

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA DE TRANSPORTE APLICANDO REDES COMPLEJAS: RED DE AVENIDAS DE LA CIUDAD DE CELAYA, GUANAJUATO

VULNERABILITY ANALYSIS OF TRANSPORTATION INFRASTRUCTURE APPLYING COMPLEX NETWORKS: CELAYA'S CITY STREET NETWORK

José Eduardo Hernández Torres

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
m1803006@itcelaya.edu.mx

Salvador Hernández González

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx

José Alfredo Jiménez García

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx

Vicente Figueroa Fernández

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
vicente.figueroa@itcelaya.edu.mx

Recepción: 12/septiembre/2019

Aceptación: 8/octubre/2019

Resumen

Los sistemas de redes están presentes en la infraestructura de los países y las ciudades, en el caso del transporte terrestre, su infraestructura está formada por redes de carreteras, avenidas y calles. El análisis de vulnerabilidad de la infraestructura física permite cuantificar la sensibilidad del sistema ante amenazas, riesgos o perturbaciones que puedan presentarse en la red. En este artículo se analizó la red de avenidas principales de Celaya, empleando el enfoque de redes complejas, antes y después de la eliminación de dos nodos importantes que son entradas y salidas de la ciudad, donde se observó que los nodos con índice más alto de cercanía, no se vio afectado en gran medida, ya que quedaron de la misma forma, aunque los nodos eliminados afectaron el flujo de entrada y salida de

vehículos a la ciudad. Los resultados son de interés para profesionales dedicados al diseño de sistemas logísticos de transporte.

Palabras clave: cercanía, redes complejas, red de transporte, vulnerabilidad.

Abstract

Network systems are present in the infrastructure of countries and cities. In the case of land transport, this infrastructure is formed by networks of roads, avenues and streets. The vulnerability analysis of the physical infrastructure allows quantifying the sensitivity of the system to threats, risks or disturbances that may occur on the network. In this article, the main avenue network of Celaya was analyzed, using the complex networks approach, before and after the elimination of two important nodes which are entrances and exits of the city. It was observed that the nodes with the highest index of closeness, wasn't greatly affected, since they were the same, even though the nodes removed affected the flow of vehicles into and out of the city. The results are of interest to professionals dedicated to the design of logistics transport systems.

Keywords: *closeness centrality, complex networks, transport network, vulnerability.*

1. Introducción

La red de transporte es fundamental para el desarrollo y crecimiento de una comunidad, ya que posibilita el transporte de personas y mercancías desde un lugar a otro, permitiendo satisfacer necesidades básicas como la educación, el trabajo, la alimentación y la salud; para ello es necesario contar con una infraestructura que asegure la eficiencia y la seguridad del libre tránsito [Rui, Ban, Wang, & Haas, 2013]. La infraestructura de los países y las ciudades la forman sistemas de redes: acueductos, alcantarillado, riego, telecomunicaciones, energía y transporte. En el caso del transporte terrestre, la infraestructura está formada por el conjunto de carreteras, avenidas y calles de una ciudad, región o país. El análisis de estas estructuras proporciona información a los responsables de planificar y diseñar sistemas de transporte sobre puntos de transferencia, longitud de un viaje, y en general, del papel de una calle o avenida dentro de la red [Huang, Zhu, Ye, Guo, &

Wang, 2015]. Por ejemplo, se ha observado que dentro de la red existe un conjunto de calles y avenidas que predominan sobre el resto debido a factores como el volumen de tránsito, demanda de transporte o puntos de origen y destino [Saberri, Mahmassani, Brockmann, & Hosseini, 2016]. Preguntas como ¿Cuáles son las intersecciones que aparecen con mayor frecuencia en un viaje cuando se circula por la red de avenidas?, ¿Cuáles son las intersecciones más cercanas a cualquier punto de la ciudad?, ¿Qué sucede cuando la red se ve afectada en alguno de sus nodos? tienen respuesta analizando la estructura de la red y permiten por ejemplo a un usuario tomar decisiones sobre sus viajes.

Por otra parte, esta infraestructura está sujeta a fallas, interrupciones, y errores aleatorios, debido a fenómenos como desastres naturales o bien ataques dirigidos, sus efectos generan un reacomodo del flujo y pueden provocar la congestión e incluso el colapsamiento de las vías o bien de una red [Loteró, 2014].

En este artículo, se analizó la vulnerabilidad de la red de avenidas principales de la ciudad de Celaya, Guanajuato, empleando el enfoque de redes complejas; utilizando el índice de cercanía, se cuantificó el desempeño de las intersecciones que forman la red de vialidades principales de la ciudad, con el objetivo de entender el estado actual de la red y lo que pasaría si alguno de sus nodos desaparece o se ven afectados por cualquier suceso.

Estado del Arte

Loteró-Vélez y Hurtado-Heredia (2014) en su artículo sobre la vulnerabilidad de redes complejas y las aplicaciones al transporte urbano, presentan una revisión de la literatura acerca de ello, dando a conocer nuevos enfoques para analizar sistemas de movilidad. Una propiedad de mayor importancia en redes complejas es la capacidad que tienen para mantener sus funciones cuando ocurren fallas, errores o ataques en sus nodos o vínculos, a lo cual se le llama robustez, resiliencia o vulnerabilidad.

En el artículo “Sistemas de transporte en México: un análisis de centralidad en teoría de redes” se realizó un análisis de centralidad en las medidas de centralidad por cercanía y la espectral, esta información es estratégica para la solución de

problemas en muchos casos y se aplicó el concepto de coherencia de una red, medida que indica qué tanto la estructura de la red de transporte está construida de acuerdo con los requerimientos reales [de-la-Peña, 2012].

El artículo “Centrality and network flow” habla sobre las medidas de centralidad y las interpretaciones de dichas medidas que hacen suposiciones implícitas sobre la manera en que el tráfico fluye a través de una red, realizando una tipología de flujos de red basada en dos dimensiones de variación, siendo los tipos de trayectorias que el tráfico puede seguir y el método de propagación [Borgatti, 2005].

En el artículo “Betweenness centrality in a weighted network” aplicaron el análisis de la centralidad de intermediación en redes ponderadas, menciona que cuando el transporte en redes sigue las rutas más cortas, la unión de cada uno de los caminos puede ser considerada como la red de superposición de transporte, o bien un subgrafo [Wang, Martin-Hernandez, & van Mieghem, 2008].

En el artículo llamado “Vulnerability Analysis of Urban Rail Transit Networks: A Case Study of Shanghai, China”, se realizó un análisis de vulnerabilidad de la red y la estación del sistema de tránsito ferroviario urbano, basándose en redes complejas y la teoría de grafos. Identificaron que dicha red es bastante robusta ante los ataques aleatorios, pero es vulnerable a ataques en nodos de mayor grado y en nodos con mayor interrelación [Jian, Zhao, & Lu, 2015].

En el artículo “Measuring centralities for transportation networks beyond structures”, se realizó una investigación sobre el uso de medidas de centralidad para determinar cuáles son los nodos críticos en una red de transporte, con el objetivo de mejorar el diseño de la red y diseñar planes que hagan frente a los fallos de dicha red, aplicándolo en la red del metro de Singapur [Cheng, Roy, Lim, & Zhu, 2015].

En lo referente al análisis de calles y avenidas empleando medidas de centralidad se pueden mencionar los trabajos de {Crucitti, Latora, & Porta, 2006}, [Cardillo, Scellato, Latora, & Porta, 2006], [Strano, y otros, 2013] y [Boeing, 2018]. Dos conclusiones de estos trabajos son que las calles forman redes donde el grado promedio es menor o igual a 3 y que las medidas de centralidad permiten diferenciar aquellas ciudades con un crecimiento controlado y planificado. También se ha observado que dentro de una red de avenidas existe una jerarquía en cuanto a la

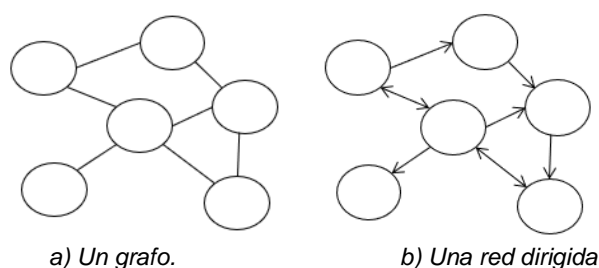
relevancia de las vialidades, debida a factores como el volumen de tránsito (20% de las calles captan el 80% del tránsito en una ciudad [Huang, et al. 2015]).

Redes complejas

Existe un consenso en el sentido de que el inicio de la Teoría de Grafos tiene su origen en el trabajo de Euler, cuando propuso el problema conocido como Problema de los Puentes de Königsberg. Con el paso del tiempo, la Teoría de Grafos, el análisis de redes y las redes complejas han sido aplicados a diversas disciplinas, el problema original de la Teoría de Grafos surgió de un problema de transporte urbano [Derrible & Kennedy, 2011].

El auge del estudio de las redes complejas dio inicio a finales de los años 90 dando lugar a un amplio soporte conceptual y metodológico en el análisis de redes sociales y gracias a aportes empíricos y teóricos de la física estadística [Newman M., 2010]. En el desarrollo del formalismo de las redes complejas, los biólogos, sociólogos, economistas e ingenieros de diversas áreas se han concentrado en la recolección de información empírica y en la fenomenología de diversos sistemas sociales, naturales y artificiales, los matemáticos han hecho aportes en la Teoría de Grafos y los físicos han dado las bases teóricas para la definición de una concepción que integra trabajo empírico, análisis y modelación [Barabási, 2016].

Una red es una representación de los componentes de un sistema, los cuales son llamados nodos o vértices, las interacciones directas que hay entre ellos se representan mediante arcos, llamados también enlaces o bordes (Figura 1). Con esta representación mediante una red, es posible estudiar sistemas que pueden diferir mucho en naturaleza, apariencia o alcance [Barabási, 2016].



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Ejemplo de un grafo y una red dirigida, las flechas indican la dirección del flujo.

Una red compleja se refiere a una red o grafo, la cual tiene propiedades estadísticas y topológicas cuantificables. En la actualidad las redes complejas se estudian por su relación con muchos campos de la ciencia. Muchos sistemas en la naturaleza se pueden describir por medio de redes complejas.

Vulnerabilidad (robustez) de una red

No existe consenso en la definición del concepto de vulnerabilidad, que también es asociado con la robustez o resiliencia.

Se puede definir vulnerabilidad como un concepto formado por dos partes, la primera tiene que ver con la probabilidad de que ocurra un evento peligroso y la segunda, llamada exposición, tiene que ver con las consecuencias del evento en cierto lugar de la red [Loteró Vélez & Hurtado Heredia, 2014]. Siendo esta la sensibilidad del sistema, en este caso la infraestructura física, ante las amenazas, los riesgos o las perturbaciones que puedan presentarse en la red, siendo esta una disminución de la eficiencia de la red después de un ataque.

La robustez es la capacidad del sistema de mantener su estructura o sus funciones intactas o ligeramente afectadas cuando está sujeto a una perturbación y la resiliencia es la capacidad del sistema de reponerse o recuperarse después de una perturbación, dichos conceptos son complementarios al de vulnerabilidad.

Para medir la vulnerabilidad o robustez de una red, esta debe ser evaluada después de la eliminación de uno o varios de sus elementos, ya sean nodos, arcos o la combinación de ambos, donde esta eliminación puede ser de forma aleatoria, simulando una falla, o también puede ser dirigida a un elemento importante simulando un ataque [Barabási, 2016].

La eliminación de nodos en forma dirigida se inicia eliminando los nodos más importantes, que pueden ser los más conectados. La importancia de un nodo está dada por varios factores asociados a su conectividad y a la de la red como un todo. Una de las propiedades de un nodo son las medidas de centralidad de grado nodal, la cual se define como el número de conexiones que tiene un nodo. La centralidad de intermediación, que se define a partir del número de geodésicas o caminos más cortos entre pares de nodos que pasan por el nodo en cuestión. La centralidad de

cercanía está dada por el inverso de la suma de las distancias del nodo a los demás nodos. Los coeficientes de cohesión están dados por la conectividad entre los vecinos de un nodo y las distancias geodésicas [Newman M., 2010].

Los resultados de Albert, Jeong y Barabási (2000) del análisis de vulnerabilidad y robustez de las redes complejas, marcaron un punto de partida, ya que ellos encontraron que algunos de los aspectos de sus propiedades, dependen de la topología de las redes, en particular de la distribución del grado nodal. Siendo que las redes libres de escala son consideradas como redes robustas ante la presentación de errores o fallas aleatorias en su sistema, mientras que son vulnerables ante ataques dirigidos a los nodos más conectados. Las redes aleatorias son robustas ante los ataques dirigidos a nodos muy conectados.

Por otro lado, los resultados de Newman (2002), muestran que las redes con configuración selectiva en sus distribuciones de grado son más robustas ante la eliminación de nodos altamente conectados. Una configuración selectiva se da cuando los nodos con mayor número de conexiones están enlazados con otros nodos altamente ligados. Este comportamiento se observa en redes sociales, mientras que las redes tecnológicas y las biológicas tienden a no tener una configuración selectiva. Los resultados obtenidos sugieren que las redes sociales son menos vulnerables que las redes biológicas o las artificiales ante la presencia de ataques a sus nodos más importantes [Loteró Vélez & Hurtado Heredia, 2014]. Se plantean diferentes maneras de analizar los efectos de quitar un elemento de la red, como por ejemplo establecer cuando cambian las geodésicas, evaluar que tanto se fragmenta la red o evaluar los cambios en los flujos de ésta. Para ello, no hay un acuerdo sobre alguna metodología de análisis que tenga en cuenta los cambios en la topología de la red de forma sistemática, para poder medir y estudiar la vulnerabilidad de una red ante diferentes sucesos posibles.

2. Método

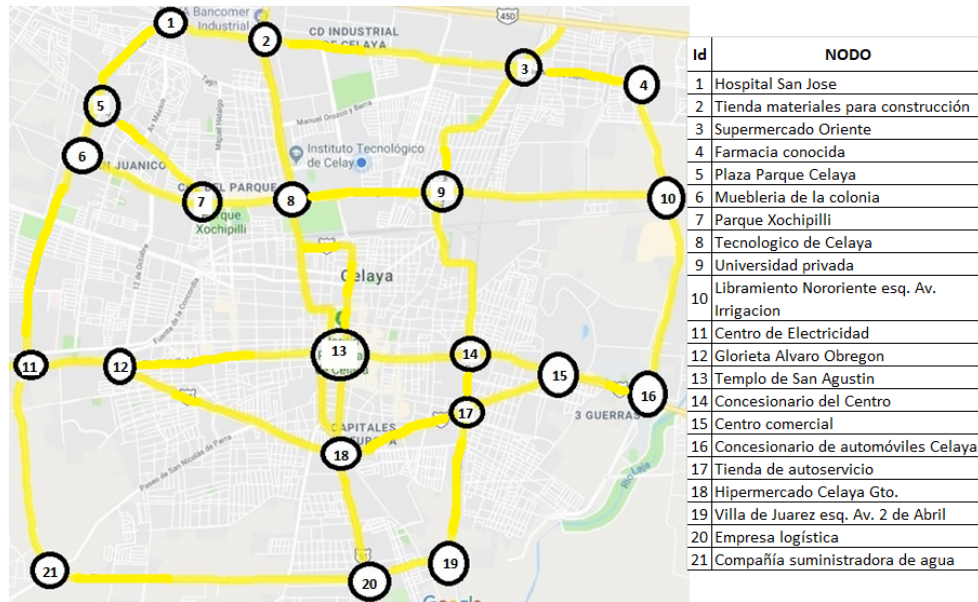
La metodología que se empleó para el desarrollo de esta investigación con el objetivo de analizar la red de avenidas principales de la ciudad de Celaya, Guanajuato, mediante redes complejas, consta de las siguientes etapas:

- Selección de la infraestructura a analizar. Se seleccionó la red de avenidas principales de la Ciudad de Celaya, Guanajuato. La razón de esta decisión radica en el hecho de que las vialidades seleccionadas favorecen la conectividad en la ciudad porque sus características permiten un flujo vehicular de mayor volumen, circulan varias rutas de autobuses. Por otra parte, sólo se toman las intersecciones entre vialidades, las cuales funcionan como nodos de transferencia (similares a las estaciones de transbordo en sistemas de transporte masivo como el metro), de esta manera, el análisis se centra en las propiedades de transferencia de la red de avenidas en la ciudad [Derrible, 2012].
- Construir el modelo de red. Después de seleccionar la red de avenidas principales de Celaya y de haber identificado los nodos, se construyó la red, esto se realizó empleando el paquete Gephi, el cual permite obtener las características de redes complejas [Gephi.org, 2017].
- Analizar y evaluar la red avenidas. Una vez construido el modelo de red se cuantificaron los índices de cercanía, los cálculos se realizaron empleando el paquete Gephi. Se construyó la gráfica de probabilidad acumulada de la medida de centralidad de cercanía [Cats, 2017].
- Analizar la vulnerabilidad de la red de avenidas. Una vez obtenidos los datos anteriores se realizó el análisis de vulnerabilidad de la red, eliminado dos nodos importantes, los cuales concentran el flujo de entradas y salidas de vehículos a la ciudad. Y repitiendo las dos etapas anteriores, para construir nuevamente el modelo de red y el análisis de la cercanía de las avenidas.
- Generar conclusiones de acuerdo con lo desarrollado. En esta última etapa se redactaron conclusiones concretas referente al desarrollo de la investigación.

3. Resultados

En la figura 2 se muestra el mapa de la ciudad de Celaya, Gto., donde se representan las avenidas principales de la ciudad, los nodos corresponden a las intersecciones que se encuentran en los cruces de dichas avenidas; cabe señalar que los nombres asignados a cada nodo corresponden a una referencia (negocio,

edificio, estación de gasolina) conocida y que permite una rápida ubicación de dicho punto en un mapa. Los arcos corresponden a las avenidas que conectan un par de nodos, el peso del arco corresponde a la distancia que hay en kilómetros de un nodo a otro.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Representación de nodos en el mapa de la Cd. De Celaya Guanajuato.

En la figura 2 se aprecia un conjunto de avenidas que forman un circuito que rodea a la ciudad formado por los nodos 19-20-21-11-6-5-1-2-3-4-10-16. Se debe señalar que para la época en la que se realizó esta investigación el arco que une los nodos 16 y 19 correspondía a un camino sin pavimentar, por lo que no se consideró en este trabajo. Los nodos 16, 20 y 11 surgen de la intersección que forman una avenida con carreteras que conecta a la ciudad con otras poblaciones: el nodo 16 es la entrada de la carretera Celaya–Querétaro, el nodo 20 corresponde a la carretera Celaya–Salvatierra, el nodo 11 corresponde a la carretera Celaya–Salamanca. En figura 2, a la derecha la tabla donde se indica el “Id”, número de nodo y el establecimiento con el que fue identificado cada uno de ellos.

En la tabla 1 se puede observar el nodo de origen y el nodo de destino con sus respectivos pesos, que son las distancias en kilómetros que hay entre cada uno de ellos, de acuerdo con lo especificado en el mapa de la ciudad de Celaya, Gto.

Tabla 1 Origen-Destino con distancias.

NODO ORIGEN	NODO DESTINO	DISTANCIA KILÓMETROS	NODO ORIGEN	NODO DESTINO	DISTANCIA KILÓMETROS
1	2	1.1	10	16	2.4
1	5	1.3	11	12	1
2	3	3.1	11	21	2.6
2	8	1.9	12	13	2.6
3	4	1.3	12	18	2.8
3	9	1.9	13	14	1.5
4	10	1.4	13	18	1.2
5	6	0.6	14	15	1.1
5	7	1.8	14	17	0.7
6	7	1.6	15	16	1.1
6	11	2.6	15	17	1.2
7	8	1.1	17	18	1.6
8	9	1.7	17	19	1.8
8	13	2.3	18	20	1.5
9	10	2.6	19	20	1
9	14	2.2	20	21	3.5

Fuente:Elaboración propia.

A continuación, se construyó la red empleando el paquete Gephi, utilizando el algoritmo de Fruchterman-Reingold para poder observar mejor la distribución de la red. El algoritmo de Fruchterman-Reingold, es un algoritmo de diseño dirigido por la fuerza. La idea de un algoritmo de diseño de fuerza dirigida es considerar una fuerza entre dos nodos cualesquiera. En este algoritmo, los nodos están representados por anillos de acero y los bordes son resortes entre ellos. La fuerza de atracción es análoga a la fuerza de resorte y la fuerza de repulsión es análoga a la fuerza eléctrica. La idea es minimizar la energía del sistema moviendo los nodos y cambiando las fuerzas entre ellos [Fruchterman & Reingold, 1991]. Se aprecia en la figura 3 que los nodos Tecnológico de Celaya, Templo de San Agustín, Concesionario del Centro y Universidad Privada ocupan la sección central de la red de avenidas, en el contexto de la infraestructura del transporte, estas intersecciones dan cohesión a la red de avenidas, como se verá más adelante, estas intersecciones son ubicaciones que favorecen la comunicación de toda la red. Lo mencionado en el párrafo anterior no implica que el resto de las intersecciones no sea vital, por el contrario, se debe recordar que cada nodo tiene una función dentro del sistema.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3 Red de nodos “cercanía” con el algoritmo de Fruchterman-Reingold.

Centralidad de la cercanía

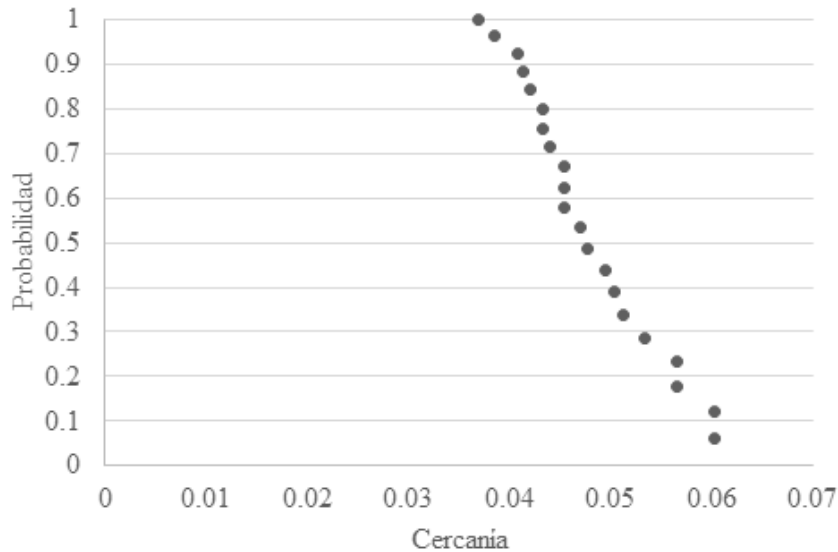
En la figura 3 se presentó la red resultante con sus pesos y sus conexiones, la intensidad del color de los nodos indica la centralidad de la cercanía; se aprecia que los cinco nodos con índice de cercanía más grande son el Tecnológico de Celaya, el templo de San Agustín, la Universidad Privada, el Concesionario del centro y el Hipermercado Celaya; en términos de distancia, estos puntos son en promedio los más cercanos a cualquier otro nodo dentro de la red. En el mapa de la ciudad, estos nodos forman un cuadro dentro del cual se ubican una gran cantidad de comercios, la terminal de autobuses y la Central de Abasto de la ciudad, por lo que se presenta un considerable flujo de vehículos. En el caso particular del Hipermercado Celaya, se trata de la conexión con la carretera Celaya–Salvatierra.

El resultado de la centralidad de la cercanía indica que aproximadamente el 20% de los nodos (4 nodos) son los que se encuentran más cerca de cualquier otro punto dentro de la red, en otras palabras, el 80% de las intersecciones entre las avenidas se encuentran muy alejadas entre sí (Figura 4); además estos 4 nodos se encuentran al sur de lo que se conoce como Centro de la ciudad.

Vulnerabilidad ante ataques dirigidos

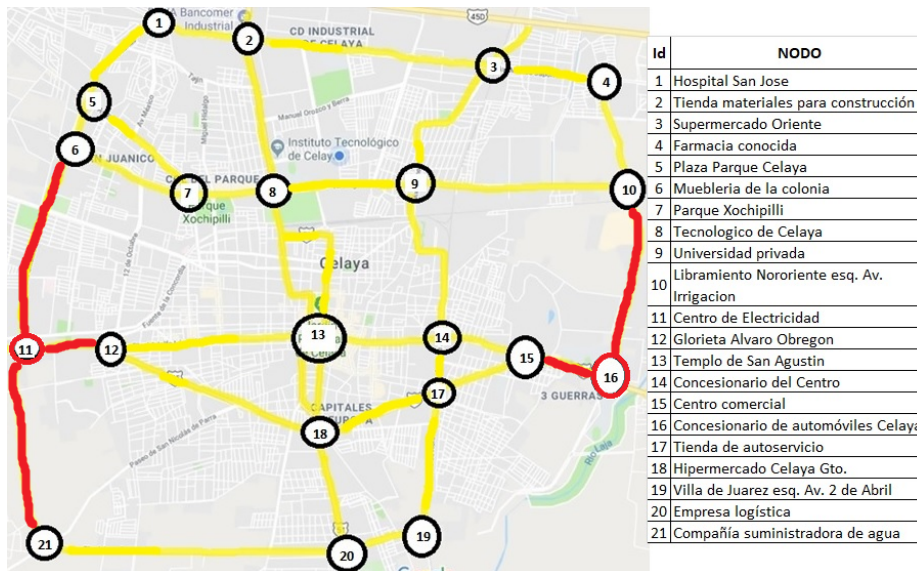
Después de que se realizaron operativos contra el robo de combustible, en la ciudad se registraron cortes de circulación mediante la quema de vehículos con el

objetivo de bloquear el paso en ambos sentidos de dos de las entradas a Celaya y retrasar así la llegada de los equipos de seguridad. En el mapa equivalió a la eliminación del nodo 11 que es la entrada y salida de vehículos de la carretera Celaya-Salamanca y del nodo 16, entrada y salida de la carretera Celaya-Querétaro, tal como se muestra en figura 5.



Fuente: Elaboración propia.

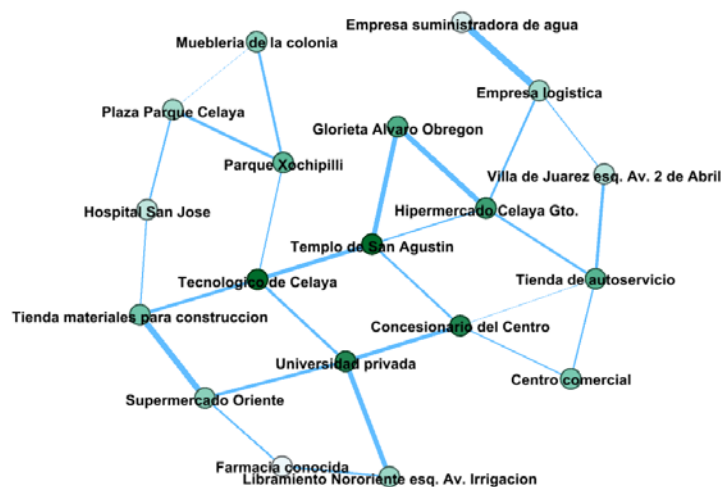
Figura 4 Gráfica de dispersión de la centralidad de la cercanía.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Eliminación de nodos de la red de Celaya.

Después de la eliminación de los dos nodos (nodo 11 y 16 marcados en rojo con sus respectivos enlaces) afectados dentro de la red representada en la figura 5, se volvió a generar dicha red en el paquete Gephi con la misma distribución que da el algoritmo de Fruchterman-Reingold, para tener una mayor perspectiva de la red, quedando como muestra figura 6.



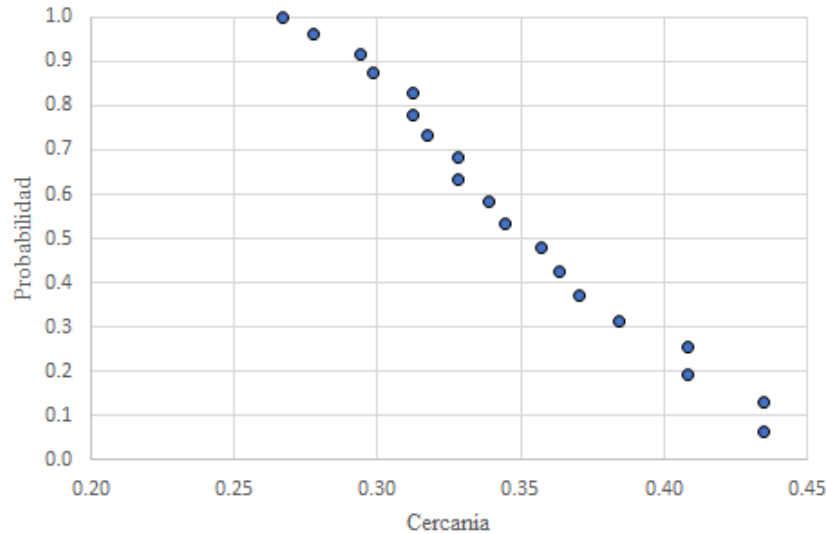
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Red de nodos “cercanía” representando el análisis de vulnerabilidad.

La figura 6, representa la red de avenidas principales de la ciudad de Celaya con el análisis de vulnerabilidad, después de la eliminación de dos de sus nodos mediante un ataque dirigido, donde se observa que al eliminar el nodo 11 “Centro de Electricidad”, ya no se cuenta con una conexión directa entre los nodos 12 “glorieta Álvaro Obregón”, nodo 6 “mueblería de la colonia” y nodo 21 “Empresa suministradora de agua”, y al eliminar el nodo 16 “Concesionario de automóviles Celaya” se elimina también la conexión directa entre el nodo 15 “Centro comercial” y el nodo 10 “Libramiento Nororiente esq. Av. Irrigación” afectando directamente la entrada y salida del flujo de vehículos a la ciudad, al igual que la ruta más corta para poder llegar a cada uno de los nodos donde se perdió la conexión, ya que en este caso es necesario buscar rutas alternas para poder llegar a dichos puntos anteriormente mencionados.

El análisis de vulnerabilidad no afectó en gran medida el resultado de la centralidad de la cercanía, ya que de igual manera indica que aproximadamente el 20% de los

nodos (4 nodos) son los que se encuentran más cerca de cualquier otro punto dentro de la red, figura 7.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Dispersión de la centralidad de la cercanía después de análisis de vulnerabilidad.

4. Discusión

Este artículo presenta un análisis de redes complejas para describir y analizar cómo se encuentra distribuida la red de avenidas principales de la ciudad de Celaya, Guanajuato, a partir del índice de cercanía, se identificaron los nodos de mayor centralidad dentro de la estructura, además de presentar un análisis de vulnerabilidad en sus nodos, es decir qué sucede si alguno de ellos se ve afectado de manera directa ante un ataque o cualquier suceso que pudiera afectarlo.

En el caso de la cercanía, el Tecnológico de Celaya, el templo de San Agustín, la Universidad Privada, el Concesionario del centro y el Hipermercado Celaya, son las intersecciones que en promedio se encuentran más cerca de cualquier otra intersección en la red.

Al realizar el análisis de vulnerabilidad en la red de avenidas principales de Celaya mediante un ataque dirigido a dos de los puntos importantes de la ciudad, se puede observar que afecta la conexión que hay con los nodos a su alrededor, ya que es necesario buscar rutas alternas para poder llegar a los nodos que quedaron incomunicados, e incluso para poder ingresar o salir de la ciudad, ya que estos son

puntos importantes para el flujo de entrada y salida de vehículos a la ciudad de Celaya, ya que se observa que al eliminar el nodo 11 “Centro de Electricidad”, ya no se cuenta con una conexión directa entre los nodos 12 “glorieta Álvaro Obregón”, nodo 6 “mueblería de la colonia” y nodo 21 “Empresa suministradora de agua”, y al eliminar el nodo 16 “Concesionario de automóviles Celaya” se elimina también la conexión directa entre el nodo 15 “Centro comercial” y el nodo 10 “Libramiento Nororiental esq. Av. Irrigación” afectando directamente la entrada y salida del flujo de vehículos a la ciudad, al igual que la ruta más corta para poder llegar a cada uno de los nodos donde se perdió la conexión, ya que en este caso es necesario buscar rutas alternas para poder llegar a dichos puntos anteriormente mencionados. Para esto es necesario mantener libres estas entradas a la ciudad y evitar que pasen este tipo de situaciones. Por otra parte, el índice de cercanía después del análisis de vulnerabilidad no se vio afectado en gran medida, ya que los cinco nodos con índice de cercanía más alto siguen siendo el Tecnológico de Celaya, el templo de San Agustín, la Universidad Privada, el Concesionario del centro y el Hipermercado Celaya; en términos de distancia, estos puntos son en promedio los más cercanos o bien, la ruta más corta a cualquier otro nodo dentro de la red.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Barabási, A. L. (2016). *Network Science* by Albert-László Barabási, 2018: *Network Science* by Albert-László Barabási: <http://networksciencebook.com/>.
- [2] Boeing, G. (2018). A Multi-Scale Analysis of 27,000 Urban Street Networks: Every US City, Town, Urbanized Area, and Zillow Neighborhood. *Environmental and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 1-18. doi:10.1177/2399808318784595.
- [3] Borgatti, S. P. (2005). Centrality and network flow. *Social Networks*, 27(1), 55-71. doi:10.1016/j.socnet.2004.11.008.
- [4] Cheng, Y.-Y., Roy, L., Lim, E.-p., & Zhu, F. (2015). Measuring centralities for transportation networks beyond structures. En P. Kazienko, & N. Chawla , *Applications of Social Media and Social Network Analysis* (págs. 23-39). New York: Springer. doi:DOI 10.1007/978-3-319-19003-7_2.

- [5] Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., & Porta, S. (2006). Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns. *Physical Review E*, 73(6), 1-7. doi:10.1103/PhysRevE.73.066107.
- [6] Cats, O. (2017). Topological evolution of a metropolitan rail transport network: The case of Stockholm. *Journal of Transport Geography*, 62(June), 172-183. doi:10.1016/j.jtrangeo.2017.06.002.
- [7] Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 1-4. doi:10.1103/PhysRevE.73.036125.
- [8] de-la-Peña, J. (2012). Sistemas de Transporte en México: un análisis de centralidad en teoría de redes. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 3(3), 72-91.
- [9] Derrible, S., & Kennedy, C. (2011). Applications of Graph Theory and Network Science to Transit Network Design. *Transport Reviews*, 31(4), 495-519. doi:10.1080/01441647.2010.543709.
- [10] Derrible, S. (2012). Network Centrality of Metro Systems. *PlosOne*, 2012, 1-10. doi:10.1371/journal.pone.0040575.
- [11] Gephi.org. (2017). Gephi: The Open Graph Viz Platform: <https://gephi.org/>.
- [12] Fruchterman, T., & Reingold, E. (1991). Graph drawing by Force-directed Placement. *Software—Practice and Experience*, 21(11), 1129-1164.
- [13] Huang, L., Zhu, X., Ye, X., Guo, W., & Wang, J. (2015). Characterizing street hierarchies through network analysis and large-scale taxi traffic flow: a case study of Wuhan, China. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 43(2), 276-296. doi:10.1177/0265813515614456.
- [14] Jian, D., Zhao, Y., & Lu, Q.-C. (2015). Vulnerability Analysis of Urban Rail Transit Networks: A Case Study of Shanghai, China. *Sustainability*, 7(6), 6919-6936. doi:doi:10.3390/su7066919.
- [15] Saberi, M., Mahmassani, H., Brockmann, D., & Hosseini, A. (2016). A complex network perspective for characterizing urban travel demand patterns: graph theoretical analysis of large-scale origin–destination demand networks. *Transportation*, 44(6), 1383-1402. doi:10.1007/s11116-016-9706-6.

- [16] Lotero Vélez, L., & Hurtado Heredia, R. G. (2014). Vulnerabilidad de redes complejas y aplicaciones al transporte urbano: una revision a la literatura. *EIA*, 11(21), 67-78. doi:10.14508/reia.2014.11.21.67-78.
- [17] Lotero, R. G. (2014). Vulnerabilidad de redes complejas y aplicaciones al transporte urbano: una revision a la literatura. *Revista EIA*, 11(21), 67-78. doi:10.14508/reia.2014.11.21.67-78.
- [18] Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction*. New York, USA: Oxford University Press.
- [19] Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction* (1 ed.). New York, USA: Oxford University Press.
- [20] Rui, J., Ban, Y., Wang, J., & Haas, J. (2013). Exploring the patterns and evolution of self-organized urban street networks through modeling. *The European Physical Journal E*, 86(3), 86-74. doi:10.1140/epjb/e2012-30235-7
- [21] Strano, E., Viana, M., da-Fontoura-Costa, L., Cardillo, A., Porta, S., & Latora, V. (2013). Urban street networks, a comparative analysis of ten European cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40, 1071-1086. doi:10.1068/b38216.