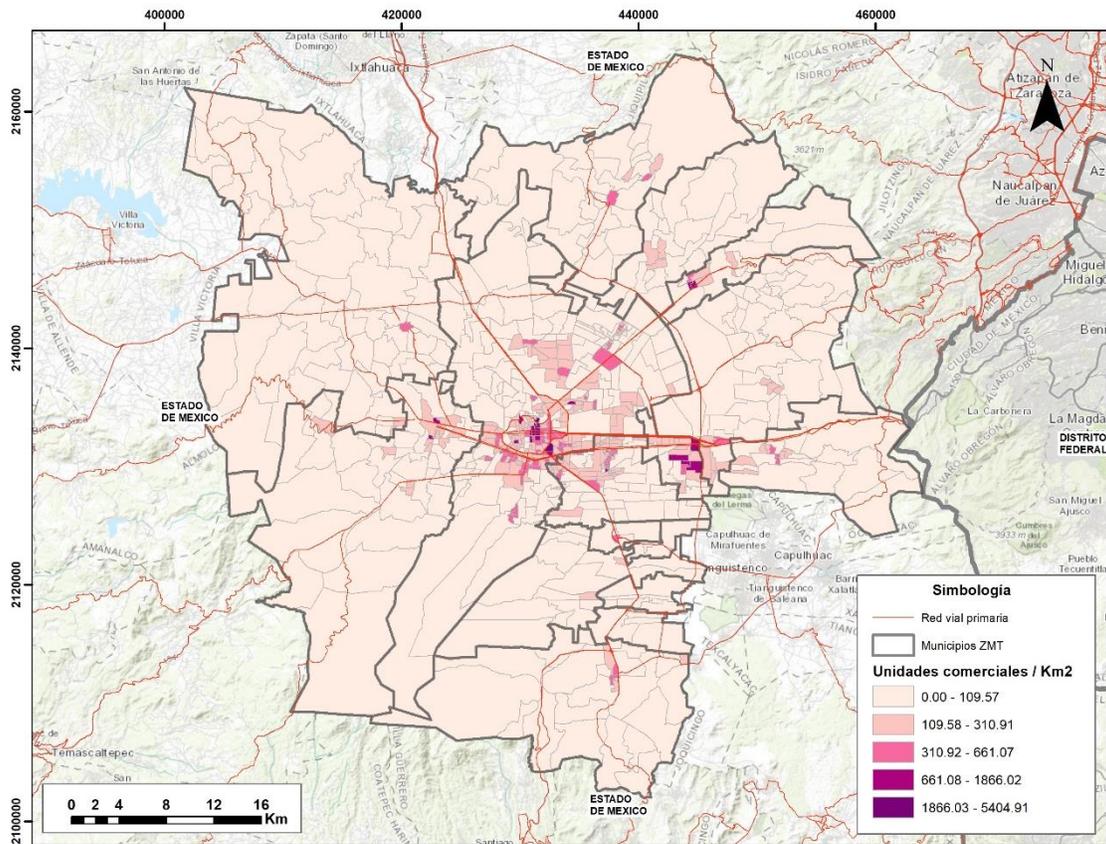
Fuente: elaboración propia

Considerando la importancia de las actividades de comercio, industria manufacturera y servicios educativos con respecto al impacto generado en los empleos de la región, en los mapas 8, 9 y 10, se evidenció la densidad de establecimientos por kilómetro cuadrado por sección electoral en la Zona Metropolitana de Toluca durante el periodo 2020.

De forma general, se observó una mayor concentración de las unidades comerciales en la zona central de la ZMT, alrededor de las vialidades urbanas principales como Tollocan, Solidaridad las Torres, Pino Suarez, El Paseo Colón y la carretera México-Toluca; destacando densidades de 661 a 5 mil 404 unidades comerciales/Km² en el 3.53% de las secciones municipales de la ZMT, principalmente en los municipios de Toluca y San Mateo

de Atenco, y de forma dispersa en pequeñas secciones electorales de Metepec, Xonacatlán, Zinacantepec y Tenango del Valle (ver mapa 8).

Mapa 8. Densidad de unidades comerciales en las secciones electorales de la ZMT, 2022



Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020); INE (2020); INEGI (2022)

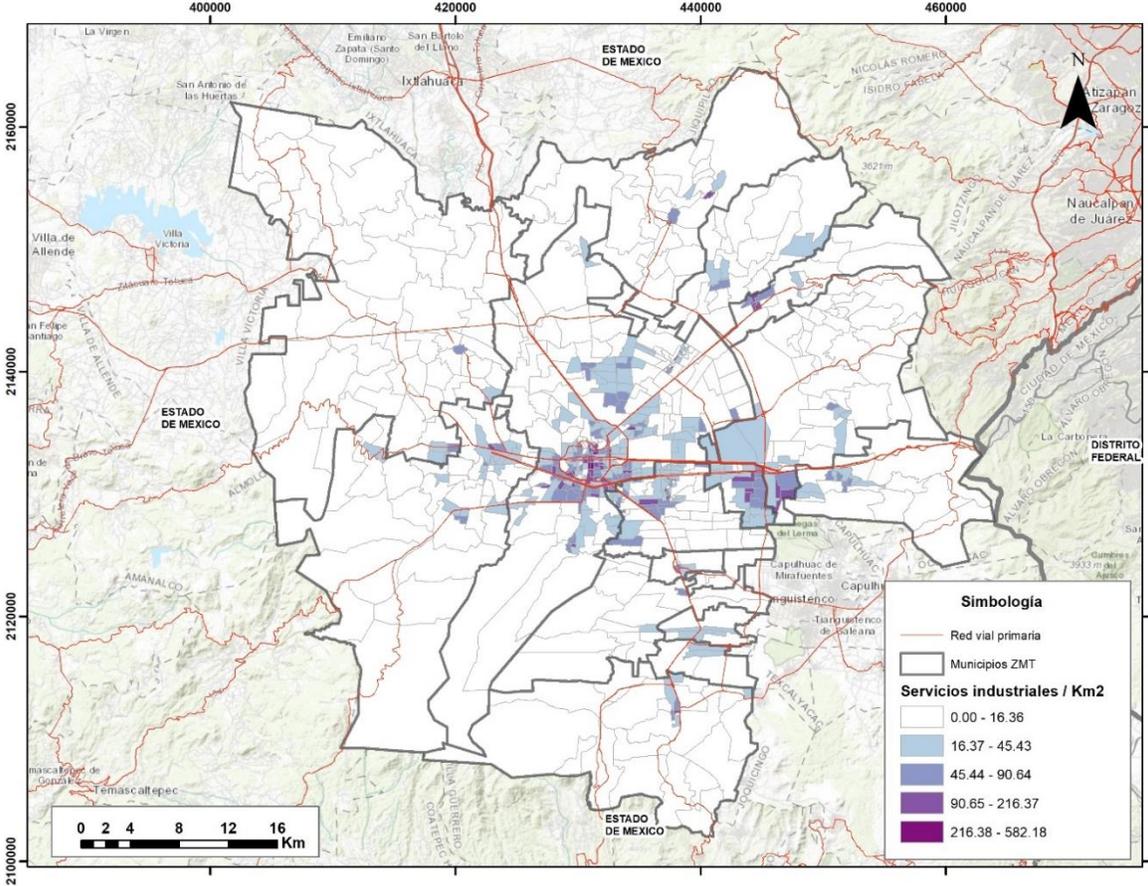
En cuanto a las actividades de la industria manufacturera, se presentaron mayores concentraciones de unidades económicas (45.44 a 582 unidades/Km²) en 165 secciones electorales de la ZMT (23.24% de las secciones de la ZMT), principalmente en los municipios de Toluca, Metepec y Lerma, y distribuidos por las vialidades primarias y áreas próximas a las áreas urbanas.

En concentraciones menores (16.37 a 45.43 unidades manufactureras/Km²), se hallaron 182 secciones electorales (24.74% de las secciones de la ZMT) (ver mapa 9). También se observaron pequeñas secciones urbanas con densidades bajas de establecimientos

manufactureros: al norte de la ZMT, en los municipios de Otzolotepec, Xonacatlán y Temoaya; al oriente de la ZMT, en Zinacantepec; al occidente, en Ocoyoacac; y al sur en Tenango del Valle, Mexicaltzingo y Rayón (ver mapa 9).

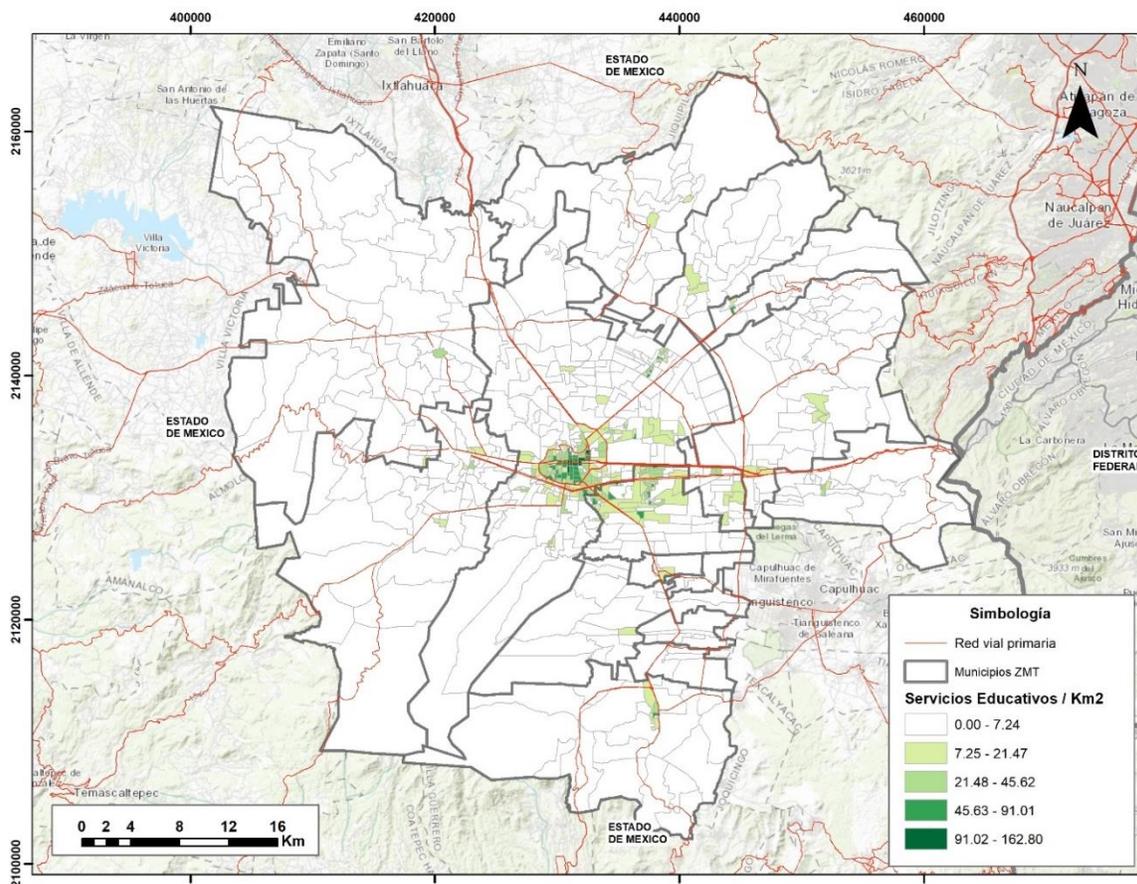
Por último, los empleos de los servicios educativos en la Zona Metropolitana de Toluca se concentraron principalmente en las secciones electorales del centro de Toluca y su zona conurbada con el municipio de Metepec. En contraste, se presentaron menores concentraciones de estas actividades en pequeñas secciones urbanas del resto de los municipios de la ZMT (ver mapa 10).

Mapa 9. Densidad de unidades manufactureras en las secciones electorales de la ZMT, 2022



Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020); INE (2020); INEGI, (2022)

Mapa 10. Densidad de servicios educativos en las secciones electorales de la ZMT, 2022



Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020); INE (2020); INEGI, (2022)

4.5 Movilidad laboral de la ZMT

En cuanto a los desplazamientos generados por actividades laborales en la ZMT, de acuerdo con los datos de la muestra censal del CNPV (INEGI, 2020c), para el periodo 2020, se generaron un aproximado de 249 mil 024 desplazamientos de ida por día (aproximadamente 3.4 millones de desplazamientos de ida y vuelta por semana), con motivos de trabajo, desde los municipios de la ZMT hasta los 36 destinos principales abordados entre el Estado de México y Ciudad de México (ver anexo 1. matriz O-D). Dentro de los principales municipios

generadores de viajes en la ZMT se encontraron los municipios de Metepec, Zinacantepec, Toluca⁶ y Lerma con una participación del 13.4%, 13.4%, 13.1% y 11.4% respectivamente.

Por otro lado, dentro de los principales municipios atractores de viajes por motivos laborales en la ZMT, se observaron los municipios de Toluca con un 48.7% del total de los desplazamientos recibidos; seguido de Lerma y Metepec con un 14.1% y 9.8% del total de los viajes atraídos, respectivamente.

Tabla 23. Desplazamientos laborales por orígenes y destinos en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020

Municipio	Desplazamientos laborales (ida) por origen	Proporción de desplazamientos laborales por origen	Desplazamientos laborales (ida) por destino	Proporción de desplazamientos laborales por destino
	Número de desplazamientos	Porcentaje	Número de desplazamientos	Porcentaje
Metepec	33,370	13.4	24,498	9.8
Zinacantepec	33,351	13.4	4,009	1.6
Toluca	32,627	13.1	121,186	48.7
Lerma	28,305	11.4	35,149	14.1
Almoloya de Juárez	24,356	9.8	3,199	1.3
San Mateo Atenco	15,231	6.1	5,781	2.3
Temoaya	14,742	5.9	2,044	0.8
Otzolotepec	12,959	5.2	1,985	0.8
Calimaya	11,984	4.8	1,820	0.7
Tenango del Valle	9,792	3.9	2,299	0.9
Xonacatlán	8,720	3.5	3,096	1.2
Ocoyoacac	8,638	3.5	2,875	1.2

⁶ Hay que considerar que, si se tiene el 100% de los movimientos realizados en la Zona Metropolitana de Toluca hacia el resto del Estado de México y Ciudad de México, el municipio de Toluca presenta un mayor porcentaje de participación en los municipios de la zona metropolitana.

Municipio	Desplazamientos laborales (ida) por origen	Proporción de desplazamientos laborales por origen	Desplazamientos laborales (ida) por destino	Proporción de desplazamientos laborales por destino
	Número de desplazamientos	Porcentaje	Número de desplazamientos	Porcentaje
San Antonio la Isla	6,989	2.8	1,739	0.7
Chapultepec	2,965	1.2	450	0.2
Rayón	2,901	1.2	1,194	0.5
Mexicaltzingo	2,094	0.8	1,264	0.5

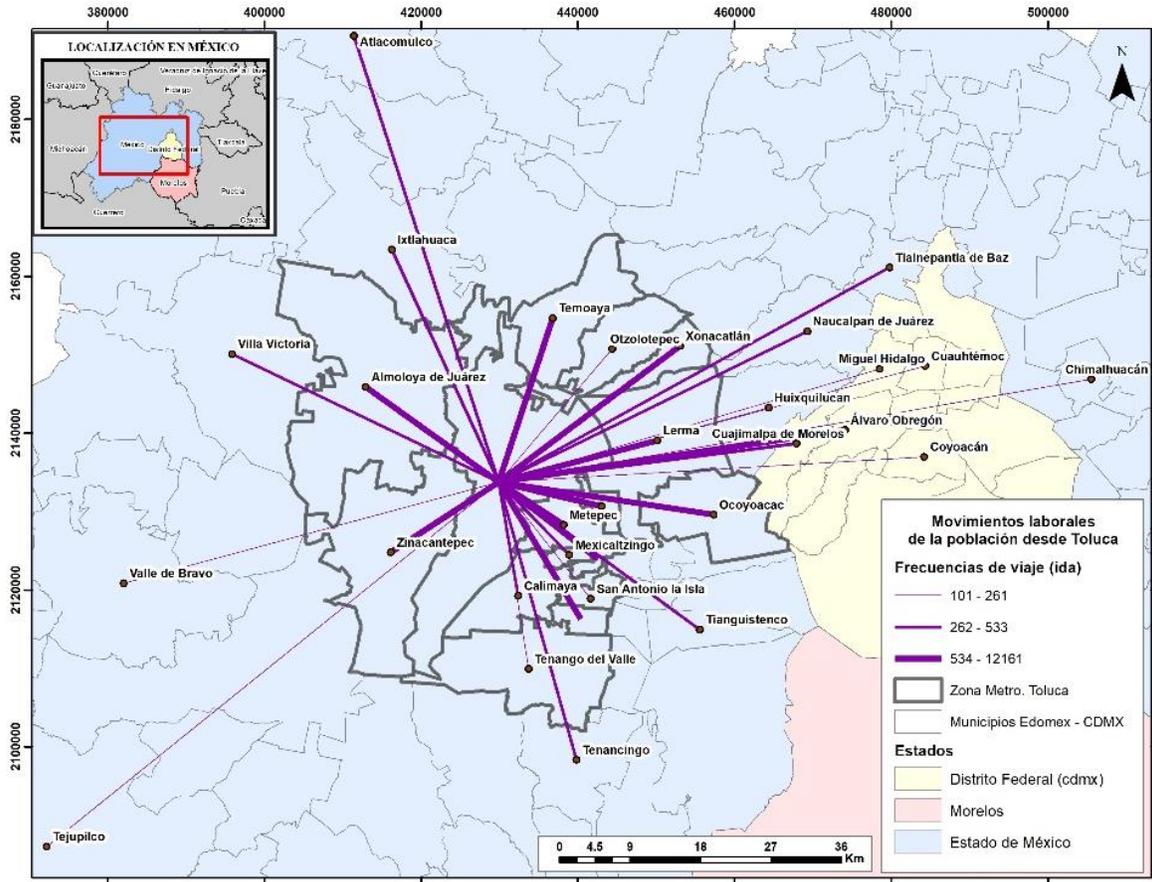
Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020c)

En ese sentido, se resalta la importancia de estos municipios en la generación y atracción de los desplazamientos laborales por parte de la población metropolitana y el nivel de interacción que presenta con otros municipios cercanos en el Estado de México y Ciudad de México.

En los mapas 11, 12 y 13, se analizaron las frecuencias de desplazamiento de la población mayores a 100 desplazamientos (ida), en los 3 principales municipios generadores de viajes (Zinacantepec, Metepec y Toluca).

Para el caso de Toluca (ver mapa 11), este presentó un mayor alcance con frecuencias mayores de 100 viajes de ida por día, en comparación con otros municipios. A nivel de ZMT, este contó con una mayor interrelación con Lerma, Ocoyoacac, Metepec, Zinacantepec, Xonacatlán y Temoaya (entre 534 y 12 mil 161 movimientos de ida realizados).

Mapa 11. Frecuencias y destinos principales de los desplazamientos laborales con origen en el municipio de Toluca, 2020

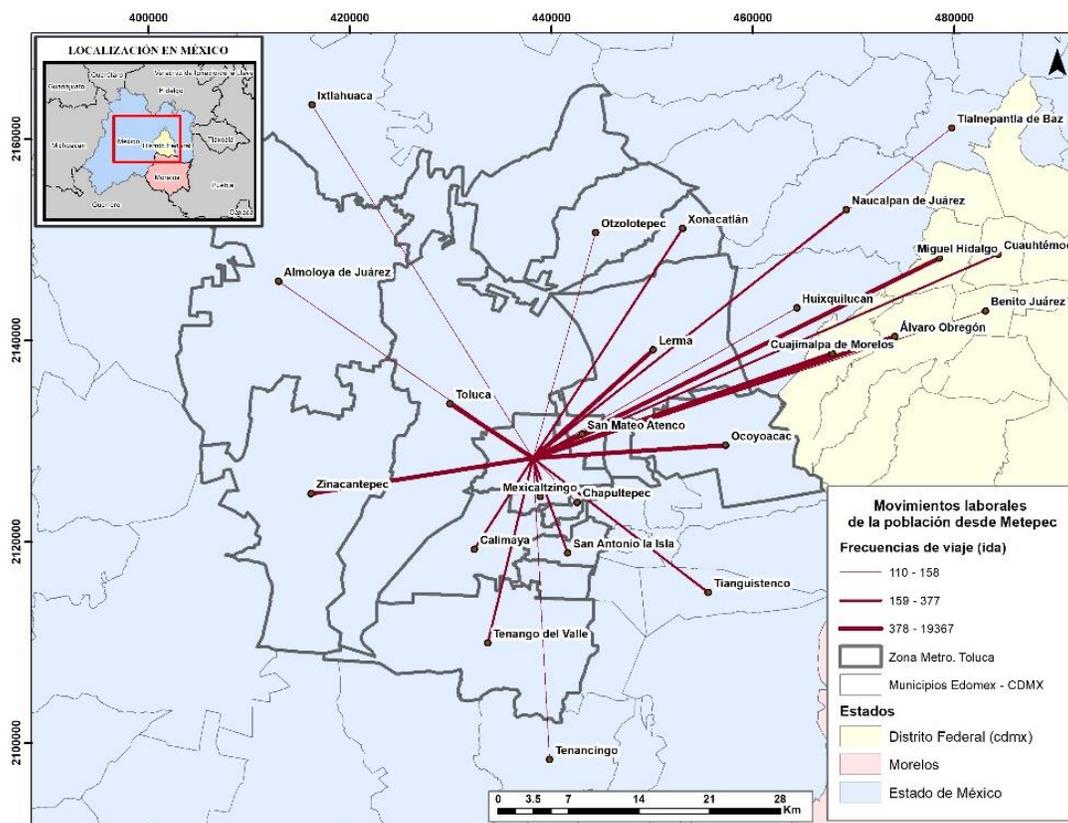


Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020c)

Con respecto a su relacionamiento con la ciudad de México, presentó importantes frecuencias de viaje con la Alcaldía de Álvaro Obregón y otras de menor jerarquía con las alcaldías de Tlanepantla, Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Coyoacán, además de los municipios del Estado (Huixquilucan, Naucalpan, Tlanepantla y Chimalhuacán), ubicados en el área conurbada con Ciudad de México (ver mapa 11).

Por su parte, Metepec presentó mayores flujos de relacionamiento (entre 378 y 19 mil 367 viajes por día) con los municipios de Toluca, Lerma, San Mateo de Atenco, Zinacantepec y Ocoyoacac; así como con alcaldías de la ciudad de México como Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón y Cuajimalpa (ver mapa 12).

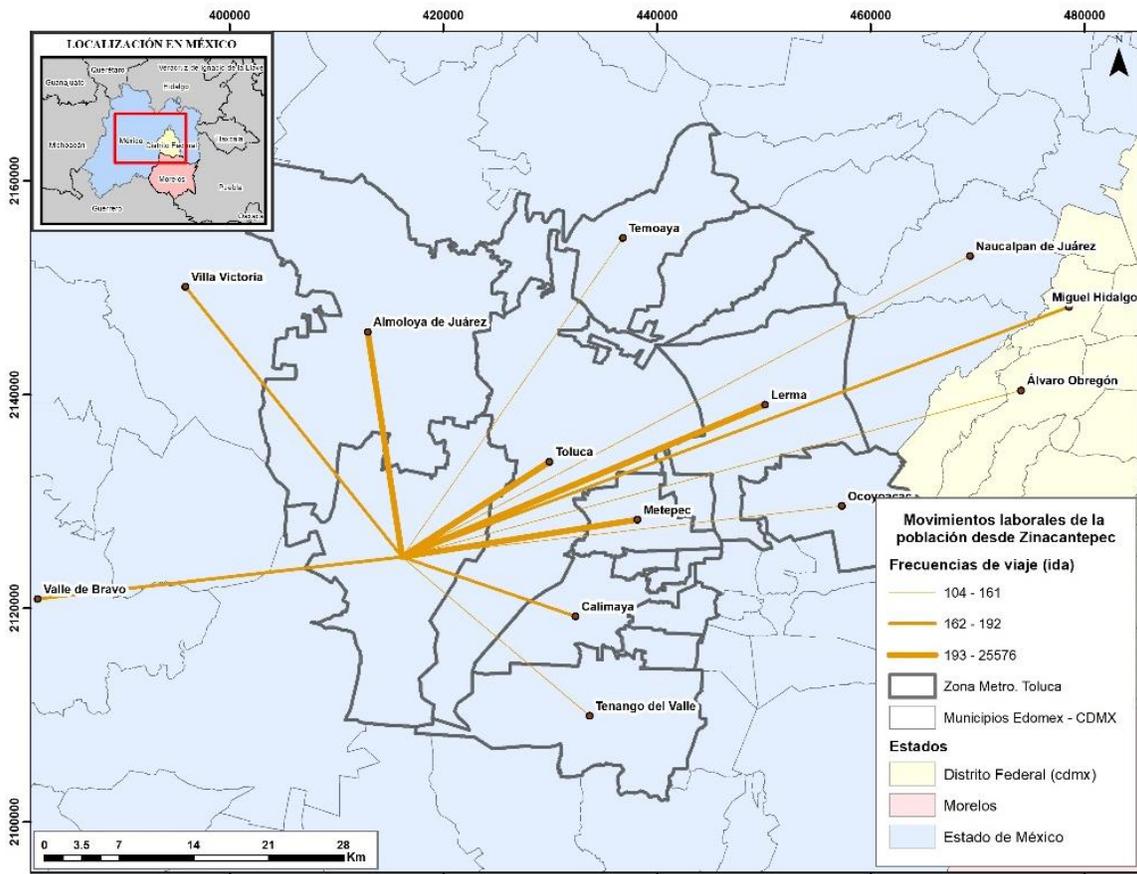
Mapa 12. Frecuencias y destinos principales de los desplazamientos laborales con origen en el municipio de Metepec, 2020



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020c)

Por último, en el caso de Zinacantepec, se destacó una mayor frecuencia de viajes de ida con Toluca (25 mil 756 movimientos ida por día), lo que quiere decir que Zinacantepec tiene una alta interdependencia laboral con el municipio de Toluca. Por otro lado, y en menor instancia, también se relaciona con un flujo laboral considerable hacia los municipios de Lerma, Metepec y Almoloya (ver mapa 13).

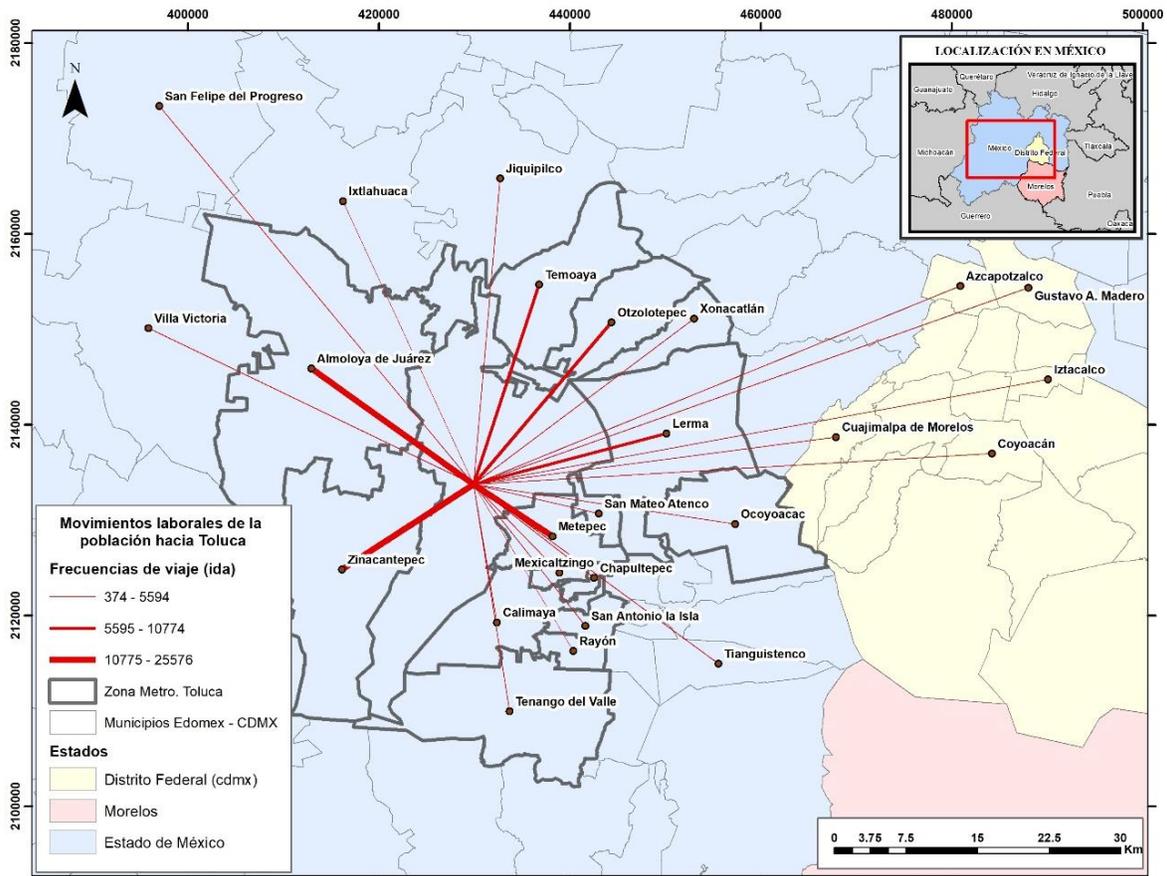
Mapa 13. Frecuencias y destinos principales de los desplazamientos laborales con origen en el municipio de Zinacantepec, 2020



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020c)

En el mapa 14 se evidenció el nivel de interacción del municipio de Toluca, con sus principales orígenes en el Estado de México y en la Ciudad de México. Lo anterior, considerando que Toluca acumuló, para el periodo 2020, un 49% de las interacciones recibidas en los municipios de la ZMT. Dentro de los municipios con mayores flujos hacia Toluca, se encontraron Zinacantepec, Metepec, Almoloya y Lerma con frecuencias diarias entre los 10 mil 700 desplazamientos de ida por día a 25 mil 576 desplazamientos de ida por día. Para el caso de Ciudad de México, se presentaron desplazamientos diarios de ida equivalentes a 5 mil movimientos de ida por día, destacando a las alcaldías de Azcapotzalco, Gustavo Madero, Iztacalco, Coyoacán y Cuajimalpa, con frecuencias entre los 290 viajes de ida por día y mil 224 viajes de ida por día.

Mapa 14. Frecuencias y orígenes principales de los desplazamientos laborales (ida) con destino al municipio de Toluca, 2020



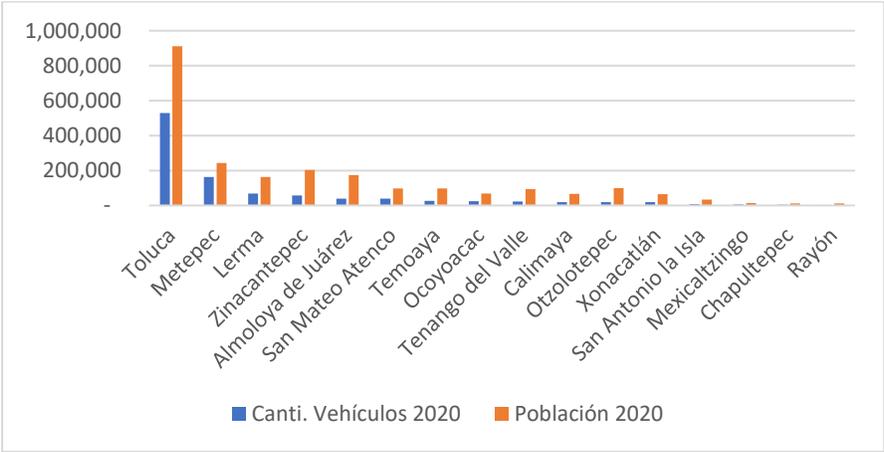
Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020c)

En general, las frecuencias de viaje generadas desde la Zona Metropolitana de Toluca, para el periodo 2020, fueron mayores que las recibidas desde la Ciudad de México, lo que quiere decir que gran parte de la población en la Zona Metropolitana de Toluca tiende a ser dependiente de la oferta laboral de la Ciudad de México.

Adicionalmente, hay que resaltar que la mayor parte de los desplazamientos de la población en la ZMT son altamente dependientes del transporte motorizado (automóvil), teniendo en cuenta la configuración dispersa y policéntrica que presenta el territorio.

De acuerdo con datos del parque vehicular de México (INEGI, 2020d), para el año 2020 se evidenció una mayor concentración de vehículos en la Zona Metropolitana de Toluca (50.5% del parque automotor de la región), donde aproximadamente 5 de cada 10 personas tenían vehículos automotores. Seguido de los municipios de Metepec (6 vehículos cada 10 personas), Lerma (4 vehículos cada 10 personas) y Zinacantepec (2 vehículos cada 10 personas) (ver figura 15).

Figura 15. Comparación entre la cantidad de vehículos motorizados y la población en los municipios de la ZMT, 2020



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020d)

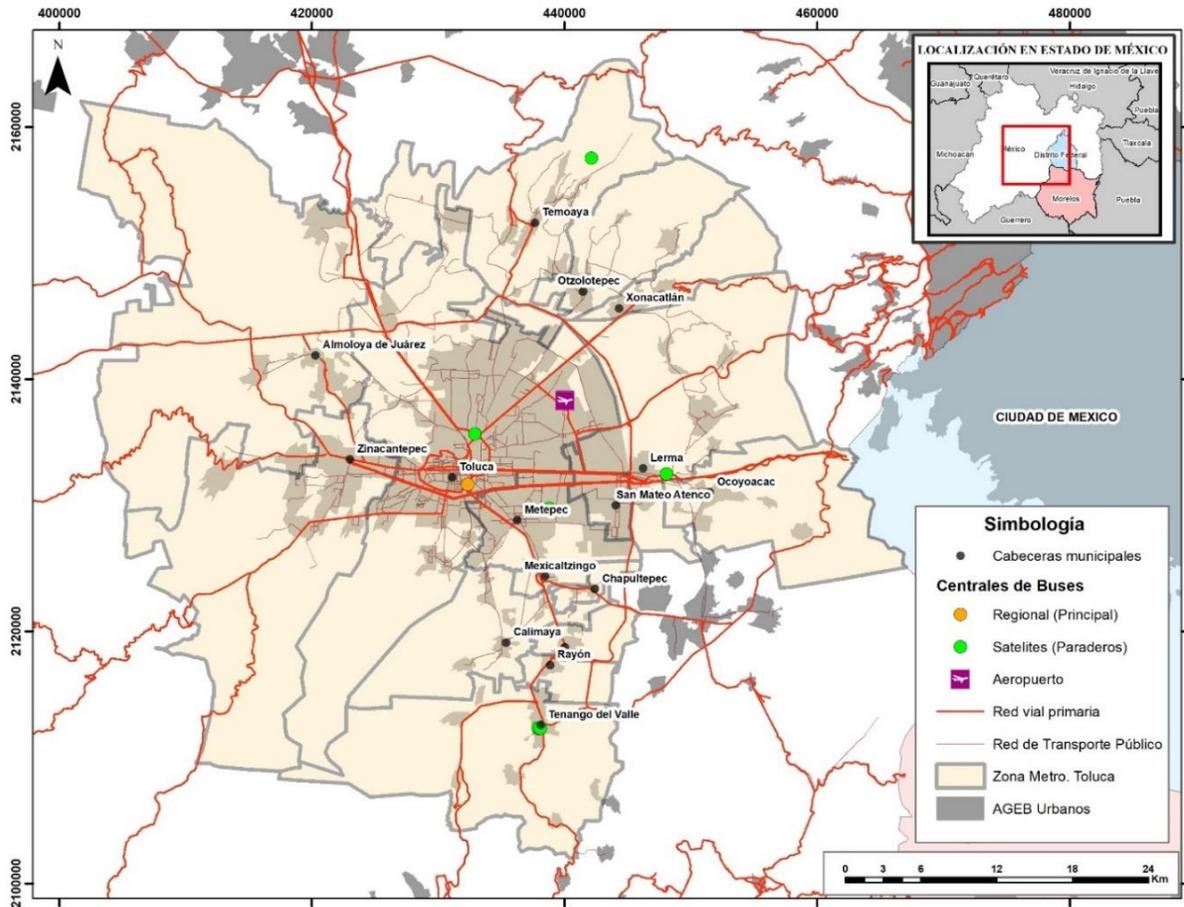
Por otro lado, de acuerdo con datos de la muestra censal (INEGI, 2020c), para el año 2020, la mayor parte de la población que laboró en la Zona Metropolitana de Toluca se transportó principalmente en camión, autobús, combi o colectivo, con una participación del 42.5% del total de los desplazamientos, seguido de un 26.8% caminando y un 11.32% en automóvil o camioneta. Dentro de los otros medios de transporte considerados, se encontraron las bicicletas (6.78%), taxis en la calle (4.32%), motocicleta o motoneta (3.26%), entre otros.

Es importante considerar que dentro de los factores incluyentes en la generación y atracción de viajes regionales desde y hacia la ZMT, se encontraron las infraestructuras de transporte existentes en la región, como es el caso de la infraestructura vial que comunica con Ciudad de México (Autopista México-Toluca y Toluca-Naucalpan y la Carretera Toluca-

Naucalpan), la Central principal de Camiones de Toluca (Terminal) y el Aeropuerto Internacional Adolfo López Mateos de Toluca (ver mapa 15).

Lo anterior pudo influir en la generación de mayores frecuencias de viaje para la población, lo que puede verse incrementado considerablemente por proyectos como el Tren Insurgente, el cual se encuentra en su fase final de construcción, y conectará directamente a los municipios de Zinacantepec, Toluca, Metepec y Lerma de la ZMT con la Poniente de Ciudad de México (Estación Observatorio), reduciendo así los tiempos de traslado de la población de 1.5 horas a 45 minutos aproximadamente, movilizandando alrededor de 230 mil personas por día (Gobierno de la Ciudad de México, 2024).

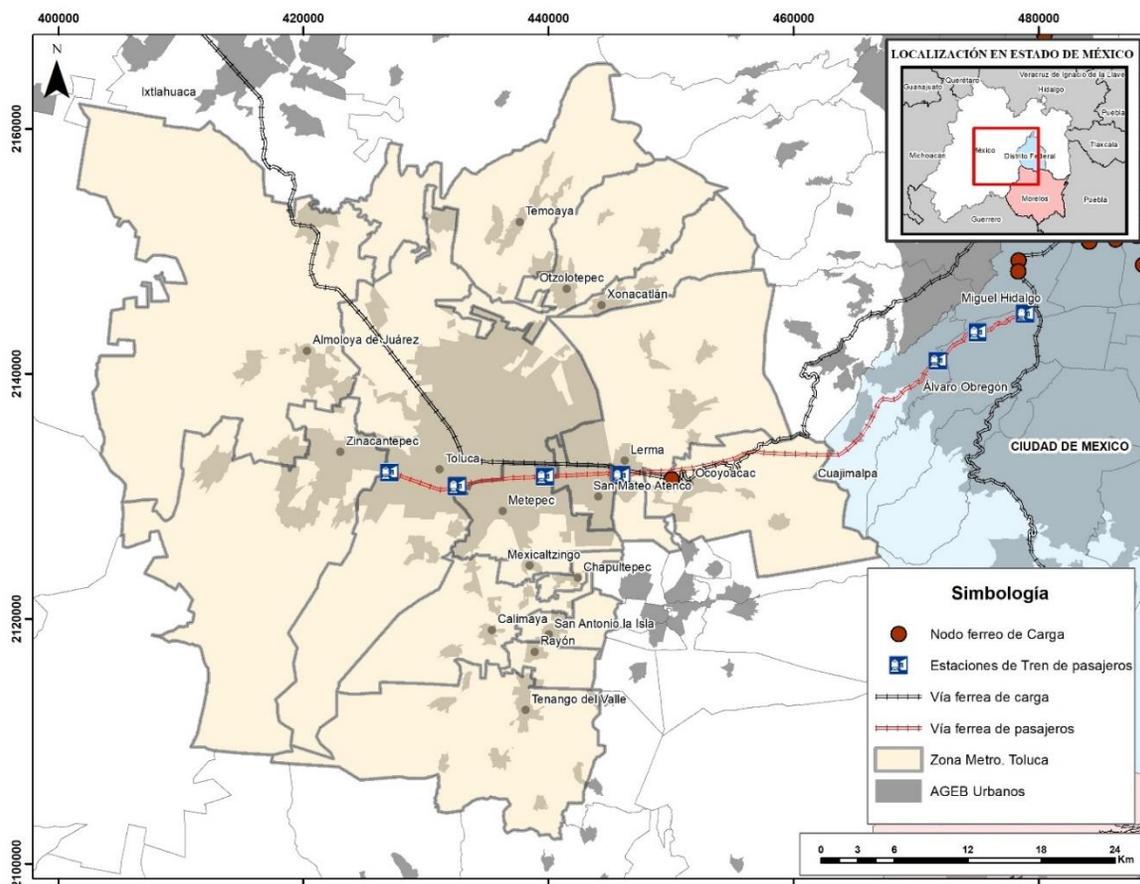
Mapa 15. Ubicación de las principales infraestructuras de transporte de carretera y aérea de la ZMT, 2020



Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020); INEGI (2020b); SIPAT (2007)

Por último, es de resaltar la dinámica de la movilidad en la región, históricamente, ha estado ligada con el transporte de mercancías, tanto por carretera como por el transporte ferroviario. Siendo este último de gran importancia, considerando que este sistema conecta la región con los principales puntos ferroviarios del país para exportación de mercancías en la estación modal de transferencia Maclovio Herrera en Ocoyoacac (GEM, 2005) (ver mapa 15).

Mapa 16. Ubicación de las principales infraestructuras de transporte ferroviaria de la ZMT, 2020



Fuente: elaboración propia con base en Gobierno de la Ciudad de México (2024) y Gobierno de México (2020)

5. Resultados

5.1 Caracterización de la red vial de transporte de la Zona Metropolitana de Toluca

De acuerdo con Cal y Mayor y Cárdenas (2007), en México se empezaron a realizar esfuerzos para la integración de la infraestructura de carreteras en lo extenso del territorio desde el año 1925. De esta forma, históricamente se han evidenciado avances en la construcción de kilómetros de carreteras en el país, mejorando de esta forma su transitabilidad y la movilidad de personas y mercancías.

Tabla 24. Longitud de vías construidas en la República de México (1925, 1965, 2004 y 2020)

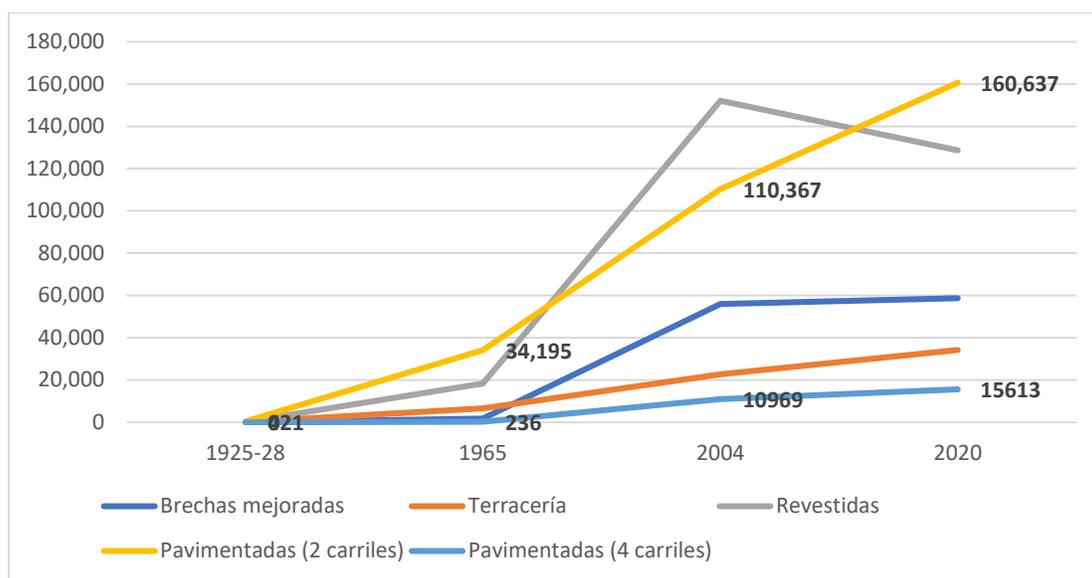
Tipo de carreteras	1925-28 Kilómetros	1965 Kilómetros	2004 Kilómetros	2020 Kilómetros
Brechas mejoradas	-	1,755	55,984	58,727
Terracería	209	6,693	22,663	34,248
Revestidas	245	18,373	152,089	128,713
Pavimentadas (2 carriles)	421	34,195	110,367	160,637
Pavimentadas (4 carriles)	-	236	10,969	15,613
Subtotal Pavimentadas	421	34,431	121,336	176,250
Total	875	61,252	352,072	397,938

Fuente: elaboración propia con base en Cal y Mayor y Cárdenas (2007) y SCT (2020)

Por su parte, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) afirmó que, entre 1925 a 1965, el total de kilómetros de vías construidas pasó de 875 Km a 61 mil 252 Km, y posteriormente este desarrollo fue 5.8 veces mayor para el año 2004, donde se registró un acumulado de 352 mil 72 Km construidos. Para el año 2020, el país presentó un total de 397 mil 938 Km de vías construidas, incrementando un 13% con respecto al año 2004.

Este comportamiento evidencia el incentivo en el desarrollo del sistema de carreteras nacional, donde ha presentado una mayor tendencia la construcción de carreteras pavimentadas de 2 y 4 carriles (ver figura 16).

Figura 16. Tendencia en la evolución de las carreteras en la República de México



Fuente: elaboración propia con base en Cal y Mayor y Cárdenas (2007) y SCT (2020)

De igual forma, para el año 2020, el Estado de México presentó un total de carreteras construidas del 3.7% del total nacional, de las cuales tuvieron una mayor participación las carreteras revestidas (51.4%), seguidas de las carreteras pavimentadas con dos carriles (41.7%). Por otro lado, también se evidenció un mayor incremento de las carreteras pavimentadas de 4 carriles⁷ (33%), entre los años 2004 y 2020, seguido de las vías de 2 carriles (12%) y un decremento de 0.8% para las vías revestidas (SCT, 2020) (ver tabla 25).

Tabla 25. Longitud de carreteras construidas en el Estado de México y la República de México, 2004 y 2020.

Tipo de carreteras	República de México		Estado de México	
	2020	2004	2020	2004
	Kilómetros	Kilómetros	Kilómetros	Kilómetros
Brechas mejoradas	58,727	0	0	0
Terracería	34,248	0	0	0

⁷ Estas se empezaron a construir a partir del año 1952.

Tipo de carreteras	República de México		Estado de México	
	2020		2004	2020
	Kilómetros		Kilómetros	Kilómetros
Revestidas	128,713		7,815	7,754
Pavimentadas (2 carriles)	160,637		5,588	6,284
Pavimentadas (4 carriles)	15,613		785	1,049
Subtotal Pavimentadas	176,250		6,373	7,333
Total	397,938		14,188	15,087

Fuente: elaboración propia con base en Cal y Mayor y Cárdenas (2007) y SCT (2020)

Los datos anteriores evidencian la prioridad que ha tenido el gobierno local del Estado de México, de igual forma que el gobierno nacional, en la implementación de políticas para el desarrollo de su infraestructura vial, lo cual ha ido ligado con el crecimiento de su población, el parque vehicular y el desarrollo de las actividades económicas industriales y comerciales desarrolladas en el territorio (SCT, 2018).

5.1.1 Clasificación de los Sistemas Viales

En México, tanto las carreteras como las vialidades urbanas presentan diferentes clasificaciones que pueden obedecer a diversos criterios (tipos de tránsito, uso del suelo colindante, espaciamiento, niveles de servicio y operación, características físicas y funcionamiento de la red) y que a su vez están determinadas por diferentes normas técnicas nacionales como el Manual Técnico de Carreteras y Caminos (SCT, 2018), la Normativa de vialidades urbanas de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2001) y la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU, 2019); o Estatales como el Reglamento de Tránsito del Estado de México (GEM, 2023).

En la Tabla 26, se evidencian las clasificaciones que pueden presentar las carreteras y caminos de México, de acuerdo con el Manual Técnico de Carreteras 2018:

Tabla 26. Clasificación vial según el manual técnico de Carreteras 2018

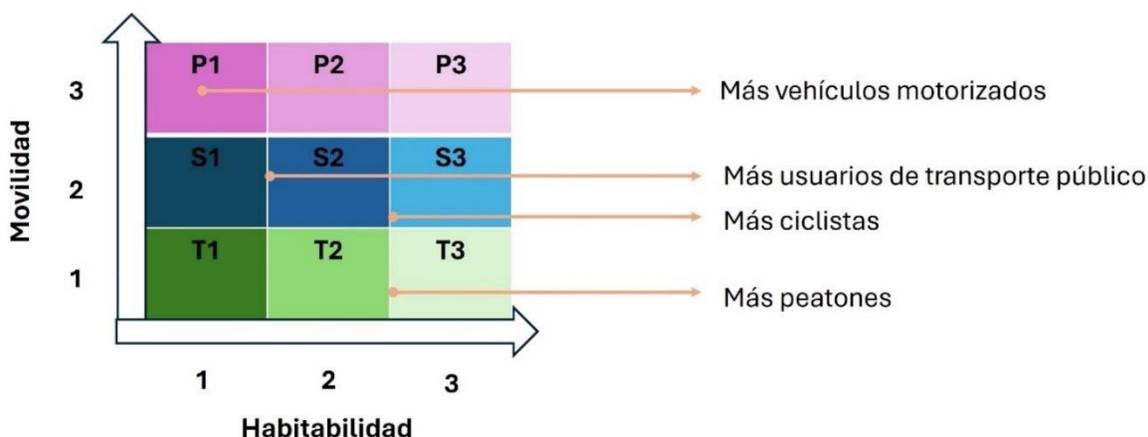
Criterio de clasificación	Clasificación	Características
Administrativa	Federales	Administradas por el gobierno federal.
	Estatales	Administradas por las juntas locales de caminos.
	Vecinales	Constituidas por cooperación de particulares.
	De cuota	Concesionada a Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos.
Según su importancia	Red troncal o primaria	Comunica las principales ciudades estatales y poblaciones de país.
	Red alimentadora y secundaria	Alimenta el tránsito de la red primaria con el tránsito de ciudades de importancia económica (turismo, industrial y agrícola).
	Red colectora o terciaria	Compuesta por las carreteras que comunican a las pequeñas poblaciones apartadas de los grandes centros urbanos.
Según su función	Control total de accesos	Este tipo de caminos tiene preferencia en el tránsito rápido, prohíbe las intersecciones a nivel y accesos a áreas privadas.
	Control parcial de accesos	Este tipo de caminos tiene preferencia en el tránsito rápido y, pueden existir algunas intersecciones a nivel y accesos a áreas privadas.
	Camino dividido	Este camino presenta circulación en dos sentidos, separándolos por medio de una faja separadora central. Estos no pueden estar compuestos por dos o más carriles por sentido.
	Arteria urbana	Vialidad principal de una zona urbana para el tránsito rápido.
	Caminos de dos carriles	Este camino no se encuentra dividido por franjas separadoras y cada carril presenta un sentido diferente.
	Caminos de tres carriles	Este presenta tres carriles no divididos, de los cuales los dos extremos son para sentidos contrarios y el carril del centro es para maniobras de rebase.
	Camino de carriles múltiples	Este camino puede presentar entre cuatro y más carriles no divididos en dos sentidos contrarios.
	Vía rápida	Utilizada para el tránsito rápido de vehículos y control parcial o total de accesos con pasos a desnivel en intersecciones importantes.
	Autopista	Utilizada para el tránsito rápido con control total de los accesos.

Criterio de clasificación	Clasificación	Características
Según su transitabilidad	Terracerías	Generalmente accesibles en los periodos secos del año, ya que su superficie de rodamiento es tierra.
	Revestidas	Generalmente accesibles en todo momento, ya que cuentan con superficies de rodamientos diferentes al pavimento.
	Pavimentadas	Generalmente accesibles en todo momento, y su superficie se encuentra en asfalto o concreto.
Criterios técnicos	Tipo ET (Autopistas)	Presentan dos o más carriles por sentido de circulación. Tienen control de acceso total.
	Tipo A4 (Autopista o Carretera Multicarril)	Presentan dos carriles por sentido de circulación. Tienen anchos de calzada de 14 m (4 carriles) y un TPDA entre 5,000 y 20,000 vehículos. Tienen control de acceso total o parcial.
	Tipo B4 (Carretera Multicarril)	Presentan dos carriles por sentido de circulación, anchos de calzada de 7 m y un TPDA entre 3,000 y 5,000 vehículos. Tienen control de acceso parcial.
	Tipo A2 (Carretera de dos carriles)	Presentan un carril por sentido de circulación, anchos de calzada de 7 m y un TPDA entre 3,000 y 5,000 vehículos. Tienen control de acceso parcial.
	Tipo B2 (Carretera de dos carriles)	Presentan un carril por sentido de circulación, anchos de vía de 7 m y un TPDA entre 1,500 y 3,000 vehículos. Tienen control de acceso parcial o son sin control, generalmente son carreteras de dos carriles.
	Tipo C (Carretera de dos carriles)	Presentan un carril por sentido de circulación, anchos de calzada de 6 m y un TPDA entre 500 y 1,500 vehículos. Tienen control de acceso parcial o son sin control.
	Tipo D (Carretera de dos carriles)	Presentan un carril por sentido de circulación, anchos de calzada de 6 m y un TPDA entre 100 y 500 vehículos. No tienen control de circulación. Son carreteras de dos carriles.
	Tipo E (Camino rural)	Estos presentan un carril para ambos sentidos de circulación, pueden presentar anchos de calzada de 4 m y un TPDA de hasta 100 vehículos, no presenta controles de acceso. Su denominación geométrica es caminos rurales.

Fuente: elaboración propia con base en SCT (2018)

De igual forma, en México a nivel urbano, las vías se pueden clasificar de forma general según su funcionalidad (SEDESOL, 1994, 2001; Centro Mario Molina, 2014; SEDATU, 2019) en vías primarias, secundarias y terciarias. Esta clasificación obedece a la relación que se pueda presentar entre la función de la vía (movilidad o habitabilidad), la forma que tiene ésta dependiendo de su jerarquía y los usos que esta pueda tener, ya sea a través de usuarios motorizados, transporte público, ciclistas o peatones.

Figura 17. Relación entre función, forma y uso de una vía urbana



Fuente: SEDATU, 2019

Vías primarias: estas son vías de alta capacidad que permiten el acceso controlado de los flujos entre el sistema interurbano de carreteras y el sistema arterial urbano. Estas permiten generar flujos a grandes concentraciones industriales, comerciales y viviendas. A su vez se pueden clasificar en autopistas, arterias principales y arterias menores.

Vías secundarias: también llamadas colectoras; su función principal es conectar las vías primarias con las calles de los barrios y colonias (sistema terciario). En su mayoría presenta cruces semaforizados. Además, pueden ser de uno o doble sentido de circulación efectiva y se recomiendan velocidades desde los 30 a 40 Km/h. Estas se pueden clasificar en secundarias tipo 1, 2 y 3, las cuales van en función del nivel de habitabilidad.

Vías terciarias: están compuestas por las calles locales y su función es generar acceso a los predios en los barrios y las colonias. Presentan capacidades y velocidades reducidas y

generalmente no están semaforizadas. Estas se pueden clasificar en T1, T2 y T3 y presentan velocidades de 30 Km/h, 20 Km/h y 10 Km/h respectivamente.

Por último, el Gobierno del Estado de México realiza una clasificación de las vías públicas en el reglamento de tránsito del Estado de México (GEM,2023), donde se encuentran:

- Las vías primarias que incluyen (1) las vías de acceso controlado, considerando dentro de estas las anulares o periféricas, radiales y viaductos; y (2) las arterias principales, conformadas por los ejes viales, avenidas, paseos y calzadas.
- Las vías secundarias que se clasifican en (1) calles locales (residenciales e industriales), (2) privadas, (3) terracería, (4) camino vecinal, (5) calle peatonal, (6) andador, (7) pasaje, (8) portal y (9) paso a desnivel.
- Ciclovías y IV. Áreas de transferencia.

Pese a las anteriores clasificaciones, en esta investigación, no se encontró información georreferenciada que contenga las principales clasificaciones urbanas teniendo en cuenta la clasificación funcional (primarias, secundarias y terciarias) que generalmente se utiliza. En ese sentido, el insumo principal está contenido en la capa de la Red Nacional de Caminos-RNC (IMT, SCT e INEGI, 2020), que presentó una tipología vial de acuerdo con la Norma Técnica de Domicilios Geográficos (GEM, 2010), desarrollada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-INEGI (ver tabla 27). Al que posteriormente se realizó una agrupación de las principales carreteras, avenidas, boulevares y calzadas para analizar los ejes viales estructurantes que describen la región en la Zona Metropolitana de Toluca.

Tabla 27. Tipologías de vías según la Norma Técnica de Domicilios del Estado de México, 2020

Código	Tipo de vía	Código	Tipo de vía
1	Ampliación	12	Corredor
2	Andador	13	Diagonal
3	Avenida	14	Eje vial
4	Boulevard	15	Pasaje
5	Calle	16	Peatonal
6	Callejón	17	Periférico
7	Calzada	18	Privada

Código	Tipo de vía	Código	Tipo de vía
8	Cerrada	19	Prolongación
9	Circuito	20	Retorno
10	Circunvalación	21	Viaducto
11	Continuación	22	Ninguno

Fuente: GEM, 2010; IMT, SCT e INEGI (2020)

5.1.2 Descripción de la infraestructura vial de la ZMT

En esta descripción se utilizó como insumo la red vial de la Red Nacional de Caminos del año 2020 (IMT, SCT e INEGI, 2020), en la cual se realizó un proceso de filtrado y normalización de datos para posteriormente elaborar un análisis a través de la herramienta de Network Analyst de ArcMap (ver figura 12). En estos se tuvieron en cuenta 15 mil 611 nodos y 19 mil 116 arcos. A nivel de infraestructura vial, la red de carreteras y vialidades analizada está compuesta por aproximadamente 3 mil 275 Km, de los cuales 2 mil 972 Km se encuentran en los municipios de la ZMT y 303 Km en municipios aledaños a esta, los cuales participan en las dinámicas funcionales de la región (ver tabla 28).

Tabla 28. Características de la red vial de la ZMT, 2020

Zona	Municipio	Nodos de la red vial	Arcos de la red vial	Longitud de vías	Proporción de vías
		Número de nodos	Número de arcos	Kilómetros	Porcentaje
Zona Metropolitana de Toluca (ZMT)	Toluca	5,301	6,619	883.51	27.0
	Almoloya de Juárez	991	1,142	347.70	10.6
	Lerma	1,066	1,274	296.31	9.0
	Metepec	1,386	1,928	237.16	7.2
	Zinacantepec	1,074	1,235	217.24	6.6
	Temoaya	631	733	194.28	5.9
	Tenango del Valle	800	900	156.14	4.8
	Ocoyoacac	748	868	154.77	4.7
	Otzolotepec	497	588	141.00	4.3
	Calimaya	553	675	100.05	3.1
	Xonacatlán	321	389	91.59	2.8
San Mateo Atenco	310	400	58.49	1.8	

	Rayón	137	169	26.26	0.8
	Mexicaltzingo	133	172	24.87	0.8
	San Antonio la Isla	193	230	21.95	0.7
	Chapultepec	112	134	21.16	0.6
Subtotal ZMT		14,253	17,456	2,972.48	0.91
Aledaño a la ZMT	Tianguistenco	552	700	78.57	2.4
	Villa Victoria	92	104	48.74	1.5
	Capulhuac	229	264	36.14	1.1
	Otros municipios	485	592	140.00	0.0
Subtotal aledaño a ZMT		1,358	1,660	303.22	9.3
Total		15,611	19,116	3,275.71	100

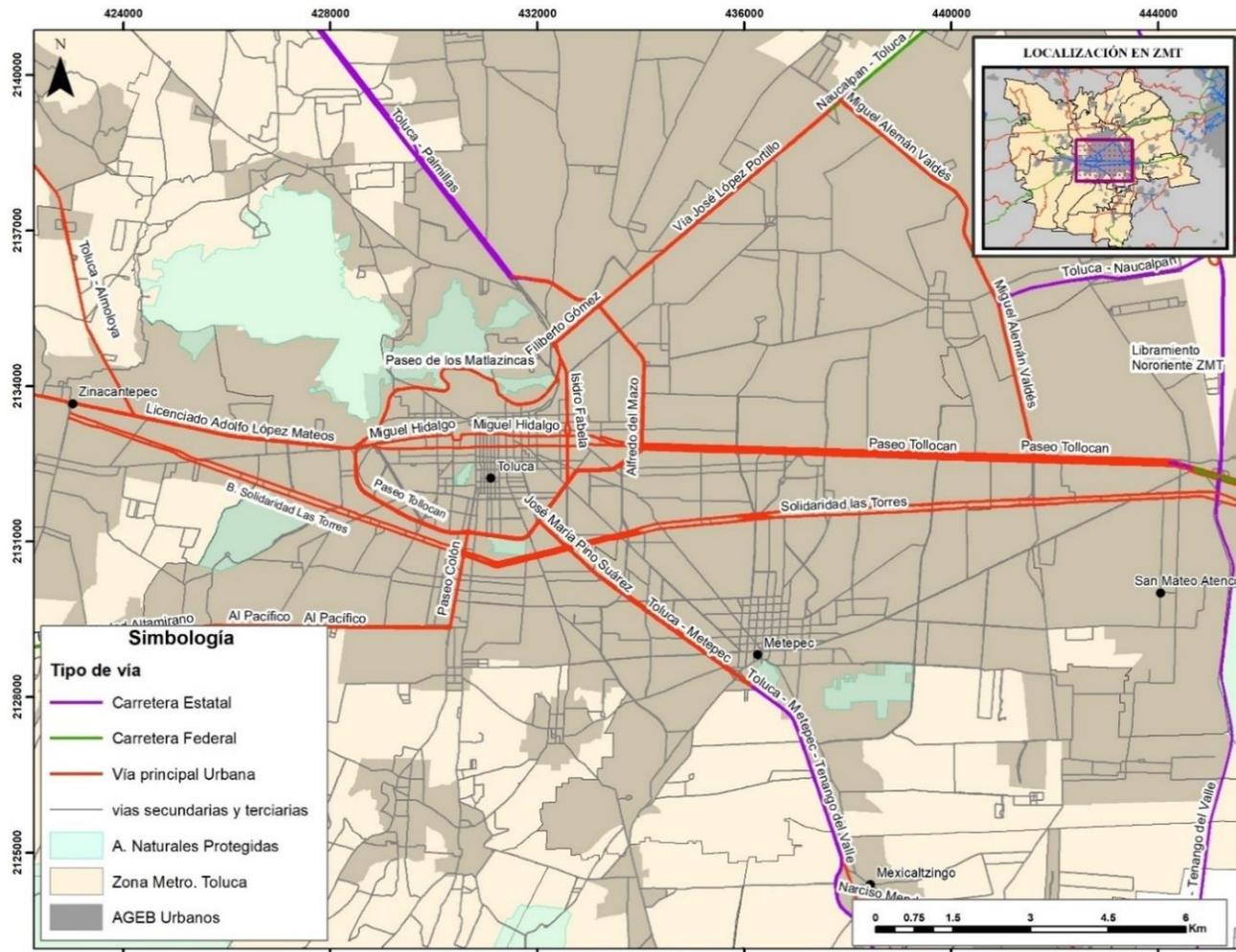
Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020)

De la tabla 28, también se observó que el municipio que presenta una mayor participación de vías es el municipio de Toluca con 27% del total de longitud en la ZMT, seguido de Almoloya de Juárez (10.6%), Lerma (9%), Metepec (7.2%) y Zinacantepec (6.6%). Lo que evidencia la concentración de vías de la zona metropolitana en el municipio de Toluca.

De acuerdo con el Centro Mario Molina (2014b), el sistema vial de la Zona Metropolitana de Toluca está compuesto por un subsistema de carreteras y un subsistema de vialidades urbanas, que satisfacen las necesidades de movilidad y accesibilidad de la población y sus diversas actividades en todo el territorio.

Dentro de estos subsistemas, se caracterizan elementos radiales-lineales que se establecen de acuerdo con las vialidades primarias (carreteras y avenidas). Estos permiten el crecimiento de la ciudad y la adaptación al transporte urbano. Por otro lado, se encuentran elementos como las mallas o retículas, las cuales generan manzanas cuadradas o rectangulares en el área urbana. Estas generalmente, propician la continuidad de las calles y son muy comunes en el centro de Toluca y, a su vez, están delimitadas por algunas vialidades principales como Tollocan, Paseo de los Matlazincas, Isidro Fabela y Alfredo del Mazo (Centro Mario Molina, 2014b) (ver mapa 17 y mapa 18).

Mapa 18. Vialidades principales de la ZMT en el municipio de Toluca, 2020



Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020)

Así mismo, el Plan Regional de Desarrollo Urbano en el Valle de Toluca (GEM, 2005) y estudios de movilidad en la ZMT (Centro Mario Molina, 2014b), destacaron dentro de los ejes estructurantes de la región algunas vialidades primarias urbanas (V), carreteras estatales y federales (CE y CF) que permiten una integración del territorio con el centro del país y las cuales aparecen en la siguiente tabla (ver tabla 29, mapa 17 y mapa 18):

Tabla 29. Carreteras y vialidades estructurantes de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020

No	Localización en la ZMT	Nombre de la vía	Longitud Km	Carriles Unidad	Característica
1	Toluca central	Miguel Hidalgo (V)	36.0	6	Vialidad del centro de Toluca que conecta con la Avenida Adolfo López Mateos y el Paseo Tollocan.
2	Toluca central	Paseo Matlazincas (V)	10.9	4	Vialidad del centro de la zona metropolitana que construye un circuito, junto con las vialidades de Alfredo del Mazo y Paseo Tollocan.
3	Toluca central	Alfredo del Mazo (V)	15.9	8 y 10	Vialidad que completa un eje circular junto con el Paseo Tollocan, Matlazincas y López Portillo.
4	Toluca central	Isidro Fabela (V)	11.9	6	Vialidad que hace parte del eje estructurante Norponiente-Suroriente, integrado por las vías José María Pino Suárez hacia Tenango.
5	Toluca central	Filiberto Gómez (V)	1.3	6	Vialidad que intercepta las vías de José López Portillo y Alfredo del Mazo y conecta a un circuito central con el paseo Matlazincas.
6	Norte	(Toluca - Naucalpan) - Temoaya – Jiquipilco (CE)	15.1	4	Carretera al norte de la ZMT que conecta con el municipio de Temoaya. A su vez conecta con el libramiento Norponiente Toluca Zitácuaro.
7	Oeste	Adolfo López Mateos (V)	31.5	6	Corredor de vivienda, comercio y servicios. Es la principal vialidad de comunicación entre Zinacantepec y Toluca.

No	Localización en la ZMT	Nombre de la vía	Longitud Km	Carriles Unidad	Característica
8	Noroeste	Toluca-Morelia (CF)	21.8	2	Carretera de entrada y salida de la ZMT al noroccidente de la ZMT, que conecta con la Avenida Adolfo López Mateos en Zinacantepec y el Libramiento Toluca Zitácuaro y Ramal a Valle de Bravo.
9	Noroeste	Toluca Palmillas (Toluca – Ixtlahuaca) (CE)	48.3	10	Corredor industrial de la ZMT que se encuentra en consolidación.
10	Noroeste	Toluca Zitácuaro y Ramal a Valle de Bravo (CE)	19.8	2	Autopista de cuota ubicada al noroccidente de la ZMT. Esta permite desviar el transporte pesado del área urbana de la región y articula la ZMT con la región central del país.
11	Suroeste	Calzada al pacífico (V)	10.4	6	Corredor de vivienda y equipamiento colindante con las faldas del volcán Nevado de Toluca.
12	Suroeste	Paseo Colón (V)	3.7	6	Se encuentra en sentido norte-sur. Conecta la calzada del Pacífico con Solidaridad Las Torres y el Paseo Tollocan. A través de esta vía se presentan actividades de servicios.
13	Suroeste	Toluca - ciudad de Altamirano (CF)	27.8	2 y 3	Carretera de entrada y salida a la ZMT desde el suroccidente que conecta con la Calzada al Pacífico.
14	Occidente, Centro y Oriente	Solidaridad las Torres (V)	60.3	6	Este corredor conecta los municipios de Zinacantepec, Toluca, San Mateo de Atenco y Lerma. A través de este se desarrollan actividades de comercio y servicios. En el derecho de vía de este corredor se encuentra la línea del tren Insurgente.
15	Oriente	Paseo Tollocan (V)	74.9	10	Es una vialidad que tiene gran capacidad y flujo. Cuenta con carriles centrales y laterales y es el principal corredor de servicios e industrial de la ZMT. Adicionalmente, conecta con el corredor

No	Localización en la ZMT	Nombre de la vía	Longitud Km	Carriles Unidad	Característica
					Ciudad de México-Toluca, por el cual se tiene acceso a la principal Terminal de Buses de la región.
16	Este	México - Toluca (CF)	37.1	12	Principal corredor para el transporte de pasajeros en la ZMT para la Ciudad de México, esta se conecta con el Paseo Tollocan.
17	Noreste	Vía José López Portillo (V)	5.5	6 y 10	Corredor de abastos, comercio y servicios que presenta conectividad con la carretera Toluca-Naucaupan.
18	Noreste	Miguel Alemán Valdés (V)	17.6	10	Corredor urbano donde se ubican actividades comerciales y de servicios. Este presenta conexión con el aeropuerto Adolfo López Mateos.
19	Noreste	Naucaupan - Toluca (CF)	50.4	4	Corredor y eje radial que permite la entrada y salida de la región con conexión al libramiento metropolitano y la vialidad José López Portillo. Se encuentra bajo jurisdicción federal.
20	Noreste	Libramiento Norponiente de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca (CE)	58.5	4	Autopista que proviene de Lerma y cruza en Palmillas. A través de esta se libera el tránsito proveniente de Atlacomulco y Valle de Bravo. Adicionalmente, descongestiona el centro de la ciudad con vehículos de carga que pasan por Toluca.
21	Noreste	Toluca – Naucaupan (CE)	50.6	4	Corredor y eje radial que permite la entrada y salida de la región con conexión al libramiento metropolitano y la vía Miguel Alemán Valdés, la cual presenta conexión con el aeropuerto internacional. Se encuentra en jurisdicción del estado.
22	Sureste	Pino Suarez (V)	3.47	10	Vialidad que conecta el Paseo Tollocan y la Solidaridad Las Torres con la vía Toluca-Metepec-Tenango del Valle hacia el sur oriente de la ZMT.

No	Localización en la ZMT	Nombre de la vía	Longitud Km	Carriles Unidad	Característica
23	Sureste	Toluca – Axixintla (CF)	20.0	2	Conecta con Toluca-Metepec-Tenango del Valle para salir al sur de la ZMT.
24	Sureste	Toluca - Metepec-Tenango del Valle (CE)	36.4	6	Corredor impulsor de actividades comerciales y de servicios que conecta con Solidaridad Las Torres y Tollocan al Norponiente de Toluca. También comunica al municipio de Metepec con Mexicaltzingo, San Antonio de Isla, Rayón y Tenango del Valle.
25	Sureste	Toluca Ixtapan de la sal (CE)	31.1	4	Autopista que inicia en la carretera Toluca-Tenango y finaliza en el municipio de Ixtapan de sal al exterior de la ZMT (municipio con características turísticas).
26	Sureste	Lerma Tenango del Valle (CE)	22.0	2	Autopista de cuota ubicada al noroccidente de la ZMT. Esta permite desviar el transporte pesado del área urbana de la región y articula la ZMT con la región central del país.
27	Sureste	(México - Toluca)-Tenango del Valle (CE)	18.4	2	Carretera que conecta el municipio de Tenango del Valle con Ocoyoacac en el corredor Toluca-La Marquesa-Ciudad de México, pasando por fuera de la región en Santiago de Tianguistengo.

Fuente: elaboración propia con base en GEM (2005), Centro Mario Molina (2014) y GEM (2018)

De los ejes estructurantes analizados, se observó un mayor desarrollo en el eje centro y oriental de la ZMT, teniendo en cuenta la cantidad de vías principales que articulan los flujos de población y mercancías a través de los ejes urbanos, metropolitanos y regionales.

Por último, en la figura 18, se destacan algunos registros fotográficos de las principales vialidades y carreteras descritas.

Figura 18. Registros fotográficos de principales ejes viales de la ZMT, 2023

	
<p>Intercepción López Portillo y Boulevard Aeropuerto (conexión con vialidad Miguel Alemán)</p>	<p>Vialidad Toluca Metepec</p>
	
<p>Carretera Toluca-Naucalpan hacia Xonacatlán</p>	<p>Carretera Toluca-Metepec–Tenango del Valle (municipio de Chapultepec)</p>
	
<p>Carretera Toluca-Metepec-Tenango del Valle (municipio de Calimaya)</p>	<p>Paseo Tollocan, conexión con Terminal de Transportes de Toluca</p>

Fuente: elaboración propia

5.1.2.1 Estado de las vías

Una de las problemáticas que se abordan en la infraestructura vial de la ZMT es el mal estado de las vías, teniendo en cuenta el deterioro de la superficie de rodamiento. Según los datos de la Red Nacional de Caminos 2020 (IMT, SCT e INEGI, 2020), las vías de la región presentaron una superficie de rodamiento asfáltico (74.4%), en comparación con el 25.6 % que se encuentra sin pavimento al exterior de las zonas urbanas.

No obstante, la mayor parte de las vías a nivel urbano se encuentran en superficie asfáltica. Pese a esto, el estado de estas se ha visto afectado por la cantidad de baches y el agrietamiento constante de las mismas, lo cual incrementa las posibilidades de reducir los tiempos de movilidad de la población e incrementar la congestión en estas, reduciendo así el nivel de accesibilidad. En la figura 19, se evidenciaron algunos registros fotográficos de deterioros en las vialidades y carreteras de la Zona Metropolitana de Toluca.

Figura 19. Registros fotográficos de deterioros de vialidades en la ZMT, 2023





La Marqueza Tianguistengo



Santiago de Tianguistengo – Tenango



Alfredo del Mazo



Libramiento Sur



Avenida Tecnológico



Paseo Colón



Fuente: Axis Vial- Conservadora Mexiquense (2023)

En ese sentido, el Gobierno del Estado de México, a través de la Junta de Caminos, es la encargada de realizar el mantenimiento de las principales vías estatales y urbanas (carreteras y vialidades). Dentro de los métodos aplicados para la conservación de la superficie de rodamiento están los bacheos, calavereos, rellenos de grietas, entre otros, los cuales se aplican para casos no muy graves (ver figura 20). Por otro lado, cuando los deterioros son más graves, se aplican reconstrucciones de las vías o modernizaciones, siendo estas últimas ampliaciones en las capacidades de las vías.

Pese a estos esfuerzos, los mantenimientos se hacen insuficientes para el deterioro en las vías (principalmente en las vialidades terciarias o calles), lo cual afecta en gran medida la

movilidad de la población, generando accidentes, atrasos en los tiempos de transporte y congestiones vehiculares en el sistema.

Figura 20. Mantenimiento de baches en vialidad López Portillo



Fuente: Axis Vial - Conservadora Mexiquense (2023)

5.1.3 Análisis estático de la infraestructura vial

A través de este tipo de análisis se describió la organización espacial de la infraestructura vial en la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT), especificando las características cuantitativas básicas de la oferta de la red vial a través de un conjunto de indicadores e índices, dentro de cuales se encuentran la densidad vial, la suficiencia vial y el índice de conectividad simple.

5.1.3.1 Densidad vial

Con este indicador se relacionó la longitud total de la red vial de la sección electoral analizada con la superficie, caracterizando la cobertura de la red vial en las secciones electorales de cada municipio de la Zona Metropolitana de Toluca.

Según los datos calculados, se resaltó el comportamiento de la densidad vial en las 707 secciones electorales de la ZMT, que presentaron un rango de 0 a 22.5 Km / Km², y una desviación estándar de 4.2 Km / Km² con respecto a la media de la ZMT (2.4 Km/Km² de vías). Así mismo, el 50% de las secciones analizadas presentó densidades menores o iguales a 3.9 Km de vías / Km².

En la tabla 30, se evidenciaron algunas estadísticas específicas de las secciones viales por municipios en la ZMT, como media, valores máximos y mínimos.

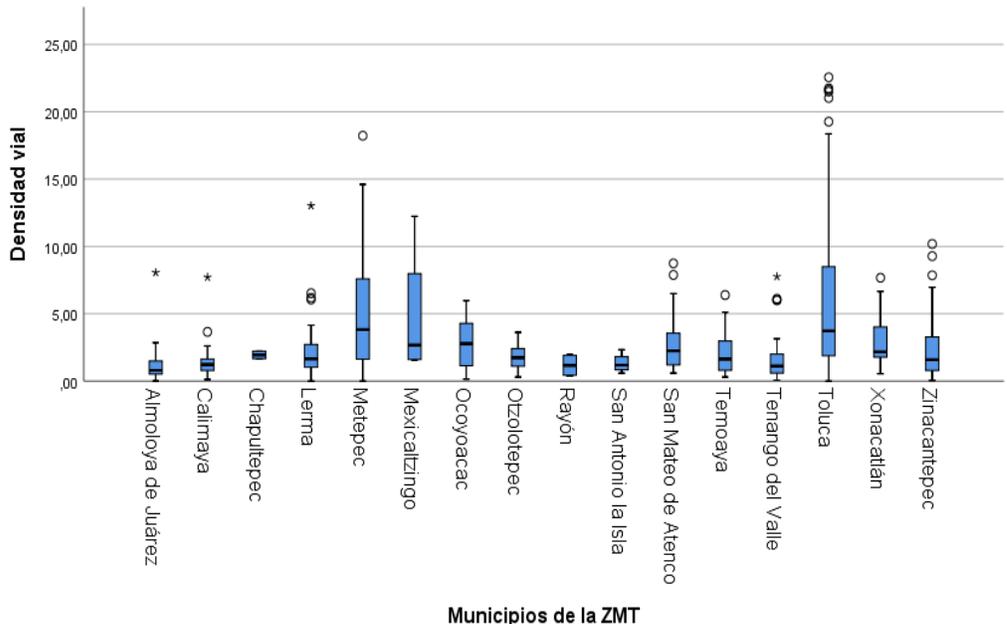
Tabla 30. Estadísticas de la densidad vial de las secciones electorales en la ZMT por municipios, 2020

Municipio	Secciones electorales Número de secciones	Densidad vial		
		Media Km vías / Km ²	Máximo Km vías / Km ²	Mínimo Km vías / Km ²
Toluca	304	5.67	22.56	0.00
Metepec	86	4.81	18.22	0.00
Mexicaltzingo	4	4.79	12.23	1.57
San Mateo de Atenco	21	3.10	8.74	0.60
Xonacatlán	14	2.93	7.67	0.54
Ocoyoacac	22	2.85	5.98	0.14
Zinacantepec	46	2.45	10.18	0.04
Lerma	49	2.29	13.02	0.00
Temoaya	26	2.00	6.39	0.30
Chapultepec	2	1.95	2.23	1.67
Tenango del Valle	27	1.89	7.76	0.07
Otzolotepec	26	1.76	3.62	0.30
Calimaya	16	1.70	7.71	0.12
San Antonia de Isla	4	1.32	2.33	0.59
Rayón	4	1.17	1.96	0.39
Almoloya	56	1.15	8.06	0.01

Fuente: elaboración propia

Por su parte, en la figura 21, se observaron los rangos y valores atípicos de las densidades viales de las secciones electorales por municipios en la ZMT, evidenciando generalmente rangos bajos de densidad vial en la mayor parte de los municipios analizados, a excepción de Toluca, Metepec, Lerma, Mexicaltzingo y Zinacantepec. Así mismo, los mayores valores atípicos de densidades viales se presentaron en los municipios de Toluca y Metepec (superiores a 15 Km/Km²).

Figura 21. Diagrama de caja de la densidad vial (Km/Km²) de las secciones electorales en la ZMT, 2020



Fuente: elaboración propia

Así mismo, se clasificaron los valores de la densidad vial de las secciones electorales en 5 categorías⁸, las cuales se muestran a continuación:

⁸ El método de clasificación utilizado fue de cortes naturales.

Tabla 31. Clasificación de la densidad vial en la Zona Metropolitana de Toluca, 2020

Clasificación de la densidad vial	Rango de Valores de densidad vial	Secciones electorales	Proporción de secciones electorales
	Km/Km ²	Número de secciones	Porcentaje
Muy bajo	0.00 a 1.78	278	39.4
Bajo	1.79 a 4.23	211	29.9
Medio	4.24 a 7.43	95	13.5
Alto	7.44 a 12.23	71	10.1
Muy alto	12.24 a 22.56	50	7.1

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la tabla 31, solo 7,1% de las secciones electorales de la ZMT (50 secciones) presentaron rangos de densidad vial “Muy altos”, los cuales oscilaron entre 12.24 Km de vías / Km² y 22.56 Km de vías / Km². Cabe destacar que solo 3 municipios de la ZMT, Toluca y Metepec y Lerma, presentaron esta clasificación en el 14,5%, 5,8% y 2% de sus electorales respectivamente.

Por otro lado, 10,1% de las secciones electorales presentaron grados “altos” de densidad vial, entre 7.44 Km de vías / Km² y 12.23 Km de vías / Km². Adicionalmente, el 13,5% de las secciones analizadas presentaron grados de densidad vial “medios”, entre 4.24 a 7.43 Km de vías / Km²; y el 29,9% de las secciones electorales tuvieron grados “bajos” de densidad vial en la ZMT, entre 1.79 Km de vías / Km² a 4.23 Km de vías / Km².

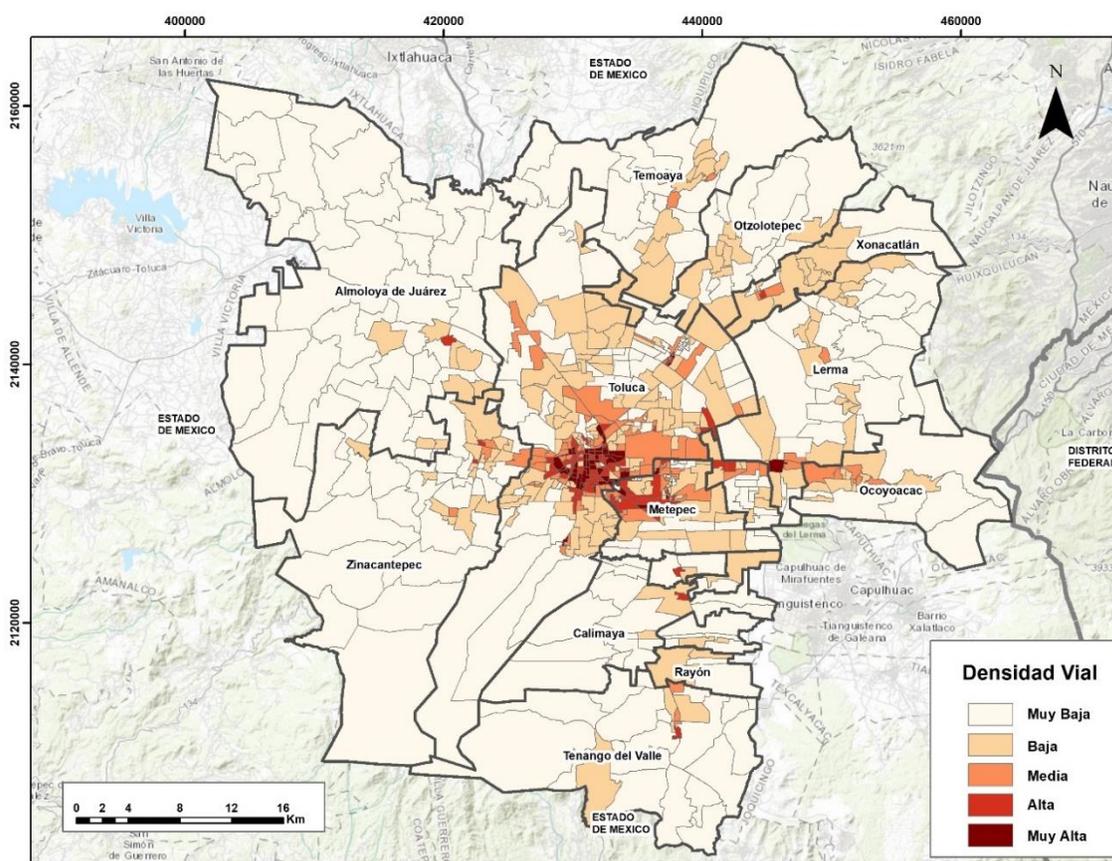
Por último, 278 secciones electorales de la ZMT (39,4% del total de secciones) evidenciaron densidades viales “muy bajas”, las cuales oscilaron entre 0 y 1.78 Km de vías / Km². De este rango, 11 de 16 municipios (a excepción de Toluca, Metepec, Xonacatlán, Ocoyoacac y San Mateo de Atenco), mostraron valores muy bajos de densidad vial en más del 50% de sus secciones electorales.

De forma general, las densidades viales más altas se focalizaron en las secciones electorales ubicadas en las áreas urbanas centrales de la ZMT, coincidiendo en los municipios de Toluca,

Metepec y Lerma. En contraste, las secciones donde se presentaron bajos grados de densidad vial (en más del 52% de sus secciones electorales) se ubicaron principalmente en la periferia de la ZMT, en los municipios de Almoloya de Juárez, Calimaya, San Antonio la Isla, Tenango del Valle, Mexicaltzingo, Temoaya, Otzolotepec, Lerma y Zinacantepec.

Esta dinámica se visualiza en el mapa 19, donde se presentó la densidad vial por secciones electorales en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca para el periodo 2020.

Mapa 19. Densidad vial en las secciones electorales de la ZMT, 2020



Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020)

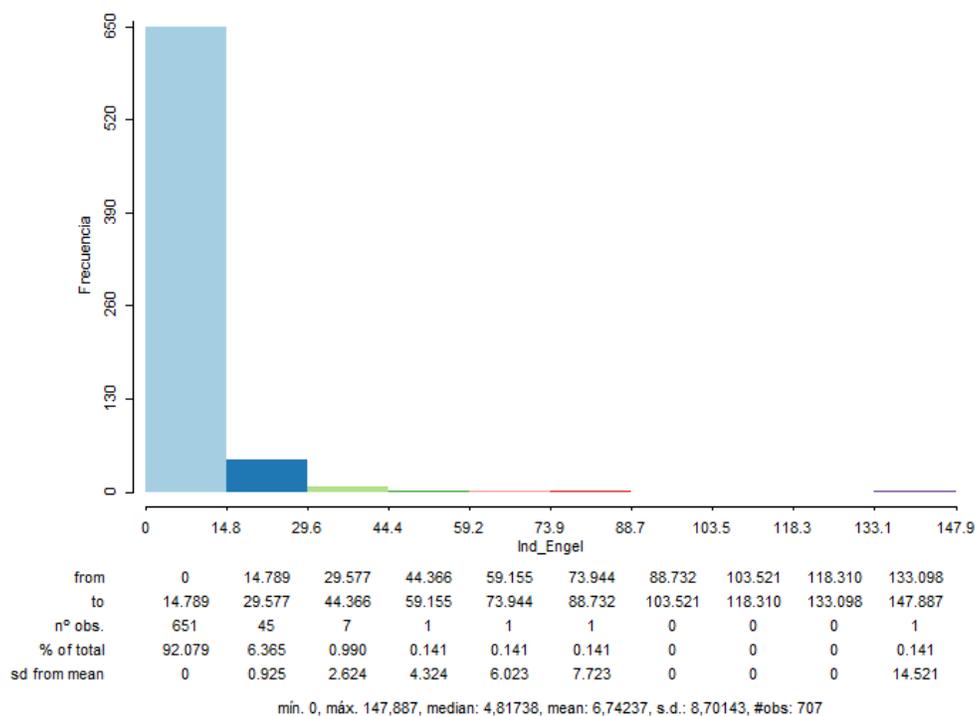
5.1.3.2 Suficiencia vial

De acuerdo con Palacios-Prieto et al. (2004), la suficiencia vial se calcula a través del Índice de Engel. Este índice representa la capacidad que tiene la red vial de cada sección electoral

en la ZMT, considerando la población y la superficie de la unidad geográfica estudiada. Mientras menor sea el índice, así será la capacidad de su infraestructura vial, lo que significan redes viales y carreteras relativamente saturadas. En contraste, cuando el indicador es alto, significa que la infraestructura vial tiene más capacidad de atender y garantizar los servicios de la población (vialidades sin saturación).

De acuerdo con los datos calculados del índice de Engel, se observó que las secciones electorales analizadas de la Zona Metropolitana de Toluca presentaron un rango que oscila entre 0 y 147.9; teniendo mayor frecuencia en índices bajos de suficiencia (alrededor del 92.5% del territorio), con rangos entre 0 y 14.79. Lo anterior se puede interpretar como si la capacidad de infraestructura vial en la ZMT (en el 92% de las secciones electorales) es insuficiente en la mayor parte del territorio para garantizar la circulación de la población actual.

Figura 22. Histograma del Índice de Engel de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020



Fuente: elaboración propia

En la tabla 32, se evidenciaron los municipios con mayores grados de suficiencia vial en las secciones electorales de la región, destacando los municipios de Almoloya, Toluca y Lerma con valores máximos en el Índice de Engel de 147, 87 y 60 respectivamente.

Tabla 32. Estadísticas de índices de suficiencia vial por municipios en la ZMT, 2020

Municipio	Secciones electorales Número de secciones	Suficiencia vial		
		Media Índice de Engel	Mínimo Índice de Engel	Máximo Índice de Engel
Mexicaltzingo	4	8.5	4.7	13.9
Toluca	304	8.0	0.0	87.0
Almoloya	56	7.3	0.2	147.9
Lerma	49	7.3	0.0	60.0
Ocoyoacac	22	6.7	0.7	22.6
Metepec	86	5.8	0.0	21.8
Chapultepec	2	5.7	5.1	6.2
Temoaya	26	5.5	1.9	9.9
Xonacatlán	14	5.3	1.4	7.9
Otzolotepec	26	5.2	1.1	17.0
Tenango del Valle	27	4.6	1.1	10.5
Zinacantepec	46	4.5	0.4	12.0
Calimaya	16	4.5	1.3	10.8
Rayón	4	4.4	0.9	8.0
San Mateo de Atenco	21	4.4	0.7	12.9
San Antonio de Isla	4	2.9	1.3	4.2

Fuente: elaboración propia

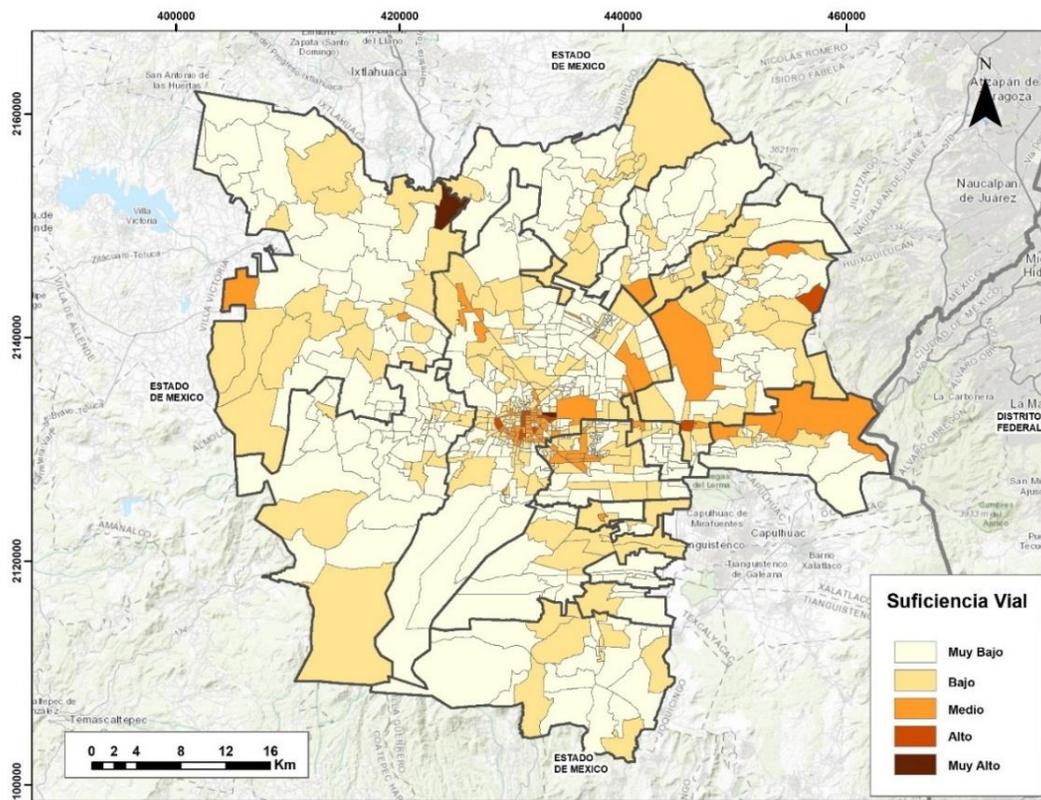
En el mapa 20 se evidenció gráficamente el índice de suficiencia vial por secciones electorales en los municipios de la Zona Metropolitana de Toluca, los cuales se clasificaron en 5 categorías, a través del método de cortes naturales (ver tabla 33).

Tabla 33. Clasificación del índice de suficiencia vial

Clasificación	Rango de valores de suficiencia vial	Secciones electorales	Proporción de secciones electorales
	Índice de Engel	Número de secciones	Porcentaje
Muy alto	60.1 a 147.9	2	0.3
Alto	25.3 a 60	12	1.8
Medio	12.4 a 25.2	26	3.9
Bajo	5.29 a 12.3	240	36.0
Muy bajo	0 a 5.28	386	58.0
Sin datos		41	5.8

Fuente: elaboración propia

Mapa 20. Suficiencia vial por secciones electorales en la ZMT, 2020



Fuente: elaboración propia con base en IMT- SCT - INEGI (2020)

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 33 y el mapa 20, se confirmó que el 94% de las secciones electorales presentan valores entre “bajos y muy bajos” de suficiencia vial, ubicados principalmente en las zonas periféricas y parte de las zonas centrales de la ZMT.

Adicionalmente, solamente el 5.7% de las secciones electorales analizadas presentaron grados entre medios y altos de suficiencia vial (entre 12.4 a 60.09), las cuales se ubicaron, en su mayoría, en la parte central y oriente de la ZMT en los municipios de Toluca, Metepec, Lerma, Mexicaltzingo, Ocoyoacac y San Mateo de Atenco. Evidenciando así, áreas con infraestructura vial relativamente saturada de acuerdo con la densidad poblacional.

Por último, se destacaron algunos valores atípicos de alta suficiencia vial (sin saturación de la infraestructura vial) en secciones electorales periféricas de la ZMT, en el municipio de Almoloya de Juárez; influyendo en este resultado la poca densidad poblacional con respecto a la infraestructura ubicada en estas secciones periféricas.

5.1.3.3 Conectividad vial

Para el índice de conectividad, se midió el grado de conexión que presentaron las secciones electorales de la Zona Metropolitana de Toluca en el periodo 2020, considerando la estructura de la red vial analizada e identificando así las áreas de la zona metropolitana que presentan mayor dinámica e integración.

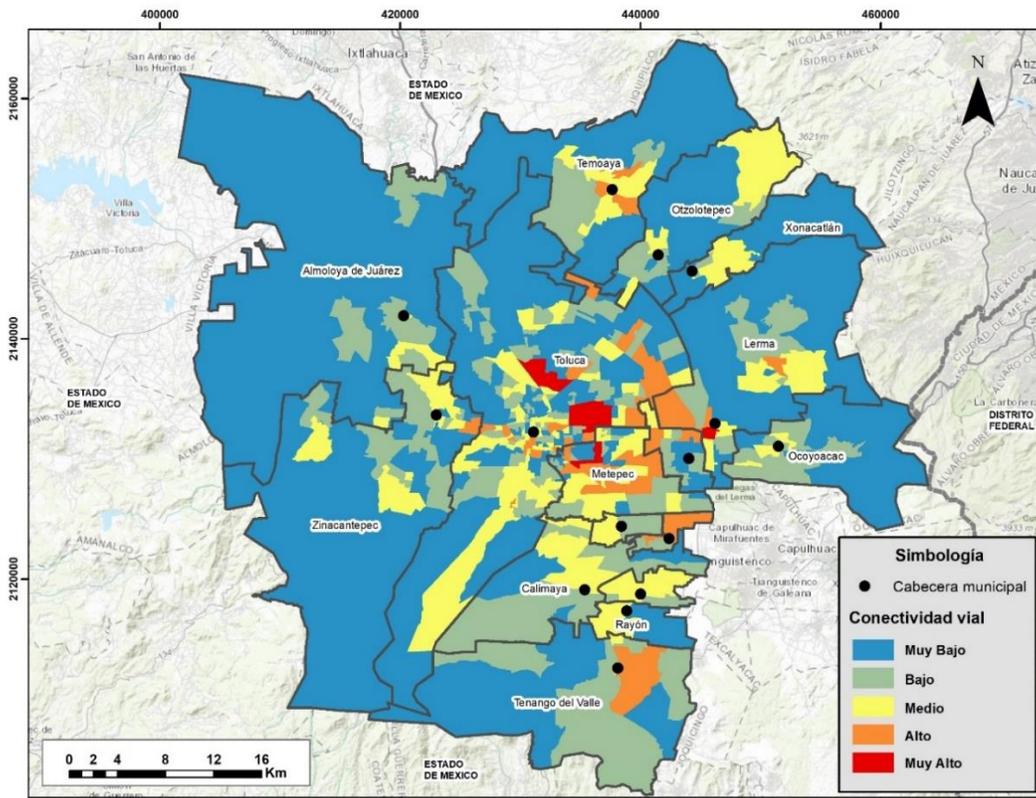
De acuerdo con los cálculos realizados, el índice de conectividad vial de las secciones electorales presentó una media de 3.73, con un rango de 0 a 33 y una desviación estándar de 4.29. Adicionalmente, el 50% de las secciones presentan índices inferiores a 3 (mediana), presentando grados bajos y muy bajos de conectividad. También se evidencia que el 7,4% de las secciones electorales presentan grados altos y muy altos de conectividad (ver tabla 34. Grados de conectividad vial).

Tabla 34. Grados de conectividad vial

Grado Conectividad	Rango de conectividad	Secciones electorales	Proporción de secciones electorales
	Índice	Número de secciones	Porcentaje
Muy bajo	0 a 2.0	346	48,9
Bajo	2.1 a 5	183	25,9
Medio	5.1 a 10	126	17,8
Alto	11 a 19	48	6,8
Muy alto	20 a 33	4	0,6

Fuente: elaboración propia

Mapa 21. Conectividad vial por secciones electorales en la ZMT, 2020



Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020)

En el mapa 21, se evidenciaron las áreas con mayor grado de conectividad (rojo) en la Zona Metropolitana de Toluca, principalmente en los municipios de Toluca⁹, Metepec y Lerma. Así mismo, se observa una mayor integración vial (conectividad) entre el centro de la ZMT y las secciones electorales de los municipios al este y sureste de la zona metropolitana en los municipios de Mexicaltzingo, Chapultepec, Calimaya, San Antonio la Isla, Rayón y Tenango del Valle; además de conectividades entre bajas y medias con los municipios de Zinacantepec y Almoloya de Juárez (oeste de la ZMT).

Otro aspecto que se destacó fue que los mayores grados de conectividad coincidieron con las secciones electorales aledañas a los corredores estructurales de la Zona Metropolitana de Toluca, como es el caso de Avenida Adolfo López Mateos, Avenida Solidaridad Las Torres, Avenida Paseo Tollocan, el Boulevard José María Pino Suarez y la carretera Toluca-Tenango de Arista.

Por último, también se observaron grados medios y altos de conectividad en las secciones electorales cercanas a las cabeceras municipales de Temoaya, Otzolotepec y Xonacatlán, las cuales se conectan por las vías estructurantes de Toluca-Naucalpan y Toluca-Temoaya-Jiquipilco.

5.1.4 Análisis dinámico de la infraestructura vial

Para este tipo de análisis se analizaron algunos indicadores dinámicos que permitieron determinar el estado de eficiencia de la red de transporte viaria, teniendo en cuenta el costo del desplazamiento (en tiempos) de la población. Dentro de los indicadores analizados, se encontraron los tiempos medios de transporte y la accesibilidad relativa.

⁹ La parte sur de Toluca presenta una sección de conectividad media, aunque no se evidencian muchas vías carretables. Esto es debido a que el área de la sección electoral es mucho mayor al área de cobertura de la infraestructura vial existente.

5.1.4.1 Tiempos promedio de recorrido

Esta variable representó el tiempo promedio invertido desde cada sección electoral de origen al resto de las secciones electorales destino, y por medio del cual se pretendió encontrar las áreas de influencia en la ZMT en función de los tiempos de desplazamiento por carreteras y vialidades a través del automóvil (Godoy y Garnica, 2012).

Con respecto a los datos analizados, los tiempos promedios de recorrido de las secciones electorales en la ZMT presentaron una media de 23.6 minutos, evidenciando un rango de 15.52 a 48.71 minutos, con una desviación estándar de 6.4 minutos. Además, los datos presentaron una mediana de 23.65 minutos, lo que indicó que el 50% de las secciones electorales presentó tiempos bajos y muy bajos de transporte a través de la infraestructura analizada y por medio de vehículos automotores.

Es necesario aclarar que el modelo analizado no consideró los tiempos de espera, congestión, caminatas del origen a las estaciones de transporte o caminatas de una estación final al destino final, sino que se consideraron los tiempos promedio de transporte con base a las distancias de las principales carreteras y vialidades urbanas y regionales y las estimaciones de las velocidades promedio por tipo de vialidad (según la RNC 2020) en las 707 secciones electorales de la ZMT.

Para efectos de caracterizar el indicador de tiempos promedios de transporte se utilizó la siguiente clasificación, de acuerdo con el método de cortes naturales:

Tabla 35. Grados de tiempos promedio de transporte

Clasificación	Rango de tiempo promedio de transporte	Secciones electorales	Proporción de secciones electorales
	Minutos	Número de secciones	Porcentaje
Muy bajo	Entre 15.52 y 23.07	385	54.50
Bajo	Entre 23.07 y 28.40	169	23.90

Clasificación	Rango de tiempo promedio de transporte	Secciones electorales	Proporción de secciones electorales
	Minutos	Número de secciones	Porcentaje
Medio	Entre 28.40 y 33.35	83	11.70
Alto	Entre 33.35 y 38.43	48	6.80
Muy alto	Entre 38.43 y 48.71	22	3.10

Fuente: elaboración propia

La tabla 35, evidenció que el 54.5% de las secciones electorales analizadas presentaron rangos “muy bajos” de tiempos promedio de transporte, que oscilaron entre los 15.5 y 23.07 minutos. Cabe destacar que estos tiempos ocuparon la mayor parte de las secciones electorales en los municipios de Metepec (91.9%), Toluca (86.5%), San Mateo de Atenco (81%), Mexicaltzingo (75%), Zinacantepec (21.9%) y Xonacatlán (21.4%) (ver mapa 22).

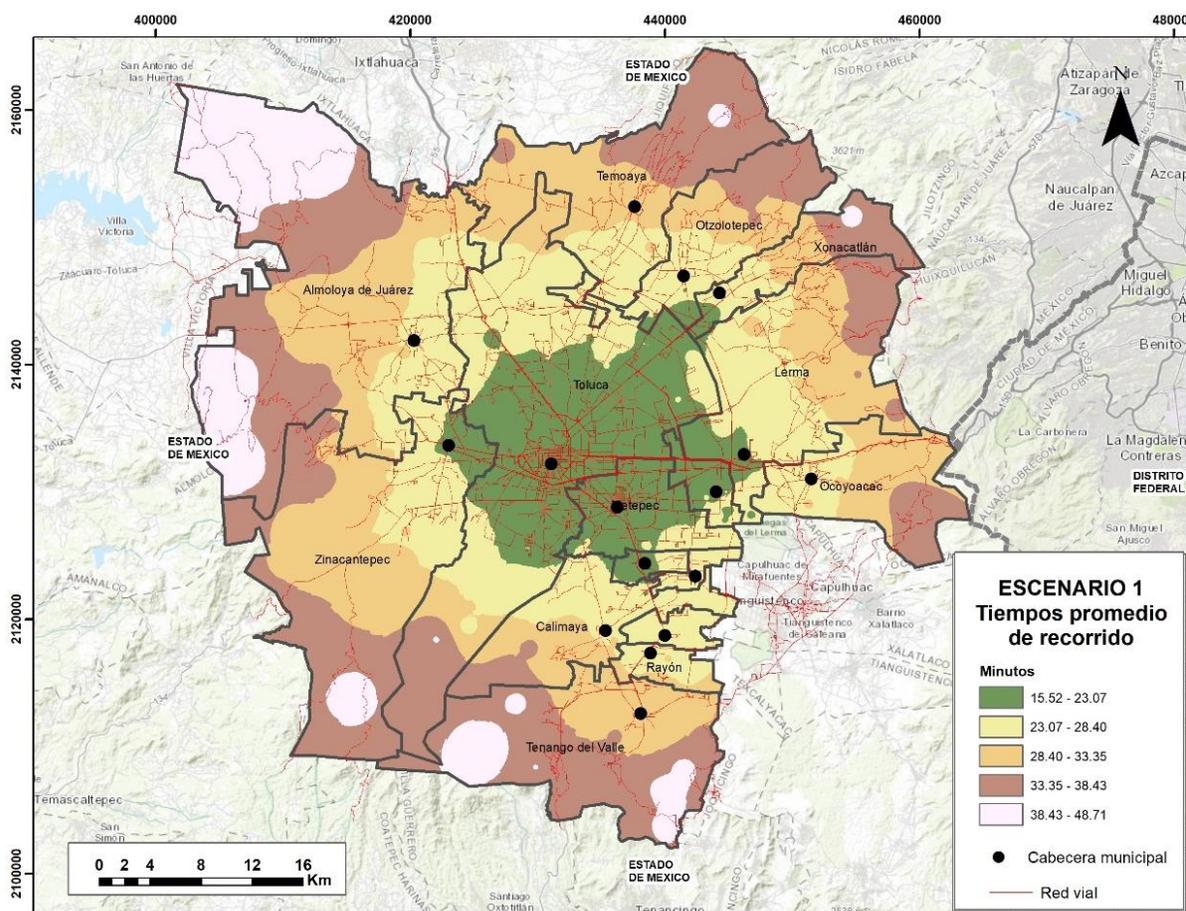
Los municipios de Temoaya, Tenango del Valle y Almoloya de Juárez fueron los que evidenciaron secciones electorales con mayores tiempos promedios de transporte en la Zona Metropolitana de Toluca (entre 38.7 y 48.71 minutos), con un 38.5 %, 22.2% y 19.3% del total de sus secciones respectivamente.

En el mapa 22, se puede verificar gráficamente la distribución geográfica de los tiempos de transporte promedios calculados. Cabe aclarar que los resultados obtenidos corresponden al cálculo de los tiempos y velocidades estimadas de la red vial, según la red nacional de caminos 2020 y no corresponden al comportamiento de la realidad en otros horarios de mayor congestión vehicular (como las horas pico).

Para efectos de validar la información de los tiempos de recorridos promedios calculados por secciones electorales, se aplicó la metodología implementada en un segundo escenario (escenario 2) con insumos de los tiempos promedios de transporte de ArcGIS Online (ESRI, 2023), entre las 16 cabeceras municipales de la Zona Metropolitana de Toluca. Estos

consideraron las longitudes de las principales vías de transporte y tiempos reales de recorrido en el territorio (ver mapa 23).

Mapa 22. Tiempos promedio de recorrido por secciones electorales en la ZMT, 2020



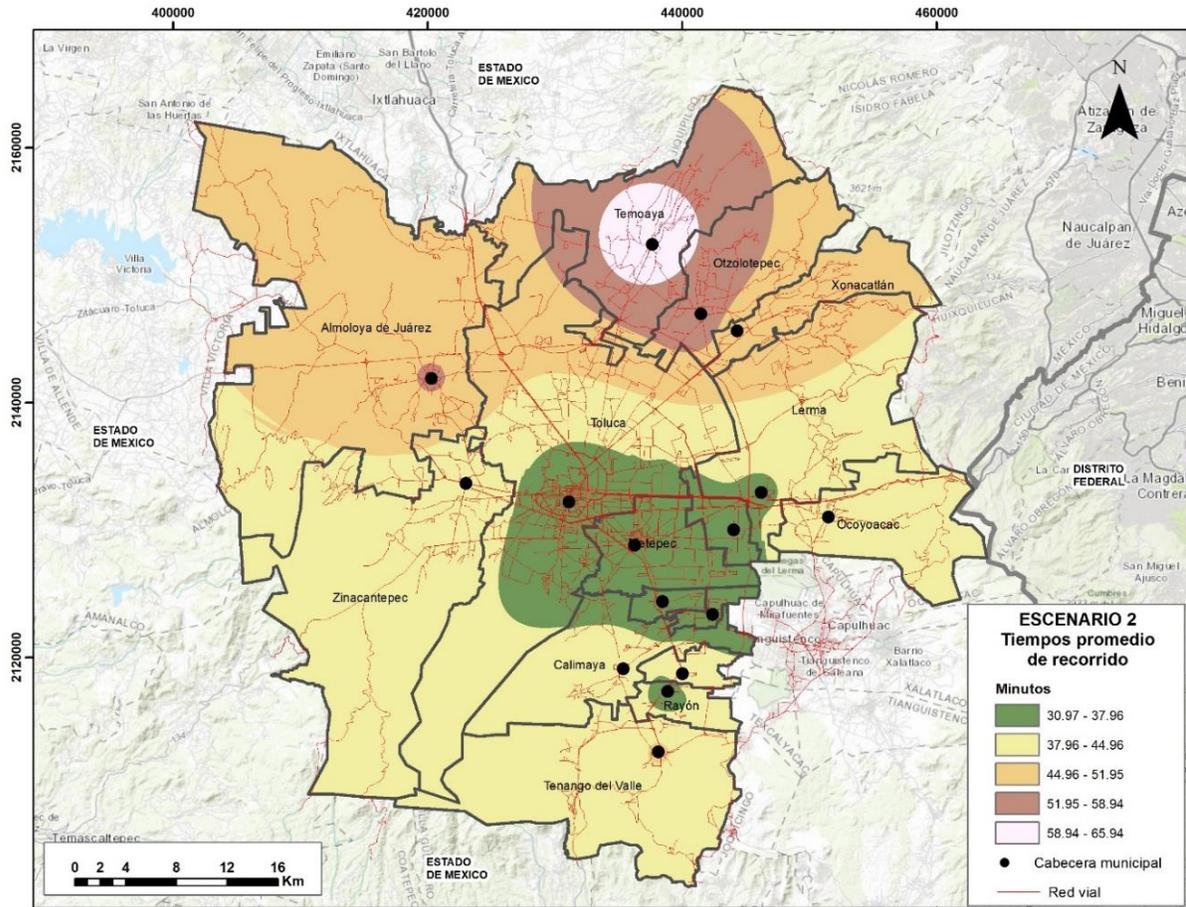
Fuente: elaboración propia con base en IMT, SCT e INEGI (2020)

De los resultados obtenidos del mapa 23, se generaron rangos de tiempos de transporte entre 30.9 y 65.94 minutos en la ZMT, que son tiempos que se ajustan a la realidad observada en la región. Se evidenciaron tiempos de transporte muy bajos (30.98 y 37.97 minutos), principalmente en la mayor parte de las secciones electorales de Toluca, Metepec, Mexicaltzingo, Chapultepec, San Mateo de Atenco y parte de Lerma.

Por otro lado, los rangos bajos de transporte (37.9 a 44.9 minutos) se presentaron en Zinacantepec, Tenango del Valle, Calimaya, San Antonio la Isla y Ocoyoacac; los rangos

medios (44.9 a 51.9 minutos) en las cabeceras de Almoloya de Juárez y Xonacatlán; los rangos altos (51.9 a 58.9 minutos) en Otzolotepec y los rangos muy altos de tiempos (58.96 a 65.94 minutos) en Temoaya (Ver mapa 23).

Mapa 23. Tiempos promedio de recorrido municipales en la ZMT, 2023



Fuente: elaboración propia a partir de datos y cartografía de la plataforma de ArcGIS Online (ESRI, 2023); IMT, SCT e INEGI (2020) e INEGI (2020b)

En general, se observaron mayores tiempos de transporte en las secciones electorales de la ZMT del escenario 2 (tiempos calculados con ArcGIS Online), comparado con el escenario 1 (tiempos calculados por el autor con datos de RNC 2020), donde se presentan rangos entre 15.5 y 48.7 minutos por medio del transporte automotor. Lo anterior da un indicio de la ineficiencia de la red vial de carreteras, teniendo en cuenta el incremento de los tiempos de

transporte de la población, debido a la reducción de las velocidades promedio por carretera y vialidad, lo que puede generar las congestiones que se presentan en el sistema.

5.1.4.2 Accesibilidad vial

La accesibilidad vial representa la relación entre la sumatoria de los desplazamientos reales y los desplazamientos ideales de transporte. De acuerdo con Rodrigue et al (2013), la accesibilidad se define como “*la evaluación y medida de capacidad de un lugar para alcanzar o ser alcanzado por diferentes localizaciones*”, siendo esta medición un indicador de la materialización de las relaciones sociales y económicas de un territorio.

En principio, para este ejercicio, se calculó la accesibilidad de la infraestructura vial en un escenario 1, considerando la proximidad entre las 707 secciones electorales de la ZMT a través del elemento estructurante del sistema territorial, las redes de vialidades y carreteras.

De acuerdo con los resultados del mapa 24, el índice de accesibilidad relativa de la infraestructura vial presentó valores entre 1.2 y 2.06, los cuales representaron la relación entre los tiempos reales (impedancia real) de traslado y los tiempos ideales (impedancia ideal). Esto indicó que entre mayor sea el índice, más demoran los tiempos de traslado de una sección electoral a otra, teniendo en cuenta las características de las vías por las cuales se moviliza la población. Por ende, entre mayor sea un índice, menor será el grado de accesibilidad de la zona observada (ver tabla 36).

Tabla 36. Grados de accesibilidad vial de la ZMT

Clasificación	Rango en la escala del índice de accesibilidad	Secciones electorales	Proporción de secciones electorales	Población	Proporción de la población
	Índice	Número de secciones	Porcentaje	Habitantes	Porcentaje
Muy baja	Entre 1.799 y 2.067	64	9.1	272,481	11.6
Baja	Entre 1.667 y 1.795	121	17.1	500,552	21.3
Media	Entre 1.564 y 1.666	214	30.1	763,014	32.4
Alta	Entre 1.457 y 1.563	257	36.4	652,616	27.7

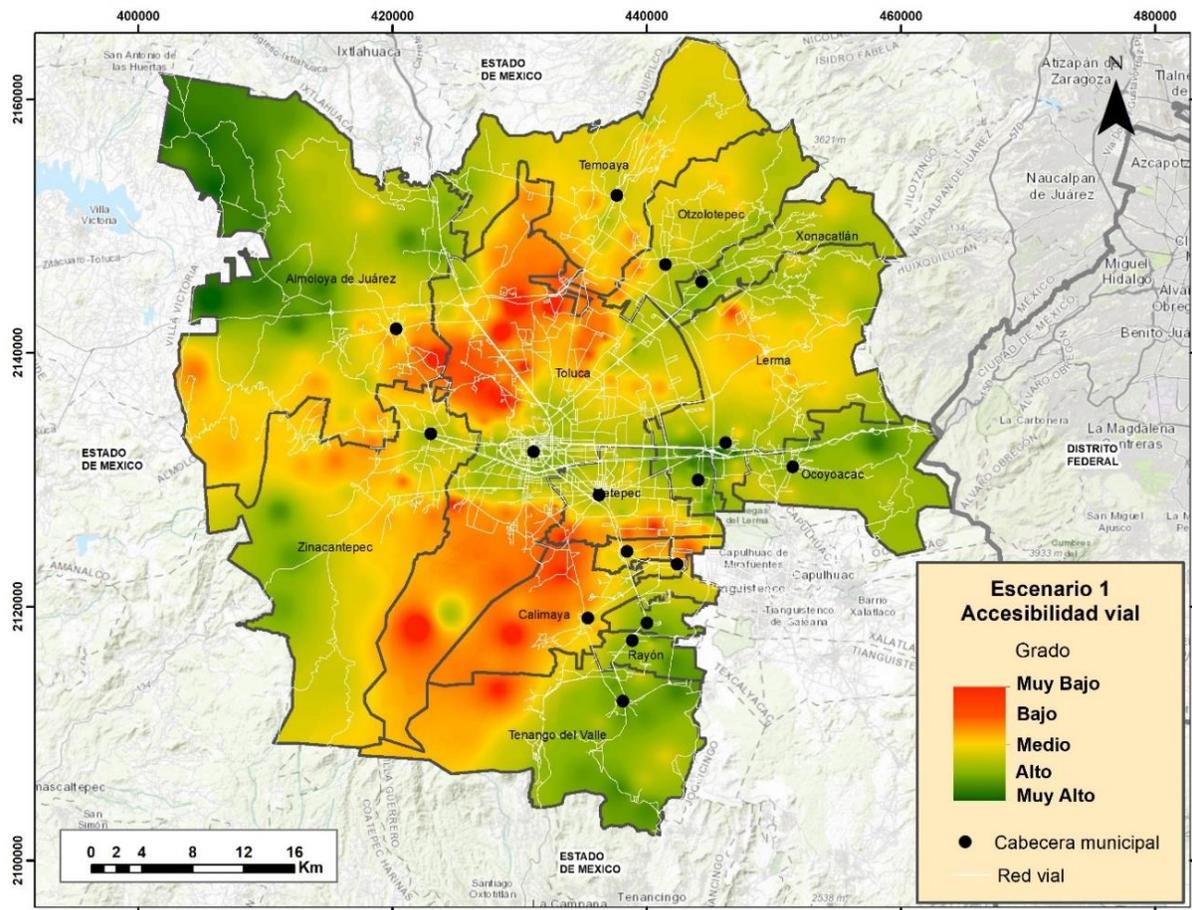
Clasificación	Rango en la escala del índice de accesibilidad	Secciones electorales	Proporción de secciones electorales	Población	Proporción de la población
	Índice	Número de secciones	Porcentaje	Habitantes	Porcentaje
Muy alta	Entre 1.293 y 1.456	51	7.2	165,492	7.0

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el mapa 24, se observaron zonas ubicadas a lo largo de varios ejes estructurales de la ZMT con un alto grado de accesibilidad vial, como es el caso de secciones electorales en los municipios de San Antonio La Isla, Rayón y Tenango del Valle, próximas al corredor Toluca-Metepec-Tenango del Valle. De igual forma, se destacaron algunas secciones electorales con “Altos y Medios” grados de accesibilidad vial en áreas aledañas al Paseo Tollocan y el Boulevard Solidaridad Las Torres, que conectan las cabeceras municipales de los municipios de San Mateo de Atenco, Ocoyoacac, Lerma, Toluca y Zinacantepec. También se evidenciaron grados altos de accesibilidad en zonas aledañas a las periferias de Xonacatlán, Almoloya de Juárez y Zinacantepec, lo cual puede ir asociado a la baja densidad de vías y la poca densidad poblacional existente. Estos valores altos y medios de accesibilidad vial presentaron una cobertura al 60% de la población.

Por último, se encontraron grados bajos y muy bajos de accesibilidad en los municipales de Chapultepec, Temoaya, Calimaya, Lerma, Toluca, Otzolotepec, Almoloya de Juárez y Zinacantepec, abarcando el 32.9% de la población de la ZMT.

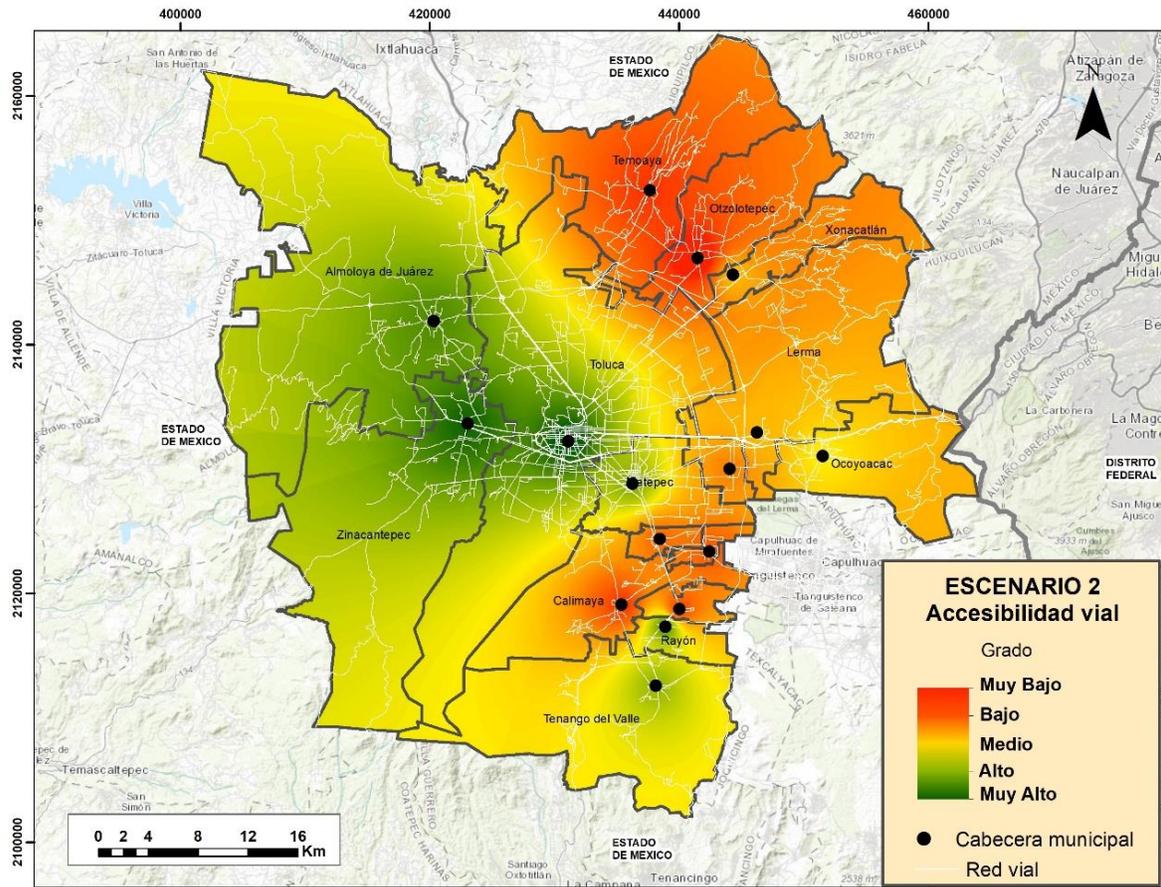
Mapa 24. Escenario 1 de Accesibilidad vial en las secciones electorales de la ZMT, 2020



Fuente: elaboración propia con base en IMT- SCT - INEGI (2020)

Posteriormente, se analizó la comparación entre el escenario 1 y el escenario 2, donde se aplicó la metodología anterior con insumos de los tiempos promedio de transporte de ArcGIS Online de ESRI, que consideran las longitudes de las principales vías de transporte y velocidades promedio más precisas entre las 16 cabeceras municipales de la Zona Metropolitana de Toluca (ver mapa 25).

Mapa 25. Escenario 2 de accesibilidad vial municipal en la ZMT, 2023



Fuente: elaboración propia a partir de datos y cartografía de la plataforma de ArcGIS Online (ESRI, 2023); IMT, SCT e INEGI (2020) e INEGI (2020b)

De los resultados obtenidos, se generaron rangos de accesibilidad vial entre 3.4 y 2.4 minutos en toda la ZMT, con accesibilidades muy altas (colores verdes) en un primer grupo al oeste, noroeste y centro de la ZMT, entre los municipios de Toluca, Metepec, Zinacantepec y Almoloya de Juárez y un segundo grupo al sureste de la ZMT entre los municipios de Rayón y Tenango del Valle (ver mapa 25).

Por otro lado, los rangos más bajos de accesibilidad vial (rojo y naranja) se presentaron principalmente en Temoaya, Otzolotepec, Xonacatlán, Lerma, Mexicaltzingo, Calimaya, San Antonio la Isla, Chapultepec y Ocoyoacac (ver mapa 25).

De forma general, y en comparación con los escenarios observados (escenario 1 y 2), se evidenciaron grados más bajos de accesibilidad vial en el escenario 2, que en el escenario 1. De esta forma, los tiempos reales de transporte en el escenario 1 se alejan mucho más de los tiempos ideales de transporte que en el escenario 2; demostrando así incrementos generales en los tiempos de transporte para los desplazamientos de la población, induciendo a una falta de eficiencia en la red vial del escenario 1, con respecto a los datos estimados de la Red Nacional de Caminos.

Dentro de las posibles razones explicativas de esta situación, se encuentran la disminución de las velocidades de transporte de las vialidades y carreteras de la ZMT, ya sea a causa de las congestiones vehiculares en la zona o por el mal estado de la infraestructura vial, lo que incrementa los tiempos reales de transporte de la población.

Otra razón que puede explicar este comportamiento es la presión ejercida por las unidades económicas que se concentran en la Zona Metropolitana de Toluca, principalmente las actividades industriales y comerciales en los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo de Atenco y Lerma, además de las actividades educativas presentadas en Toluca y Metepec. Estas presiones generan gran cantidad de desplazamientos que saturan al sistema vial, especialmente en horas pico, generando a su vez congestiones y mayores costos de desplazamientos (tiempos y dinero) para la población.

5.2 Marginación de la Zona Metropolitana de Toluca

Con base a los resultados obtenidos del índice de marginación calculado, se obtuvieron valores entre 1 y 5.99, los cuales se agruparon en 5 categorías entre muy bajo y muy alto, de acuerdo con el método de índice de valor medio-VIM (ver tabla 37).

De acuerdo con los resultados del índice de marginación, calculado a través del método VIM, se elaboró el mapa temático de los grados de marginación de la Zona Metropolitana de Toluca (ver mapa 26). En este se pudieron identificar las secciones electorales que contaron con un grado alto y muy alto de marginación (tonos naranjas y rojos), dentro de los cuales se observó el 28.2% de la población de la ZMT para el periodo 2020; así como las secciones electorales

con grados bajos y muy bajos de marginación (tonos de verde claro y verde oscuro), que ocuparon el 38% de la población, y por último los grados medios (verde oliva), que abarcaron el 34% de la población en la zona de estudio (ver tabla 37 y mapa 26).

Tabla 37. Resumen de grados de marginación

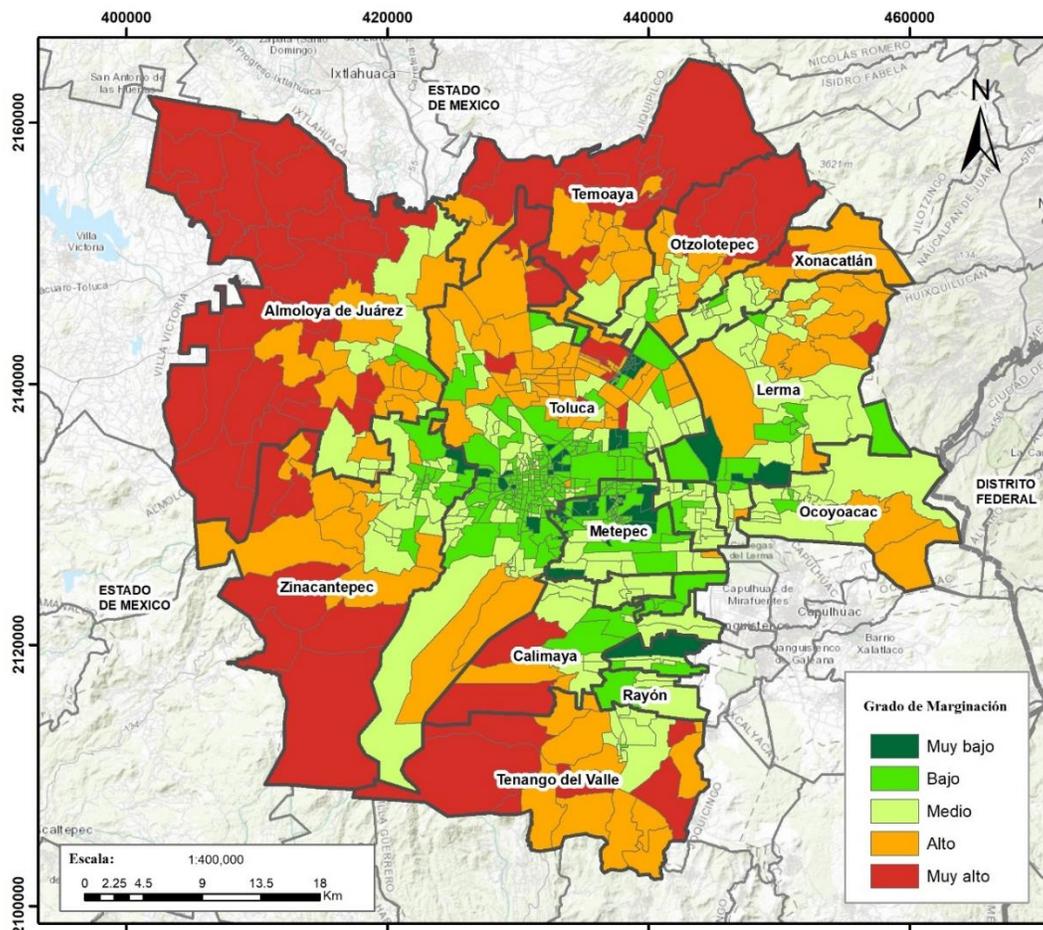
Grado de marginación	Rangos en la escala del índice de marginación	Secciones electorales	Proporción de secciones	Población	Proporción de la población
		Número de secciones	Porcentaje	Habitantes	Porcentaje
Muy Bajo	Entre 1.00 y 1.99	57	8.0	180,685	7.7
Bajo	Entre 2.00 y 2.99	241	34.1	709,210	30.1
Medio	Entre 3.00 y 3.99	209	29.6	800,593	34.0
Alto	Entre 4.00 y 4.99	125	17.7	453,356	19.3
Muy Alto	Entre 5.00 y 5.99	74	10.4	210,311	8.9

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta la definición de marginación, la interpretación de estos resultados indicó que entre mayor sea el grado de marginación de una sección electoral, existe una mayor probabilidad que la población que allí reside cuente con más carencias de los servicios básicos que se prestan en un territorio. En ese sentido, se consideraron las dimensiones de los indicadores utilizados (educación, salud, vivienda y disponibilidad de bienes y TIC).

Así se identificó que la mayor parte de las secciones electorales ubicadas en las zonas urbanas de la ZMT cuenta con grados bajos y muy bajos, mientras que las áreas periféricas presentaron grados altos y muy altos de marginación, lo que puede traducirse a que estos lugares tendieron a presentar mayores carencias de servicios durante el periodo 2020.

Mapa 26. Grado de Marginación de las secciones electorales en la Zona Metropolitana de Toluca, 2020



Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020a)

En la tabla 38, se visualizaron los porcentajes de secciones electorales agrupadas por grados de marginación y municipios.

Tabla 38. Porcentaje de secciones electorales agrupados por municipio y grado de marginación en la ZMT, 2020

Municipio	Grado de Marginación				
	Muy bajo Porcentaje	Bajo Porcentaje	Medio Porcentaje	Alto Porcentaje	Muy alto Porcentaje
Almoloya	0.0	0.8	4.8	11.2	40.5
Calimaya	0.0	0.8	4.8	1.6	2.7

Municipio	Grado de Marginación				
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
Chapultepec	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
Lerma	5.3	4.6	10.5	8.8	1.4
Metepec	33.3	22.4	5.7	0.8	0.0
Mexicaltzingo	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0
Ocoyoacac	0.0	0.8	8.1	2.4	0.0
Otzolotepec	0.0	0.8	4.8	7.2	6.8
Rayón	0.0	0.4	1.4	0.0	0.0
San Antonia de Isla	1.8	0.4	1.0	0.0	0.0
San Mateo de Atenco	1.8	1.2	8.1	0.0	0.0
Temoaya	0.0	0.0	0.5	8.8	18.9
Tenango del Valle	0.0	0.4	4.3	8.8	8.1
Toluca	56.1	61.4	31.6	40.0	10.8
Xonacatlán	0.0	0.4	4.3	2.4	1.4
Zinacantepec	1.8	4.6	8.1	8.0	9.5
Porcentaje de secciones electorales	8.1	34.1	29.6	17.7	10.5
Número de secciones electorales	57	241	209	125	74

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2020a)

De acuerdo con la tabla 38, el 34.1% y el 29.6% de las 707 secciones electorales de la ZMT se encontraron ubicadas entre los grados de marginación bajo y medio, respectivamente. Sin embargo, en el caso de los grados altos (situación desfavorable) se observaron los municipios de Toluca y Almoloya, con un 40% y 20% del total de casos en ese grado. Por su parte, el grado “muy alto” se presentó (situación más desfavorable) en los municipios de Almoloya de Juárez y Temoaya, con el 40% y el 18% de las secciones afectadas en ese grado de marginación.

5.3 Accesibilidad vial y marginación de la ZMT

Para este apartado, se relacionaron los resultados obtenidos con el índice de accesibilidad vial de la ZMT, con respecto al Índice de Marginación de la ZMT. En ese sentido, se tuvieron en cuenta dos fases:

- Análisis de la asociación espacial del índice de accesibilidad vial y el índice de marginación.
- Análisis de dependencia entre el índice de accesibilidad vial y el índice de marginación.

5.3.1 Relación por asociación espacial del índice de accesibilidad y el índice de marginación

Para identificar la presencia de relaciones (de asociación) y patrones espaciales en las variables de accesibilidad y marginación, se utilizó el Índice de Moran, graficando así el comportamiento de las variables a través de un diagrama de dispersión y analizando la autocorrelación espacial a nivel global.

Posteriormente, se identificaron las zonas de concentración espacial (clústeres) a través del análisis de gráficos LISA (Local Indicator of Spatial Association), permitiendo localizar clústeres en el comportamiento de las variables a nivel de secciones electorales.

Es necesario resaltar que para el desarrollo del ejercicio se generó una matriz de pesos espaciales de contigüidad reina de orden 1, para generar el esquema de conectividad, a través del software Geoda.

5.3.1.1 Índice de Moran Univariante –Escala de Marginación

Para el presente ítem, se analizaron los resultados del diagrama de dispersión de la variable “Índice de Marginación”.

Es de aclarar que el Índice de Moran presenta valores de -1 a +1, indicando grados altos de autocorrelación a medida que se acerque a alguno de estos dos valores, siendo negativa si se acerca a -1 o positiva si se acerca a +1. Adicionalmente, el análisis desarrollado responde a

la pregunta si existe un patrón espacial de dispersión o concentración del grado de marginación en la zona de estudio.

De acuerdo con los resultados del diagrama de dispersión (ver figura 23a), durante el periodo 2020, el índice de marginación tendió a una autocorrelación espacial fuerte y positiva en las secciones electorales de la ZMT con respecto al retardo espacial de sus secciones electorales vecinas, ya que presentó un I de Moran de 0.74.

Este comportamiento se evidenció en los clústeres alto-alto (cuadrante I) y bajo-bajo (cuadrante III) (ver figura 23a). Así mismo, los resultados respondieron a un p-valor de 0.001 para un total de 999 permutaciones.

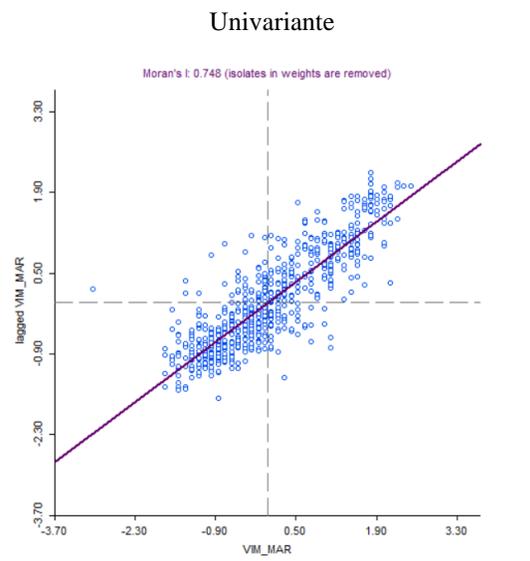
Lo anterior llevó a demostrar que el comportamiento espacial de la variable durante el año 2020 no fue aleatorio y tendió a su concentración, en vista de que el nivel de intensidad del I de Moran fue mayor a 0.35 y su significancia presentó un p-valor menor a 0.05.

En la figura 23b, se observaron los clústeres alto-alto (color rojo), que representaron las secciones electorales que tendieron a tener grados de marginación altos y que a su vez estuvieron rodeadas por secciones electorales con altos grados de marginación. En este clúster se identificaron 142 secciones electorales, ubicadas en la periferia norte, sur y oeste de la ZMT en los municipios de Xonacatlán, Oztolotepec, Temoaya, Toluca (norte y sur), Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Calimaya y Tenango del Valle, abarcando a una población de 472 mil 702 habitantes de la ZMT (20.1% del total de la población).

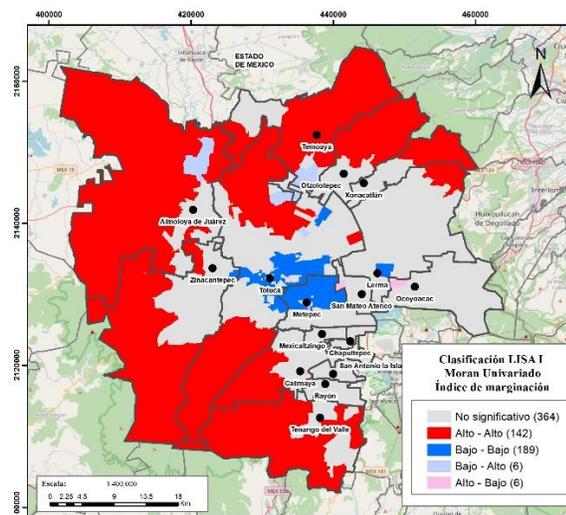
Respecto a los clústeres bajo-bajo (en color azul), se encontraron las secciones electorales más afortunadas, que presentaron bajos grados de marginación en su población con respecto al letargo espacial de sus secciones vecinas. En este grupo se observaron 189 secciones electorales ubicadas en la zona central de la ZMT, en los municipios de Toluca, Metepec y otras pequeñas secciones de Lerma y Zinacantepec, abarcando una población de 429 mil 288 habitantes (18.2% de la población).

Figura 23. Gráfico de dispersión del I de Moran y mapa LISA de la marginación, 2020

a) Diagrama de dispersión I de Moran Global



b) Indicador LISA de la Marginación



Fuente: elaboración propia

5.3.1.2 Índice de Moran Univariante – Accesibilidad vial

En este apartado se analizaron los resultados del diagrama de dispersión del Índice de Moran para la variable de accesibilidad vial. De esta forma se respondió si existe un patrón espacial de dispersión o concentración en el grado de accesibilidad vial en las secciones electorales de la zona de estudio.

De acuerdo con la figura 24a, se observó un I de Moran de 0.62. Este resultado indicó que para el año 2020, la accesibilidad vial tendió a agruparse en el espacio en las secciones en la ZMT, ya que presentó autocorrelación espacial positiva, lo que se evidencia en la formación de los clústeres alto-alto (cuadrante I) y bajo-bajo (cuadrante III). Así mismo, los resultados respondieron a un p-valor de 0.001 para un total de 999 permutaciones.

Los clústeres alto-alto (figura 24b, en color rojo) son áreas que generalmente presentan un buen nivel de accesibilidad vial con respecto a las secciones vecinas. En este clúster, destacan 83 secciones que suman una población de 186 mil 597 personas (7.9 % del total en la ZMT) ubicadas en el centro de Toluca y otras al oriente de la ZMT, en los municipios de Metepec,

San Mateo de Atenco, Lerma y Ocoyoacac. Lo cual coincidió con el principal corredor vial para comunicarse con Ciudad de México, Paseo Tollocan y la carretera México-Toluca, además de la vialidad de la Solidaridad Las Torres entre San Mateo de Atenco y Lerma y la carretera México-Toluca-Tenango del Valle, que comunica Tenango del Valle con Ocoyoacac.

Adicionalmente, también se evidenciaron 16 secciones electorales al suroriente de la ZMT, con una población de 53 mil 882 habitantes, en los municipios de Tenango del Valle, Rayón y San Antonio de Islas, teniendo en cuenta los reducidos tiempos de desplazamiento en esta área, a través de los principales ejes carreteros Toluca-Metepec-Tenango del Valle y la Autopista Sur Lerma-Tenango del Valle.

Por último, dentro de este grupo, también se destacaron 17 secciones al noroccidente de la ZMT en el municipio de Almoloya de Juárez, con una población de 32 mil 328 personas. Esta situación particular de alta accesibilidad vial en estas secciones con poca densidad de población podría explicarse por los tiempos reducidos de transporte en esta área, a través de la carretera Toluca-Morelia-Tabernillas, que conecta con un eje regional federal Toluca-Morelia.

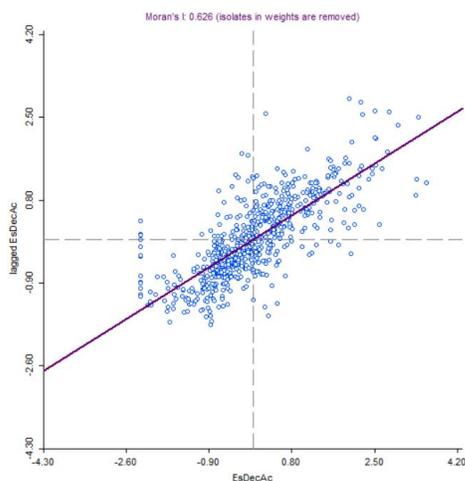
En contraste, también se encontraron los clústeres bajo-bajo (color azul), que son secciones que para ese periodo tendieron a estar en una situación “no ideal”, teniendo en cuenta que generalmente estos lugares presentaron bajos grados de accesibilidad con respecto a los bajos grados de accesibilidad de sus secciones vecinas. En ese sentido, son áreas prioritarias para tomar acciones en aras de mejorar la accesibilidad vial.

Este clúster lo conformaron 144 secciones que se distribuyeron principalmente en 2 grupos: el primero abarcó 90 secciones al noroccidente de la ZMT, en los municipios de Zinacantepec, Almoloya de Juárez y el norte de Toluca y Temoaya; el segundo grupo abarcó 51 secciones al suroriente de la ZMT, en los municipios de Toluca, Mexicaltzingo, Sur de Metepec, Chapultepec y Calimaya. Por último, se evidenciaron otras secciones dispersas (3) en el municipio de Lerma (ver figura 24).

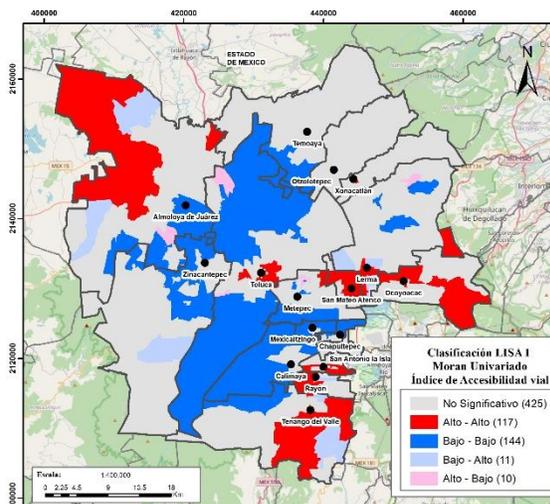
En total, este clúster representó una población de 642 mil 778 habitantes, equivalentes al 27.3% de la población total de la ZMT para el año 2020.

Figura 24. Gráfico de dispersión del I de Moran y mapa LISA de la accesibilidad vial, 2020

a) Diagrama de dispersión I de Moran Univariante



b) Indicador LISA de la accesibilidad vial



Fuente: elaboración propia

5.3.2 Dependencia espacial entre marginación y accesibilidad vial

En este apartado se analizó la existencia de una relación espacial explicativa entre las variables de escala de accesibilidad vial y la marginación en la ZMT. Para ello, se realizó una comparación entre un modelo convencional de regresión y un modelo de rezago espacial, para evidenciar el efecto del espacio en las relaciones de dependencia las variables en la zona de estudio.

De acuerdo con la tabla 39, se evidenció que el modelo de rezago espacial presentó un resultado significativo considerando el valor del pseudo R^2 (0.6912) en comparación con el R^2 del modelo convencional 0.0103). De esta forma el modelo espacial reflejó una fuerte dependencia espacial (pesudo R^2 mayor a 0.3) de la marginación en función de la accesibilidad vial, midiendo la influencia promedio de las observaciones en cada sección electoral con respecto al efecto de sus secciones vecinas ($Rho = 0.8154$). Adicionalmente los criterios de AIC, SC y Lag Likelihood presentaron una disminución de sus valores en el

modelo LM (Lag) con respecto al MCO, lo que representa un ajuste mejorado y significativo en el modelo espacial.

Tabla 39. Resultados del modelo de regresión convencional y de rezago espacial

Criterios	Modelo de regresión convencional (MCO)	Modelo de regresión espacial- LM (Lag)
R ² / Pseudo -R ²	0.01	0.69
Coefficiente Lag (Rho)	-	0.81
Criterio de Akaike (AIC)	2119.03	1431.43
Lag Likelihood	-1,057.52	-712.71
Criterio de Schwarz (SC)	2128.16	1445.12
Variable	Coefficiente	Coefficiente
W_ Marginación	-	0.8154
Constante	3.5662	0.7289
Accesibilidad vial	-0.0064	-0.0024

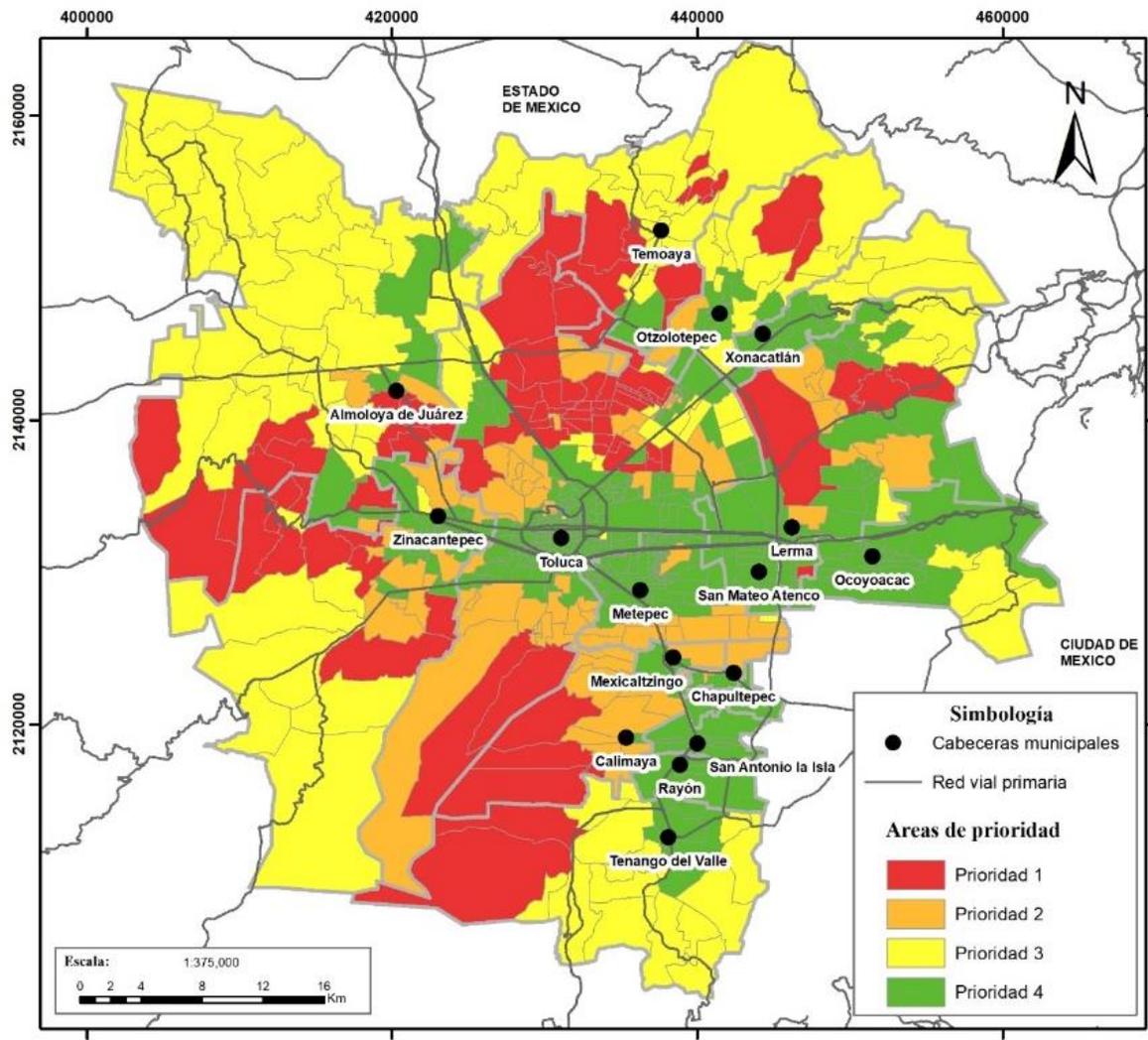
Fuente: elaboración propia

Por ende, la accesibilidad de la infraestructura vial fue un factor influyente en el comportamiento de la marginación de la región para el periodo 2020. Cabe destacar que el tipo de relación entre estas variables fue inverso, teniendo en cuenta el coeficiente de la accesibilidad obtenido (-0.002), de tal forma que, entre mayor era el grado de accesibilidad vial de una sección, menor era el grado de marginación de las secciones electorales de la ZMT.

5.4 Determinación de áreas de mejora

En la determinación de las áreas de mejora de la marginación y accesibilidad en su conjunto, se consideró la alta dependencia espacial que presenta la marginación en función de la accesibilidad vial. De esta forma, se establecieron 4 áreas prioritarias para mejorar la accesibilidad vial y la marginación: (ver mapa 27):

Mapa 27. Áreas prioritarias de atención de la Accesibilidad vial y Marginación



Fuente: Elaboración propia IMT, SCT e INEGI (2020), INEGI (2020a) e INE (2020)

Prioridad 1. En esta categoría se encontraron 91 secciones electorales (color rojo) que presentaron tendencia en grados bajos y muy bajos de accesibilidad, además de grados altos y muy altos de marginación. Esta prioridad se distribuyó en la periferia de la ZMT: (a) al norte, en los municipios de Toluca y Temoaya; (b) al suroccidente, en los municipios de Toluca, Zinacantepec, Calimaya y Tenango del Valle; (c) al occidente, en los municipios de Zinacantepec y Almoloya de Juárez; y, por último, (d) al nororiente en algunas secciones dispersas en los municipios de Lerma y Oztolotepec. Cabe destacar que estas áreas fueron

las más desfavorecidas, y representaron zonas con baja densidad poblacional que cubrieron el 14.39 % de la población de la ZMT para el año 2020.

Dentro de las posibles estrategias de mejora, se pueden considerar el mejoramiento de infraestructura vial existente, principalmente al suroccidente y occidente de la ZMT; así como mejorar la frecuencia y calidad de servicios de transporte público en la zona norte y nororiental. También son determinantes las implementaciones de estrategias que impacten lo menos posible a los ecosistemas bióticos y abióticos de la zona, ya que estas zonas cubren algunas áreas de protección ambiental.

Prioridad 2. En esta categoría se encontraron 94 secciones electorales que presentaron grados “muy bajos” y “bajos” de accesibilidad vial, además de grados “medios”, “bajos” y “muy bajos” de marginación, abarcando a una población del 18.81% del total de la ZMT (442 mil 863 habitantes). Estas zonas se distribuyeron dispersamente en varias secciones electorales de Toluca (49 secciones), Metepec (10 secciones), Zinacantepec (9 secciones), Lerma (9 secciones), Almoloya (4 secciones) y Otzolotepec (3 secciones), así como en la mayor parte del municipio de Calimaya (8 secciones), Chapultepec (1 sección) y Mexicaltzingo (1 sección).

Teniendo en cuenta los grados “bajos y muy bajos” de accesibilidad vial, se puede mejorar el estado de la infraestructura vial existente, y los tiempos y operatividad del transporte público, considerando que estas áreas están próximas (en su mayor parte) a las áreas de mayor densidad poblacional.

Prioridad 3. En esta categoría se encontraron 108 secciones electorales que tienden a presentar grados “medios”, “altos” y “muy altos” de accesibilidad vial, y grados entre “altos” y “muy altos” de marginación, cubriendo un 13.7% de la población de la ZMT. Estas secciones electorales se distribuyeron principalmente en la periferia de la ZMT, abarcando gran parte de los municipios de Almoloya de Juárez (30 secciones), Tenango del Valle (15 secciones), Temoaya (15 secciones), Otzolotepec (11 secciones), Zinacantepec (8 secciones); otras secciones electorales periféricas en los municipios de Xonacatlán (4 secciones), Lerma

(7 secciones), Ocoyoacac (3 secciones); y pequeñas secciones electorales dispersas al centro y norte de Toluca (14 secciones).

Las accesibilidades viales medias, altas y muy altas de estas áreas podrían tener su explicación en la ubicación de corredores regionales (entrada y salida a la ZMT) dentro de estas zonas (Toluca-Morelia, Toluca-Ciudad de Altamirano, Toluca-Ixtapan de Sal, Toluca-La Marquesa, Toluca-Atlacomulco y Toluca-Naucalpan), lo que reduce los tiempos de transporte en esas determinadas áreas. Sin embargo, presentan altas y muy altas marginaciones, considerando la falta de servicios a la población.

Dentro de las posibles estrategias de mejora en esta zona, se puede considerar el aprovechamiento de la infraestructura existente (alta accesibilidad vial) para el desarrollo de servicios atractores sobre las carreteras de entrada y salida regionales. Sin embargo, la baja densidad poblacional dificulta el desarrollo de proyectos de prestación de servicios y la sostenibilidad de estos en la zona. Otra estrategia podría ser la mejora de los tiempos de transporte hasta las áreas de prestación de servicios al interior de la ZMT, siendo necesario implementar proyectos alternativos de transporte como el tren, o teniendo una mejor cobertura de transporte en toda la zona metropolitana.

Prioridad 4. Por último, en esta categoría se ubicaron 414 secciones electorales que tienden a tener grados “medios”, “altos” y “muy altos” de accesibilidad vial, en conjunto con grados “medios”, “bajos” y “muy bajos” de marginación, las cuales se encuentran en situaciones más deseables que el resto de las áreas priorizadas.

Estas áreas presentaron la característica de estar distribuidas principalmente en las zonas con mayor densidad poblacional (52.9% de la población de la ZMT) y tener mayores ofertas de servicios sobre los corredores y vialidades principales, que conectan la zona desde Occidente a Oriente (desde Toluca-Morelia-Tlalcilalcalpan, pasando por Adolfo López Mateos, Tollocan, Las Torres, hasta Toluca-México-La Marquesa). A través de estos corredores urbanos y regionales se conectan las áreas urbanas de Zinacantepec, Toluca, Metepec, San Mateo de Atenco, Lerma y Ocoyoacac.

Adicionalmente, se encontraron otras secciones agrupadas al suroriente de la ZMT, en los municipios de Mexicaltzingo, Chapultepec, San Antonio de Isla y Tenango del Valle. Por último, se notaron secciones dispersas con mayor proximidad a las áreas urbanas de Otzolotepec, Xonacatlán y algunas secciones aledañas a la cabecera municipal de Almoloya de Juárez.

Dentro de las posibles estrategias de mejora en esta zona, se pueden considerar el mejoramiento de la calidad y operatividad del transporte público, el mejoramiento de espacios de estacionamiento, el mejoramiento del estado de las vialidades y la implementación de medios alternativos de transporte como el Tren Insurgente para reducir los tiempos de desplazamientos de la población, lo cual ayudaría a reducir la congestión generada por los grandes flujos de pasajeros que se generan en la zona.

Con respecto al tren interurbano, también es conveniente que los puntos de transferencia de pasajeros del tren Insurgente se integren adecuadamente con el sistema de transporte público para un mejor funcionamiento en la movilidad de la región.

Conclusiones

Con esta investigación, se planteó como objetivo determinar el grado de eficiencia de la red vial de transporte de la Zona Metropolitana de Toluca, buscando patrones espaciales y relaciones de dependencia entre la accesibilidad vial y la desigualdad social (medida a través de la marginación), determinando así áreas prioritarias para la mejora de la planeación del transporte y el desarrollo de la población.

Para ello, se abordaron diversos principios teóricos relacionados con la geografía del transporte, la teoría de redes y el principio de accesibilidad para determinar la eficiencia de la red (Rodrigue et al, 2013; Graizbord, 2008; Buzai y Baxendale, 2003; Madrid y Ortiz, 2005; y Seguí y Petrus, 1991); así como los aportes de CONAPO (2020), Mancino et al (2018), para establecer una medición de la desigualdad social a través de la marginación; y Santana (2009) y Anselin (1998), para analizar la existencia de patrones espaciales y la dependencia de las variables estudiadas (accesibilidad vial y marginación) a través de métodos de autocorrelación espacial.

La metodología aplicada partió de un enfoque cuantitativo a través del método hipotético deductivo, utilizando técnicas de análisis espacial a través del cálculo de indicadores. En primera instancia, se analizó el contexto de la zona metropolitana de Toluca, considerando indicadores socioeconómicos como la densidad poblacional, la tasa de crecimiento de la población y de las áreas urbanas en la región, así como la dinámica de unidades económicas y su efecto en la movilidad laboral.

Seguidamente, se analizó el contexto de la red de transporte en la ZMT, utilizando métricas de indicadores con base a la oferta y características de la infraestructura vial, como la densidad vial, conectividad, tiempos promedio de recorrido y accesibilidad vial. Adicionalmente, se determinó la medición de la desigualdad social a través de la marginación, considerando el método de valor del índice medio (VIM). Luego, se aplicaron métodos de autocorrelación espacial en las variables de accesibilidad y marginación para

analizar los patrones espaciales, determinando su nivel de dependencia. Por último, definieron las áreas prioritarias de mejora en la accesibilidad y marginación del territorio.

Dentro de los resultados obtenidos se identificaron varios hallazgos:

La estructura espacial de la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) ha experimentado un desarrollo industrial y comercial significativo, especialmente en Toluca, Lerma, Metepec, San Mateo de Atenco y Zinacantepec, lo que ha impulsado una mayor oferta vial para satisfacer la demanda de transporte. Sin embargo, entre 2009 y 2021, el crecimiento urbano ha sido disperso, superando al crecimiento poblacional y generando una dependencia del transporte automotor, lo que aumenta la presión sobre los sistemas de transporte en los municipios donde se concentran las actividades económicas de la región (Toluca, Metepec, Zinacantepec y Lerma).

Considerando lo anterior, la mayor parte de los desplazamientos laborales fueron soportados por las infraestructuras viales de transporte regional para la entrada y salida de la región, principalmente las carreteras México-Toluca (libre y de cuota) y Naucalpan-Toluca en dirección a la Ciudad de México. Por otro lado, se destacó el corredor metropolitano de la ZMT, conformado por el libramiento nororiente o autopista hacia Lerma y Tenango del valle, la cual permite paso rápido de vehículos alrededor de la región, sin congestionar aún más las zonas urbanas y las vialidades urbanas para el tráfico interno de la población, como es el caso del Paseo Tollocan, la avenida Adolfo López Mateos, el Boulevard Solidaridad Las Torres, la vía José López Portillo, Miguel Alemán Valdés y la vía Toluca-Almoloya.

El análisis de la densidad vial en la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) mostró mayores densidades en áreas centrales como Toluca y Metepec, pero el 94% del territorio sufre de insuficiencia vial, lo que genera saturación vial en el área estudiada. Aunque ciertas zonas presentan buena conectividad y alta accesibilidad, especialmente en corredores centrales, la red vial es deficiente, con problemas de congestión y mal estado de las vías, lo que incrementa los tiempos de traslado. Un análisis alternativo usando ArcGIS Online reflejó tiempos de transporte más realistas, entre 30 y 66 minutos.

Se identificaron clústeres de accesibilidad baja-baja en la región, a través del análisis LISA, ubicando estas áreas en la zona sur, suroccidental y noroccidental de la Zona Metropolitana de Toluca, los cuales fueron objeto de priorización para las áreas de mejora en la región.

Pese a lo anterior, el Gobierno del Estado de México ha mejorado la conectividad vial en la región, principalmente en dirección hacia la Zona Metropolitana del Valle de México. Sin embargo, enfrenta desafíos en el control del crecimiento urbano desorganizado y la planeación regional. En ese sentido, se adelantan proyectos alternativos de movilidad como el tren interurbano (El Insurgente) que sugieren ser una buena iniciativa para descongestionar los flujos carreteros regionales; sin embargo, esto dependerá en gran medida de los precios de transporte que se fijen y la capacidad económica de la población.

Por otro lado, la marginación en ZMT mostró niveles bajos y muy bajos en las zonas centrales, lo cual es favorable para la población. Sin embargo, al alejarse hacia la periferia, los niveles de marginación aumentan significativamente, identificándose como áreas prioritarias para su atención. Estos resultados confirman un patrón de aglomeración espacial, con un índice de Moran de 0.74 y la formación de clústeres bajo-bajo en zonas centrales y alto-alto en zonas periféricas de la región.

Como hallazgo final, se evidenció una relación de dependencia de la marginación con respecto a la accesibilidad vial a través del modelo de regresión espacial, arrojando un pseudo R^2 de 0.69. Lo que significa que la accesibilidad de la infraestructura vial puede ser un factor clave para explicar el comportamiento de la marginación en la región. De esta forma, entre mayor tienda a ser el grado de accesibilidad vial de un lugar, menor será el grado de marginación en ese mismo lugar.

Es de resaltar que la investigación desarrollada muestra similitud con estudios realizados en Argentina (Buzai y Baxendale, 2003; Mieres, 2004; Principi, 2012), quienes desarrollaron estudios con base a métricas de accesibilidad basadas en impedancias reales e ideales y la relación entre estas; por su parte, Condori et al (2016) de Perú; Belogi y Mera (2022) de Argentina; y otros estudios en México (CONAPO, IMT y CentroGeo, 2022; González et al., 2022; CONEVAL, 2018; García et al., 2017), desarrollaron métricas de accesibilidad de las

redes de transporte en un territorio con respecto a la separación de la población, además de comparar los resultados con indicadores socioeconómicos y desigualdad social, determinando así la incidencia de la accesibilidad en estos fenómenos.

Así mismo, autores como Godoy y Garnica (2012); Torres (2018) de Colombia; CONAPO (2016) y Hernández e Hinojosa (2018) de México, evaluaron la accesibilidad y eficiencia de la infraestructura vial en sus respectivos territorios, utilizando indicadores de transporte básicos como la densidad de la red, suficiencia vial, conectividad, tiempos de recorrido y accesibilidad vial para establecer relaciones funcionales con los servicios prestados a la población atendida y la importancia de la planeación del transporte en los territorios estudiados.

Los resultados obtenidos correspondieron con otros estudios a nivel nacional en cuanto a la importancia que representa la accesibilidad para la planeación de los sistemas de transportes y como factor de mejora para el desarrollo de la población (Villena, 2016), especialmente con variables que miden la desigualdad social de los territorios mediante la marginación. Como es el caso de Calonge (2016), quien mencionó que en las zonas no centrales de las áreas metropolitanas existen mayores carencias de servicios a la población y mayor desorganización del transporte. Además de Pineda (2010), quien concluyó que, a mayor accesibilidad territorial, con base a su cercanía con la infraestructura vial, son menores las desigualdades sociales y la marginación del territorio.

Sin embargo, de los antecedentes consultados, también se evidenciaron algunas diferencias con los métodos o metodologías implementadas, destacando algunos casos donde se aplicaron mediciones de la accesibilidad con base a la interacción espacial (Hernández e Hinojosa, 2018), y también se incluyeron variables adicionales para el cálculo de la accesibilidad como las pendientes del terreno, usos de suelo, disponibilidad del transporte público (CONEVAL, 2018), o simplemente se implementaron a escalas diferentes (rurales y nacionales) como CONAPO (2016), entre otras.

De la investigación realizada, se puede inferir que normalmente en las ciudades mexicanas y latinoamericanas, que tienden a evaluar el nivel de desarrollo de un territorio a través de

indicadores desigualdad, bienestar social y justicia espacial, las personas con menores ingresos y mayor marginación son las menos afortunadas, en una sociedad que tiende a vivir en zonas lejanas de las áreas de trabajo y en lugares de menor accesibilidad; en contraste con las personas más afortunadas, que tienden a vivir en las zonas más accesibles y cercanas de los trabajos.

En ese sentido, es necesario hacer más eficiente la red vial, mejorando la operatividad del transporte público de tal forma que la población cuente con un servicio bien regulado, seguro y confiable; incrementando así las posibilidades de mejorar el acceso a la prestación de servicios de la población más marginada.

Por otra parte, a medida que la población crece dispersamente, se tiende al uso del transporte particular automotor, lo que tiende a generar mayor congestión sobre las redes de transporte, reduciendo la accesibilidad en el territorio, y, por ende, incrementando los costos y tiempos de viaje para la población. Por lo anterior, es menester crear proyectos con sistemas de transporte alternativos, incentivando el cambio de la cultura poblacional sobre la dependencia del automóvil, ya que estos son menos eficientes en capacidad con respecto al transporte público.

Considerando las limitaciones de la investigación, este trabajo se podría beneficiar si se dispusiera de un sistema de información vial actualizado de la Zona Metropolitana de Toluca, de tal forma que contenga datos más precisos en cuanto a velocidades reales de desplazamiento, tiempos de transporte por vías, clasificaciones de la infraestructura vial con base en la funcionalidad (primaria, secundaria y terciaria), datos del estado de las vías, áreas de estacionamientos y capacidad, pendientes, topes, baches en las vías y otros elementos que retrasen los desplazamientos en la red de transporte. Adicionalmente, en el análisis no se considera la integración de la infraestructura férrea de pasajeros (Tren Insurgente) para la simulación de los tiempos de transporte y el cálculo de la accesibilidad vial y regional.

Para finalizar, se recomienda como trabajos futuros de investigación la medición integral de la accesibilidad vial en la ZMT, considerando la integración de los sistemas de transporte público metropolitano y el ferroviario (Tren Insurgente), de tal forma que se identifiquen

iniciativas de mejora para el desarrollo del territorio y la población más marginada. Otra propuesta para desarrollar es el análisis de accesibilidad a través de métodos diferentes, con base en la interacción espacial de la población, estudios de demanda del transporte, modelos de usos de suelo y transporte, la aplicación de la sintaxis espacial o redes complejas.

Referencias bibliográficas

- Adhvaryu, B., y Kumar, S. (2021). Public transport accessibility mapping and its policy applications: A case study of Lucknow, India. *Case Studies on Transport Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.08.001>
- Aguirre, M. (2018). Análisis espacial del crecimiento urbano de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, mediante sistemas de información geográfica. [Tesis de especialización en cartografía automatizada, teledetección y sistemas de información geográfica]. Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/106183/proyecto%20final%20Magaly%20-%20copia.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Allen, J. (2018). Mapping Inequalities of Access to Employment and Quantifying Transport Poverty in Canadian Cities. University of Toronto. [Tesis de Maestría Departamento de Geografía y Planeación]. Universidad de Toronto. https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/91390/3/Allen_Jeffrey_J_201811_MA_thesis.pdf
- Amézquita-López, J., Valdés-atencio, J., y Angulo-García, D. (2021). Understanding Traffic Congestion via Network Analysis, Agent Modeling, and the Trajectory of Urban Expansion: A Coastal City Case. <https://www.mdpi.com/2412-3811/6/6/85>
- Andrade, M., Campos, J., y Macías, M. (2018). Accesibilidad geográfica. Unidades de salud pública del municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. En V. Hernández y R. Ramírez (Eds.), *Dinámicas urbano-regionales y análisis espacial en el estudio del territorio*. (pp. 15–38). <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/105712>
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Anselin, L. (2005). *Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook*. Spatial Analysis Laboratory/University of Illinois, Urbana Champaign. <https://www.geos.ed.ac.uk/~gisteac/fspat/geodaworkbook.pdf>
- Anselin, L. y Rey, S. (2014). *Modern Spatial Econometrics in Practice: A Guide to GeoDa, GeoDaSpace and PySAL*. GeoDa Press LLC. <https://zlibrary.to/filedownload/modern-spatial-econometrics-in-practice-a-guide-to-geoda-geodaspace-and-pysal>
- Anselin, L. (2020). *Geoda. Una introducción a la ciencia de datos espaciales. Pesos Espaciales Basados En Contigüidad*. https://geodacenter.github.io/workbook/4a_contig_weights/lab4a.html

- Aparicio, R. (2004). Índice absoluto de marginación 1990-2000. Consejo Nacional de Población.
http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/indices_margina/marginabsoluto/IAM1990-2000_docprincipal.pdf
- Arias, S., y Correa, N. (2015). Aproximación teórica para el análisis de la accesibilidad del sistema de transporte como factor de desarrollo sustentable. *Revista Transporte y Territorio*, 13, 170–184. <https://www.redalyc.org/pdf/3330/333042522009.pdf>
- Axis Vial - Conservadora Mexiquense. (2023). Registros fotográficos del mantenimiento vial en la Zona Metropolitana de Toluca.
- Barrientos, M. (2007). *Network Analyst: El análisis de redes desde ArcGIS 9.2* (p. 140). Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
https://www.academia.edu/28515734/Network_Analyst_with_ArcGIS_9_2
- Batty, M. (2009). Accessibility: In search of a unified theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(2), 191–194. <https://doi.org/10.1068/b3602ed>
- Belogi, I., y Mera, G. (2022). Transport and Urban Territory: Accessibility Conditions in Greater Buenos Aires Agglomeration. *Revista INVI*, 37(105), 174–203.
<https://doi.org/10.5354/0718-8358.2022.63497>
- BID (2013). Definición de un sistema nacional de plataformas logísticas y plan de implementación para México. Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://sursureste.org.mx/sites/all/themes/fidesur/archivo/SistemaNacionaldePlataformasLogisticas.pdf>
- Borrego, J. (2018). Modelos de Regresión para datos espaciales. [Trabajo de Fin de Grado Departamento de Estadística e Investigación Aplicada]. Universidad de Sevilla.
<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/81660/Borrego%20S%C3%A1nchez%20Jos%C3%A9%20C%C3%81ngel%20TFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bosio, A., y Moreno, A. (2022). Análisis de la equidad espacial en la accesibilidad intraurbana a los equipamientos de salud y educación en Santa Fe de la Vera Cruz, Argentina. *Geografía Digital*, 19 (37), 3–27.
<https://revistas.unne.edu.ar/index.php/geo/article/viewFile/5833/5660>
- Bosque, J., Moreno, A., Fuenzalida, M., y Gómez, M. (2012). Sistemas de información geográfica y localización óptima de instalaciones y equipamientos (2a ed. Rdo). Paracuellos de Jarama: Ra-Ma. https://www.ra-ma.es/libro/sistemas-de-informacion-geografica-y-localizacion-optima-de-instalaciones-y-equipamientos_141905/

- Buzai, G., y Baxendale, C. (2003). Accesibilidad e interacción espacial. *Gerencia Ambiental*, 10 (95), 360. <https://www.researchgate.net/publication/237718474>
- Cadena, E. (2019). Método para la construcción de índices multidimensionales. Aplicación a la desigualdad social y comportamiento electoral en México. En G. Buzai y M. Santana (Eds.), *Métodos cuantitativos en Geografía Humana* (pp. 177–191). Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO). <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/105840/29%20M%C3%A9todo%20de%20c%C3%A1lculo%20de%20C3%ADndices%20multidimensionales.pdf?sequence=1>
- Cadena, E. (2021). La vulnerabilidad social en México: distribución espacial por sección electoral Social. *Economía, Sociedad y Territorio*, XXI (67), 893–917. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212021000300893&script=sci_arttext
- Cadena, E., y De la Rosa, J. (2019). Focalización de políticas públicas: insumos disponibles, limitaciones y retos. En J. De la Rosa y P. De León (Eds.), *Políticas Públicas con perspectiva territorial* (pp. 175–202). Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad de Lerma. <https://ulibros.com/politicas-publicas-con-perspectiva-territorial-e8uas.html>
- Cagmani, R. (2004). *Economía Urbana* (Antoni Bosch (ed.)). <https://www.amazon.com.mx/Economia-Urbana-Roberto-Camagni/dp/8495348136>
- Cal y Mayor, R., y Cárdenas, J. (2007). Sistema Vial. In *Ingeniería del Tránsito: Fundamentos y aplicaciones* (8th ed., pp. 103–120). AlfaOmega. https://www.sancristoballibros.com/libro/ingenieria-del-transito_75507
- Calonge, F. (2016). Usos de los medios de transporte y accesibilidad urbana. Un estudio de caso en el Área Metropolitana de Guadalajara, México. *Papeles de Geografía*, (62), 90–106. <https://doi.org/10.6018/geografia/2016/256351>
- Camberos, M., y Bracamontes, J. (2007). Marginación y políticas de desarrollo social: Un análisis regional para Sonora. *Problemas Del Desarrollo*, 38(149), 113–135. <https://www.scielo.org.mx/pdf/prode/v38n149/v38n149a6.pdf>
- CAME (2017). Programa de gestión federal para mejorar la calidad del aire de la Megalópolis 2017- 2030. PROAIRE de la Megalópolis. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno de Ciudad de México. [https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa de Gesti%C3%B3n Federal 2017-2030 final.pdf](https://framework-gb.cdn.gob.mx/data/institutos/semarnat/Programa%20de%20Gesti%C3%B3n%20Federal%202017-2030%20final.pdf)

- Caravaca, I., y Cruz, J. (1993). Crecimiento urbano y marginación social en Latinoamérica. Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles - AGE, 15–16, 133–157.
<https://idus.us.es/handle/11441/49728>
- Cárdenas, J. (2010). Cardenalización del índice de marginación: una metodología para evaluar la eficiencia del gasto ejercido en el Ramo 33. EconoQuantum, 7(1), 43–68.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-66222010000200002
- Cardozo, O., Gómez, E., y Parras, M. (2009). Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al Transporte Público de Pasajeros en Resistencia. Revista Transporte y Territorio No1, 89–111.
<http://repositorio.filo.uba.ar/handle/filodigital/2361>
- Celemín, J. P. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. Revista Universitaria de Geografía, 18, 11–31. <https://www.redalyc.org/pdf/3832/383239099001.pdf>
- Centro Mario Molina. (2014a). Documento de difusión Movilidad Sustentable Toluca.
<https://centromariomolina.org/estudio-del-sistema-integral-de-movilidad-sustentable-para-el-valle-de-toluca/>
- Centro Mario Molina. (2014b). Estudio del sistema integral de movilidad sustentable para el Valle de Toluca.
https://ieecc.edomex.gob.mx/sites/ieecc.edomex.gob.mx/files/files/Publicaciones_Históricas/4_Estudio_Movilidad_Sustentable/Estudio del Sistema Integral de Movilidad Sustentable para e.pdf
- Chiaradía, A., Cooper, C., y Wedderburn, M. (2013). Network geography and accessibility. 12th Transport Practitioners' Meeting. <https://sdna.cardiff.ac.uk/sdna/wp-content/ChiaradiaCooperWedderburnTPM2014.pdf>
- CONAPO. (2016). La condición de ubicación geográfica de las localidades menores a 2 500 habitantes en México. Consejo Nacional de Población.
<https://www.gob.mx/conapo/documentos/la-condicion-de-ubicacion-geografica-de-las-localidades-menores-a-2-500-habitantes-en-mexico>
- CONAPO. (2020). Metodología para el cálculo del índice de marginación urbana. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/828844/urbana.pdf>
- CONAPO. (2021). La marginación en México. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/conapo/acciones-y-programas/marginacion-en-mexico>
- CONAPO, IMT, y CentroGeo. (2022). Análisis geoespacial de la accesibilidad a centros urbanos de las localidades de México: Nota técnico-metodológica. En Consejo

Nacional de Población. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/analisis-geoespacial-de-la-accesibilidad-a-centros-urbanos-de-las-localidades-de-mexico>

- Condori, D., Mollinedo, R., Pary, D., y Mamany, R. (2016). Organización Espacial de la red de carreteras de la región de Puno mediante la teoría de grafos. *Ceprosimad*, 09(1), 15–25.
https://www.academia.edu/114167032/Organizaci%C3%B3n_Espacial_De_La_Red_De_Carreteras_De_La_Regi%C3%B3n_Puno_Mediante_La_Teor%C3%ADa_De_Grafos?uc-sb-sw=42633972
- CONEVAL. (2018). Grado de accesibilidad a carretera pavimentada. Gobierno de México. https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Documents/Accesibilidad_carretera/Documento_metodologico.pdf
- CONEVAL. (2020). Medición de la Pobreza. Índice de Rezago Social. Gobierno de México. https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Indice_Rezago_Social_2020.aspx
- Cooper, C., y Chiaradia, A. (2020). SoftwareX sDNA: 3-d spatial network analysis for GIS, CAD, Command Line y Python. *SoftwareX*, 12, 100525. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100525>
- Cortés, F., y Vargas, D. (2013). La dependencia temporal de la marginación municipal en México 1990-2010: una tercera mirada al índice de marginación. XXVIII Foro Nacional de Estadística, 20. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/eventos/2013/fne/P-FernandoCortesDV.pdf>
- Curtin, K. (2007). Network Analysis in Geographic Information Science: Review, Assessment, and Projections. *Cartography and Geographic Information Science*, 34(2), 103–111. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=45bb1558bf4bdd0baf027c2d145ce97f96a33d81>
- Curtis, C., Scheurer, J., y Mellor, R. (2012). Spatial Network Analysis for Multimodal Urban Transport Systems (SNAMUTS). *Accessibility Instruments for Planning Practice*, 49–55. https://www.researchgate.net/publication/228939466_Network_Analysis_in_Geographic_Information_Science_Review_Assessment_and_Projections
- De Corso, G., y Pinilla, M. (2017). Métodos gráficos de análisis exploratorio de datos espaciales con variables espacialmente distribuidas. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 13(25), 92–104. <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v13i25.2417>

- De la Peña, J. A. (2012). Sistemas de transporte en México: un análisis de centralidad en teoría de redes. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 3(3), 72–91.
https://rde.inegi.org.mx/RDE_07/Doctos/RDE_07_Art6.pdf
- De las Heras, D., y Cadena, E. (2022). Geografía del cáncer de mama y cervicouterino en la Megalópolis de México. *Investigaciones Geográficas*.
<https://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/60538/54398>
- Departamento Nacional de Planeación. (2020). Manual de Innovación. Movilidad y transporte. Programa POT modernos. [Documento técnico]. Colombia.
<https://portalterritorial.dnp.gov.co/KitOT/Content/uploads/Manual%20innovacion%20Movilidad%20y%20Transporte%20PDF.pdf>
- Dupuy, G. (1998). El urbanismo de las redes: Teorías y métodos (Arman Colin (ed.)). Oikos Tau SL. <https://es.scribd.com/document/244495107/DUPUY-El-urbanismo-y-las-redes-pdf>
- Escalera, C. (2022). Propuesta de definición y medición de la accesibilidad para la política Pública: Un análisis desde la percepción. (p. 187). Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000831897
- Escalona, A. (1989). Tendencias actuales de la Geografía del Transporte: el análisis de la movilidad. *Geographicalia*, 26, 83–90.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=59759>
- Escobar, D., y Urazán, C. (2014). Accesibilidad territorial: instrumento de planificación urbana y regional. *Revista Tecnura*, 241–253.
<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/8171/9824>
- ESRI. (2011). Algoritmos utilizados por ArcGIS Network Analyst extension.
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm>
- ESRI (2023). Plataforma de ArcGIS Online [Software]. Environmental Systems Research Institute. <https://www.arcgis.com/index.html>
- Etherington, T. R. (2012). Mapping organism spread potential by integrating dispersal and transportation processes using graph theory and catchment areas transportation processes using graph theory and catchment areas. *International Journal of Geographical Information Science* 26 (3), 541-556.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2011.598459>

- Ferreira, F., y Walton, M. (2004). Desigualdad en América Latina y el Caribe: ¿Rompiendo con la historia? Banco Mundial.
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/916491468046165704/pdf/348560958682541rica0Latinal10PUBLIC.pdf>
- Flores, E., Mora-Arias, E., Chica, J., y Balseca, M. (2022). Evaluación de la movilidad de estudiantes y accesibilidad espacial a centros de educación en zonas periurbanas. *Novasinerгия*, 5(1), 128–149. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2631-26542022000100128&script=sci_arttext
- Fuentes, C., y Hernández, V. (2015). La evolución espacial de los subcentros de empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua (1994-2004): un análisis con indicadores de autocorrelación espacial global y local. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 30(89), 433–467. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-72102015000200433&script=sci_abstract
- García, L. (1989). Metodología del índice de valor medio. *Investigaciones Geográficas*, 19, 69–87. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n19/n19a5.pdf>
- García, L., Mungaray, A., Calderón, J., y Sánchez, A. (2017). Impacto de la accesibilidad carretera en la calidad de vida de las localidades urbanas y suburbanas de Baja California, México. *Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales EURE*, 45(134), 99–123.
https://www.redalyc.org/journal/196/19657710005/html/#redalyc_19657710005_ref33
- García, R. (2022). In: Análisis de redes de calles: comparativo entre áreas metropolitanas de Sao Paulo y el Valle de México. En R. Jacobi, M. Federico, B. Ricárdez, P. Henrique, C. Torres, S. Zioni, y A. Venancio-Flores (Eds.), *Dilemas ambientais-urbanos em duas metrópoles latino americanas: São Paulo e Cidade do México no século XXI*. Org. Pedro (pp. 155–176). <https://www.pacolivros.com.br/dilemas-ambientais-urbanos>
- Garnica-Monroy, R. (2012). La accesibilidad como instrumento analítico para comprender la organización espacial de la Ciudad de México (p. 272). [Tesis de doctorado en Estudios Urbanos y Ambientales]. Colegio de México.
<https://repositorio.colmex.mx/concern/theses/9g54xh99r?locale=en>
- Garnica-Monroy, R. (2013). La planeación del transporte a partir de los principios de la conectividad y la accesibilidad espacial. *Memorias Del XVII Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano*, April 2013.
https://www.researchgate.net/publication/237423468_La_planeacion_del_transporte_a_partir_de_los_principios_de_la_conectividad_y_la_accesibilidad_espacial_El_caso_de_Tuxtla_Gutierrez_Chiapas

- Garrocho, C., y Campos, J. (2006). Un indicador de accesibilidad a unidades de servicios clave para ciudades mexicanas: fundamentos, diseño y aplicación. *Economía Sociedad y Territorio*, VI. <https://doi.org/10.22136/est002006262>
- Garrocho, C., y Campos, J. (2013). Réquiem por los indicadores no espaciales de segregación residencial. *Papeles de Población*, 19(77), 269–300. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11228794011>
- GEM (2005). Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca (pp. 1–100). http://seduv.edomexico.gob.mx/dgau/planes_regionales/prduvt/Doc%20PRDUVT.pdf
- GEM (2010). Norma Técnica de domicilios Geográficos del Estado de México. <https://consejogobiernodigital.edomex.gob.mx/sites/consejogobiernodigital.edomex.gob.mx/files/files/Estandares/Norma%20te%CC%81cnica%20sobre%20domicilios%20geogra%CC%81ficos%20del%20Estado%20de%20Me%CC%81xico.pdf>
- GEM (2018). Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Toluca 2018. Gobierno del Estado de México. https://sedui.edomex.gob.mx/sites/sedui.edomex.gob.mx/files/files/planes_municipales/Toluca/Docs/DOCUMENTO.pdf
- GEM (2019). Plan estatal de desarrollo urbano 2019-2023. Gobierno del Estado de México. https://sedui.edomex.gob.mx/sites/sedui.edomex.gob.mx/files/files/RE_PEDUEM_final2021.pdf
- GEM (2023). Reglamento de Tránsito del Estado de México (pp. 1–67). Gobierno del Estado de México. <https://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/rgl/vig/rglvig079.pdf>
- German-Soto, V. y Barajas, H. (2014). The Nexus between Infrastructure Investment and Economic Growth in the Mexican Urban Areas. *Moder Economy* (5), 1208-1220. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=52323>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2024). Generalidades del Proyecto Tren Insurgente. <https://www.obras.cdmx.gob.mx/proyectos/tren-interurbano-cdmx>
- Gobierno de México. (2020). Red Ferroviaria Nacional. <https://www.gob.mx/artf/documentos/mapas-del-sistema-ferroviario-mexicano>
- Godoy, R., y Garnica, R. (2012). Guía conceptual y metodológica para desarrollar el proceso de subregionalización: El caso del departamento del Atlántico. Universidad de Córdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/1890a53b-da1f-4606-8d05-d743419b80bb>

- González, A. (2019). Accesibilidad geográfica de los servicios de salud públicos y pobreza en la periferia sur de la Ciudad de México. [Tesis de Licenciatura en Geografía]. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/3473826>
- González, J., Backhoff, M., Morales, E., y Vázquez, J. (2022). Metodología para determinar la accesibilidad geográfica de las poblaciones de México (p. 70). Instituto Mexicano del Transporte. <https://imt.mx/download-archivo.html?l=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNpb25lcy9QdWJsaWNhY2lublRIY25pY2EvcHQ2OTgucGRm>
- González, S., y Larralde, A. (2019). La forma urbana actual de las zonas metropolitanas en México: indicadores y dimensiones morfológicas. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 34(100), 11–42.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102019000100011
- Goodchild, M., y Haining, R. (2005). SIG y análisis espacial de datos: perspectivas convergentes. *Investigaciones Regionales*, 6, 175- 201.
<https://www.redalyc.org/pdf/289/28900609.pdf>
- Graizbord, B. (2008). Geografía del transporte en el área metropolitana de la Ciudad de México (1era ed.). Colegio de México. <https://libros.colmex.mx/tienda/geografia-del-transporte-en-el-area-metropolitana-de-la-ciudad-de-mexico/>
- Granda, I., Rendón, J., Dewez, R., Rodríguez, M., Peña, M., Saraceno, P., y Ortiz, P. (2022). Infraestructura vial y MiPyMEs: un estudio de accesibilidad y nodos logísticos. En *Banco Interamericano de Desarrollo* 135 (4).
<https://publications.iadb.org/es/infraestructura-vial-y-mipymes-un-estudio-de-accesibilidad-y-nodos-logisticos>
- Gutiérrez-Pulido, H., y Gama-Hernández, V. (2010). Limitantes de los índices de marginación de CONAPO y propuesta para evaluar la marginación municipal en México. *Papeles de Población*, 16(66), 227-257.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252010000400008
- Hansz, M., Hernández, D., y Rubinstein, E. (2018). ¿Qué implica la accesibilidad en el diseño e implementación de políticas públicas urbanas?: Concepto, instrumentos para su evaluación y su rol en la planificación de la movilidad urbana.
https://webimages.iadb.org/publications/2019-01/Nota_Tecnica_14.12.18.pdf
- Harary, F. (1969). *Graph Theory*. Addison-Wesley Publishing Company.
<https://es.scribd.com/document/452842247/Graph-Theory-by-Harary>

- Heckmann, T., Schwanghart, W., y Phillips, J. D. (2015). Graph theory — Recent developments of its application in geomorphology. *Geomorphology*, 243, 130–146. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.12.024>
- Herger, N., y Sassera, J. (2018). Un acercamiento a la desigualdad socioeducativa en espacios locales. Estudio exploratorio sobre la distribución, la accesibilidad y las barreras a la educación de jóvenes y adultos en Berazategui. *Educación, Lenguaje y Sociedad*, XV (junio), 1–33. <http://dx.doi.org/10.19137/els-2018-151503>
- Hernández-Torres, J., Hernández-González, S., Jiménez-García, J. A., y Figueroa-Fernández, V. (2020). Análisis de la infraestructura de transporte aplicando redes complejas: red de avenidas de la ciudad de Celaya, Guanajuato. *Revista EIA*, 17(33). <https://doi.org/10.24050/reia.v17i33.1305>
- Hernández, V. (2012). Análisis exploratorio espacial de los accidentes de tránsito en Ciudad Juárez, México. *Rev. Panam Salud Publica*, 31(5), 396–402. <https://www.scielosp.org/pdf/rpsp/v31n5/a07v31n5.pdf>
- Hernández, V., y Chaparro, I. (2022). Desbordamientos espaciales del tiempo de traslado al trabajo asociados con la accesibilidad al empleo, valor catastral y carencias sociales en Ciudad Juárez, México. *Revista Transporte y Territorio*, 26, 206–230. <https://cathi.uacj.mx/handle/20.500.11961/23115>
- Hernández, V., y Hinojosa, R. (2018). Accesibilidad de la infraestructura carretera en Chihuahua, México. En V. Hernández y R. Ramírez (Eds.), *Dinámicas urbano-regionales y análisis espacial en el estudio del territorio*. (pp. 157–172). Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/99455?show=full>
- Higueras, A. (2003). *Teoría y Método de la Geografía*. Prensas Universitarias de Zaragoza. <https://puz.unizar.es/413-teoria-y-metodo-de-la-geografia-introduccion-al-analisis-geografico-regional.html>
- Hossain, A., y Cooper, C. (2021). Spatial network analysis as a tool for measuring change in accessibility over time: Limits of transport investment as a driver for UK regional development. *Growth and Change*, 52(April 2020), 2124–2148. <https://doi.org/10.1111/grow.12512>
- IMT, SCT e INEGI. (2020). Red nacional de caminos 2020 [Shape file]. <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>
- INE. (2020). Secciones electorales de México 2020 [Shape file]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/112099>

- INEGI. (2009). Usos del suelo y vegetación, escala 1:250.000. Serie IV. Continua nacional. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250ks4gw
- INEGI. (2010). Censo Nacional de Población y vivienda 2010. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- INEGI. (2013). Usos del suelo y vegetación, escala 1:250.000. Serie V. Continua nacional. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s5ugw
- INEGI. (2017). Usos del suelo y vegetación, escala 1:250.000. Serie VI. Continua nacional. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s6gw
- INEGI. (2018). Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, México SCIAN (p. 617). INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825099695.pdf
- INEGI. (2020a). Censo Nacional de Población y vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- INEGI. (2020b). Marco geoestadísticos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía 2020. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- INEGI. (2020c). Muestra censal del Censo Nacional de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#microdatos>
- INEGI. (2020d). Parque vehicular de Municipios de México. <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/#herramientas>
- INEGI. (2021). Usos del suelo y vegetación, escala 1:250.000. Serie VII. Continua nacional. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s7gw
- INEGI. (2022). Directorio estadístico Nacional de Unidades económicas - DENUÉ. <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/>
- Islas, V., Rivera, C., y Torres, G. (2002). Estudio de la demanda de transporte. Instituto Mexicano del Transporte. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt213.pdf>
- Jardon, J. (2014). Configuración policéntrica y jerarquía nodal de la zona metropolitana. [Tesis de licenciatura en Planeación Territorial]. Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/30920>

- Jiménez, F., y Torrecillas, C. (2020). Diseño de la Red Multimodal de Transporte de Sevilla mediante Network Analyst de ArcGIS. [Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil] Universidad de Sevilla. <https://idus.us.es/handle/11441/104477>
- LeSage, J. y Kelley, R. (2009). Introduction to Spatial econometrics. Taylor and Francis Group, LLC.
http://enistat.lecture.ub.ac.id/files/2013/02/James_LeSage_Robert_Kelley_Pace-Introduction_to_Spatial_Econometrics_Statistics_A_Series_of_Textbooks_and_Monographs-Chapman_and_Hall_CRC2009.pdf
- Liévanos, J. (2016). El papel del centro histórico de Toluca como centralidad en la Zona Metropolitana de Toluca desde una perspectiva histórica. [Tesis de maestría en Estudios de la Ciudad]. Universidad Autónoma del Estado de México.
<https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/58905>
- López-Escolano, C., y Pueyo-Campos, Á. (2019). Medidas básicas de accesibilidad territorial. Enfoques, evolución y utilidades. Bitácora Urbano Territorial, 29(3), 49–57. <https://www.redalyc.org/journal/748/74860961006/html/>
- López, H., y Plata, W. (2009). Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2000. Investigaciones Geográficas, 68, 85.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112009000100007
- López, L. (2015). Diccionario de Geografía aplicada y profesional: Terminología de análisis, planificación y gestión del territorio. Universidad de León.
https://www.uv.es/~javier/index_archivos/Diccionario_Geografia%20Aplicada.pdf
- Lotero, L., y Hurtado, G. (2014). Vulnerabilidad de redes complejas y aplicaciones al transporte urbano: Una revisión de la literatura. Revista EIA, 11(21), 67–78.
<https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/618>
- Lustig, N. (2020). Desigualdad y descontento social en América Latina. Nueva Sociedad, 286, 53–61. <https://biblat.unam.mx/hevila/Nuevasociedad/2020/no286/5.pdf>
- Madrid, S., y Ortiz, L. M. (2005). Las Redes: Graficación, estructura y funcionalidad. En Análisis y síntesis en cartografía: Algunos procedimientos (p. 170).
https://www.researchgate.net/publication/30757533_Analisis_y_sintesis_en_cartografia_Algunos_Procedimientos
- Mancino, M. (2019). Metodología de estimación de zonas inundables y su impacto socioeconómico en el Estado de México. [Tesis doctoral en Ciencias Ambientales]. Universidad Autónoma del Estado de México.
<https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/105468>

- Mancino, M., Adame Martínez, S., Cadena Vargas, E., y Hinojosa Reyes, R. (2018). Marginación y costos de inundación en el Estado de México, México. *Investigaciones Geográficas*, 69, 91. <https://doi.org/10.14198/ingeo2018.69.06>
- Mario, J., Henao, M., y Véliz, J. (2020). Segregación e inequidad en el acceso a servicios de educación, cultura y recreación en Bogotá. *Cuadernos de Geografía*, 29(1), 171–189. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.73395>.
- Masot, A., y Segovia, N. (2018). Análisis de la distribución espacial de equipamientos educativos (0 a 16 años) en Extremadura a escala de detalle. 493–520. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2549>
- Matus, J., Herrera, R., Atencio, E., y Pellicer, E. (2019). Análisis de conectividad vial para la planificación urbana: casos de estudios Valparaíso (Chile) y Valencia (España). 23rd International Congress on Project Management and Engineering Málaga, 10th – 12th July 2019 02-016, 29. http://dspace.aepro.com/xmlui/bitstream/handle/123456789/2392/AT02-016_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Merino, A. (2022). 100 puertos más importantes. Los pilares del comercio marítimo. El Mapa de Los Puertos Más Importantes Del Mundo. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/puertos-mas-importantes-mundo/>
- Mieres, A. (2004). Análisis de accesibilidad e interacción espacial a través del potencial dinámico: Su aplicación a los partidos de la Cuenca del río Luján. En G. Buzai (Ed.), *Geografía y sistemas de información geográfica: Aspectos conceptuales y aplicaciones* (pp. 603–651). Universidad Nacional de Lujan. Buenos Aires.
- Millán, M. (2018). La ciclovía como movilidad sustentable; una propuesta mediante el análisis espacial con geotecnologías, caso de estudio Zona Urbana de Toluca. [Tesis de licenciatura en Geografía]. Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/99443/MILLAN-LAGUNAS-MICHAEL-MC-MAEGI-2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Miller, E. (2020). Measuring Accessibility Methods and Issues. *International Transport Forum*, 24. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/245867/1/1772157937.pdf>
- Miller, H. (2004). Tobler's First Law and Spatial Analysis. *Annals of the Association of American Geographer*, 94(2), 284–289. <https://www.jstor.org/stable/3693985>
- Montoya, J. A., Escobar, D. A., y Moncada, C. A. (2019). Análisis de accesibilidad urbana a partir de intervenciones viales mediante sistemas de información geográfica. Caso de estudio, la malla vial del municipio de Quibdó, en Colombia. *Información Tecnológica*, 31(2), 19–30. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000200019>

- Morales-Hernández, R. (2015). Análisis regional de la marginación en el estado de Guerrero, México. *Papeles de Población*, 21(84), 251–274.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252015000200010
- Moreno, A., Buzai, G., y Fuenzalida, M. (2018). *Sistemas de información geográfica: Aplicaciones en diagnósticos territoriales y decisiones geoambientales*. Ra-Ma editorial; Ediciones de la U. https://www.ra-ma.es/libro/sistemas-de-informacion-geografica-aplicaciones-en-diagnosticos-territoriales-y-decisiones-geoambientales_48486/
- Moreno, R. y Vayá, E. (2000). *Técnicas econométricas para el tratamiento de datos espaciales: La econometría espacial*. Ediciones Universidad de Barcelona.
https://books.google.com.pe/books?id=Udh_wcm75GwC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false
- Moreno, R., y Vayá, E. (2002). *Econometría espacial: nuevas técnicas para el análisis regional. Una aplicación a las regiones europeas*. *Investigaciones Regionales*, 1, 83–106. <https://www.redalyc.org/pdf/289/28900104.pdf>
- Naranjo, J., y Gutiérrez, J. (2016). Estimación de la accesibilidad de las plataformas logísticas en la Península Ibérica tras la construcción de las nuevas plataformas en Badajoz y Caía. En A. Nieto Masot (Ed.), *Tecnologías de la información geográfica en el análisis espacial. Aplicaciones en los Sectores Público, Empresarial y Universitario*. (pp. 231–246). Junta de Extremadura.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5776242>
- Nava, J., y Pineda, F. (2010). *Marginación y accesibilidad en México 1990, 2000, 2005*. [Tesis de licenciatura en Planeación Territorial]. Universidad Autónoma del Estado de México. Biblioteca UAEMex. Clasificación local: LPT 39 .N383 2010
- Navarrete, E., Trujillo, A., Garrocho, C., y Cadena, E. (2020). Un enfoque de estadística espacial para explorar la geodemografía de los niños en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 35(2), 369–403.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/educm/v35n2/2448-6515-educm-35-02-369.pdf>
- Ortega, E. (2005). *Ubicación de la marginación en el área metropolitana de Monterrey*. Centro de Estudios Estratégicos, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey.
https://www.academia.edu/7117147/ubicacion_de_la_marginacion_en_el_area_metropolitana_de_monterrey
- Oyana, T. y Margai, F. (2016). *Spatial Analysis: Statistics, visualization and computational methods*. CRC Press. <https://vdoc.pub/download/spatial-analysis-statistics-visualization-and-computational-methods-6n86k6uod0m0>

- Palacios-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M., Casado-Izquierdo, J. M., Propin Frejomil, E., Delgado Campos, J., Velázquez Montes, A., Chías Becerril, L., y Ortiz Álvarez, M. (2004). Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio. Universidad Nacional Autónoma de México.
<https://www.researchgate.net/publication/288840782> Indicadores para la Caracterización y Ordenamiento del Territorio
- Peláez, O. (2017). La marginación a lo largo del tiempo: cálculo del Índice de Marginación Absoluta (IMA). *Economía, Teoría y Práctica*, 46, 115–137.
<https://www.scielo.org.mx/pdf/etp/n46/2448-7481-etp-46-00115.pdf>
- Peláez, O. (2023). El Índice de Marginación del CONAPO transformado en indicador cardinal: 50 años de marginación comparada en el tiempo. *EconoQuantum*, 20(1), 59–82. <https://www.scielo.org.mx/pdf/ecoqu/v20n1/2007-9869-ecoqu-20-01-59.pdf>
- Pineda, G. (2010). Accesibilidad territorial en el Estado de México: Un impacto en la desigualdad social 1990-2005. [Tesis de licenciatura en Planeación Territorial]. Universidad Autónoma del Estado de México. Biblioteca UAEMex. Clasificación local: LPT 39. P564 2010.
- Principi, N. (2012). Análisis de accesibilidad e interacción espacial: cálculos cuantitativos y representación cartográfica a escala regional Análisis espacial de la cuenca del río Luján View project. *Revista Digital Del Grupo de Estudios Sobre Geografía y Análisis Espacial Con Sistemas de Información*, 4, 23–38.
<https://www.researchgate.net/publication/313475488>
- Ramírez, R., y Rosales, R. (2023). Curso de Econometría Espacial. Instituto de Investigaciones Económicas. Universidad Nacional Autónoma de México- UNAM.
https://www.iiec.unam.mx/oferta_academica/cec/cursos/econometria-espacial
- Rodrigue, J.P., Comtois, C., y Slack, B. (2013). *The geography of transport systems*. Routledge. <https://pdfroom.com/books/the-geography-of-transport-systems/jN2R0a7RdvW>
- Rodríguez, J. (2018). Alta Desigualdad en América Latina: ¿desde cuándo y por qué? Munich Personal RePEc Archive, 87619. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/87619/1/MPRA_paper_87619.pdf
- Salonen, M., y Toivonen, T. (2013). Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport q. *Journal of Transport Geography*, 31, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.06.011>
- Sánchez, L. (2012). Alcances y límites de los métodos de análisis espacial para el estudio de la pobreza urbana. *Papeles de población*, 18(72), 147-180.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252012000200007&lng=es&tlng=es

- Sánchez, N. y Hernández, M. (2015). Configuración terciaria de la zona metropolitana de Toluca. *Bitácora Urbano Territorial*, 25(1), 57–66.
<https://www.redalyc.org/pdf/748/74841604007.pdf>
- Santana, G., y Aguilar, A. (2019). Método para autocorrelación espacial. Aplicación a la mortalidad por homicidios en el Estado de México. In *Métodos cuantitativos en Geografía Humana* (pp. 109–127). Instituto de Investigaciones Geográficas Universidad Nacional de Luján.
https://www.researchgate.net/publication/349849698_METODO_PARA_AUTOCO_RRELACION_ESPACIAL_Aplicacion_a_la_mortalidad_por_homicidios_en_el_Estado_de_Mexico
- Santana, G., Pineda, N., y Serrano, R. (2021). Análisis de conglomerados espaciotemporales de la neumonía en población vulnerable del Estado de México. *Personas y Sociedad*, 35 (1), 199–215.
<https://personaysociedad.uahurtado.cl/index.php/ps/article/view/344>
- Santana, M., Santana, G., Sánchez, C., Sánchez, R., y Ortega, R. (2020). Covid-19 en México: Asociación espacial de cara a la fase tres. *Revista Brasileira de Geografia Médica e Da Saúde*, 36–48. <https://doi.org/10.14393/Hygeia0054317>
- Saraví, G. (2020). Acumulación de desventajas en América Latina: aportes y desafíos para el estudio de la desigualdad. *Revista Latinoamericana de Población*, 14(27), 228–256. <https://www.redalyc.org/journal/3238/323862727009/html/>
- Scheurer, J., y Curtis, C. (2007). *Accessibility Measures: Overview and Practical Applications*. Urbanet Curtin University, 4.
http://wiki.dpi.inpe.br/lib/exe/fetch.php?media=ser300:wiki_pessoal_tatiana:overvie_w_and_practical_applications.pdf
- SCT. (2018). *Manual De Proyecto Geométrico De Carreteras 2018*. Secretaría De Comunicaciones y Transportes. <https://www.rosarito.gob.mx/ix-transparencia/archivo/2021-12/manual-del-proyecto-geometrico-de-carreteras.-2018.pdf>
- SCT. (2020). *Anuario Estadístico del Sector Comunicaciones y Transporte, 2020*. Secretaría De Comunicaciones y Transportes.
<http://www.sct.gob.mx/planeacion/estadistica/anuario-estadistico-sct/>
- SEDATU. (2019). *Manual de calles. Diseño vial para ciudades mexicanas*. Secretaría de Desarrollo Territorial y Urbano. Banco Interamericano de Desarrollo.

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/509173/Manual de calles 2019.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/509173/Manual_de_calles_2019.pdf)

- SEDATU, CONAPO e INEGI (2015). Delimitación de las zonas metropolitanas México 2015. Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU).
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825006792.pdf
- SEDESOL. (1994). Programa de asistencia técnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas. Dirección General de Ordenación del Territorio.
[https://www.academia.edu/28161390/subsecretaria de desarrollo urbano y ordenacion del territorio tomo xii manual de estudios de ingenier%c3%ada de tr%c3%a1nsito programa de asistencia tecnica en transporte urbano para las ciudades medias mexicanas manual normativo](https://www.academia.edu/28161390/subsecretaria_de_desarrollo_urbano_y_ordenacion_del_territorio_tomo_xii_manual_de_estudios_de_ingenier%c3%ada_de_tr%c3%a1nsito_programa_de_asistencia_tecnica_en_transporte_urbano_para_las_ciudades_medias_mexicanas_manual_normativo)
- SEDESOL. (2001). Vialidad Urbana. En Normativa Urbana de SEDESOL (pp. 1–26). Secretaría de Desarrollo Social. [http://cdam.unsis.edu.mx/files/Desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial/Otras disposiciones/Vialidad Cap 1.pdf](http://cdam.unsis.edu.mx/files/Desarrollo_Urbano_y_Ordenamiento_Territorial/Otras_disposiciones/Vialidad_Cap_1.pdf)
- Seguí, J., y Petrus, J. (1991). Geografía de redes y sistemas de transporte. SINTESIS S.A.
<https://es.scribd.com/document/369200176/Geografia-de-Redes-y-Sistemas-de-Transporte>
- Severino, E. (2011). La caracterización de la estructura del espacio urbano: Elementos de la “sintaxis del espacio.” En S. Escolano y J. Ortiz (Eds.), Sobre la medición del espacio urbano construido: aplicación a Santiago (Chile) y Zaragoza (España) (pp. 17–49). <https://www.academia.edu/53495079>
- Siabato, W., y Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. Cuadernos de Geografía, 28(1), 1–22.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/76919/html>
- SIPAT. (2007). Red de transporte público del sistema de información para la planeación y administración del transporte de la ciudad de Toluca. [Shape file]. Facultad de Ingeniería UAEMex.
- Talavera, R., y Valenzuela, L. (2012). La accesibilidad peatonal en la integración espacial de las paradas de transporte público. Bitácora Urbano Territorial, 21(2), 97–109.
<https://www.redalyc.org/pdf/748/74826255014.pdf>
- Talavera, R., y Valenzuela, L. (2014). Guía para el análisis de la accesibilidad espacial del transporte público: enfoque desde los sistemas de metro ligero.
<https://www.researchgate.net/publication/272394928>

- Torres, J. (2018). Organización espacial y funcional del área rural del municipio de Montería, departamento de Córdoba, Colombia: Bases para la planificación del espacio rural (corregimental). [Tesis de maestría]. Universidad de Córdoba.
- Torres, J., y Garnica, R. (2022). Estructuras y procesos espaciales del municipio de Montería en su contexto rural. *Facultad de Ciencias Básicas*, 2(1), 11–24.
<https://doi.org/10.21897/rfcb.v2i1.2996>
- Ubilla, G. (2017). Accesibilidad y conectividad geográfica en áreas rurales. Caso de la comuna de María Pinto, Chile. *Papeles de Geografía*.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40751261013>
- Valera, G. (2019). Análisis espacial de la infraestructura peatonal y cultura vial de la Ciudad de Toluca. En *Universidad Autónoma del Estado de México* 1 (1). Universidad Autónoma del Estado de México.
<http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/105783>
- Venancio Flores, A. (2016). Planificación y gestión del desarrollo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Un análisis desde la gobernanza, 2005.2012. Instituto de Administración Pública del Estado de México, A. C.
https://www.researchgate.net/publication/318379983_Planificacion_y_gestion_del_desarrollo_de_la_Zona_Metropolitana_del_Valle_de_Toluca_Un_analisis_desde_la_gobernanza_20052012
- Villena, J. (2016). Accesibilidad y desarrollo económico en la región Montaña de Guerrero, 1990-2010. [Tesis de maestría en Geografía]. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://132.248.9.195/ptd2016/noviembre/0753236/0753236.pdf>
- Waters, N. (2017). Tobler' s first law of geography. *La Enciclopedia Internacional de Geografía*, 1–13. <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg1011>
- Zakowska, L., Starowicz, W., y Pulawska, S. (2012). Geographic / Demographic Accessibility of Transport Infrastructure (GDATI). 139–143.
<https://www.accessibilityplanning.eu/uploads/pdf/14-GDATI-R.pdf>

ANEXO

Anexo 1. Matriz Origen – Destino de principales flujos de la Zona Metropolitana de Toluca, 2020

Origen / Destino	Azcapotzalco	Coyoacán	Cuajimalpa de Morelos	Iztapalapa	Álvaro Obregón	Tlalpan	Benito Juárez	Cuauhtémoc	Miguel Hidalgo
	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos
Toluca	17	116	533	63	603	98	38	175	128
Metepec	24	58	514	11	823	71	153	345	479
Zinacantepec	5	78	44	55	134	0	4	14	165
Lerma	280	307	3,223	146	2,061	171	647	851	1,957
Almoloya de Juárez	0	4	96	0	12	37	0	3	15
San Mateo Atenco	7	11	196	17	221	7	44	29	55
Temoaya	42	43	243	65	182	47	71	158	30
Otzolotepec	7	19	0	18	68	28	14	10	44
Calimaya	14	17	51	0	79	28	5	8	40
Tenango del Valle	0	0	4	40	16	0	4	10	57
Ocoyoacac	15	65	672	34	415	46	24	126	268
Xonacatlán	84	8	67	22	30	25	34	121	148
San Antonio la Isla	0	5	16	0	30	5	15	5	38
Chapultepec	0	4	48	6	9	3	10	14	21
Rayón	0	0	0	4	6	0	0	0	2
Mexicaltzingo	4	7	10	9	16	5	2	8	15

Origen / Destino	Almoloya de Juárez	Atacomulco	Calimaya	Chapultepec	Ecatepec de Morelos	Huixquilucan	Ixtlahuaca	Lerma	Metepec
	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos
Toluca	663	419	353	57	92	189	394	12,161	7,765
Metepec	158	74	377	110	53	140	147	5,918	
Zinacantepec	1,711	45	192	0	7	59	67	2,307	1,687
Lerma	62	161	63	51	62	897	38		1,989
Almoloya de Juárez		126	52	0	96	41	381	1,235	1,079
San Mateo Atenco	22	13	44	12	22	81	11	6,505	2,272
Temoaya	311	74	15	0	96	52	375	839	482
Otzolotepec	37	32	10	0	41	16	91	768	384
Calimaya	106	10		34	13	24	10	648	3,261
Tenango del Valle	32	20	288	36	8	47	0	281	1,142
Ocoyoacac	0	0	35	32	4	215	14	2,559	503
Xonacatlán	36	9	3	13	0	201	40	1,020	217
San Antonio la Isla	25	1	214	33	0	20	21	398	2,016
Chapultepec	19	6	63		3	3	3	299	763
Rayón	11	4	47	20	0	0	8	132	473
Mexicaltzingo	6	3	64	52	12	5	26	79	465

Origen / Destino	Mexicaltzingo	Naucalpan de Juárez	Ocoyoacac	Otzolotepec	Rayón	San Antonio la Isla	San Mateo Atenco	Temoaya	Tenancingo
	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos
Toluca	331	396	670	138	39	101	1,789	843	398
Metepec	218	213	399	123	0	167	1,797	95	114
Zinacantepec	27	122	104	0	0	21	64	161	84
Lerma	0	356	1,079	569	5	4	890	311	9
Almoloya de Juárez	3	170	34	25	0	49	250	189	30
San Mateo Atenco	35	76	292	33	16	16		33	11
Temoaya	28	215	40	509	0	0	107		12
Otzolotepec	0	101	10		0	0	16	211	11
Calimaya	142	57	45	9	156	406	84	9	94
Tenango del Valle	98	12	104	12	574	476	88	8	671
Ocoyoacac	5	92		120	0	0	396	8	4
Xonacatlán	4	794	42	445	0	0	33	145	5
San Antonio la Isla	157	31	15	1	384		76	18	63
Chapultepec	175	16	25	0	12	77	115	3	16
Rayón	41	5	0	0		387	36	5	44
Mexicaltzingo		29	16	1	8	35	40	5	15

Origen / Destino	Tenango del Valle	Tianguistenco	Tlalnepantla de Baz	Toluca	Valle de Bravo	Villa Guerrero	Villa Victoria	Xonacatlán	Zinacantepec
	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos	Desplazamientos
Toluca	258	300	438		252	56	361	757	1,636
Metepec	203	197	140	19,367	0	71	57	175	579
Zinacantepec	159	62	11	25,576	192	0	165	29	
Lerma	36	295	127	10,774	4	45	0	576	259
Almoleya de Juárez	68	31	0	19,008	99	6	129	66	1,022
San Mateo Atenco	103	179	23	4,733	22	0	4	38	48
Temoaya	19	69	25	9,956	34	0	60	435	108
Otzolotepec	0	21	52	9,915	10	0	10	929	86
Calimaya	433	305	88	5,594	5	57	14	16	122
Tenango del Valle		1,041	43	3,383	13	1,197	24	8	55
Ocoyoacac	27	644	36	2,203	3	4	9	41	19
Xonacatlán	15	3	46	5,049	37	0	18		6
San Antonio la Isla	431	195	0	2,724	0	10	11	11	20
Chapultepec	46	237	6	940	0	4	0	2	17
Rayón	446	197	0	1,003	0	10	0	6	14
Mexicaltzingo	55	94	7	961	8	5	2	7	18

Fuente: Elaborado por autor con base en INEGI (2020c)

