

Resiliencia en Sistemas de Transporte Urbano ante Eventos Extremos

Resilience of Urban Transportation Systems to Extreme Events

Rodolfo de la Torre López^a

RESUMEN

Este artículo analiza el estado del arte en resiliencia de sistemas de transporte urbano, enfocándose en sus dimensiones y metodologías de medición. Se utiliza un enfoque de revisión sistemática de literatura en Scopus y Web of Science, con herramientas de análisis en R, para establecer un marco conceptual actualizado. Además, se presentan las tendencias observadas en la literatura reciente y se destacan los enfoques metodológicos más empleados, subrayando áreas clave en el estudio de la resiliencia en transporte.

Palabras clave: Resiliencia, transporte, precipitaciones, desastres, bibliometrix.

ABSTRACT

This article analyzes the state of the art in resilience of urban transportation systems, focusing on its dimensions and measurement methodologies. It uses a systematic literature review

^a Profesor Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. Correo: rodolfo.delatorre@academicos.udg.mx

approach in Scopus and Web of Science, with analysis tools in R, to establish an updated conceptual framework. In addition, trends observed in recent literature are presented and the most commonly used methodological approaches are highlighted, underlining key areas in the study of transportation resilience.

Keywords: *Resilience, transport, rainfall, disasters, bibliometrix.*

INTRODUCCIÓN

La resiliencia de los sistemas de transporte urbano ha cobrado relevancia ante eventos extremos como huracanes, terremotos e inundaciones, que generan altos costos económicos y sociales en las ciudades. Los efectos de estos eventos van más allá de la simple interrupción del servicio de transporte: afectan la economía local, el bienestar de los ciudadanos y la infraestructura misma de la ciudad. En contextos urbanos, el impacto de estas disrupciones puede ser devastador, dado que los sistemas de transporte juegan un rol fundamental en la conectividad y la movilidad de la población. Por ello, estudiar la resiliencia en el transporte urbano es crucial para preparar a las ciudades ante posibles desastres naturales y humanos, que van en aumento debido al cambio climático y la urbanización acelerada.

Eventos como los huracanes Irene y Sandy en Nueva York, el colapso del puente I-35 W en Minnesota, y las recientes inundaciones en Europa del 2021 han demostrado la importancia de desarrollar un sistema de transporte capaz de soportar y recuperarse de impactos severos. La resiliencia en este contexto implica no solo la robustez estructural del sistema, sino también su adaptabilidad y capacidad de recuperación ante diferentes tipos de perturbaciones.

PROBLEMÁTICA

La resiliencia en sistemas de transporte se enfrenta a la ambigüedad y complejidad inherentes al concepto. Este ha evolucionado y ha sido interpretado de diversas maneras en disciplinas como la ecología, la psicología y la ingeniería. En el contexto de los sistemas de transporte, resiliencia se entiende como la capacidad de estos para mantener la funcionalidad y recuperarse de disrupciones, sean de origen natural (como terremotos y huracanes) o de origen humano (como ataques terroristas y conflictos laborales). Esta noción implica un enfoque en la recuperación y el mantenimiento de la funcionalidad del sistema ante condiciones adversas. Conceptos relacionados, como la vulnerabilidad y la capacidad adaptativa, están estrechamente vinculados a la resiliencia, lo cual puede dificultar la diferenciación clara entre ellos. La vulnerabilidad se refiere a la susceptibilidad de un sistema a verse afectado por perturbaciones, mientras que la capacidad adaptativa abarca la habilidad de responder y adaptarse a cambios imprevistos. En el ámbito del transporte, estas dimensiones se integran para evaluar la resiliencia de una manera más holística y comprensiva.

METODOLOGÍA

Para desarrollar una visión actualizada de la resiliencia en sistemas de transporte, se realizó una revisión sistemática en Scopus y Web of Science. Estos motores de búsqueda académicos contienen artículos de alta calidad en el campo de la ingeniería y ciencias sociales, proporcionando una base sólida de literatura relevante para el estudio de la resiliencia en transporte.

Criterios de Inclusión y Exclusión

Los artículos fueron analizados y sistematizados con la paquetería Bibliometrix en R. Los criterios de inclusión se basaron en la relevancia temática y el número de citas, lo cual permitió seleccionar estudios que aportan de manera significativa al campo de la resiliencia

en transporte. En una fase posterior, se empleó la técnica de “bola de nieve” para identificar artículos adicionales mediante las referencias de los estudios previamente seleccionados. Este proceso culminó con una base de datos final de 125 artículos, proporcionando un cuerpo de literatura robusto para el análisis conceptual y metodológico.

En cuanto a los criterios de exclusión, se descartaron artículos con menos de diez citas para asegurar que los estudios incluidos tuvieran un impacto significativo en el campo. También se excluyeron artículos duplicados y aquellos que no trataban directamente la resiliencia en el contexto de sistemas de transporte urbano.

Indicadores Bibliométricos

Los datos bibliométricos reflejan un incremento exponencial en la cantidad de publicaciones sobre resiliencia en transporte desde 2010, con Estados Unidos, China y Reino Unido liderando la producción científica. Transportation Research Record, Transportation Research Part D y Transportation Research Part A son las principales fuentes de publicación, lo que indica una consolidación del interés académico en la resiliencia de sistemas de transporte. Este incremento en la literatura sugiere que la resiliencia en transporte es una preocupación global que involucra a múltiples disciplinas y países.

Tabla 1. Artículos por año sobre resiliencia en transporte

Año	Número de Artículos
2010	3
2015	38
2020	107

Fuente: Elaboración propia con base en información
de Scopus y Web of Science.

Estos indicadores destacan un aumento significativo en las publicaciones y un interés creciente en la resiliencia de transporte a nivel global. Sin embargo, también se observa que, mientras la producción de artículos aumenta, la cantidad de citas por artículo ha disminuido en años

recientes, lo que puede indicar una mayor fragmentación en el campo y la necesidad de enfoques multidisciplinarios y colaborativos.

DEBATE EN ESTABILIDAD ECOLÓGICA

La resiliencia en sistemas de transporte urbano encuentra su origen en estudios de ecología, particularmente en la noción de resiliencia ecológica de Holling y la resiliencia de ingeniería de Pimm. Mientras que Holling considera que un sistema puede tener múltiples equilibrios y que su resiliencia radica en la capacidad de mantener sus funciones en diferentes estados, Pimm enfoca la resiliencia en la rapidez con la que un sistema retorna a un equilibrio único. Estos enfoques han influido en la manera en que se conceptualiza la resiliencia en transporte. La resiliencia ecológica aporta un enfoque más flexible y adaptable, que permite al sistema mantener una funcionalidad parcial o desplazarse a un nuevo estado de equilibrio. La resiliencia de ingeniería, por otro lado, se centra en la estabilidad estructural y en la restauración rápida de la funcionalidad, enfatizando la importancia de la velocidad de recuperación después de una perturbación.

INFLUENCIA DE RESILIENCIA COMUNITARIA Y ECONÓMICA

La resiliencia del transporte también se basa en los conceptos de resiliencia comunitaria y económica. Bruneau et al. (2003) y Rose (2004) identificaron cuatro dimensiones clave de resiliencia: robustez, redundancia, disponibilidad de recursos y rapidez. Estas dimensiones son esenciales para evaluar la respuesta del transporte ante crisis y contribuyen a que el sistema mantenga su funcionalidad ante interrupciones.

La resiliencia comunitaria enfatiza la capacidad de las comunidades para soportar y recuperarse de desastres, lo cual es aplicable en el contexto de transporte cuando se considera la importancia de la infraestructura y su papel en la recuperación comunitaria. Por otro lado, la resiliencia económica examina cómo los recursos financieros pueden ser gestionados para mantener la operación del transporte en tiempos de crisis, permitiendo una recuperación eficiente y sostenible.

DIMENSIONES DE LA RESILIENCIA EN TRANSPORTE

Los sistemas de transporte resilientes integran diversas dimensiones clave. Murray-Tuite (2006) identifica diez dimensiones, incluyendo redundancia, adaptabilidad, movilidad y capacidad de recuperación. Estas características permiten que el sistema de transporte mantenga su funcionamiento incluso bajo condiciones adversas, asegurando que los usuarios puedan seguir desplazándose y que la infraestructura se mantenga operativa.

Tabla 2. Diez dimensiones de la resiliencia en transporte

Dimensión	Descripción
Redundancia	Función cumplida por diferentes elementos del sistema
Diversidad	Cada elemento se distingue funcionalmente de los otros
Eficiencia	Optimización de recursos en el sistema
Autonomía	Independencia funcional entre componentes
Adaptabilidad	Flexibilidad del sistema ante cambios
Colaboración	Intercambio de información entre los componentes del sistema
Movilidad	Capacidad de los usuarios para desplazarse eficientemente
Seguridad	Protección de los usuarios ante perturbaciones
Capacidad de recuperación	Rapidez en restaurar el nivel de servicio

Fuente: Elaboración propia con base en Murray-Tuite, (2006).

Estas dimensiones proporcionan un marco útil para evaluar la resiliencia en sistemas de transporte urbano, resaltando la importancia de un diseño robusto y flexible. La colaboración

y adaptabilidad, en particular, son esenciales en contextos de crisis, ya que permiten una respuesta coordinada y eficaz ante eventos disruptivos.

MEDICIÓN DE LA RESILIENCIA EN TRANSPORTE

Existen múltiples enfoques para medir la resiliencia en transporte, que incluyen modelos matemáticos, análisis topológicos y estudios basados en el desempeño del sistema. Los métodos cuantitativos, como la simulación y los modelos probabilísticos, permiten evaluar la capacidad del sistema para mantener accesibilidad y conectividad durante eventos disruptivos, así como su rapidez de recuperación.

Este tipo de estudios permite a los investigadores simular diferentes escenarios y analizar cómo el sistema reacciona a diversas condiciones de estrés. Además, estos modelos ofrecen una base cuantitativa para diseñar estrategias de mitigación que optimicen la respuesta y recuperación del sistema ante eventos de alto impacto.

REFLEXIONES FINALES

La revisión bibliométrica y conceptual sugiere una falta de estudios observacionales y un predominio de enfoques basados en modelos y simulaciones. La integración de TIC y transporte plantea nuevos desafíos y oportunidades de investigación, especialmente en el contexto del cambio climático y la incertidumbre climática.

Es fundamental avanzar en estudios empíricos que permitan comprender y medir cómo los sistemas de transporte pueden adaptarse a escenarios cada vez más inciertos. La aplicación de métodos de análisis cuantitativo y cualitativo, junto con enfoques colaborativos entre disciplinas, permitirá una mejor comprensión de las dimensiones clave de la resiliencia en transporte y su aplicación en políticas públicas urbanas.

BIBLIOGRAFÍA

Bruneau, M., et al. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic

resilience of communities. *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752.

Murray-Tuite, P. M. (2006). A comparison of transportation network resilience under simulated emergencies. *Transportation Research Part A*, 40(3), 201-220.

Rose, A. (2004). Defining and measuring economic resilience to disasters. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 13(4), 307-314.