

La concentración de la intermediación y la congestión vehicular en zonas metropolitanas de México

The concentration of betweenness and traffic congestion in Mexican metropolitan areas


JUAN ANTONIO PICHARDO CORPUS

El Colegio de la Frontera Norte

Departamento de Estudios Urbanos y del Medio Ambiente

Tijuana, Baja California, México

 <https://orcid.org/0000-0002-9553-128X>

 jpichardo@colef.mx

Resumen. Este artículo presenta un análisis de la concentración de la intermediación en las redes de vialidades de las zonas metropolitanas de México y su impacto en la congestión vehicular. Se muestra que el tamaño de la red y su casi planaridad determinan la proporción de aristas (calles) que concentran la mayor parte de la intermediación de la red. Esta proporción explica entre el 50 y el 70% de la varianza en la cantidad de horas perdidas debido a la congestión. Los resultados indican que es casi imposible disminuir significativamente los niveles de congestión modificando la conectividad localmente, como la creación de puentes o pasos a desnivel. Esto fortalece las propuestas de invertir en transporte público masivo y en infraestructura para la movilidad activa, así como en el desarrollo de ciudades con mezclas de usos de suelo que eviten los desplazamientos largos.

Palabras clave: medidas de centralidad, redes de calles, intermediación de aristas, redes de intermediación concentrada.

Abstract. This article explores the relationship between congestion and the betweenness concentration of street networks in Mexican metropolitan areas. The analysis shows that the size of the network and its quasi-planarity determine the edges' proportion, which concentrates most of the network betweenness. This edge proportion explains 50 and 70% of the variation in the number of hours lost due to congestion. The results indicate that it is almost impossible to significantly reduce congestion levels by widening streets and creating bridges or overpasses. This implication strengthens the proposals to invest in mass transit, alternative means to motorized transport, and to develop cities with a mix of land uses that avoid long commutes.

Keywords: centrality measures, street networks, edge betweenness, betweenness-concentrated networks.

Introducción

Desde la perspectiva sistémica, las redes de vialidades se pueden entender como el esqueleto de una ciudad o zona metropolitana, el cual es un determinante para diversos fenómenos urbanos, como la distribución espacial de actividades económicas (Porta et al., 2009; 2012), los patrones estructurales en la evolución de las ciudades (Barthelemy et al., 2013; Kirkley et al., 2018) o la congestión vehicular (Choi y Ewing, 2021; Loder et al., 2019).

Una de las maneras más comunes de analizar una red vial es su representación como una gráfica (o grafo), en la cual las intersecciones entre las vialidades son los nodos o vértices y las calles los enlaces o aristas (Barthelemy, 2022; Diestel, 2017). Tanto a los vértices como a las aristas se les pueden asociar un conjunto de medidas de centralidad; en el caso de las redes de vialidades, la cercanía y la intermediación son de las medidas que más se han estudiado, ya que cuantifican el valor de un nodo o arista para conectar diversas partes de la red (Barthelemy, 2022).

Una representación diferente de las redes de vialidades aparece en el modelo Space Syntax (Hillier, 2002), donde la red vial se transforma en un mapa axial y a partir de éste se construye una red dual que se utiliza para realizar los cálculos necesarios. Aunque con este modelo se han obtenido resultados satisfactorios tanto en investigación como en programas de intervención urbana (Porta et al., 2009), en el análisis de la centralidad y su relación con varios fenómenos urbanos la representación directa de la red es la más adecuada (Crucitti et al., 2006). Esto se debe a que en la red dual una línea está representada por un vértice o nodo y no es posible identificar variaciones a lo largo de esa línea, aunque ésta se cruce con otras. Esas variaciones son importantes para el cálculo de varias medidas de centralidad, como la intermediación.

En los primeros análisis de la intermediación de las aristas de las redes de vialidades se pensó que, entre más grande era el valor de la intermediación de una calle o vialidad, mayor sería su congestión (Lämmner et al., 2006). Actualmente se sabe que tal asociación no es directa: la intermediación no es suficiente para explicar los niveles de congestión de una vialidad, pero agregando información adicional a la estructura combinatoria de la red es posible predecir la congestión a nivel de una calle o avenida (Gao et al., 2013; Kazerani y Winter, 2009). Por otra parte, la intermediación promedio de una red vial sí es un determinante en los niveles de congestión de una ciudad (Loder et al., 2019); esto se explica en parte porque la intermediación promedio determina la tasa de entrada de vehículos en la red (Lampo et al., 2021). En este sentido, se puede decir que la intermediación tiene el potencial de identificar la congestión a escala de ciudad, pero es limitada a nivel de una vialidad.

Por su parte, la congestión vehicular es un tema de investigación central en los estudios urbanos, en los que, desde hace décadas, existen esfuerzos para reducir los niveles de congestión de las ciudades (Sevtsuk y Davis, 2019). En principio, por su impacto en la movilidad cotidiana, ya que en las ciudades con problemas de congestión la gente suele

invertir mucho tiempo en sus desplazamientos (Daude et al., 2017). Luego, ese tiempo perdido tiene impactos económicos, esto es, hay un costo que suele asociarse con la llamada *deseconomía* (Çolak et al., 2016; Imco, 2019; Louf y Barthelemy, 2014). Aunado a ello, posiblemente el problema más apremiante relacionado con la congestión es su impacto en la contaminación atmosférica y en particular en la calidad del aire de las zonas urbanas, lo que remarca la importancia de este tópico en los estudios urbanos (Bedoya-Maya et al., 2022; Zhang y Batterman, 2013).

Es natural pensar que entre más grande es una ciudad, más congestión se genera. Además, el tamaño de la ciudad está asociado con el crecimiento poblacional, entonces se puede suponer que hay una relación entre el tamaño de la población y la congestión. Esta suposición fue evaluada en 97 áreas urbanas de Estados Unidos (Louf y Barthelemy, 2014), y se encontró una relación de ley de potencia entre el tamaño de la población y el tiempo perdido debido a la congestión. Cabe señalar que el exponente en la ley de potencia fue mayor a uno, lo cual implica que conforme crece la población, la congestión aumenta a una tasa mayor que si se tuviese una relación lineal. Aunque este modelo es más o menos general, hay un supuesto importante: los autos particulares son el principal medio de transporte en los viajes cotidianos. Esta suposición no se cumple en las ciudades latinoamericanas, en las cuales el transporte público es el principal medio de transporte (Daude et al., 2017). En estas urbes hay otras variables que explican la congestión, además de la utilización del automóvil, como los usos de suelo, la infraestructura del transporte público y la estructura de las redes de vialidades.

La intermediación de las redes de vialidades explica una parte de la congestión. En concreto, la concentración de la intermediación permite identificar la congestión como una propiedad emergente asociada al tamaño de la red y al espacio bidimensional (Pichardo-Corpus, 2023). Ésta es la base del concepto de red de intermediación concentrada, donde un porcentaje alto del total de la intermediación ($\approx 90\%$) está contenido en un porcentaje pequeño de las aristas ($\approx 30\%$). Cuando las ciudades son pequeñas normalmente su red vial no es de intermediación concentrada, pero a medida que la ciudad crece, la red se vuelve de intermediación concentrada y emerge la congestión. Una consecuencia para la movilidad cotidiana es que las ciudades con redes de intermediación concentrada tienen la gran mayoría de los caminos más cortos, entre dos lugares cualesquiera, pasando por menos de una tercera parte del total de calles. En efecto, las ciudades con los niveles más altos de congestión a nivel mundial tienen redes de intermediación concentrada (Pichardo-Corpus, 2023).

En este trabajo se retoma el concepto de red de intermediación concentrada para analizar las redes de vialidades de las 74 zonas metropolitanas de México y su relación con el tiempo perdido debido a la congestión (Imco, 2019; INRIX, 2021). En general, las ciudades latinoamericanas han estado ausentes de este tipo de análisis, salvo algunas que, por su tamaño, suelen aparecer en diversos *rankings*, como la Ciudad de México, São Paulo, Buenos Aires, Bogotá, entre otras. Esto se explica, en parte, por la dificultad de

generar datos confiables y completos para ciudades medias y pequeñas, así como por las limitantes de cómputo que se tenían hasta hace algunos años para llevar a cabo ese tipo de análisis.

La hipótesis fundamental es que las redes de vialidades determinadas por polígonos de la división geopolítica de las zonas metropolitanas son suficientes para asociar el concepto de red de intermediación concentrada con la congestión de la zona metropolitana. Es decir, que sin tener determinadas las áreas de viajes cotidianos, es posible identificar umbrales de congestión con base en el tamaño y la estructura combinatoria de la red vial. Esto es de vital importancia para regiones y ciudades que carecen de información sobre los viajes cotidianos y requieren de alguna aproximación de la relación entre el tamaño de la ciudad, la estructura de la red vial y la congestión. Por supuesto, la diversidad en las opciones de movilidad, tanto de transporte público como de movilidad activa, juegan un papel fundamental para paliar la congestión, pero conocer el rol de la estructura de la red en la congestión permitirá avanzar hacia medios y modelos de transporte óptimos, tanto en tiempo de traslado como en impacto ambiental.

Para obtener las redes de vialidades se usaron los polígonos que definen cada una de las 74 zonas metropolitanas (Sedatu et al., 2018). Las redes fueron descargadas de Open Street Maps (OSM) mediante la librería OSMX de Python (Boeing, 2017). Sobre estas redes se realizaron los cálculos de la intermediación de las aristas, lo cual permitió identificar aquellas de intermediación concentrada. Luego, se emplearon estos resultados para obtener las correlaciones con las horas perdidas debido a la congestión (Imco, 2019; INRIX, 2021).

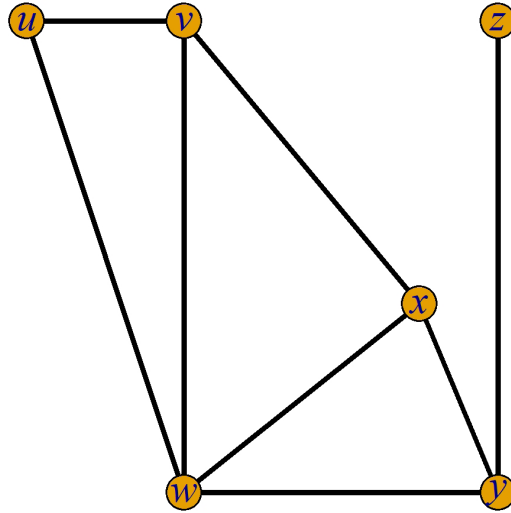
El resto del artículo está dividido en cuatro secciones. La primera contiene los conceptos básicos para presentar la definición de red de intermediación concentrada. En la segunda se desarrollan los detalles de la obtención de los datos y la descripción de los métodos empleados. Los principales hallazgos y su relación con otros estudios se muestran en la tercera sección. Y la última corresponde a las conclusiones.

1. Nociones preliminares

Una red se puede representar matemáticamente como una gráfica $G = (V, E)$, donde V es el conjunto de vértices o nodos y E el conjunto de enlaces o aristas. En el caso de las redes de vialidades, los vértices son las intersecciones entre las vialidades, y las aristas las calles o la parte de la vialidad entre cada intersección. En el resto de este artículo se hará referencia a red o gráfica indistintamente. El número de vértices (resp. aristas) de una gráfica se denotará por n_G (m_G) o simplemente $n(m)$ si es claro a qué gráfica se hace referencia.

Para presentar la definición de intermediación se requiere el concepto de camino y distancia entre vértices. Un camino es una secuencia de vértices distintos, tal que para cada par de vértices consecutivos hay una arista que los conecta. Por ejemplo, en la red

Figura 1
Red de referencia con seis vértices y ocho aristas

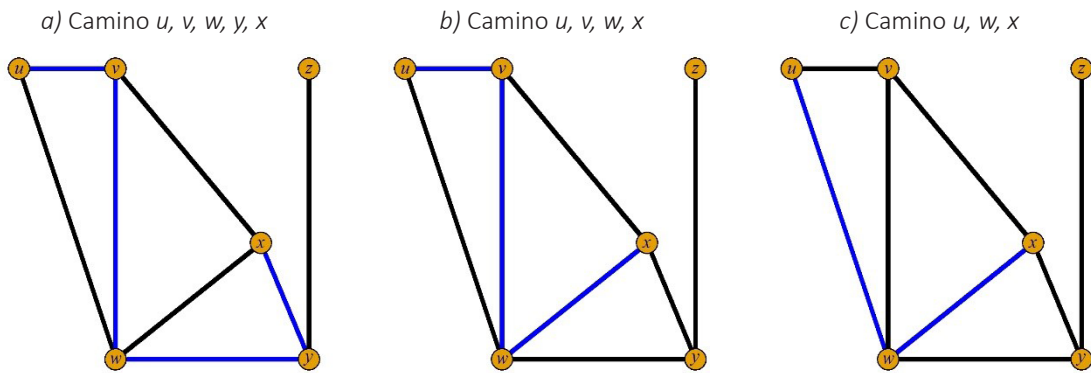


Fuente: Elaboración propia.

de la Figura 1, la secuencia u, w, y, z es un camino que va del vértice u al vértice z , pero la secuencia u, v, x, z no es un camino porque no hay una arista que una el vértice x con el vértice z ; de manera similar, la secuencia v, w, x, y, w tampoco es un camino porque se repite el vértice w .

Por supuesto, puede haber más de un camino entre dos vértices, como se muestra en la Figura 2, donde se han representado tres caminos distintos entre el vértice u y el vértice x . Está claro que cada camino pasa por una cantidad distinta de aristas: el primero pasa por cuatro, el segundo por tres y el último sólo por dos. La cantidad de aristas que com-

Figura 2
Ejemplo de caminos distintos entre el vértice u y x



Fuente: Elaboración propia.

ponen el camino es la longitud del camino. Entonces, se puede hablar del camino más corto entre dos vértices. En el ejemplo de la Figura 2, el camino más corto entre u y x es el u, w, x , es decir, el camino de longitud dos. Además, no sólo puede haber más de un camino entre dos vértices, incluso puede haber dos caminos más cortos; por ejemplo, otro camino más corto entre los vértices u y x es el u, v, x , que también es de longitud dos.

Con base en los caminos se define la distancia entre dos vértices, como la longitud del camino más corto entre ellos. De esta manera, la distancia entre el vértice u y v es uno, entre u y w también es uno, entre u y x es dos, entre u e y también es dos, mientras que entre u y z es tres. También se puede definir la distancia cuando las aristas tienen pesos; en el caso de las redes de vialidades, los pesos más comunes son las distancias euclidianas entre las intersecciones, pero para los fines de este trabajo es suficiente con considerar la distancia que se ha presentado.

A partir de las nociones expuestas se define la centralidad de intermediación. Ésta fue introducida inicialmente para los nodos (Freeman, 1977), aunque desde hace dos décadas se ha estudiado la intermediación de aristas (Girvan y Newman, 2002). La centralidad de intermediación de un vértice es la proporción de caminos más cortos que pasan por él; de manera similar, la intermediación de una arista es la proporción de caminos más cortos que pasan por esa arista. Así, la intermediación de una arista se calcula como se expresa en la fórmula 1.

$$b(e) = \sum_{u \neq v \in V} \frac{\sigma_{uv}(e)}{\sigma_{uv}}, \tag{1}$$

donde σ_{uv} es el total de caminos más cortos entre los vértices u y v , mientras que $\sigma_{uv}(e)$ es el número de esos caminos que pasan por la arista e . Por otra parte, a la suma de las intermediaciones de todas las aristas se le llamará la intermediación de la gráfica y se denota como en la fórmula 2.

$$B_G = \sum_{e \in E} b(e). \tag{2}$$

Como ejemplo, en el Cuadro 1 se muestra el cálculo de la intermediación de la arista $v - x$ de la red de referencia. En la primera columna se presentan todas las parejas de vértices de la red; en la segunda, la cantidad de caminos más cortos que hay entre cada par de vértices; en la tercera columna está la cantidad de estos caminos más cortos que pasan por la arista $v - x$, y en la última está la proporción de caminos más cortos de cada par que pasa por $v - x$. Por ejemplo, hay dos caminos más cortos entre el par u y x , pero sólo uno de ellos pasa por la arista $v - x$, por lo que la proporción es 0.5. Finalmente, la suma de las proporciones es igual a la intermediación de la arista.

El resto de los valores de intermediación de las aristas de la red de referencia se muestra en la Figura 3, donde el grosor de las aristas es proporcional a dichos valores. En este ejemplo, las aristas $y - w$ y $z - y$ comparten el valor más grande, mientras que $u - v$ y $w - x$

Cuadro 1

Ejemplo del cálculo de la intermediación de la arista $v - x$ de la red de referencia

<i>Pares de vértices</i>	<i>Caminos más cortos</i>	<i>Caminos que pasan por $v - x$</i>	<i>Proporción</i>
u, v	1	0	0
u, w	1	0	0
u, x	2	1	0.5
u, y	1	0	0
u, z	1	0	0
v, x	1	1	1
v, w	1	0	0
v, y	2	1	0.5
v, z	2	1	0.5
w, x	1	0	0
w, y	1	0	0
w, z	1	0	0
x, y	1	0	0
x, z	1	0	0
y, z	1	0	0
Suma de proporciones			2.5

Fuente: Elaboración propia.

el más pequeño. En este caso, la intermediación de la red (B_G) es igual a 24, ya que es la suma de las intermediaciones de las aristas.

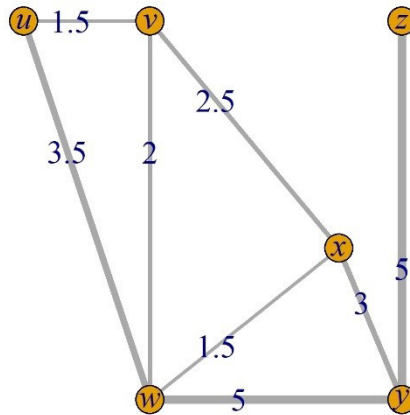
En principio se podría usar la intermediación de los vértices en lugar de las aristas, pero la centralidad de intermediación de los vértices depende de la intermediación de las aristas (Barthelemy, 2022, p. 71), y más importante aún, las aristas generan ciclos asociados a patrones de movilidad y congestión (Lion y Barthelemy, 2017; Pichardo-Corpus, 2023).

Una vez que se tienen los valores de intermediación de las aristas, se calcula qué proporción de aristas contiene el 90% de B_G . Para ello, se representa cada arista por un número natural entre 1 y m , enseguida se ordenan los valores de intermediación de mayor a menor, $b(1) \geq b(2) \geq \dots \geq b(m)$. Luego, se toman los primeros k valores, de tal manera que la suma de éstos sea mayor o igual al 90% de B_G . Formalmente se realiza un procedimiento recursivo hasta obtener el primer k que cumple con la desigualdad en la fórmula 3.

$$\sum_{e=1}^k b(e) \geq \frac{9}{10} B_G. \tag{3}$$

Figura 3

Red de referencia con el grosor de las aristas proporcional a los valores de la intermediación (en azul) de cada arista



Fuente: Elaboración propia.

Entonces, la proporción de aristas $P_G = k/m$ es un indicador de la concentración de la intermediación en la red G . Para la red de referencia, los primeros cuatro valores suman el 79% de B_G , los primeros cinco el 87.5%, y los primeros siete el 93.7%; en este caso $k = 7$, es decir, que $\frac{k}{m} = \frac{7}{8}$, de esta manera el 87.5% de las aristas contiene al 93.7% del total de la intermediación. Esta relación es la esperada en una red pequeña donde no hay ninguna variable que origine una concentración de la intermediación en algún subconjunto más pequeño de aristas. Sin embargo, en una red plana o casi plana como las redes viales, conforme la red empieza a crecer se genera concentración de la intermediación, como se muestra a continuación.

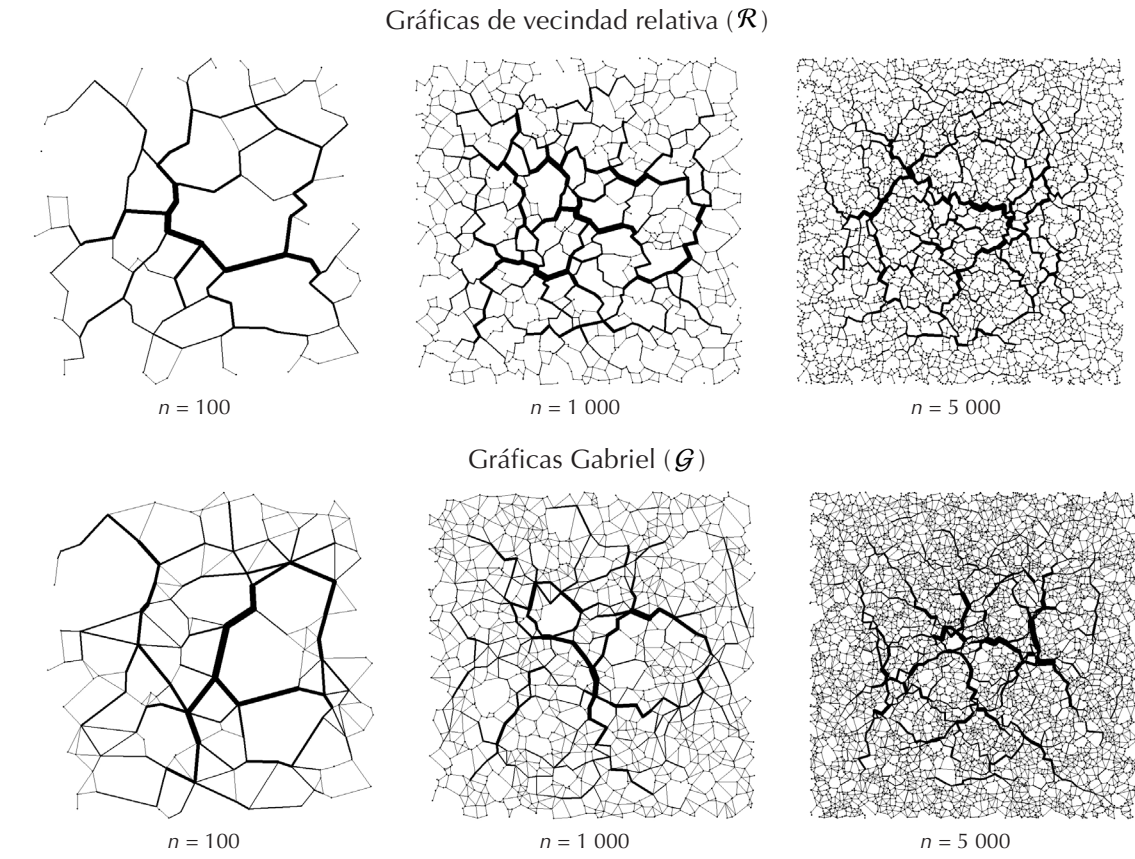
Para ejemplificar el proceso de la concentración de la intermediación se consideran dos tipos de redes planas: gráficas de vecindad relativa y gráficas Gabriel (Radke y Flodmark, 1999), las cuáles se denotarán por \mathcal{R} y \mathcal{G} , respectivamente. Se seleccionaron las redes \mathcal{R} y \mathcal{G} porque el patrón en los valores de P_G es el mismo que en las redes de vialidades, esto es, conforme la red crece, aumenta el número de nodos, y el valor de P_G disminuye (Pichardo-Corpus, 2023). Esta disminución no depende de la densidad de aristas en la red, ya que en las redes \mathcal{R} y \mathcal{G} la densidad es constante, sino de la restricción de la red al espacio bidimensional.

En la Figura 4 se muestran tres redes de cada tipo, de distintos tamaños: la primera con cien vértices, la segunda con mil y la tercera con cinco mil. Estas redes se denotan por $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}_3$, y $\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \mathcal{G}_3$, respectivamente.

Las redes \mathcal{R} de la Figura 4 tienen valores $P_{\mathcal{R}_1} = 0.66$, $P_{\mathcal{R}_2} = 0.56$ y $P_{\mathcal{R}_3} = 0.45$, mientras que los valores de las redes \mathcal{G} son $P_{\mathcal{G}_1} = 0.63$, $P_{\mathcal{G}_2} = 0.48$ y $P_{\mathcal{G}_3} = 0.34$. Este patrón es

Figura 4

Gráficas planas con el grosor de aristas proporcional a la intermediación



Fuente: Elaboración propia.

el que se ha observado en redes viales de ciudades como París (Francia) y Tijuana (México); en concreto, para las redes de París los valores pasaron de 0.52 a 0.28 en poco más de 200 años, mientras que para las de Tijuana se tuvo un cambio de 0.61 a 0.2 en 75 años (Pichardo-Corpus, 2023). La diferencia en el tiempo de evolución de las redes de esas ciudades muestra que lo más importante para la concentración de la intermediación es el tamaño y la restricción espacial, ya que ambas ciudades tienen tamaño y concentración similares, pero Tijuana llegó a esos números en un tercio de lo que le llevó a París.

Ésa es la idea central de la definición de gráfica de intermediación concentrada: conforme una red crece, la intermediación se concentra en una proporción cada vez más pequeña de aristas (Pichardo-Corpus, 2023); es decir, una red de intermediación concentrada es el resultado de un proceso evolutivo de la red, que aumenta su tamaño en un espacio restringido al plano.

En general, se puede definir P_G como una función $P_G(x)$, donde x representa una proporción de B_G , entonces se dice que una red es de intermediación concentrada cuando

$P_G(x) \leq \frac{x}{3}$. El valor $\frac{1}{3}$ se obtiene de un análisis de la concentración de la intermediación en redes tipo árbol, en las que un tercio de las aristas capturan toda la intermediación cuando la cantidad de nodos es grande, por ello se usa como un caso límite (Pichardo-Corpus, 2023). Además, las variaciones importantes de $P_G(x)$ ocurren en el intervalo $0.9 \leq x \leq 0.93$. En particular, para analizar la correlación de $P_G(x)$ con la congestión, el valor $x = 0.9$ tuvo el mejor equilibrio entre identificar todas las redes como altamente congestionadas y casi ninguna (Pichardo-Corpus, 2023). Entonces, se fija $x = 0.9$, y como $\frac{0.9}{3} = 0.3$, la definición se operacionaliza de la siguiente manera: una red vial es de intermediación concentrada cuando $P_G \leq 0.3$. El término *red vial de intermediación concentrada* se abreviará como *red IC*.

Un último apunte sobre la representación de las redes de vialidades como gráficas. En general, las redes de vialidades son dirigidas, ya que las calles tienen un sentido para circular; a estas gráficas se les llama digráficas y, como se mencionó, pueden tener pesos con lo que se tendría una digráfica pesada. En algunos casos existe más de una arista entre un vértice y otro, cuando esto sucede se tiene una multigráfica o multidigráfica. Para los fines de este trabajo es suficiente con considerar las redes de vialidades como gráficas sin direcciones y sin pesos, debido a que los patrones de la intermediación que se analizan aquí no varían significativamente con esta elección (Barthelemy et al., 2013; Kirkley et al., 2018; Pichardo-Corpus, 2023).

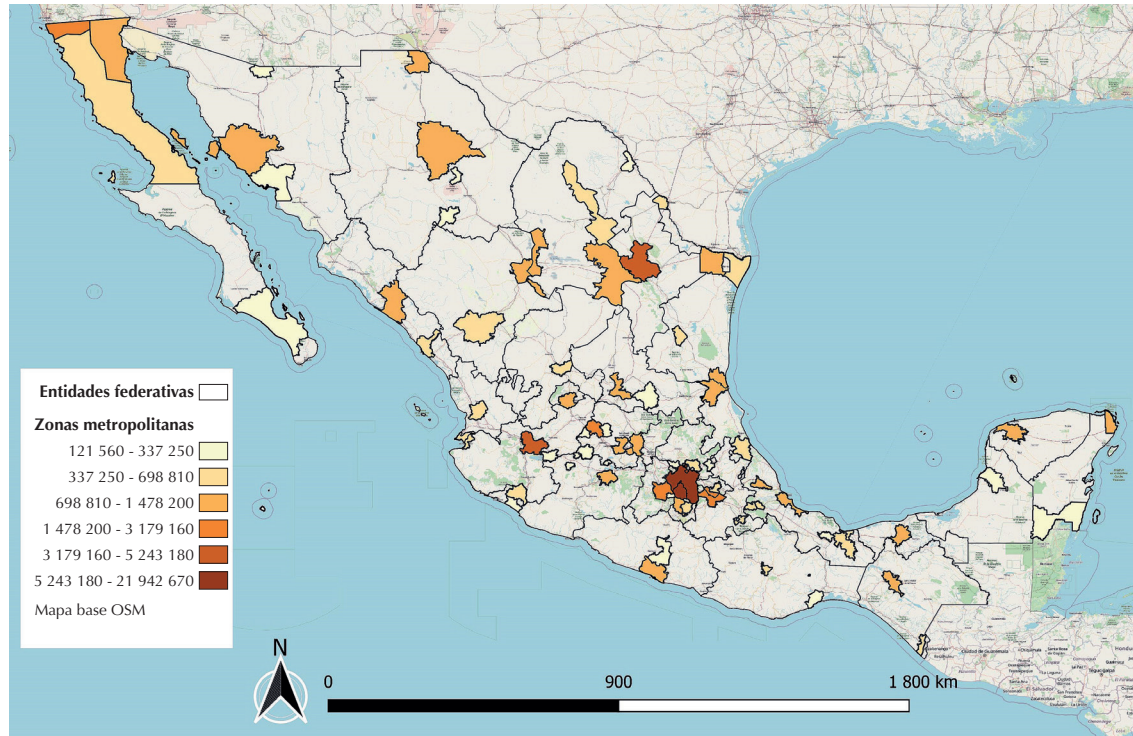
2. Datos y métodos

Hay dos tipos de datos con los cuales se trabajó: los geográficos de las 74 zonas metropolitanas (ZM) de México, y los datos de congestión. Los geográficos se dividen en dos: los polígonos de las zonas metropolitanas, que fueron obtenidos de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu, 2018); y las redes de vialidades, que fueron recabadas de Open Street Maps (OSM). Por su parte, los datos de congestión provienen de dos fuentes: la empresa INRIX (INRIX, 2021) y el Instituto Mexicano para la Competitividad (Imco, 2019).

2.1. Datos geográficos

En la Figura 5 se presenta un mapa con la distribución espacial de las 74 zonas metropolitanas de México. El mapa muestra que éstas están distribuidas en el territorio de manera uniforme. Por otra parte, las ZM son muy diversas con respecto al tamaño de su población: 35 tienen entre 100 mil y 500 mil habitantes; 25 tienen más de 500 mil y menos de un millón; 11 tienen más de un millón y menos de tres millones; tres tienen más de cinco millones, y de éstas sólo la ZM del Valle de México tiene más de 20 millones de habitantes.

Figura 5
Mapa con las 74 zonas metropolitanas de México



Nota: La clasificación de color de los polígonos se realizó con base en la población total de cada zona metropolitana.

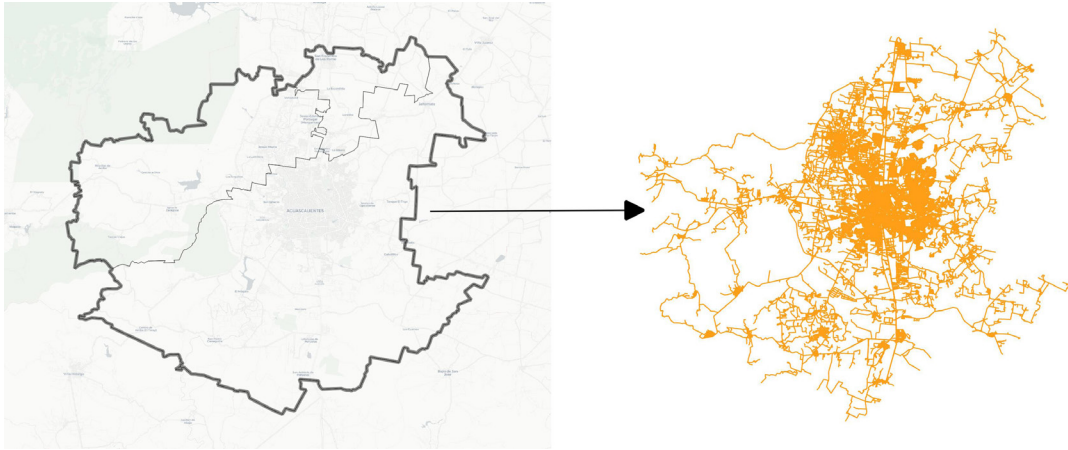
Fuente: Elaboración propia.

La composición municipal de las ZM también es muy diversa: 46 tienen de uno a tres municipios; 18 de cuatro a ocho; siete tienen de nueve a diecinueve municipios, y únicamente hay tres con más de veinte municipios. De estas últimas, sobresale la ZM del Valle de México con 76 municipios. Las características mencionadas y otras que se describen más adelante hacen de las ZM de México un caso de estudio representativo para el análisis de sus redes de vialidades.

La Figura 6 ejemplifica el método que se usó para obtener las redes de vialidades a partir de los polígonos que delimitan cada ZM. Esto se realizó en Python 3.8.8, usando la librería OSMNX (Boeing, 2017), que permite descargar las redes de vialidades de OSM. Se usó esta fuente de información porque es relativamente sencillo tener redes conexas, es decir, redes en las que se puede llegar desde un punto hasta cualquier otro en la red; aunque parece trivial, esto no pasa (pasaba) con las redes de vialidades del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En particular, se usó la función `graph_from_polygon`, la cual recibe como elemento de entrada un polígono y se fijó el parámetro `network_type="drive"`. Luego, esta red se exportó mediante la función `save_graphml`.

Figura 6

Proceso para obtener la red de vialidades en el caso de la ZM de Aguascalientes



Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos se realizaron con la librería *igraph* (Csardi y Nepusz, 2006), tanto en Python 3.8.8 como en R 4.1.1. Primero se convirtió cada gráfica en una red simple y sobre ésta se calcularon el número de vértices, la cantidad de aristas y la intermediación de estas últimas, usando las funciones *vcount*, *ecount* y *edge.betweenness*, respectivamente. Luego, para cada una de las redes se obtuvo el valor de P_G , es decir, la proporción de aristas con el 90% del total de la intermediación (B_G). Finalmente, con los valores de P_G se obtuvieron las regresiones lineales, y las correlaciones con el número de vértices de cada red y con las horas perdidas debido a la congestión.

2.2. Datos de congestión

La correlación entre los valores de P_G y la congestión se realizó considerando las horas (h) per cápita perdidas anualmente debido a la congestión, es decir, la variable que representa a la congestión es la cantidad de horas reportadas en cada clasificación.

Desafortunadamente, no se encontró información de congestión para las 74 ZM, por ello se usaron dos fuentes de información: INRIX e Imco. Aunque la clasificación de la empresa INRIX incluye mil ciudades alrededor del mundo, sólo 15 son mexicanas (Cuadro 2), mientras que la clasificación del Imco sólo se hizo para 32 ciudades o zonas metropolitanas (Cuadro 3). De manera natural hay intersección entre ambas clasificaciones: de las 15 ciudades reportadas por INRIX, 12 están en la clasificación del Imco; las tres que sólo están en la clasificación de INRIX son La Laguna, Reynosa y Tula. Es claro que, aun teniendo estas dos fuentes, no fue posible tener información para las 74 ZM.

Por ello, se hicieron dos análisis de correlación: uno entre los valores de P_G y las horas perdidas de las ZM reportadas por INRIX (Cuadro 2) y otro entre los valores de P_G y las horas perdidas en las ZM reportadas por el Imco (Cuadro 3). Por supuesto, para las ZM que no están en ninguna de las clasificaciones no fue posible realizar tal análisis de correlación, pero, como se verá en los resultados, las regresiones lineales y las correlaciones en los dos conjuntos permiten realizar inferencias para las 74 ZM.

Cabe señalar que las diferencias en las horas perdidas de cada clasificación son esperadas. La empresa INRIX calcula los tiempos de viaje observando exclusivamente el tiempo invertido en ir y regresar de los principales centros de empleo dentro del área metropolitana y los vecindarios circundantes (INRIX, 2021); por su parte, el Imco considera todos los desplazamientos (Imco, 2019). Además, el área de cálculo es diferente, mientras que INRIX considera áreas de viaje de la ciudad central a las zonas aledañas, el Imco sí toma en cuenta las zonas metropolitanas, sobre todo en los casos más grandes. Asimismo, las clasificaciones difieren en tres años, y esos tres años incluyen la pandemia COVID-19, que tuvo un impacto muy fuerte en los patrones de movilidad (INRIX, 2021).

Cuadro 2
Horas perdidas debido a la congestión reportadas por INRIX

<i>Zona Metropolitana</i>	<i>h</i>
Cuernavaca	35
Culiacán	14
Guadalajara	55
Juárez	5
La Laguna	8
Mérida	11
Monterrey	70
Puebla-Tlaxcala	16
Reynosa	8
San Luis Potosí	1
Tijuana	29
Tlaxcala-Apizaco	0.1
Toluca	30
Tula	0.1
Valle de México	67

Fuente: Elaboración propia con datos de INRIX.

Cuadro 3

Horas perdidas debido a la congestión reportadas por el IMCO

<i>Zona Metropolitana</i>	<i>h</i>	<i>Zona Metropolitana</i>	<i>h</i>
Acapulco	112.98	Morelia	60.08
Aguascalientes	42.08	Oaxaca	36.36
Campeche	28.34	Pachuca	77.88
Cancún	55.6	Puebla-Tlaxcala	114.18
Ciudad Victoria	53.78	Querétaro	93.91
Colima-Villa de Álvarez	24.1	Saltillo	78.51
Cuernavaca	75.83	San Luis Potosí	52.17
Culiacán	10.41	Tepic	20.53
Durango	24.19	Tijuana	75.54
Guadalajara	98.44	Tlaxcala-Apizaco	29.24
Hermosillo	49.94	Toluca	116.07
Juárez	50.77	Tuxtla Gutiérrez	36.6
La Paz	32.66	Valle de México	146.45
León	54.27	Villahermosa	79.85
Mérida	55.41	Xalapa	78.61
Monterrey	113.36	Zacatecas-Guadalupe	49.98

Fuente: Elaboración propia con datos del IMCO.

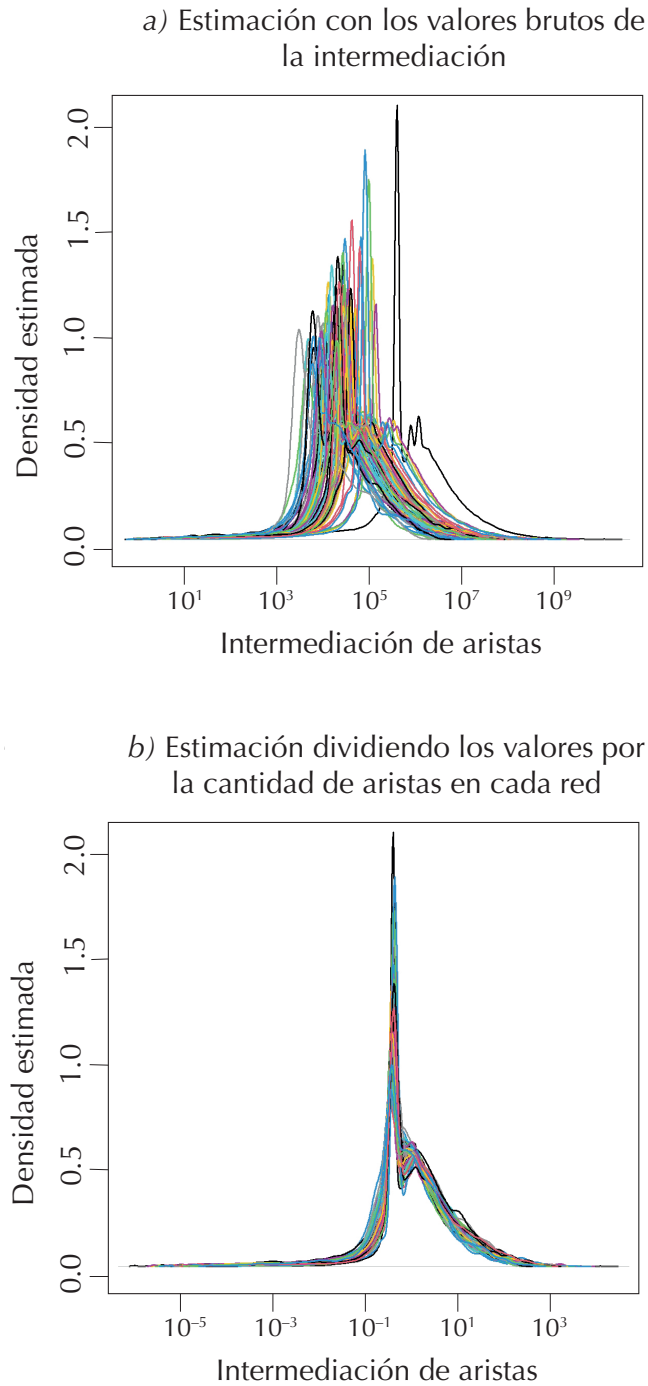
3. Resultados y discusión

En la Figura 7 se muestran las curvas de densidad estimadas de la intermediación de aristas para las 74 zonas metropolitanas. En la Figura 7a se observa que cada curva tiene dos picos, esto implica dos tipos de regímenes en los valores de intermediación, y hay grupos de aristas con tales valores entre uno y dos órdenes de magnitud de diferencia.

Los regímenes descritos también fueron observados en la distribución de la intermediación de nodos en redes de vialidades (Kirkley et al., 2018), para los que se mostró que el primer régimen está asociado con una estructura de red con ciclos, y el segundo a una estructura tipo árbol sin ciclos; la primera genera valores de intermediación bajos porque hay caminos alternativos para llegar de un nodo a otro, mientras que en la segunda muchos caminos pasan por pocos nodos.

Otra característica importante de las distribuciones en la Figura 7a es que las curvas parecen estar desplazadas hacia la izquierda de la curva negra, que corresponde a la red de la ZM del Valle de México. Además, los picos de cada curva están entre 10^3 y 10^6 , es

Figura 7
Curvas de densidad estimadas de los valores de intermediación de las 74 ZM



Fuente: Elaboración propia.

decir, en el orden del tamaño de las redes. Por ello, en la Figura 7b se presentan las mismas estimaciones, pero con los valores de la intermediación normalizados, dividiendo cada valor por la cantidad de aristas en cada red. Después de la normalización se observa que las curvas colapsan hacia una sola. Esto también es consistente con los resultados que se obtuvieron para la intermediación de los vértices (Kirkley et al., 2018).

No es casualidad que se observe un patrón similar entre la distribución de la intermediación de aristas y de los vértices; como se mencionó, la centralidad de intermediación de los vértices depende de la intermediación de las aristas (Barthelemy, 2022, p. 71). Esto implica que las redes de las ZM de México realmente son un caso representativo de lo que se ha observado en redes viales de ciudades alrededor del mundo, y los análisis que se presentan aquí contribuyen a mejorar el conocimiento sobre la estructura de las redes de vialidades y su impacto en diversos fenómenos urbanos a escala global, con énfasis en el caso mexicano.

Comúnmente, el número de vértices representa el tamaño de la red: una red del orden de 10^3 vértices es pequeña, una de 10^4 es mediana y una de 10^5 es grande (Kirkley et al., 2018). En el caso de las redes de las ZM de México se tienen 15 del orden de 10^3 vértices, 55 del orden de 10^4 y cuatro del orden de 10^5 (Cuadro 4).

Si se considera el número de aristas como referencia de tamaño, hay más redes de tamaño medio, ya que sólo ocho tienen del orden de 10^3 aristas, mientras que hay 61 redes con número de aristas en el orden de 10^4 y cinco en el orden de 10^5 . Se puede decir que las ZM de México son esencialmente de tamaño medio, lo cual es congruente con el tamaño de población y la extensión territorial de éstas (Sedatu et al., 2018). La variación en el tamaño de las redes abona a la representatividad de las ZM de México como caso de estudio general.

En la Figura 8 se muestra la relación entre el número de vértices y los valores de P_G . Ésta es consistente con la reportada recientemente para un conjunto de 300 ciudades alrededor del mundo (Pichardo-Corpus, 2023).

De acuerdo con el coeficiente de determinación ($r^2 = 0.67$), casi el 70% de la varianza en los valores de P_G se explica por el tamaño, lo cual confirma la hipótesis de que entre más grande es una red, más concentrada está la intermediación. La red de la ZM de Ensenada es un caso atípico, ya que tiene el mismo valor $P_G = 0.11$ que la red de la ZM del Valle de México, pero la de la ZM de Ensenada tiene del orden de 10^4 vértices, mientras que la de la ZM del Valle de México tiene del orden de 10^5 vértices. Esto se puede explicar por dos variables importantes: la forma y el tamaño del polígono de la ZM de Ensenada.

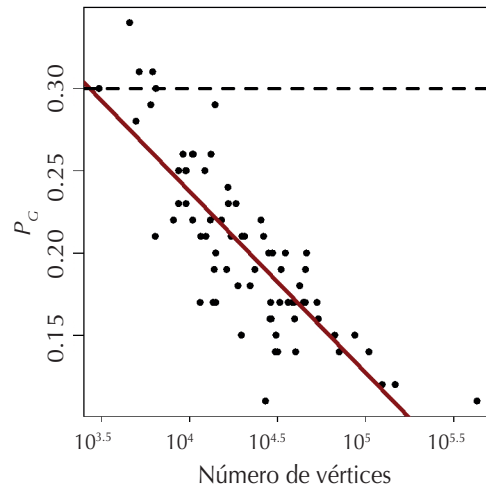
Como se puede apreciar en la Figura 9, el polígono de la ZM de Ensenada es muy alargado, ya que se encuentra en la costa de Baja California en un área donde la mayor parte está deshabitada. Sin embargo, la ZM de Ensenada es la más grande en superficie, con 53 mil kilómetros cuadrados, prácticamente del triple de la que le sigue en tamaño, que es la ZM de Chihuahua, con 18 mil kilómetros cuadrados (Sedatu et al., 2018, pp. 60-62). Estas características generan que haya mucha dispersión y pocas vialidades importantes

Cuadro 4
 Datos representativos de cada red

ZM	n	m	P _G	ZM	n	m	P _G
Acapulco	31 656	40 361	0.14	Nogales	6 455	8 776	0.3
Acayucan	4 972	6 798	0.28	Nuevo Laredo	14 014	22 318	0.29
Aguascalientes	39 201	57 031	0.17	Oaxaca	31 054	41 671	0.15
Campeche	10 418	15 154	0.26	Ocotlán	6 401	9 270	0.21
Cancún	25 482	36 520	0.22	Orizaba	13 157	18 019	0.22
Ciudad Victoria	13 250	20 354	0.26	Pachuca	36 377	50 328	0.17
Celaya	28 977	40 434	0.17	Piedad-Pénjamo	13 634	17 938	0.17
Chetumal	10 465	16 587	0.22	Piedras Negras	9 224	14 860	0.26
Chihuahua	45 451	70 218	0.17	Poza Rica	19 767	27 270	0.15
Chilpancingo	14 100	18 812	0.2	Puerto Vallarta	18 876	27 322	0.18
Coatzacoalcos	11 619	17 728	0.21	Puebla-Tlaxcala	104 915	137 140	0.14
Colima-V. Álvarez	18 377	28 382	0.23	Querétaro	71 048	94 537	0.14
Córdoba	10 518	14 399	0.26	Reynosa	29 677	45 326	0.2
Cuautla	28 732	37 861	0.16	Rioverde	8 706	12 371	0.23
Cuernavaca	44 572	56 612	0.17	Saltillo	38 644	56 402	0.17
Culiacán	33 146	50 325	0.19	Sn Fco. del Rincón	9 565	13 196	0.23
Delicias	9 612	15 331	0.25	San Luis Potosí	42 373	59 986	0.18
Durango	26 409	40 361	0.21	Tampico	30 863	46 163	0.14
Ensenada	27 083	39 986	0.11	Tapachula	12 419	17 026	0.21
Guadalajara	124 321	178 133	0.12	Tecomán	6 035	9 381	0.29
Guanajuato	8 114	10 329	0.22	Tehuacán	12 273	17 758	0.25
Guaymas	11 526	17 391	0.17	Tehuantepec	9 546	13 370	0.25
Hermosillo	35 016	51 661	0.2	Tepic	16 657	24 702	0.23
Hidalgo del Parral	4 573	6 835	0.34	Teziutlán	3 068	3 855	0.3
Juárez	46 262	69 955	0.2	Tiangustenco	6 198	7 875	0.31
La Laguna	52 997	79 812	0.17	Tijuana	66 770	91 339	0.15
La Paz	13 844	20 917	0.19	Tlaxcala-Apizaco	28 203	36 183	0.2
León	54 074	77 899	0.16	Toluca	86 921	107 191	0.15
Matamoros	19 937	30 496	0.21	Tula	16 322	21 081	0.19
Mazatlán	16 598	25 192	0.24	Tulancingo	17 306	23 261	0.21
Mérida	45 690	69 664	0.19	Tuxtla Gutiérrez	29 109	41 389	0.16
Mexicali	40 180	61 385	0.14	Valle de México	430 515	577 546	0.11
Minatitlán	14 122	18 871	0.17	Veracruz	32 604	47 351	0.17
Monclova-Frontera	15 232	23 805	0.22	Villahermosa	22 138	28 358	0.18
Monterrey	147 532	217 944	0.12	Xalapa	23 597	30 889	0.19
Morelia	39 650	56 444	0.16	Zacatecas-Gpe.	20 569	30 184	0.21
Moroleón	5 179	7 038	0.31	Zamora	8 696	12 585	0.25

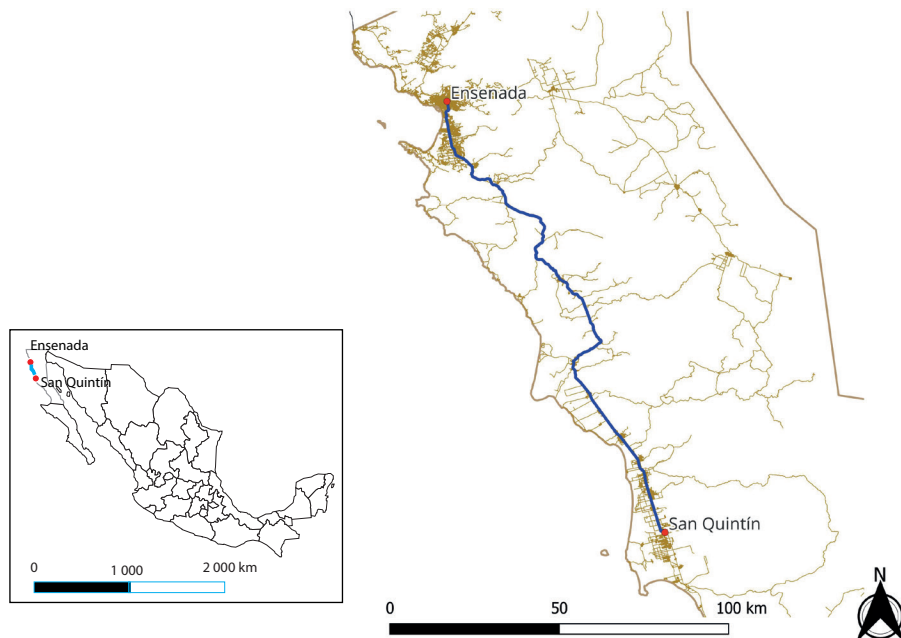
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8
 Diagrama de dispersión entre P_C y el número de vértices (logaritmo)



Nota: La recta roja representa la regresión lineal con $P_C = 0.68 - 0.048x$, donde $x = \log n$. La línea punteada representa el umbral para las *redes IC*.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 9
 Ruta más corta entre Ensenada y San Quintín



Fuente: Elaboración propia.

que conecten las partes más lejanas de las áreas habitadas. Por ejemplo, la distancia por la ruta más corta entre Ensenada y San Quintín es de 190 kilómetros. Esta observación pone en evidencia un fallo en la delimitación de las zonas metropolitanas realizada en 2015. Actualmente, el polígono de la ZM de Ensenada está integrado por dos municipios más, San Quintín y San Felipe, los cuales no estaban constituidos como tales cuando se hizo la clasificación de las zonas metropolitanas en 2015. Cabe señalar que, recién finalizado este trabajo, fue publicada una nueva clasificación de zonas metropolitanas en la que ya no se incluye a San Quintín (Sedatu et al., 2023).

Retomando el análisis de la correlación, en la Figura 8 se puede apreciar que casi todas las redes son de intermediación concentrada, salvo tres que tienen $P_G > 0.3$. Esto es más o menos esperado, ya que se están considerando zonas metropolitanas, lo que implica áreas urbanas relativamente grandes; como se mencionó, sólo hay 15 que se pueden considerar pequeñas. Además, en muchos casos hay más de dos municipios que conforman la ZM. En efecto, sólo hay 16 ZM con un sólo municipio, lo que puede generar más dispersión. Aunado a ello, se tienen casos como el de Ensenada que, aunque sólo es un municipio, sus áreas urbanas están muy alejadas.

Por otra parte, las redes se obtuvieron considerando todo el polígono de la ZM, por lo cual se tienen redes más grandes y en algunos casos más dispersas en comparación con las obtenidas usando sólo el área de viajes cotidianos. Esto hace que la intermediación se concentre más, es decir, que los valores de P_G son más pequeños en las redes que se usaron en este trabajo que en otros donde se consideran las redes usando el área de viaje (Pichardo-Corpus, 2023). Los datos del Cuadro 5 muestran esta relación.

En el Cuadro 5 se presentan el número de vértices (n) y los valores P_G de cuatro redes de vialidades obtenidas de dos formas distintas, unas usando el polígono del área de viaje (véase la tabla C.2 de Pichardo-Corpus, 2023) y otras el polígono de la ZM (Cuadro 4).

Los valores del Cuadro 5 evidencian un fenómeno conocido como efecto de borde o efecto de frontera, que se ha estudiado en las medidas de centralidad de las redes de vialidades (Gil, 2017). Se sabe que, si las áreas urbanas son pequeñas, la variación en las

Cuadro 5

Número de vértices y valores para redes obtenidas con polígonos distintos

<i>ZM o ciudad</i>	<i>Polígono área de viaje</i>		<i>Polígono ZM</i>	
	<i>n</i>	<i>P_G</i>	<i>n</i>	<i>P_G</i>
Guadalajara	78 359	0.22	124 321	0.12
Monterrey	88 584	0.20	147 532	0.12
San Luis Potosí	34 825	0.29	42 373	0.18
Valle de México	230 993	0.17	430 515	0.11

Fuente: Elaboración propia.

medidas de centralidad puede ser grande; pero si las áreas urbanas son grandes, las variaciones son pequeñas (Gil, 2017). Esto es consistente con los valores de P_G del Cuadro 5: la diferencia más grande (0.11) corresponde a la red de San Luis Potosí, mientras que la red del Valle de México tiene la diferencia más pequeña (0.06).

Visualmente, las diferencias entre las redes obtenidas con cada polígono se muestran en la Figura 10 para el caso de la ZM de San Luis Potosí. En la Figura 10a está la red obtenida con el polígono de la ZM, y en la Figura 10b la conseguida con el polígono del área de viaje. En la Figura 10b se puede apreciar que las vialidades con la mayor intermediación coinciden con la división de la ZM en los sectores urbanos más importantes (Hernández Cerda et al., 2023). Esta observación es fundamental para analizar la relación de la estructura de la red con los patrones de movilidad cotidiana; además podría ser de utilidad como un proxy en ciudades que carecen de dicha información.

Las diferencias en los valores del Cuadro 5 y el ejemplo visual de la Figura 10 muestran los alcances del método empleado para obtener la red. Aunque los valores tienden a sobreestimar la concentración de la intermediación, el comportamiento general es estable: las redes más grandes tienen valores P_G más pequeños.

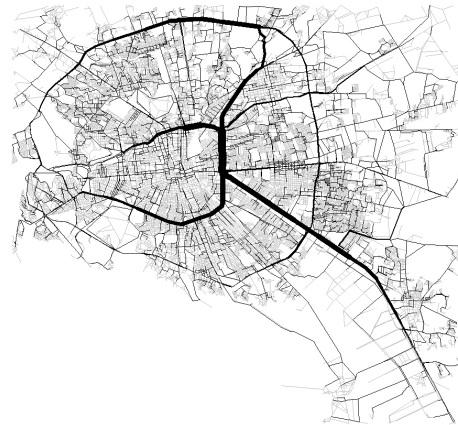
Como ya se mencionó, la relación entre el tamaño de la red y la concentración de la intermediación también es consistente en el tiempo; es decir, conforme una red vial crece, la intermediación se concentra más. Esto se observó en las redes viales de París (Francia) y Tijuana (México) en periodos de 200 y 75 años, respectivamente (Pichardo-Corpus, 2023).

Figura 10
Red vial de San Luis Potosí

a) Red con el polígono que delimita la ZM



b) Red con el polígono del área de viaje



Nota: El grosor de las vialidades es proporcional al valor de la intermediación de las aristas que la conforman

Fuente: Elaboración propia.

Conviene remarcar la relación entre el tamaño de la red y P_G , porque no se cumple para cualquier red. Por ejemplo, se puede tomar una red reticular donde todos los vértices tienen cuatro conexiones, salvo los que se encuentran en las esquinas y las orillas (con dos y tres, respectivamente), y en este caso la concentración no es significativa conforme crece la red; lo mismo pasa en los modelos de redes que no están asociadas al espacio, como las Erdős-Renyi o Barábasi-Albert (Pichardo-Corpus, 2023). Además, la relación entre concentración de la intermediación y el tamaño de la red es casi idéntica en redes planas aleatorias, como las gráficas de vecindad relativa y las gráficas Gabriel, lo que determina que la restricción del espacio bidimensional (salvo el caso reticular) es la variable que explica la concentración, y que aun haciendo cambios en la estructura de la red es muy difícil cambiar esa asociación.

3.1. La intermediación y la congestión

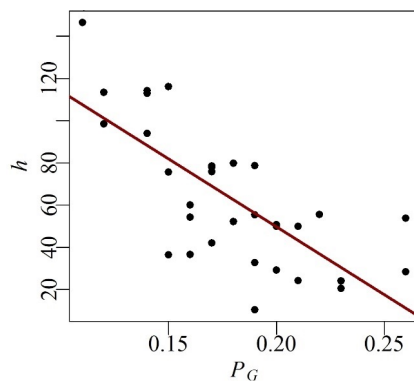
Para analizar la relación entre la concentración de la intermediación y la congestión, en la Figura 11 se muestran los diagramas de dispersión entre los valores P_G y las horas perdidas debido a la congestión (h), con los datos del Imco (11a) y con los de INRIX (11b).

Los coeficientes de determinación (r^2) de las correlaciones entre h y P_G son 0.52 y 0.79 respectivamente. Estos valores implican que ciudades o zonas metropolitanas sin información sobre la congestión, podrían usar la concentración de la intermediación como un proxy de la congestión.

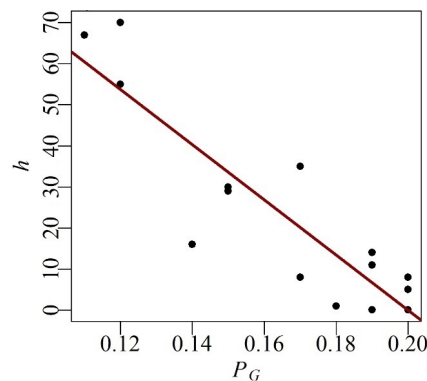
Figura 11

Diagramas de dispersión entre h y P_G

a) Con las horas reportadas por el IMCO (IMCO, 2019)



b) Con las horas reportadas por INRIX (INRIX, 2023).



Nota: En cada caso la recta roja representa la regresión lineal. En el primero se tiene $h = 178.3 - 642.7 P_G$, mientras que en el segundo $h = 134.4 - 642.4 P_G$.

Fuente: Elaboración propia con base en IMCO, 2019 e INRIX, 2023.

En el diagrama de dispersión de la Figura 11a se muestra que, de las 32 ZM consideradas en esa regresión, la ZM con la menor cantidad de horas perdidas (10.4) no tiene la red con el valor más alto de P_G . Esta red corresponde a la ZM de Culiacán, aunque la ciudad central no está en la costa, el polígono de la ZM incluye parte de la bahía. En general, las ciudades pequeñas o medianas que tienen este tipo de límites con cuerpos de agua suelen tener redes de intermediación concentrada, aunque los niveles de congestión no sean tan altos (Pichardo-Corpus, 2023). Esto es debido a que los cuerpos de agua ocasionan que haya pocas intersecciones por donde pasan muchos caminos más cortos.

La relación entre el tamaño de la red y la concentración de la intermediación, en conjunto con las correlaciones entre la concentración y la congestión, permite inferir que la congestión es inevitable conforme crecen las ciudades o zonas metropolitanas, a menos que se tenga una estructura reticular (Choi y Ewing, 2021), que para la gran mayoría de las ciudades es imposible mantener conforme la ciudad crece. La clave está en reducir la cantidad de autos en las calles.

La última afirmación parece trivial, pero todavía la inversión más fuerte en infraestructura de movilidad está dirigida al automóvil (ITDP, 2017): se busca enfrentar la congestión haciendo vialidades con más carriles, creando puentes, pasos a desnivel, entre otros. Pero ya se mostró que, variando las conexiones o teniendo el doble de aristas, la concentración es muy similar en gráficas planas (Kirkley et al., 2018; Pichardo-Corpus, 2023), y este mismo patrón es el que se observa para las redes de las ZM de México.

Además, en los cálculos de la intermediación no se consideró la cantidad de autos o la capacidad de la red; sólo se tomó en cuenta la estructura combinatoria de la red y la restricción del espacio. Esto corresponde a un modelo donde la tasa de autos es constante con respecto al crecimiento, pero en México no ha sido así. De acuerdo con datos del INEGI (2022), en 2010 había poco más de 31 millones de vehículos registrados en circulación, mientras que en 2020 este número subió a poco más de 51 millones; es decir, se tuvo un incremento del 64%, mientras que la población creció apenas un 12%.

Con ese aumento en el número de vehículos los problemas de congestión se incrementan más rápido, entonces cómo reducir el número de autos de las calles. Hay al menos tres maneras de hacerlo de manera ordenada: una es aumentando y mejorando la oferta de transporte público; la otra es reduciendo la distancia de los viajes cotidianos, sobre todo al trabajo, escuela y esparcimiento; y la tercera es una combinación de las dos primeras. Con base en ello se puede fomentar la movilidad activa, aunque se tenga disponible un automóvil particular (Suzuki et al., 2014, p. 57).

Para tener una mejor oferta de transporte público se requieren inversiones muy fuertes y en muchos casos no hay recursos suficientes, pero estas inversiones son necesarias antes de llegar a escenarios como el de la ciudad de Chicago, donde los ingresos generados por viajes en taxi son mayores a lo que la ciudad invierte en transporte público anualmente (Sevtsuk y Davis, 2019, p. 540). La inversión en transporte público masivo de calidad es impostergable, así como la infraestructura de medios alternativos para la movilidad

activa, sobre todo en ciudades medias y/o en ciudades fronterizas del norte de México. En estas últimas es imperante, ya que el uso del automóvil es más parecido al de las ciudades de Estados Unidos.

Por otra parte, reducir las distancias de los viajes cotidianos puede ser menos costoso. Se requiere un ordenamiento territorial donde se privilegie la mezcla de usos de suelo, lo cual es posible para un gobierno con la voluntad de hacerlo. De esta manera, no sólo se reduciría la congestión, sino los efectos nocivos del transporte motorizado y se reduciría el costo asociado al tiempo perdido.

La intermediación considera un escenario donde las personas tienen necesidad de moverse entre dos puntos cualesquiera de la ciudad, lo cual es equivalente a tener distancias de todas las longitudes posibles en la red. Entonces, reducir la distancia en los desplazamientos implica eliminar distancias largas en la red, lo que impacta en el cálculo de la intermediación porque se tendrían menos caminos pasando por muchas aristas y esto evitaría o disminuiría la concentración de la intermediación, que a su vez reduciría la congestión.

La variación de P_G con los límites de la ciudad o zona metropolitana es una de las tareas pendientes; aunque la variación no es fundamental en la correlación con las horas perdidas debido a la congestión, sí es importante en la medida que P_G pudiera usarse como un indicador de la congestión. Para ello, es necesario realizar comparaciones entre conjuntos de ciudades o ZM más diversos y grandes que los cuatro casos del Cuadro 5, lo cual implica generar polígonos urbanos con metodologías distintas como la percolación sobre las redes (Tapia-McClung et al., 2023).

También se pueden emplear delimitaciones basadas en otros parámetros, en los que ciudades como Ensenada no figuran como zona metropolitana (Orihuela Jurado y Sobrino, 2023). Adicionalmente, será necesario revisar la nueva clasificación de ZM que fue publicada cuando se finalizó esta investigación (Sedatu et al., 2023).

Por otra parte, hay zonas metropolitanas que cuentan con encuestas origen-destino, las cuales delimitan naturalmente áreas de análisis, con las que se pueden obtener redes y comparar la concentración de la intermediación con los flujos de mayor demanda. También es posible extender el análisis hacia la relación de P_G con variables asociadas a la resiliencia de las ciudades, donde la centralidad de intermediación de las redes de vialidades desempeña un papel importante (Cordero y Rodríguez, 2022).

Conclusiones

Hay varios aspectos que permiten enlazar las implicaciones de los resultados. Primero, el cálculo de la intermediación sólo requiere de la estructura de conexión de la red. Segundo, la concentración de la intermediación es el resultado de la evolución de las redes viales, que aumentan de tamaño en un espacio restringido a dos dimensiones. Tercero,

prácticamente todas las redes viales de las ZM de México son de intermediación concentrada. Cuarto, para las ZM con datos disponibles, la concentración de la intermediación (P_G) explica entre el 50 y 70% de la varianza en las horas perdidas debido la congestión. Entonces, una parte importante de la congestión se explica solamente por la estructura de conexión, el tamaño y la restricción espacial de la red vial.

Por otra parte, los cambios en las conexiones en redes planas, incluyendo reconexiones y/o aumento de aristas, no tienen un impacto significativo en la disminución de la concentración de la intermediación. En términos de las redes viales, esos cambios son equivalentes a los puentes, pasos a desnivel, etc. Por lo tanto, este tipo de intervenciones tendrán un impacto muy limitado en la disminución de la congestión, en la gran mayoría de los casos sólo se daría en un entorno cercano a la intervención.

Si se combinan las implicaciones anteriores con el crecimiento del parque vehicular, está claro que la congestión es inevitable. Por lo tanto, la única manera de reducir o evitar la congestión es disminuir la cantidad de autos en las calles, ya sea mejorando la oferta de transporte público, la infraestructura para la movilidad activa y/o reduciendo la distancia de los viajes cotidianos. De lo contrario, la congestión aumentará conforme crezcan las ciudades o zonas metropolitanas.

El conjunto de redes de las zonas metropolitanas presenta características universales que se han reportado para grupos de ciudades en diversas regiones del mundo, tanto a nivel de los estadísticos básicos como en la distribución de las densidades de los valores de la intermediación; en este sentido, los análisis son representativos para el caso mexicano y servirán como referencia en estudios de redes de vialidades a nivel global.

Finalmente, hay varias vertientes para seguir el análisis de las redes de vialidades de las zonas metropolitanas, tanto desde el punto de vista de la delimitación de la red misma, como de la relación de la concentración de la intermediación con otras variables relacionadas con la movilidad.

Referencias bibliográficas

- Barthelemy, M. (2022). *Spatial networks. A complete introduction: From graph theory and statistical physics to real-world applications*. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-94106-2>
- Barthelemy, M., Bordin, P., Berestycki, H. y Gribaudi, M. (2013). Self-organization versus top-down planning in the evolution of a city. *Scientific Reports*, 3(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/srep02153>
- Bedoya-Maya, F., Calatayud, A. y Gonzalez-Mejia, V. (2022). *Estimating the effect of urban road congestion on air quality in Latin America*. IDB. <https://doi.org/10.18235/0004512>
- Boeing, G. (2017). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126-139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>

- Choi, D. y Ewing, R. (2021). Effect of street network design on traffic congestion and traffic safety. *Journal of Transport Geography*, 96, e103200. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103200>
- Çolak, S., Lima, A. y González, M. C. (2016). Understanding congested travel in urban areas. *Nature Communications*, 7(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/ncomms10793>
- Cordero, D. y Rodríguez, G. (2022). Merger of network graph indicators to estimate resilience in Latin American cities. *IEEE Access*, 10, 81071-81093. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3195894>
- Crucitti, P., Latora, V. y Porta, S. (2006). Centrality in networks of urban streets. *Chaos*, 16(1), e015113. <https://doi.org/10.1063/1.2150162>
- Csardi, G. y Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *Inter-Journal, Complex Systems*, 1695. <https://igraph.org>
- Daude, C., Fajardo, G., Brassiolo, P., Estrada, R., Goytia, C., Sanguinetti, P., Álvarez, F. y Vargas, J. (2017). *RED 2017. Crecimiento urbano y acceso a oportunidades: un desafío para América Latina*. CAF. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1090>
- Diestel, R. (2017). *Graph theory*. Springer.
- Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 40(1), 35. <https://doi.org/10.2307/3033543>
- Gao, S., Wang, Y., Gao, Y. y Liu, Y. (2013). Understanding urban traffic-flow characteristics: A rethinking of betweenness centrality. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(1), 135-153. <https://doi.org/10.1068/b38141>
- Gil, J. (2017). Street network analysis “edge effects”: Examining the sensitivity of centrality measures to boundary conditions. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(5), 819-836. <https://doi.org/10.1177/0265813516650678>
- Girvan, M. y Newman, M. E. J. (2002). Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(12), 7821-7826. <https://doi.org/10.1073/pnas.122653799>
- Hernández Cerda, C. N., Ávila Galarza, A., Aguilar Robledo, M. y Vázquez Solís, V. (2023). Análisis espacial de las dinámicas de movilidad en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 38(2), 581-618. <https://estudiosdemograficosyurbanos.colmex.mx/index.php/edu/article/view/2123>
- Hillier, B. (2002). A theory of the city as object: or, how spatial laws mediate the social construction of urban space. *Urban Design International*, 7, 153-179. <https://doi.org/10.1057/palgrave.udi.9000082>
- Imco. (2019). *El costo de la congestión: vida y recursos perdidos*. Instituto Mexicano para la Competitividad. <https://imco.org.mx/costo-la-congestion-vida-recursos-perdidos/>
- INEGI. (2022). *Parque vehicular*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>
- INRIX. (2021). *2021 INRIX global traffic scorecard*. <https://inrix.com/scorecard/>
- ITDP. (2017). *Invertir para movernos. Diagnóstico de inversión en movilidad en las zonas metropolitanas de México, 2011-2017*. Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo. <https://invertirparamovernos.itdp.org/#/>
- Kazerani, A. y Winter, S. (2009). Can betweenness centrality explain traffic flow. En J.-H. Haunert,

- B. Kieler y J. Milde (eds.), *12th AGILE International Conference on Geographic Information Science* (pp. 1-9).
- Kirkley, A., Barbosa, H., Barthelemy, M. y Ghoshal, G. (2018). From the betweenness centrality in street networks to structural invariants in random planar graphs. *Nature Communications*, 9(1), 2501. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04978-z>
- Lämmer, S., Gehlsen, B. y Helbing, D. (2006). Scaling laws in the spatial structure of urban road networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 363(1), 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.01.051>
- Lampo, A., Borge-Holthoefer, J., Gómez, S. y Solé-Ribalta, A. (2021). Multiple abrupt phase transitions in urban transport congestion. *Physical Review Research*, 3(1), 13267. <https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.3.013267>
- Lion, B. y Barthelemy, M. (2017). Central loops in random planar graphs. *Physical Review E*, 95(4), 42310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.95.042310>
- Loder, A., Ambühl, L., Menendez, M. y Axhausen, K. W. (2019). Understanding traffic capacity of urban networks. *Scientific Reports*, 9, 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51539-5>
- Louf, R. y Barthelemy, M. (2014). How congestion shapes cities: From mobility patterns to scaling. *Scientific Reports*, 4. <https://doi.org/10.1038/srep05561>
- Orihuela Jurado, I. y Sobrino, J. (2023). Delimitación y trayectorias de las zonas metropolitanas en México, 1990-2020. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 38(3), 867-917. <https://doi.org/10.24201/edu.v38i3.2172>
- Pichardo-Corpus, J. A. (2023). The concentration of edge betweenness in the evolution of planar graphs and street networks. *Journal of Complex Networks*, 11(2). <https://doi.org/10.1093/comnet/cnad004>
- Porta, S., Latora, V., Wang, F., Rueda, S., Strano, E., Scellato, S., Cardillo, A., Belli, E., Cárdenas, F., Cormenzana, B. y Latora, L. (2012). Street centrality and the location of economic activities in Barcelona. *Urban Studies*, 49(7), 1471-1488. <https://doi.org/10.1177/0042098011422570>
- Porta, S., Strano, E., Iacoviello, V., Messora, R., Latora, V., Cardillo, A., Wang, F. y Scellato, S. (2009). Street centrality and densities of retail and services in Bologna, Italy. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(3), 450-465. <https://doi.org/10.1068/b34098>
- Radke, J. y Flodmark, A. (1999). The use of spatial decompositions for constructing street centerlines. *Geographic Information Sciences*, 5(1), 15-23. <https://doi.org/10.1080/10824009909480509>
- Sedatu. (2018). *IDE Sedatu*. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. <https://ide.sedatu.gob.mx/#/>
- Sedatu, Conapo e INEGI. (2018). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano / Consejo Nacional de Población / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/delimitacion-de-las-zonas-metropolitanas-de-mexico-2015>
- Sedatu, Conapo e INEGI. (2023). *Metrópolis de México 2020*. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano / Consejo Nacional de Población / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://ide.sedatu.gob.mx/>
- Sevtsuk, A. y Davis, D. E. (2019). Future of streets. En L. D'Acci (ed.), *The mathematics of urban morphology* (pp. 537-546). https://doi.org/10.1007/978-3-030-12381-9_29

- Suzuki, H., Cervero, R. e Iuchi, K. (2014). *Transformando las ciudades con el transporte público: integración del transporte público y el uso del suelo para un desarrollo urbano sostenible*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-9-5869-5967-4>
- Tapia-McClung, R., Montejano-Escamilla, J. A. y Caudillo-Cos, C. A. (2023). Defining city boundaries through percolation theory: The case of the Mexican urban system. *Economía Sociedad y Territorio*, 23(73), 753-778. <https://doi.org/10.22136/est20232087>
- Zhang, K. y Batterman, S. (2013). Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Science of the Total Environment*, 450-451, 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>

ACERCA DEL AUTOR

Juan Antonio Pichardo Corpus es profesor-investigador en el Departamento de Estudios Urbanos y del Medio Ambiente de El Colegio de la Frontera Norte. Es doctor en Ciencias en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Es maestro en Ciencias en Educación Matemática por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, y licenciado en Educación Secundaria con especialidad en Matemáticas por la Escuela Normal Superior Oficial de Guanajuato. Realizó una estancia posdoctoral en el Centro de Investigación en Matemáticas (Cimat) y fue catedrático Conacyt comisionado al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geográfica (CentroGeo). Ha sido profesor visitante en el Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA) de la University College London. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Sus líneas de investigación son: transporte y movilidad, forma urbana y redes complejas.

RECIBIDO: 16 de noviembre de 2023.

DICTAMINADO: 31 de enero de 2024

ACEPTADO: 24 de abril de 2024.