



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Evaluación del impacto de la confiabilidad en la red carretera para decisiones de logística

Jared Piña Bárcenas
Miguel Gastón Cedillo Campos

Publicación Técnica No. 718
Querétaro, México
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en el Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte, adscrito a la Coordinación de Transporte Integrado y Logística del Instituto Mexicano del Transporte, por el Mtro. Jared Piña Bárcenas y el Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna TI 08/22 Método para evaluar el impacto de la estructura de la red y nivel de confiabilidad en los tiempos de tránsito para decisiones de logística.

Se agradece la colaboración de las empresas de autotransporte que amablemente compartieron muestras de datos.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Revisión bibliográfica	4
2. Metodología.....	9
2.1 Red carretera.....	9
2.2 Datos GPS.....	13
2.3 Estimación de índices.....	16
3. Resultados.....	21
3.1 Implicaciones para la toma de decisiones.....	27
Conclusiones.....	29
Bibliografía	31

Sinopsis

En el presente estudio se incluyen los resultados de analizar la centralidad y fluidez de la Red Nacional de Caminos de México (RNCM). Se utilizan muestras de datos GPS (Sistema de Posicionamiento Global) de vehículos de carga para establecer la participación de los segmentos carreteros en las rutas más cortas que comunican diferentes puntos logísticos en México. El objetivo de este trabajo fue caracterizar la infraestructura de transporte mediante la teoría de gráficas con el fin de clarificar el grado de conectividad, centralidad y fluidez de la red carretera nacional. Se tomó en cuenta que, desde un punto de vista logístico, es deseable transitar por tramos que presenten poca variación en sus tiempos de viaje, de modo que se evite llegar a cuellos de botella durante el traslado de las mercancías. Este trabajo ayuda a develar aquellos segmentos con oportunidad de mejora para reducir la variación de los tiempos extra de viaje y focalizar recursos para aumentar las rutas alternas en la red.

Abstract

The study includes analyzing the centrality and fluidity of the National Road Network of Mexico (NTNM). Based on samples of GPS (Global Positioning System) data emitted by cargo vehicles, the involvement of road segments in the shortest routes that connect different logistics points in Mexico is established. The objective of this work was to characterize the transport infrastructure through graph theory to clarify the degree of connectivity, centrality, and fluidity of the national road network. It was considered that, from a logistics point of view, it is more attractive to travel through sections that present slight variation in their travel times, and thus, to avoid bottlenecks during the transportation of goods. This work helps to reveal those segments with an opportunity for improvement to reduce the variation of extra travel times, and consequently, to focus resources on increasing the number of alternative network routes.

Introducción

Dos de los principales factores que influyen en el desarrollo logístico de cualquier organización o país es tanto la conectividad que ofrece la infraestructura (Mora-García, 2012), como el nivel de fluidez con que se mueven los bienes que la utilizan (Cedillo-Campos et al., 2017; Cedillo-Campos et al., 2019). Frente al entorno de incertidumbre actual, evaluar la robustez operativa de la red vial nacional es clave para México. El proceso de regionalización de las cadenas de suministro iniciado hace algunos años y que hoy se acentúa, representa una importante oportunidad para México (Cedillo-Campos et al., 2014; Cedillo-Campos et al., 2022), por lo que resulta importante identificar el estado actual de la conectividad y fluidez de la infraestructura carretera, con el fin de tomar las previsiones adecuadas.

Desde un enfoque basado en la teoría de gráficas, el propósito de este trabajo es proponer un nuevo método. El mismo está enfocado en evaluar el impacto de la estructura de la red (centralidad, cercanía y conectividad), así como el nivel de confiabilidad en los tiempos de tránsito que provee la infraestructura carretera. De esta forma, este método puede ser un importante insumo para la toma de decisiones en logística por parte de las organizaciones que la utilizan.

De manera general, las redes que cuentan con nodos en ubicaciones específicas (espacios euclidianos bidimensionales o tridimensionales), se denominan redes espaciales; las redes de transporte entran en esta categoría. A diferencia de las redes no espaciales, como las redes sociales, las redes de transporte están estrechamente vinculadas al territorio y, por tanto, tienen características y atributos geográficos que deben tenerse en cuenta (Erath et al., 2009).

Para el análisis de redes espaciales se hace uso de la teoría de gráficas. En la literatura se pueden identificar diferentes tipos de estudios, como son: i) la medición de las características topológicas y la clasificación a través de éstas (Liu y Zhao, 2015; Su et al., 2007); ii) la determinación de la relación del desarrollo de la red y el entorno geográfico (Liu et al., 2007; Patarasuk, 2013); iii) la identificación de vialidades o intersecciones importantes de la red (Bono y Gutiérrez, 2011; Duan y Lu, 2014; Freiria et al., 2015; Novak y Sullivan, 2014); iv) el desarrollo de nuevos índices y medidas (Xie y Levinson, 2009); v) análisis espacio-tiempo de tiempos de viaje por la red carretera

(Cheng et al., 2012); vi) y la definición de metodologías para la generalización de la red (Thomson y Brooks, 2007; Touya, 2010; Zhang, 2005). Es importante mencionar que, en estos estudios se hace uso de índices topológicos que toman en cuenta la distancia entre nodos o el tiempo de viaje. Sin embargo, ninguno realiza análisis incluyendo indicadores de fluidez y mucho menos desde una perspectiva logística.

El método desarrollado puede servir para definir posibles cambios que mejoren la efectividad de la infraestructura con apoyo de indicadores de la estructura de la red y puntos críticos, para el diseño y la operación a mediano y largo plazo. La innovación del sistema de evaluación aquí propuesto, radica en el apoyo que aporta a la evaluación de la red carretera al considerar indicadores basados en la teoría de gráficas y la confiabilidad del tiempo de viaje. Se buscó definir indicadores que faciliten la toma de decisiones logísticas de nivel estratégico y táctico.

En este sentido, se identificaron dos pasos principales: i) medir la confiabilidad de los tiempos de viaje en los principales corredores de la red carretera de México; y ii) caracterizar la infraestructura de transporte a partir de la teoría de graficas mediante la identificación de índices topológicos que puedan integrar las medidas de confiabilidad. Para aplicar nuestro enfoque utilizamos los datos de la Red Nacional de Caminos de México (RNCM).

Con base en lo antes expuesto, se caracterizó la infraestructura de transporte mediante la teoría de gráficas con el fin de clarificar el grado de conectividad, centralidad y fluidez de la red carretera nacional. Desde un punto de vista logístico, es deseable transitar por tramos que presenten poca variación en sus tiempos de viaje, de modo que se evite llegar a cuellos de botella durante el traslado de las mercancías. Desde esta perspectiva, una vez estimados los indicadores mencionados, se establecieron los tramos que participan en mayor medida dentro de rutas confiables. Para lograrlo, se analizaron las muestras de datos GPS (Global Positioning System) aportadas por empresas de autotransporte que tuvieron actividades en los principales corredores carreteros de México.

La presente investigación se desarrolló desde un enfoque cuantitativo que consistió en la recepción, valoración y depuración de la muestra de datos; definición de la red carretera para ser analizada; estimación de las medidas de fluidez para cada uno de los tramos carreteros; identificación de los índices de teoría de gráficas para medir la conectividad y centralidad de la red; así como el análisis de los resultados.

Cabe señalar que este proyecto está alineado con el objetivo 1 del PROGRAMA SECTORIAL DERIVADO DEL PLAN NACIONAL DE

DESARROLLO 2019-2024 (SICT, 2020): *“Contribuir al bienestar social mediante la construcción, modernización y conservación de infraestructura carretera accesible, segura, eficiente y sostenible, que conecte a las personas de cualquier condición, con visión de desarrollo regional e intermodal”.*

1. Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión de la bibliografía con el objetivo de identificar los principales índices de Teoría de Gráficas aplicados en el análisis de redes de transporte y que permitieran integrar las medidas de fluidez para caracterizar los arcos carreteros. Para llevar a cabo la presente revisión, se consultaron tres bases de artículos científicos: i) Elsevier; ii) Springer; y iii) Transportation Research Board. Para las consultas se utilizó una lista de palabras clave: Road network; Accessibility; Graph theory; Spatial analysis; Network structure; Network complexity; Network analysis; Space-time; Travel time prediction; Transport network topology; Dual network analysis.

Esta revisión fue una actualización y complemento de la realizada previamente por Piña-Barcenas et al. (2018). Entre los principales hallazgos de dicho trabajo se encontró que: i) los artículos identificados se enfocaron en evaluar las redes de transporte a través de la teoría de gráficas y con base en esto realizaron la clasificación de los arcos, su agrupamiento en sub-gráficas o determinación de las relaciones que se pueden llegar a presentar con indicadores económicos o demográficos; ii) encontraron que las medidas más utilizadas de teoría de graficas son los índices alfa (mide la conectividad de la red respecto al número de ciclos presentes), beta (mide la conectividad de la red comparando el número de segmentos contra el número de nodos), gamma (mide la conectividad de la red comparando el número de segmentos existentes contra todos los posibles), la centralidad de grado (es una medida de centralidad de las intersecciones, de acuerdo al número de segmentos que coincidan) y la centralidad por intermediación (medida de centralidad de las intersecciones o segmentos, de acuerdo al número de rutas más cortas en que participan); y finalmente que, iii) para analizar las redes en la literatura se han propuesto dos representaciones de gráfica: la “primal”, donde el análisis se enfoca en las intersecciones, y la “dual”, donde el análisis se enfoca en los arcos.

Por lo general, se pueden encontrar estudios donde se evalúa la estructura de las redes, sin contemplar los pesos en sus arcos (por ejemplo, Feng y Hu, 2019). Al realizar las evaluaciones desde esta perspectiva, se supone que todas las conexiones son iguales y que presentan un comportamiento estático (King, Aboudina y Shalaby, 2019). Esto no toma en cuenta su capacidad o calidad para realizar la comunicación entre nodos y sus características dinámicas.

Una manera sencilla de marcar la diferencia entre una conexión y otra, es agregar pesos con base en su distancia. Por ejemplo, Barrington-Leigh y Millard-Ball (2019) toman en cuenta la longitud de los arcos al definir su índice de desconexión, el cual integra medidas de la teoría de gráficas e información espacial (la distancia), para capturar la estructura que presentan las ciudades de acuerdo a su legado histórico de crecimiento.

Otro ejemplo es el trabajo de Ando et al. (2020), quienes aplican el método de centralidad de vector propio, ponderando los arcos con su capacidad vial para identificar las partes fuertemente y débilmente conectadas en la red. Suponen que es menos probable que las carreteras más anchas tengan una interrupción del enlace durante un desastre. Por lo tanto, se usa la capacidad vial del tramo carretero, que está altamente correlacionada con el ancho de la vialidad, como un indicador de la solidez de las conexiones durante un desastre. Se concluye que la centralidad de vector propio es una medida útil de la conectividad de una red vial.

Otra forma de analizar las redes y complementar los resultados de teoría de gráficas, es a través de la agregación de métodos que capturen su naturaleza dinámica. Por ejemplo, King, Aboudina y Shalaby (2019) emplean medidas de Teoría de Gráficas junto con métodos de demanda elástica para el análisis de la resiliencia de la red del servicio de transporte público (metro, tranvía y autobuses) de la ciudad de Toronto, en Canadá. Por un lado, se determina la centralidad de intermediación de los arcos para establecer su importancia en términos de ruta más corta (número de arcos, no distancia recorrida), para después removerlos en ese orden de importancia en una simulación del desempeño de la red. Como resultado se muestra como el desempeño de la red cae más rápido cuando se anulan tramos con centralidad importante, en comparación con la eliminación de tramos de manera aleatoria.

En su trabajo, Ansorena (2020) analiza la red marítima del puerto de Algeciras en España. Sus objetivos fueron detectar grupos de puertos con perfiles de conexión similares, los principales corredores marítimos en los que participa el puerto, así como su grado de centralidad. La red marítima se definió con base en todos los servicios de línea identificados en el Anuario "*Algeciras Port 2016*" (Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, 2017). Se agregó un peso en los arcos que representa el número de servicios entre los puertos sin considerar la dirección de las relaciones. El análisis se realizó desde la perspectiva del puerto de Algeciras y se usó la centralidad de grado sin considerar los pesos para determinar su conectividad. También se evaluó toda la red con la centralidad de grado, para ello se consideraron los pesos para determinar los puertos fuertemente conectados desde la perspectiva de los servicios de línea. Por

otro lado, para determinar los principales corredores marítimos se usó la centralidad por intermediación con la red sin pesos en los arcos.

El agrupamiento de elementos de la red es otro problema recurrente en la literatura. Por ejemplo, Klapka, Kraft y Halás (2020) proponen una metodología para definir lo que ellos llaman regiones de transporte funcionales. Mencionan que las regiones de transporte funcionales presentan características y comportamientos propios que reflejan sus roles administrativos y funcionales como centros urbanos. De manera general, los autores caracterizan la red carretera de la República Checa con base en la intensidad de tráfico diario, utilizando datos de los años 2000 y 2016; de ese modo, localizan y remueven los arcos con intensidad mínima; comparan la red contra una capa de división territorial; y relacionan cada sub-gráfica con la unidad “general” que las contiene (polígonos territoriales). Las unidades generales las definen como grupos de municipios con funciones centrales (escuelas, oficinas de correo, médicos, etc.). Concluyen que el enfoque de teoría de gráficas para la definición de regiones de transporte funcionales basado en la identificación de flujos mínimos resulta válido, ya que el sistema regional resultante es relativamente autónomo y su diseño espacial está de acuerdo con la organización geográfica del territorio checo.

Un ejemplo más de identificación de regiones es el trabajo de Castro Leiva et al. (2021), en el cual proponen una metodología para la clasificación territorial con base en patrones de movilidad y evalúan su eficiencia en función de indicadores de autonomía y complementariedad. Aplican medidas de teoría de gráficas en una primera etapa (centralidad de grado y *PageRank*) a la red de caminos del área metropolitana de Río de Janeiro, ponderada con tiempos de viaje para detectar los elementos más centrales. Los resultados son usados en una segunda etapa para alimentar su Análisis de Integración Territorial, el cual genera índices relacionales que describen la integración, articulación, divergencia, convergencia, dependencia e independencia de las zonas. Como resultado dan sugerencias de cómo pueden ser interpretados estos índices y su utilidad para decisiones de políticas públicas de movilidad.

Los investigadores Bansal y Sen (2022) analizaron la red aérea definida por los aeropuertos de las ciudades de segundo rango o “*Tier II*” de la India. Su objetivo fue evaluar la red en términos de conectividad y accesibilidad, principalmente en relación con los aeropuertos de ciudades de primer rango o “*Tier I*”. Las medidas utilizadas para la evaluación son índices de concentración, conectividad y accesibilidad basados en la teoría de gráficas (longitud de ruta más corta y tiempos de viaje) e indicadores de accesibilidad parcial (accesibilidad diaria, indicador potencial, indicador de

ubicación y eficiencia de la red). Como resultado identificaron áreas con necesidad de nuevos aeropuertos o el crecimiento de otros.

En su trabajo, Henry, Furno y Faouzi (2021) miden la resiliencia de la red carretera de Lyon, Francia. Para ello utilizan la centralidad de grado con pesos en los arcos. Los pesos de los arcos son velocidades promedio estimadas con una muestra de datos GPS de vehículos en general. En la muestra se identificaron aquellos datos que correspondían a eventos disruptivos importantes y se separaron para realizar el análisis de resiliencia. Se concluye que la variación en la centralidad de grado observada en los escenarios con y sin eventos disruptivos, captura adecuadamente las condiciones del tráfico en el estado de la red carretera.

Otro análisis enfocado en las redes carreteras es el elaborado por Furno et al. (2021). La red analizada corresponde a los caminos del departamento de Ródano en Francia. En su caso, los pesos de las redes corresponden a la mediana (medida de tendencia central considerada más robusta que la media) de las velocidades observadas en una muestra GPS de taxis. La mediana de las velocidades es estimada por hora del día. En su trabajo proponen monitorear la red carretera mediante el cálculo aproximado de valores de centralidad por intermediación bajo restricciones de tiempo, dado que esta medida es útil para identificar cuellos de botella estructurales. Concluyen que su algoritmo presenta un desempeño de tiempo aceptable, por lo que lo consideraron para un futuro sistema de monitoreo de la red.

Como se puede apreciar en la revisión, la teoría de gráficas sigue siendo una herramienta importante para el análisis de las redes de transporte. En México se tiene el reto de que la extensión de la red es mucho mayor a las áreas consideradas en la mayoría de los trabajos, a excepción de algunos (por ejemplo, Barrington-Leigh y Millard-Ball, 2019) que son a nivel mundial pero que usan únicamente la distancia como peso (un atributo estático y sencillo de determinar). Otro reto importante es la implementación de medidas que exigen una gran cantidad de operaciones, como la centralidad por intermediación, cuyo cálculo implica un gran tiempo de cómputo y que en trabajos como en el de Furno et al. (2021) se ha optado por realizar aproximaciones.

En cuanto a las medidas de gráficas, Henry, Furno y Fauzi (2021) mencionan que desde una aproximación topológica se puede cuantificar la resiliencia de la red a través de medidas de centralidad, como: i) centralidad por intermediación; ii) centralidad por cercanía; y iii) centralidad de grado. Los autores mencionan que, en trabajos previos, se ha verificado la sensibilidad de los pesos de los arcos y las medidas de centralidad con respecto a la dinámica del tráfico.

En el caso de la conectividad de la red, cuanto más escasamente conectada esté la red, más difícil será para los viajeros llegar a sus destinos a tiempo si hay bloqueos o fallas en los segmentos (Scott et al., 2006).

Ando et al. (2020) mencionan que la centralidad por intermediación es importante para la robustez de la red carretera de una ciudad. Esta medida permite conocer la importancia de los tramos carreteros en términos de accesibilidad de la red y la identificación de cuellos de botella estructurales (Furno et al., 2021).

En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de las principales medidas consideradas en los trabajos revisados. Como se puede observar, siguen siendo medidas recurrentes la centralidad de grado e intermediación, como se identificó desde el trabajo de Piña-Barcenas et al. (2018). Además, son medidas que incluyen fácilmente diferentes tipos de pesos en los arcos de las redes.

Tabla 1.1 Resumen de medidas de teoría de gráficas identificadas

Artículo	Tipo de peso	Tipo de red	Grado	Intermediaci	Vector	Agrupamien	Otros
Henry, Furno y Faouzi (2021)	Velocidad promedio dinámica	Carretera	X				
Ansorena (2020)	Número de servicios de línea	Marítima	X	X			
Ando et al. (2020)	Capacidad vial	Carretera			X		
Bansal y Sen (2021)	Número de vuelos	Aérea					X
Barrington-Leigh y Millard-Ball (2019)	Distancia	Carretera (A nivel mundial)	X				X
Feng y Hu (2019)	Distancia	Tren Urbano	X	X		X	X
Furno et al. (2021)	Velocidad (mediana)	Carretera		X			
King, Aboudina y Shalaby (2019)	Número de viajes	Red de transporte público		X			X
de Castro Leiva et al. (2021)	Tiempo de viaje	Carretera	X		X		

Fuente: Elaboración propia.

Dado que la centralidad de grado se encuentra enfocada al análisis de los nodos de la red, se decidió usar en el presente trabajo la centralidad por intermediación (CI) de los arcos. La cual, de manera natural, puede incluir las velocidades, tiempos de viaje y medidas de fluidez en sus estimaciones.

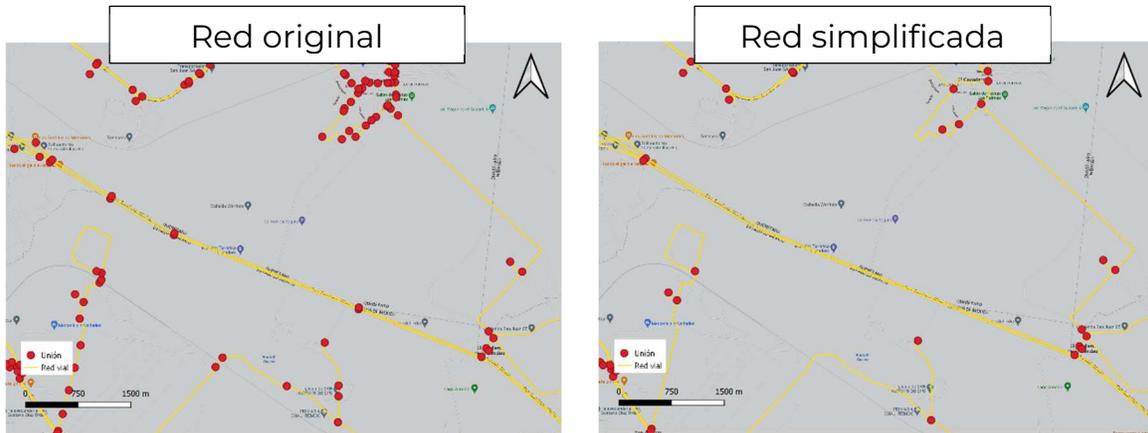
2. Metodología

En esta sección se presenta la metodología que permitió caracterizar la red de caminos de México con base en medidas definidas a partir de la Teoría de Graficas y la confiabilidad. Primero, se preparó una porción de la red a estudiar, reduciendo el número de nodos y arcos de la versión original. Segundo, se preparó la muestra de datos GPS (Global Positioning System) para su análisis y relación con la red antes definida. Tercero, ya contando con la red, la muestra y su relación, se dio paso a la caracterización de la red.

2.1 Red carretera

Como base se tomó la Red Vial 2021 del modelo de la Red Nacional de Caminos de México (RNCM). Esta es una representación digital georreferenciada de la red de caminos a nivel nacional, cuyo principal objetivo es servir de principal fuente oficial para sistemas de ruteo en México. La RNCM es un desarrollo del IMT en conjunto con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (IMT, 2022). Este modelo se compone de 1' 751, 835 segmentos y 1' 547, 525 de uniones.

Al igual que en el trabajo de Henry, Furno y Faouzi (2021), se decidió reducir la complejidad del modelo de la red carretera, ya que presenta uniones (nodos) en lugares que no son intersecciones de vialidades, como se muestra en el ejemplo de la Figura 2.1. Para modelar una red carretera como una gráfica, las intersecciones de las vialidades se toman como nodos y los arcos de la red son las vialidades que unen dichas intersecciones.



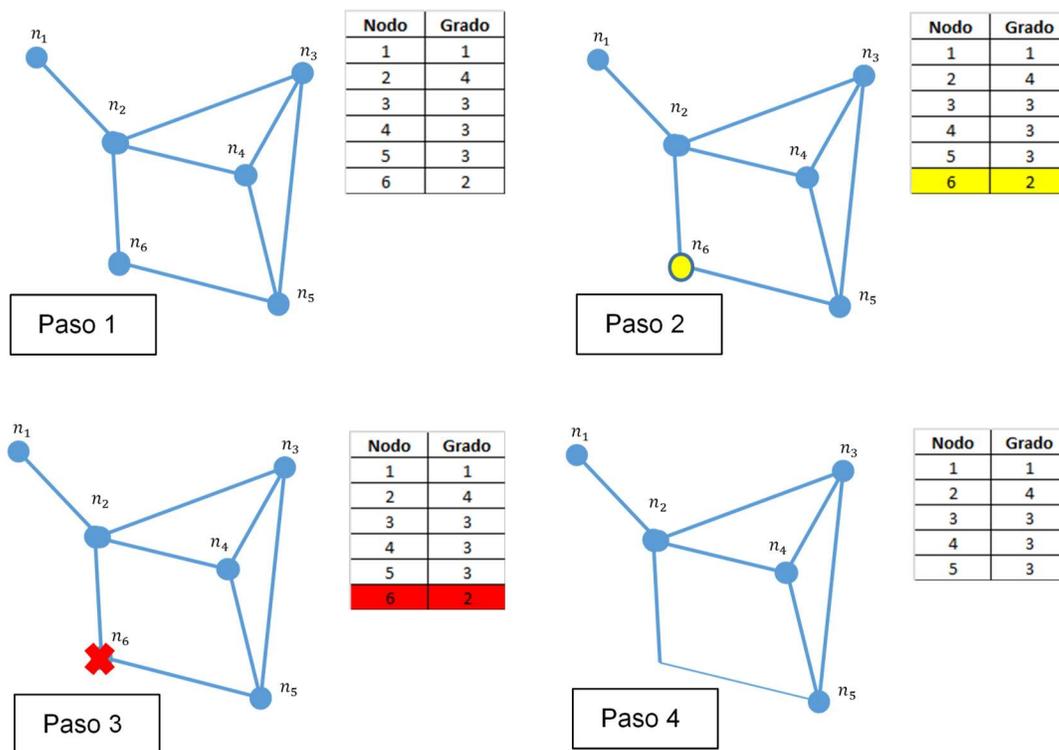
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.1 Ejemplo de reducción de la complejidad de la red

El proceso para la reducción de la complejidad del modelo de la red fue el siguiente:

- **Paso 1.** Se estimó el número de vialidades relacionadas con cada unión. En teoría de graficas corresponde al grado de cada nodo.
- **Paso 2.** Se identificaron aquellas uniones relacionadas solo con dos vialidades (nodos de grado dos).
- **Paso 3.** Las uniones de grado dos se descartaron y las dos vialidades correspondientes se unieron para formar una vialidad (un solo arco de la gráfica).
- **Paso 4.** Los pasos 2 y 3 se repiten hasta que solo quedan nodos de grado diferente a 2.

En la Figura 2.2 se presenta de manera gráfica el proceso antes descrito. El nodo seis es el único con grado igual a dos, por lo que es eliminado y la gráfica de ejemplo queda compuesta de cinco nodos, todos con una centralidad de grado diferente a dos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.2 Proceso de reducción de la complejidad del modelo

La unión de vialidades para formar una sola siguió un proceso para mantener los atributos del modelo original. Estos son el identificador de la red, tipo vial, nombre, longitud, entre otros. Se identificaron tres casos importantes a tomar en cuenta:

- **Caso 1:** Las dos vialidades pertenecen al mismo tipo, por ejemplo, los dos segmentos son de tipo carretera, avenida o calle.
- **Caso 2:** Cada una de las dos vialidades pertenece a un diferente tipo de vialidad, por ejemplo, uno es una carretera y el otro es una avenida.
- **Caso 3:** Una de las vialidades es de tipo enlace.

Las reglas de asignación del nuevo valor de cada atributo durante la unión de vialidades se muestran en la Tabla 2.1. Las reglas se enfocaron en: i) mantener la continuidad de las carreteras; y ii) no sobreestimar las características del arco que se obtiene como resultado de la unión. Como se muestra en la tabla, dependiendo del caso es la regla a seguir. De manera general para el Caso 1, donde ambos arcos son del mismo tipo vial, se decidió mantener los atributos del tramo más largo; para el Caso 2, donde son de diferente tipo vial, se decidió mantener los atributos del arco

de menor jerarquía de tipo vial; y para el Caso 3, se decidió mantener los atributos de la vialidad que no fueran un enlace, ya que no se encontró una justificación para que una vialidad sin intersecciones cambie, por ejemplo, de tipo “Carretera” a un tipo “Enlace”. Con respecto a la jerarquía de los tipos de vialidad, se considera el tipo “Carretera” como el más importante y los de menor importancia son los segmentos por los que no circulan vehículos de carga, como el tipo “Peatonal”, “Vereda”, “Camino” o “Calle”, entre otros.

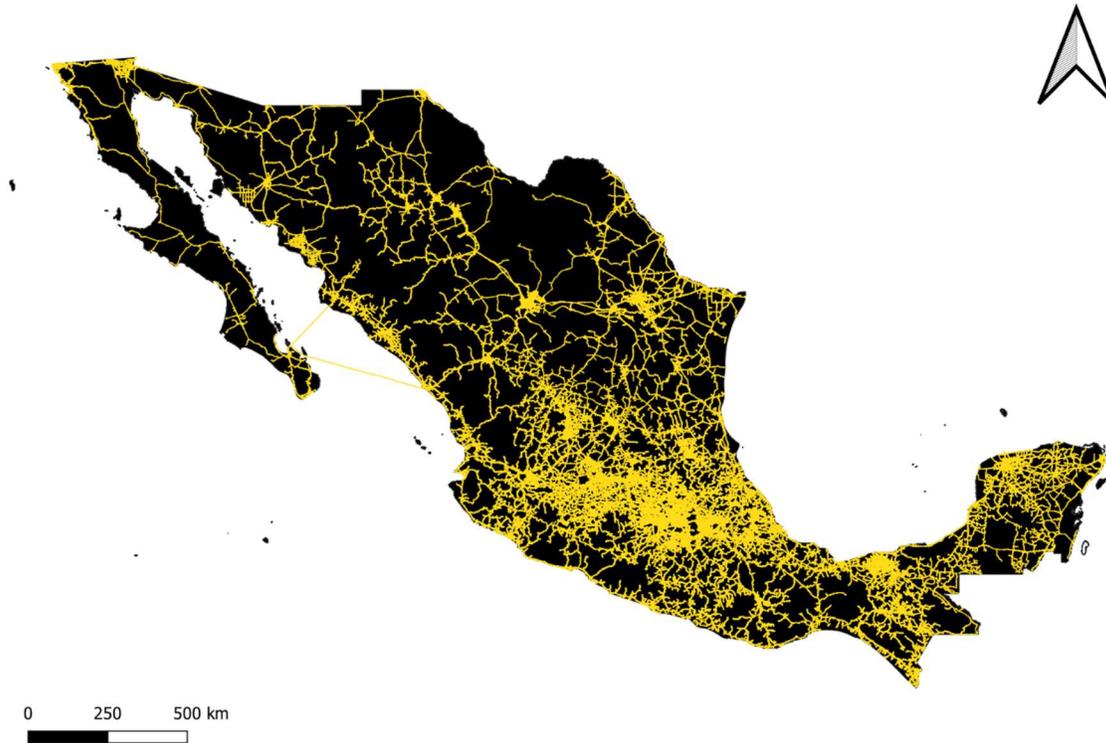
Tabla 2.1 Reglas seguidas para mantener los atributos de la red

Atributos	Reglas Caso 1	Reglas Caso 2	Reglas Caso 3
Identificador	Se elige el mayor	Se elige el menor	Se elige el menor
Tipo de vialidad	Son iguales	Se elige el de menor jerarquía de tipo vial	Se elige el de mayor jerarquía de tipo vial
Nombre	Se mantiene el del tramo más largo	Se elige el de menor jerarquía de tipo vial	Se elige el de mayor jerarquía de tipo vial
Código	Se mantiene igual	Se elige el de menor jerarquía de tipo vial	Se elige el de mayor jerarquía de tipo vial
Condición del pavimento	Se mantiene el del tramo más largo	Se elige el de menor jerarquía de tipo vial	Se elige el de mayor jerarquía de tipo vial
Recubrimiento	Se mantiene el del tramo más largo	Se elige el de menor jerarquía de tipo vial	Se elige el de mayor jerarquía de tipo vial
No. de carriles	Se elige el menor número de carriles	Se elige el menor número de carriles	Se elige el menor número de carriles
Estatus	Se elige el menor estatus	Se elige el menor estatus	Se elige el menor estatus
Condición de operación	Se elige la menor condición	Se elige la menor condición	Se elige la menor condición
Nivel	Se mantiene el del tramo más largo	Se mantiene el del tramo más largo	Se mantiene el del tramo más largo
Peaje	Se elige el mayor peaje	Se elige el mayor peaje	Se elige el mayor peaje
Circulación	Se mantiene el del tramo más largo	Se mantiene el del tramo más largo	Se mantiene el del tramo más largo
Escala de visualización	Se mantiene el del tramo más largo	Se mantiene el del tramo más largo	Se mantiene el del tramo más largo
Velocidad	Promedio ponderado	Promedio ponderado	Promedio ponderado
Unión inicial	La del primer tramo	La del primer tramo	La del primer tramo
Unión final	La del segundo tramo	La del segundo tramo	La del segundo tramo
Longitud	La suma de ambos	La suma de ambos	La suma de ambos
Ancho	El ancho mínimo	El ancho mínimo	El ancho mínimo
Fecha de actualización	Se mantiene la del tramo más largo	Se mantiene la del tramo más largo	Se mantiene la del tramo más largo
Calificador de representación	Se mantiene la del tramo más largo	Se mantiene la del tramo más largo	Se mantiene la del tramo más largo
Geometría	La unión	La unión	La unión

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del proceso de reducción de la complejidad de la red, se eliminaron 738, 444 uniones que representan el 47.71% respecto del total. Además, la red quedó compuesta por 1' 013, 386 segmentos, lo cual representa una disminución del 42.15% del número de segmentos originales.

Una vez concluido el proceso de reducción del modelo, se decidió prescindir de aquellas vialidades por las que los vehículos de carga no transitan en condiciones normales, como son: callejones, cerradas, andadores, caminos de terracería, privadas, rampas de frenado, veredas y peatonales. Por último, se validó que la porción final de la red nacional de caminos estuviera totalmente conectada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.3 Red Nacional de Caminos simplificada

2.2 Datos GPS

La muestra de datos GPS provino de seis empresas de autotransporte de carga, las cuales operan con vehículos no articulados y articulados. Los periodos de tiempo que abarca la muestra van de julio de 2016 a septiembre de 2018 y el periodo de julio 2020 a julio de 2021 (sin datos del año 2019).

Las seis muestras suman un total de 256' 377, 328 registros, de los cuales se descartaron todos aquellos con una velocidad igual a cero. En total se cuenta con poco más de 56 millones de registros GPS a lo largo del territorio mexicano con velocidades mayores a cero. Cada registro se compone además del identificador del vehículo de carga, su ubicación, la

fecha y hora. En la Figura 2.4 se presenta la muestra de datos GPS considerada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.4 Muestra de datos GPS

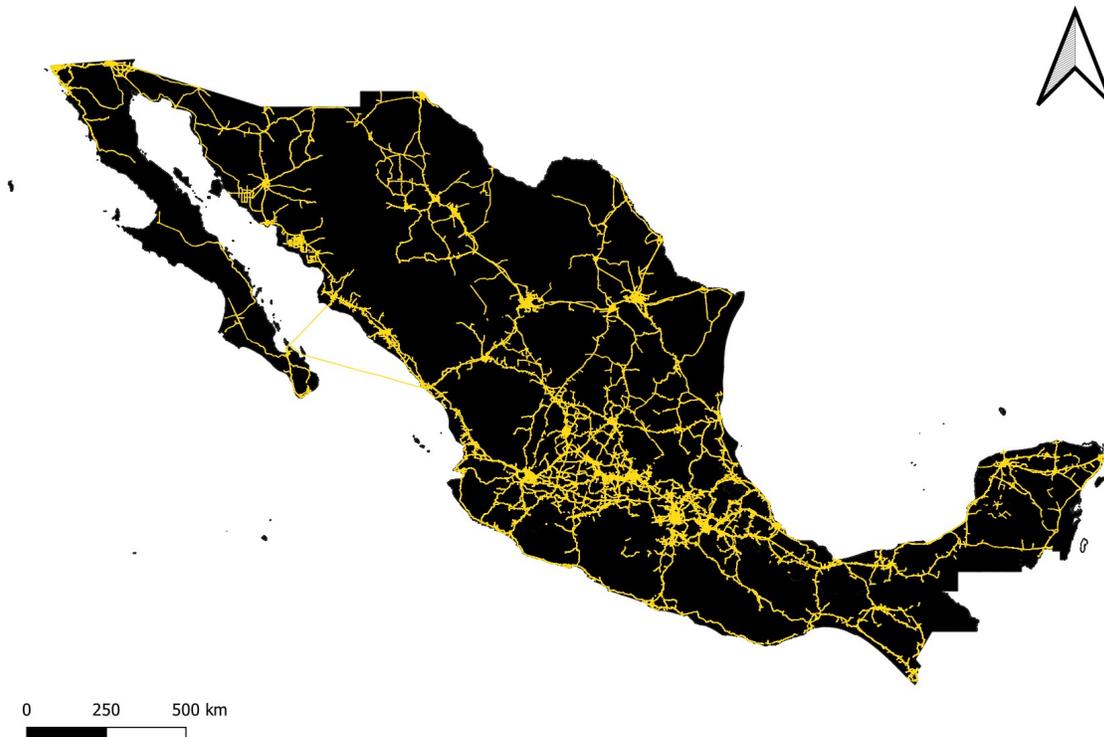
Una vez consolidadas las seis muestras, se dio paso a su análisis. Dado que los datos GPS serían utilizados para ponderar los arcos de la red, fue necesario relacionar cada punto con su arco más próximo (Henry et al., 2021). El proceso se llevó a cabo utilizando funciones de análisis geoespacial de la extensión PostGIS de PostgreSQL.

Al ser una gran cantidad de puntos GPS, la tarea de relacionar cada uno de estos puntos con un segmento de la red sería un proceso que demoraría demasiado tiempo, por lo que se decidió agruparlos en una cuadrícula para después relacionar cada elemento con un segmento. Se creó para este fin una cuadrícula con elementos de doce metros por lado, se eligió esta distancia dado que el 95% de las carreteras en la base original presentan esta anchura como máximo.

Como segundo paso se relacionaron los segmentos con los elementos de la cuadrícula que intersectan y, en consecuencia, los puntos GPS contenidos. Al examinar los resultados del agrupamiento de los datos, se observaron dos casos importantes:

- Relaciones de celdas con segmentos cercanos que no corresponden; y
- Registros GPS con menos de una hora de diferencia en el mismo segmento.

El primer caso, que es consecuencia del proceso de agrupamiento y asignación de segmentos, se mitigó anulando las relaciones donde el número de puntos era muy pequeño, así como eliminando datos atípicos en los grupos de puntos de cada tramo. Para el segundo caso, antes de estimar los indicadores de fluidez, se decidió tomar el promedio de las velocidades que correspondían al mismo vehículo, el mismo día, en el mismo segmento, ya que estos casos correspondían a velocidades bajas que indican un posible embotellamiento en la carretera. Una justificación para este paso es el gran número de registros GPS con velocidades cercanas a cero en un mismo intervalo de tiempo, en un día, en un mismo segmento, y que pueden provocar que las estimaciones de las velocidades resulten más bajas de lo que realmente son.

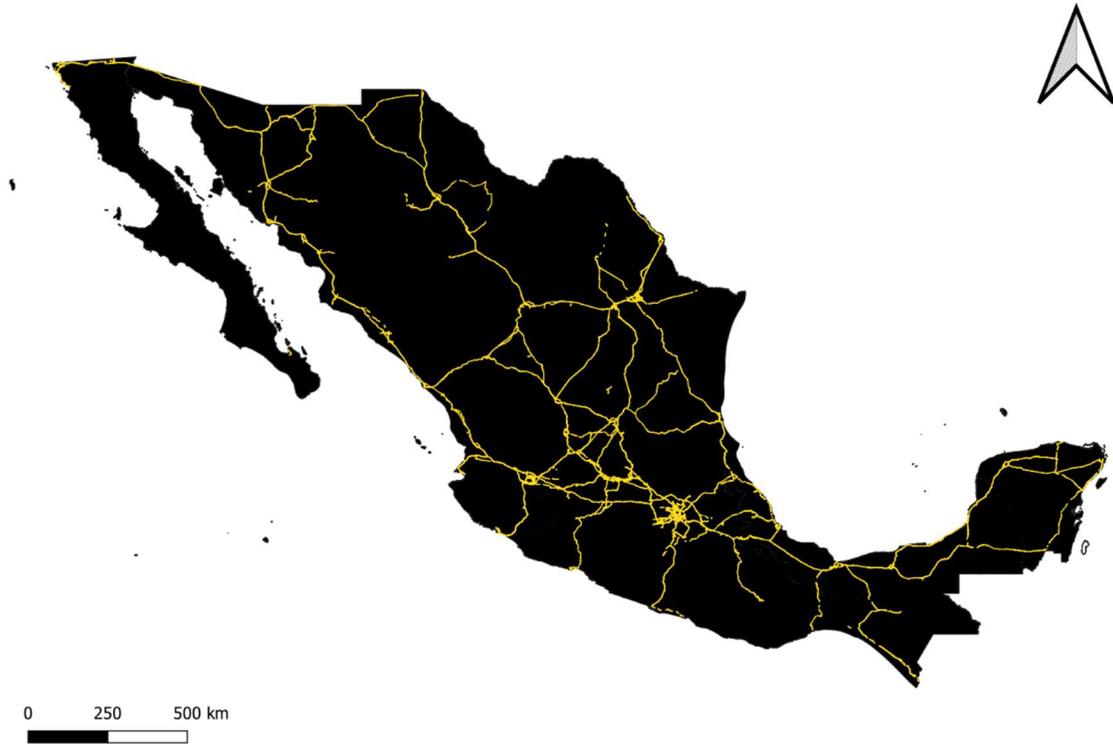


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.5 Red Nacional de Caminos con datos

En la Figura 2.5 se muestran los segmentos de la red que tienen relacionados puntos GPS. Sin embargo, se observó que varios de estos segmentos presentan un número pequeño de datos. Tomando la RNCM

simplificada se tiene que el 75% de los segmentos presenta 3 o menos puntos, por lo que se decidió tomar el percentil del 95% de puntos para establecer un límite mínimo de datos en los segmentos para ser analizados. Como resultado, en la Figura 2.6 se muestran los segmentos con mínimo 145 puntos GPS relacionados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.6 Red Nacional de Caminos con mínimo 145 datos

2.3 Estimación de índices

Una vez contando con la relación entre registros GPS y arcos de la red, el siguiente paso fue identificar los valores atípicos. Para este fin se usó el método “Diagrama de Caja” (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, 2013) que clasifica como valores atípicos moderados los registros fuera del intervalo:

$$[Q1 - 1.5 * RI, Q3 + 1.5 * RI]$$

donde $Q1$ es el primer cuartil; $Q3$ es el tercer cuartil; y $RI = Q3 - Q1$ es el rango intercuartil.

El siguiente paso fue estimar las medidas de tendencia central y dispersión necesarias para las medidas de fluidez. Por cada segmento con

datos se estimaron los cuartiles, el percentil del 5% y la media de las velocidades. Como se puede observar en la Tabla 2.2 las medidas de fluidez, como el índice de reserva y el tiempo de reserva, se basan en el tiempo de viaje y se propone que sean estimados con las velocidades observadas en las muestras. Más aún, se propone cambiar el tiempo medio por la mediana que es una medida de tendencia central más robusta, es decir, que no se ve influenciada por valores extremos.

Tabla 2.2 Medidas de fluidez usadas en el presente estudio

Índice	Fórmula original	Fórmula propuesta	Detalles
Índice de tiempo de reserva	$BI = \frac{\text{Perc. 95\%} - \text{Tiempo medio de viaje}}{\text{Tiempo medio de viaje}}$	$BI = \frac{\text{Perc. 95\%} - \text{Mediana}}{\text{Mediana}}$	Tiempo extra necesario expresado en porcentaje
Tiempo de reserva	$BT = \text{Perc. 95\%} - \text{Tiempo medio de viaje}$	$BT = \text{Perc. 95\%} - \text{Mediana}$	Tiempo extra necesario expresado en unidades de tiempo

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, las formulas quedarían propiamente definidas como:

$$BI_i = \frac{\frac{l_i}{velp5_i} - \frac{l_i}{med_i}}{\frac{l_i}{med_i}}$$

$$BT_i = \left(\frac{l_i}{velp5_i} - \frac{l_i}{med_i} \right) * 60$$

Donde:

- BI_j es el índice de tiempo de reserva del segmento i de la red;
- BT_i es el tiempo de reserva en minutos del segmento i de la red;
- l_i es la longitud en kilómetros del segmento i de la red;
- $velp5_i$ es el percentil del 5% de las velocidades observadas en el segmento i de la red;
- med_i es la mediana de las velocidades observadas en el segmento i de la red.

En las fórmulas anteriores se puede observar el uso del percentil del 5% (en el caso de las velocidades) en lugar del percentil del 95% (en el caso original de los tiempos), esto para cumplir con la relación inversa que existe entre la velocidad y el tiempo.

Al contar con la red de caminos caracterizada con las medidas estadísticas y de fluidez necesarias, el siguiente paso fue estimar las medidas de teoría de gráficas. Sin embargo, se pudo observar la existencia de segmentos que no tenían datos, esto a pesar del tamaño importante de la muestra con que se contó.

En los segmentos sin registros GPS se establecieron reglas de penalización para asignarles pesos. Lo anterior debido a que la falta de información se puede también interpretar en la mayoría de los casos como la falta de condiciones óptimas para que los vehículos de carga transiten por dichos segmentos.

Queda claro que también pueden existir otras razones, como: a) que las empresas transportistas no hayan tenido demanda de servicios por esas zonas; b) que no exista cobertura del servicio de monitoreo GPS; c) que la relación entre la longitud del tramo y el intervalo de tiempo entre cada registro GPS no haga posible que se registren datos en el segmento; entre otras causas. Sin embargo, no se cuenta con una manera eficaz de determinar la causa real, por lo que la penalización fue ponderada de acuerdo a la jerarquía del tipo de vialidad de la cual se tratara, como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Penalizaciones por tipo de vialidad

Tipo de vialidad	Velocidad Penalizada (km/hr)	Tiempo de reserva penalizado (minutos)
Carretera, Corredor, Periférico	10	60
Calle, Diagonal, Glorieta, Ampliación	1	120
Enlace	Velocidad de diseño	0.0001
Ferri	30	70
Otro tipo de vialidad	5	90

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un programa con la biblioteca NetworkX de Python para determinar la centralidad por intermediación. Esta biblioteca ha sido utilizada en otros trabajos (King, Aboudina y Shalaby, 2019; Henry, Furno y Faouzi, 2021). En específico se usó la función:

```
betweenness centrality_subset(G, sources, targets, normalized = False, weight = None)
```

Donde:

- **G** es la gráfica dirigida de la RNCM.

- Para definir los orígenes (**sources**) y destinos (**targets**) se usó un subgrupo de elementos de la capa de “Sitios de Interés” del modelo de la Red Nacional de Caminos 2021. Se filtraron aquellos elementos que fueran de clase Aduana, Aeropuerto Internacional, Estación de Ferrocarril, Puerto Industrial, Puerto Fronterizo, Terminal de Carga Multimodal o Zona Industrial con nombre. Después se relacionó cada elemento con un arco de la red que se encontrara a menos de un kilómetro de distancia y se hizo una lista con los nodos iniciales de dichos tramos. Esta lista de 189 nodos fueron los orígenes y destinos utilizados en la función (Figura 2.7).
- El parámetro de opción de normalización (**normalized**) se quedó configurado como falso para obtener como resultado el número de caminos más cortos en que participó cada arco de la red.
- Por último, el peso (**weight**) se hizo variar de entre cuatro opciones:
 - tiempos de viaje estimados con las velocidades del modelo de la RNCM;
 - tiempos de viaje estimados con la mediana de las velocidades;
 - tiempos de viaje estimados con la velocidad mínima observada en el 95% de las ocasiones;
 - y el tiempo de reserva en minutos.

Los resultados junto con su discusión son presentados en la siguiente sección.

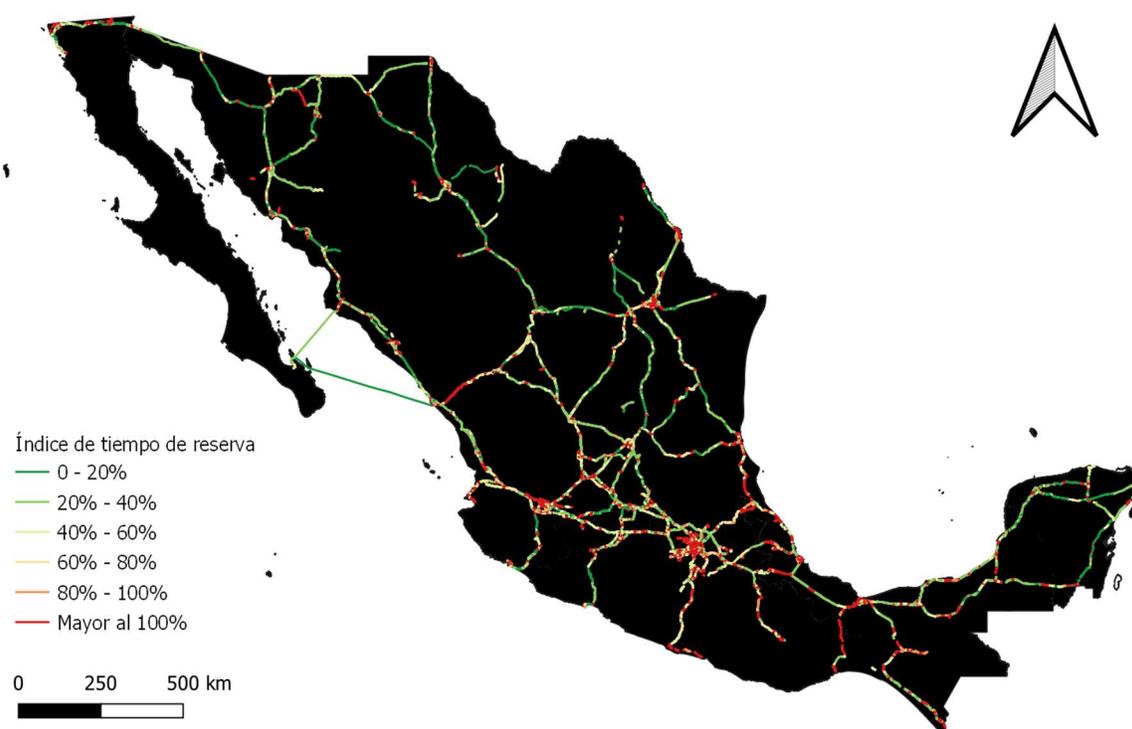


Fuente: Elaboración propia.

Figura 2.7 Nodos origen-destino

3. Resultados

Como primer resultado se obtuvo la actualización de los tiempos de viaje estimados con las velocidades observadas en la muestra de datos GPS. Con estos tiempos de viaje se obtuvieron: i) el índice de tiempo de reserva; y ii) el tiempo de reserva por segmento carretero de la RNCM simplificada. En la Figura 3.1 se presenta este índice a nivel nacional. Los colores que van cambiando de verde – amarillo – naranja – rojo indican el nivel de confiabilidad de los tiempos de viaje, siendo el color verde indicador de menor variabilidad de los tiempos de viaje y llegando al color rojo como indicador de una mayor variabilidad.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.1 Índice de tiempo de reserva

En particular se observan grupos de segmentos con niveles altos de tiempo extra de viaje a considerar, en las zonas metropolitanas de Monterrey, Guadalajara y la Ciudad de México. Un tramo de longitud considerable y un índice de tiempo de reserva mayor al 100% corresponde a la carretera federal de cuota Durango – Villa Unión, con clasificación ET2,

es decir que el tiempo de viaje en ese tramo puede llegar a duplicarse. Otro tramo con una alta variación en los tiempos de viaje es la carretera federal Coahuila – Salina Cruz, también clasificada como ET2. Por otro lado, un tramo con un índice de tiempo de reserva menor al 20% es la carretera San Luis Potosí – Matehuala – Saltillo, de clasificación ET4, lo que significa que el tiempo de viaje por este tramo presenta poca variación. Otro tramo con poca variabilidad es la carretera Saltillo – Torreón, también de clasificación ET4. En general se observa un buen desempeño en el Corredor Querétaro – Ciudad Juárez, en el tramo a partir de Gómez Palacio hasta la frontera norte.

A continuación, se presentan cuatro mapas con análisis de centralidad de intermediación por ruta más corta, los cuales sirven para comparar el diseño de rutas considerando:

- velocidades de diseño (caso menos realista);
- mediana de las velocidades (medida similar al promedio, pero más robusta);
- menor velocidad garantizada durante la operación cotidiana (percentil del 5%);
- y menor tiempo de variación de la ruta (no se trata de las rutas más rápidas, sino de las más confiables).

La comparación sirve para determinar la infraestructura carretera que ofrece el mejor desempeño para la actividad logística.

Para iniciar con el análisis de centralidad, en la Figura 3.2 se presentan los resultados de medir la Centralidad de Intermediación (CI) de rutas más cortas estimando tiempo de viaje con base en las velocidades reportadas en la RNCM. Es importante aclarar que en algunos casos se trata del promedio de dichas velocidades, de tramos que fueron unidos en el proceso de reducción de complejidad de la red. Este tipo de casos se presenta en los estudios de redes de transporte desde la teoría de gráficas más comunes, dado que por lo general no se cuenta con información real de las velocidades o tiempos de viaje de toda la red. Se puede apreciar la participación de caminos que no son utilizados en la realidad por el transporte de carga y ocurre al no considerar penalizaciones en los segmentos no utilizados.

Como se puede apreciar, las líneas varían de un color blanco hasta el rojo, denotando una menor o mayor centralidad, en términos de su participación en el número de rutas más cortas estimadas con velocidades de diseño (caso menos realista). Así, los tramos carreteros en rojo son como

“imanes” de rutas más cortas, al ofrecer menores tiempos de viaje para conectar a México, además de presentar características ideales para el transporte de carga. La centralidad se concentra en segmentos como lo son: a) parte del corredor México-Puebla-Progreso; b) Libramiento Norte de la Ciudad de México; c) corredor Querétaro – Ciudad Juárez; y d) corredor México - Nogales. Sin embargo, al ser rutas estimadas con velocidades ideales, no toman en cuenta la variabilidad de los tiempos de viaje.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.2 CI, tiempos estimados con las velocidades de la RNCM

A continuación, en la Figura 3.3 se muestran los resultados de evaluar la CI usando como peso los tiempos estimados con la mediana de las velocidades. A diferencia de los resultados con las velocidades de diseño, en este caso las rutas se concentran en un menor número de tramos carreteros con mayor preferencia por los vehículos de carga de la muestra. Los tramos en rojo atraen de manera más fuerte las rutas más cortas, dado que proporcionan mejores tiempos de viaje para el transporte de carga. Se puede notar un aumento de centralidad del corredor México – Nuevo Laredo y la permanencia de los anteriores (México-Puebla-Progreso, Libramiento Norte de la Ciudad de México, Querétaro – Ciudad Juárez y

México - Nogales). Dicho aumento de centralidad es consecuencia de la disminución de opciones carreteras ideales para el transporte de carga. Esta centralidad es similar a los resultados que se esperarían usando las velocidades medias para la estimación del tiempo de viaje.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.3 CI, tiempos estimados con la mediana de las velocidades

Hasta este punto se analizó el caso de las velocidades de diseño y el caso de las medianas de las velocidades, pero ¿qué ocurre con el escenario de velocidades menos optimistas? En la Figura 3.4 se muestran los resultados. Lo que salta a la vista es el aumento importante de centralidad que presentan el corredor México – Puebla – Progreso, el Libramiento Norte de la Ciudad de México, junto con el corredor Querétaro – Ciudad Juárez con Ramal a Tijuana. En el dado caso que las carreteras presenten su peor desempeño, las rutas más cortas se aglomeran principalmente en estos corredores, como si se tratara de una sola ruta troncal y el resto alimentadoras.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4 CI, tiempos estimados con el percentil del 5% de las velocidades

Se puede observar, hasta los mapas anteriores, que con las medianas de las velocidades las rutas más cortas aprovechan las opciones de caminos disponibles en la red y en el caso de las velocidades menos optimistas se forma una ruta troncal. Ahora toca el turno de analizar. ¿Qué pasa con respecto a las rutas con menos variación en sus tiempos extra? En la Figura 3.5 se muestra la centralidad de las rutas más confiables (es importante entender que no necesariamente son las más cortas). Se puede apreciar un comportamiento similar al caso de las medianas, sin embargo, con la importante diferencia de que se evade un tramo del corredor Querétaro – Ciudad Juárez. Se deduce que dicho tramo puede llegar a presentar una variación importante en el tiempo de viaje para algunas rutas, a partir de San Luis Potosí hasta Gómez Palacio en Durango. El resto de corredores centrales son México-Puebla-Progreso, Libramiento Norte de la Ciudad de México y México – Nogales.



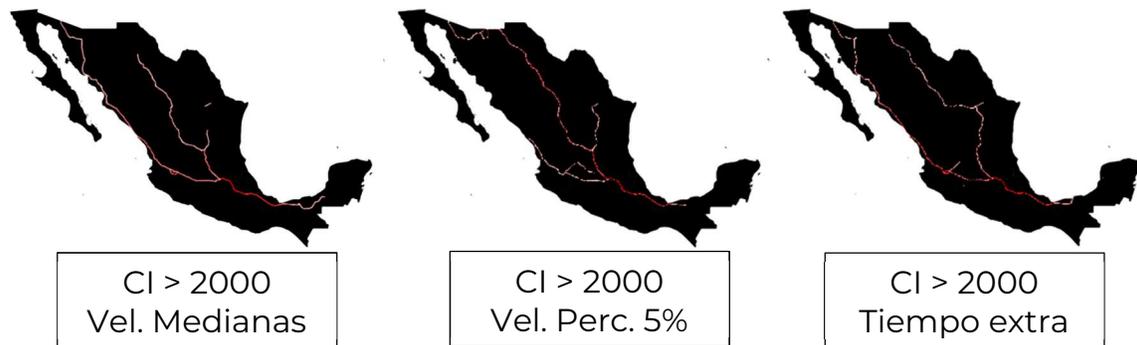
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5 CI, rutas con menor tiempo extra necesario

En seguida se muestra una comparación de la centralidad por intermediación de los tres casos: tiempos de viaje estimados con las medianas de las velocidades; tiempos de viaje estimados con la velocidad del percentil del 5%; y menor tiempo extra necesario a considerar en las rutas. Se filtraron los resultados, mostrando solo aquellos segmentos de la red con valores de CI mayores a 2,000. Un resultado importante a señalar es la permanencia del corredor México-Puebla-Progreso y el Libramiento Norte de la Ciudad de México, como elementos centrales en los tres casos, lo cual indica que no se encuentran caminos alternos con mejores características, en esa zona y en los tres escenarios.

Al realizar una inspección de los segmentos que participan en el corredor y el libramiento antes identificados, se observa que solo el 25% (180 segmentos de 722) presenta una mediana menor a 59 km/h. Además, el 25% de los segmentos puede llegar a aportar un retraso mayor a 1.46 minutos y, en el peor de los casos, llegar a ser de 83.87 minutos. Respecto a todos los segmentos analizados a nivel nacional con al menos 145 registros GPS, el aporte promedio de tiempo extra es de 1.6 minutos, por

lo que el 75% de los segmentos del corredor México-Puebla-Progreso y el Libramiento Norte de la Ciudad de México están debajo de la media.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6 Comparación de resultados con centralidad mayor a 2000

Otro caso que llama la atención, es la evasión del tramo del corredor Querétaro - Ciudad Juárez, a partir de San Luis Potosí hasta Gómez Palacio en Durango en el análisis de centralidad con tiempos extra. Una ventaja que se observa en la ruta más central (San Luis Potosí – Saltillo – Gómez Palacio) es el menor número de segmentos, lo que implica un menor número de intersecciones. Este menor número de intersecciones puede influir en la menor variación de las velocidades en el flujo, debido a la incorporación y desincorporación de vehículos.

3.1 Implicaciones para la toma de decisiones

Hasta aquí se ha caracterizado la RNCM con su fluidez y centralidad, pero ¿cómo apoyan estos resultados la toma de decisiones en el ámbito público y privado? A continuación, se exponen las implicaciones para la toma de decisiones.

En el ámbito público es de interés contar con información que ayude a destinar recursos para el mantenimiento y operación de la infraestructura de manera eficiente. Además, como resultados de este trabajo se tienen identificados los segmentos más centrales de la RNCM con respecto al autotransporte de carga y sus tiempos de viaje. Estos segmentos se pueden considerar como críticos para el buen desempeño de la red y priorizar recursos para su mantenimiento puede ser benéfico para el sector de autotransporte y sus usuarios. Un caso importante son los segmentos del corredor México-Puebla-Progreso y el Libramiento Norte de la Ciudad de México, centrales en todos los casos y por lo tanto prioritarios para el desempeño de la red.

Por otro lado, existen segmentos carreteros con clasificaciones A y ET que no aparecen como centrales y es importante analizar su bajo desempeño para el autotransporte de carga. Un ejemplo es la carretera Durango – Villa Unión de clasificación ET2 cuya centralidad, usando las velocidades de diseño (caso ideal), es de 1 206. Sin embargo, al estimar su nivel de centralidad considerando las velocidades reales de los vehículos de carga, obtiene un índice de menos de 600 en los tres casos (mediana, percentil del 5% y tiempo extra), su centralidad cae a menos de la mitad del caso ideal. Las causas pueden ser variadas (exceso de accidentes, falta de mantenimiento, tránsito pesado, etc.) pero los resultados dan un indicio de la posible necesidad de atención de dichos tramos carreteros.

En cuanto al ámbito privado, los resultados ayudan a determinar ubicaciones con un importante potencial de conectividad. Por ejemplo, la ciudad de Saltillo en el estado de Coahuila se muestra como una ubicación estratégica con acceso a rutas confiables que comunican distintos puntos fronterizos con el centro del país. Esta ubicación es idónea para la localización de nuevas plantas o almacenes que muevan mercancías por autotransporte y con necesidad de acceso al norte y centro de México, como las empresas relacionadas con el ramo automotriz.

Conclusiones

La conectividad y el nivel de fluidez que ofrece la infraestructura al movimiento de los bienes, son dos factores principales que influyen en el desarrollo logístico de cualquier país. Identificar el estado actual de conectividad y fluidez de la infraestructura carretera, es clave en el proceso de regionalización de las cadenas de suministro, permitiendo tomar las previsiones adecuadas en la ubicación de nuevos eslabones de las cadenas de suministro en México.

De esta manera, se llevó a cabo la caracterización de la infraestructura de transporte con el fin de clarificar el grado de conectividad, centralidad y fluidez de la red carretera nacional. Con ello se logró establecer los tramos que participan en mayor medida en rutas más confiables para el traslado de las mercancías y esta información se pone a disposición para ser tomada en cuenta por los tomadores de decisiones públicos (para identificar segmentos dónde invertir para mejorar el desempeño de la red) y privados (para identificar los tramos de importancia estratégica para el transporte de sus mercancías).

En el presente trabajo se utilizó el modelo de la Red Nacional de Caminos de México, a cuya red fue necesario realizarle cambios para su análisis desde la Teoría de Gráficas. Los segmentos de la red fueron además ponderados por índices de confiabilidad, estimados con velocidades observadas en muestras de datos GPS de vehículos de carga exclusivamente. Y por último se analizaron tres escenarios para determinar la centralidad de los segmentos según su participación en rutas más cortas estimadas con las medianas de las velocidades, el percentil del 5% de las velocidades y el menor tiempo extra por ruta.

Como resultado del presente trabajo se alcanzaron tres conclusiones principales:

- Primero, las variaciones en los niveles de centralidad de los tres escenarios muestran la importancia de no solo considerar el tiempo medio de viaje, sino también la variación del tiempo que pueden presentar las rutas, dado que las rutas más cortas no son necesariamente las más confiables.
- Segundo, se identificaron tramos cuya importancia no varió en los tres escenarios, lo cual es un indicador de la necesidad de mejorar el

desempeño de las rutas alternas, para aumentar la robustez de la red.

- Tercero, de los resultados de la parte norte del país se puede sugerir la necesidad de una disminución en la variación de los tiempos de viaje, para mantener niveles similares de centralidad por intermediación distribuidos en los diferentes corredores y evitar la dependencia de algunas rutas específicas.

De esta forma se concluye que el uso de datos GPS generados por los vehículos de carga pueden aportar información para medir el desempeño y robustez que ofrece la infraestructura de transporte en sus operaciones a lo largo del país. Esta información se resume en la centralidad por intermediación de los tiempos de viaje, que ayuda a develar aquellos segmentos con oportunidad de mejora para reducir la variación de los tiempos extra y focalizar recursos para aumentar las rutas alternas en la red.

Como trabajo futuro se pueden realizar análisis similares en áreas más reducidas para determinar la centralidad de los segmentos de manera local. También se pueden tomar en cuenta otro tipo de información para el análisis, como el costo del flete, matrices origen-destino o datos viales, para tomar en cuenta la preferencia de la ruta por parte de los usuarios.

Bibliografía

- Ando, H., Bell, M., Kurauchi, F., Wong, K.I. y Cheung, K. (2020). Connectivity evaluation of large road network by capacity-weighted eigenvector centrality analysis. *Transportmetrica A: Transport Science*, 77(4), 648-674. <https://doi.org/10.1080/23249935.2020.1804480>
- Ansorena, I.L. (2020). Analysing the maritime network of the port of Algeciras Bay. *World Review of Intermodal Transportation Research*, Vol. 9, No. 3, 245–263. <https://doi.org/10.1504/WRITR.2020.108222>
- Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras (2017). Memoria Anual 2016 Algeciras Port. [Consulta en línea]. <https://www.apba.es/bundles/common/docs/publicaciones/memoria-anual-2016.pdf>
- Bansal, S., y Sen, J. (2022). Network assessment of Tier-II Indian cities' airports in terms of type, accessibility, and connectivity. *Transport Policy*, 124, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.05.009>
- Barrington-Leigh, C. y Millard-Ball, A. (2019). A global assessment of street-network sprawl. *PLoS ONE* 14(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223078>
- Bono, F., y Gutiérrez, E. (2011). A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged Port Au Prince and Carrefour urban road networks. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1443-1455. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.08.002>
- de Castro Leiva, G., Orrico Filho, R. D., Geaquinto, P. D., de Oliveira Maranhão, Í. G., y de Paiva Neto, J. B. (2021). A territorial embeddedness analysis based on transport flows: Classifying the Intra-Urban space of the Rio de Janeiro metropolitan area. *Case Studies on Transport Policy*, 9(4), 1770-1782. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.08.014>
- Cedillo-Campos, M., Sanchez, C., Vadali, S., Villa, J., y Menezes, M. (2014). Supply chain dynamics and the “cross-border effect”: The U.S.–

Mexican border's case. *Computers and Industrial Engineering*, 72, 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.03.015>

Cedillo-Campos, M. G., García-Ortega, M. G., Martner-Peyrelongue, C. D., Saucedo-Martínez, J. A., y Ponce-Ceja, N. (2017). Flujos de carga automotriz y su impacto en la infraestructura ferroviaria en México: Un enfoque de fluidez en la cadena de suministro. *Ingeniería, investigación y tecnología*, vol.18 no.1.

Cedillo-Campos, M., Pérez-González, C., Piña-Barcenas, J. y Moreno, E. (2019). Measurement of travel time reliability of road transportation using GPS data: a freight fluidity approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 130, 240-288.

Cedillo-Campos, M., Piña-Barcenas, J., Pérez, C. y Mora, J. (2022). How to measure and monitor the transportation infrastructure contribution to logistics value of supply chains? *Transport Policy*, Volume 120, 120-129.

Cheng, T., Haworth, J., y Wang, J. (2012). Spatio-temporal autocorrelation of road network data. *Journal of Geographical Systems*, 14(4), 389-413. <https://doi.org/10.1007/s10109-011-0149-5>

Duan, Y., y Lu, F. (2014). Robustness Analysis of City Road Network at Different Granularities. En *Space-Time Integration in Geography and GIScience*, 127-143. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9205-9_8

Erath, A., Löchl, M., y Axhausen, K. W. (2009). Graph-Theoretical Analysis of the Swiss Road and Railway Networks Over Time. *Networks and Spatial Economics*, 9(3), 379-400. <http://dx.doi.org/10.1007/s11067-008-9074-7>

Feng, L. y Hu, X. (2019). Construction Rules of Urban Rail Transit Network Based on Complex Network Eigenvalue. *Sixth International Conference on Transportation Engineering*, 540-548. <https://doi.org/10.1061/9780784482742.061>

Freiria, S., Ribeiro, B., y Tavares, A. O. (2015). Understanding road network dynamics: Link-based topological patterns. *Journal of Transport Geography*, 46, 55-66. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.05.002>

Furno, A., Faouzi, N. E. E., Sharma, R., y Zimeo, E. (2021). Graph-based ahead monitoring of vulnerabilities in large dynamic transportation networks. *PloS one*, 16(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248764>

- Gutiérrez Pulido, H., y de la Vara Salazar, R. (2013). Control estadístico de la calidad y Seis Sigma. México DF: Mc Graw Hill Education.
- Henry, E., Furno, A., y Faouzi, N. E. E. (2021). Approach to quantify the impact of disruptions on traffic conditions using dynamic weighted resilience metrics of transport networks. *Transportation research record*, 2675(4), 61-78. <https://doi.org/10.1177/0361198121998663>
- Instituto Mexicano del Transporte [IMT], (2022). Red Nacional de Caminos [Consulta en línea]. <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>
- King, D., Aboudina, A. y Shalaby, A. (2019). Evaluating transit network resilience through graph theory and demand-elastic measures: Case study of the Toronto transit system. *Journal of Transportation Safety & Security*. <https://doi.org/10.1080/19439962.2018.1556229>
- Klapka, P., Kraft, S. y Halás, M. (2020). Network based definition of functional regions: A graph theory approach for spatial distribution of traffic flows. *Journal of Transport Geography*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102855>
- Liu, S., Cui, B., Wen, M., Wang, J., y Dong, S. (2007). Statistical regularity of road network features and ecosystem change in the Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR). *Chinese Science Bulletin*, 52(S2), 82-89. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-7020-6>
- Liu, Z., y Zhao, S. (2015). Characteristics of road network forms in historic districts of Japan. *Frontiers of Architectural Research*, 4(4), 296-307. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2015.08.003>
- Mora-García, L. A. (2012). Gestión logística integral. Las mejores prácticas en la cadena de abastecimientos. Ecoe Ediciones.
- Novak, D. C., y Sullivan, J. L. (2014). A link-focused methodology for evaluating accessibility to emergency services. *Decision Support Systems*, 57, 309-319. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2013.09.015>
- Patarasuk, R. (2013). Road network connectivity and land-cover dynamics in Lop Buri province, Thailand. *Journal of Transport Geography*, 28, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.11.011>
- Piña-Barcenas, J., Pérez-González, C. M. y Hernández-Garfias, P. (2018). Analysis of network attributes: potential implementation to the Red Nacional de Caminos de México. *Int. J. Supply Chain and Operations*

Resilience, Vol. 3, No. 3, 219-235.
<https://doi.org/10.1504/IJSCOR.2018.093259>

Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transporte [SICT]. (2020). PROGRAMA SECTORIAL DERIVADO DEL PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2019-2024. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596042&fecha=02/07/2020

Scott, D. M., Novak, D. C., Aultman-Hall, L., y Guo, F. (2006). Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, 14(3), 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2005.10.003>

Su, W., Yang, G., Yao, S., y Yang, Y. (2007). Scale-free structure of town road network in southern Jiangsu Province of China. *Chinese Geographical Science*, 17(4), 311-316. <https://doi.org/10.1007/s11769-007-0311-7>

Thomson, R., y Brooks, R. (2007). Generalisation of Geographical Networks. *Generalisation of Geographic Information*, 255-267. <https://doi.org/10.1016/B978-008045374-3/50015-6>

Touya, G. (2010). A Road Network Selection Process Based on Data Enrichment and Structure Detection. *Transactions in GIS*, 14(5), 595-614. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2010.01215.x>

Xie, F., y Levinson, D. (2009). Modeling the growth of transportation networks: A comprehensive review. *Networks and Spatial Economics*, 9(3), 291-307. <https://doi.org/10.1007/s11067-007-9037-4>

Zhang, Q. (2005). Road network generalization based on connection analysis. In *Developments in spatial data handling* (pp. 343-353). https://doi.org/10.1007/3-540-26772-7_26



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México.
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>