



Necesidades de adaptación del transporte frente a la vulnerabilidad producida por eventos climáticos

Transport adaptation needs in the face of vulnerability produced by climate events

Álvarez, Daniel

Director Instituto del Transporte, Escuela de Hábitat y Sostenibilidad, Universidad Nacional de San Martín.
Universidad Nacional de San Martín, Argentina. (<https://orcid.org/0009-0000-0454-7423>)
alvarezdaniel9@gmail.com

R E S U M E N

Según el IPCC, el calentamiento en el sistema climático es innegable y, desde la década de 1950, una parte significativa de los cambios observados en el ambiente no han tenido precedentes en el último siglo..

El cambio climático es resultado de la elevada concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, los cuales son generados por actividades humanas. Esto provoca diversos efectos, como alteraciones en los patrones de precipitación, incremento del nivel del mar, nuevos patrones de viento y cambios de temperatura en extensas zonas del planeta, dichos eventos afectan las infraestructuras de transporte. Para hacer frente a esta situación, existen dos tipos de medidas: las de mitigación y las de adaptación. Las primeras tienen como objetivo reducir y limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, mientras que las de adaptación se centran en reducir la vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático. En resumen, las medidas de mitigación buscan 'combatir' el cambio, mientras que las de adaptación buscan 'defenderse' de él.

1. Introducción

La contribución determinada a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés) que la Argentina presentó ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático [CMNUCC] en diciembre de 2016, en el contexto del Acuerdo de París, compromete al país a no exceder una emisión neta de 483 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) hacia el año 2030 (meta incondicional). Esta meta se logrará a través de la implementación de medidas de reducción de emisiones en los sectores Energía, Transporte, Agricultura, Bosques, Industria y Residuos.

El Plan de Acción Sectorial de Cambio Climático para el sector energético prevé como meta evitar la emisión de 77 MtCO₂e en el 2030 (70 % de la meta incondicional) y esto con base en cuatro grandes ejes de acción: energías renovables, eficiencia energética, biocombustibles y generación a gran escala (generación hidroeléctrica y nuclear, switch a gas natural en la generación eléctrica y mejora de la eficiencia de las centrales térmicas). En cuanto al transporte, la meta es evitar la emisión de 5.9 MtCO₂e en el 2030 (5.4 % de la meta incondicional) mediante el ahorro acumulado de 13.3 mil millones de litros de diésel (2011-2030), con base en los siguientes ejes: jerarquización y rehabilitación del ferrocarril, priorización del transporte público, mejora de la eficiencia del transporte de carga y desarrollo de movilidad baja en emisiones y no motorizada^[1].

Cumplir con estas metas va a requerir reformas de política ambiciosas, además de un relevante portafolio de proyectos y obras de infraestructura.

El International Transport Forum [ITF] menciona que, en referencia al sector, la actividad total del transporte para 2050 duplicará el valor de 2015. El nivel de actividad implicará un crecimiento del 260% para el transporte de mercancías. Manteniendo las políticas actuales, prevén el 22% de crecimiento de las emisiones de CO₂ con respecto al año 2015 en el transporte de mercancías. También se espera un aumento de su participación con relación al conjunto total de emisiones del sector transporte.

Las incidencias climáticas presentan diferencias en términos de frecuencia, previsibilidad, extensión geográfica y magnitud, pero comparten el hecho de tener impactos negativos directos en la capacidad operativa de las redes y en el deterioro o destrucción de la infraestructura del transporte. Estos impactos pueden ser causados tanto por los fenómenos climáticos en sí mismos como por una serie de eventos que provocan interrupciones o reducciones significativas en la circulación y el transporte de bienes y personas. Por lo tanto, resulta necesario identificar los factores de vulnerabilidad de las redes de transporte que causan afectaciones en las infraestructuras nodales y lineales, así como en las operaciones de transporte. En consecuencia, determinar las posibles intervenciones para reducir dichos impactos reviste una importancia significativa.

2. Marco conceptual

El buen desempeño de una red vial, ferroviaria o navegable afecta a la fluidez del movimiento de cargas, cuya estabilidad más allá de variaciones estacionarias y accidentes naturales o provocados, influye directamente en la competencia logística de los operadores que transitan por ella. En las últimas décadas, y en correlación con el desarrollo de la digitalización, el procesamiento de grandes volúmenes de datos y la creciente preocupación por eventos disruptivos en el mundo, el estudio de los diferentes tipos de redes para determinar sus puntos críticos se ha impuesto como una tendencia de creciente interés, tanto para organismos públicos, como para empresas que deben asegurar la continuidad de sus cadenas de suministros y mantener activos sus canales de distribución ([Sheffi, 2016](#)). Se trata de una derivación de los más tradicionales estudios de accesibilidad, pensados para analizar el desempeño de redes en condiciones normales de tráfico (para una comparativa de estudios de este tipo en España: [López-Escolano y Pueyo Campos, 2018](#)). Si bien los estudios de accesibilidad más comunes se refieren a redes de tipo vial, los hay también ferroviarios ([Gavira Narváez y Ventura Fernández, 2013](#)) y urbanos ([Gutiérrez Gallego et al., 2014](#), estudian el acceso al transporte público), refiriéndose tanto al acceso de cargas como de pasajeros.

En líneas generales, las redes viales han sido estudiadas desde el punto de vista del tráfico de pasajeros que las utilizan, como derivación del interés por la congestión urbana y la forma de mitigarla.

La posibilidad de una catástrofe natural (lluvias, desbordes de ríos, bloqueos por avalanchas, etc.) o provocadas (ej. varaduras en una vía navegable) ha dirigido los esfuerzos hacia los estudios de vulnerabilidad, con la intención de identificar los puntos más débiles de una red específica y la afectación de las zonas aledañas (por ejemplo: [Rodríguez Núñez y García-Palomares, 2014](#)). El desarrollo de instrumentos informáticos con capacidad de manipulación de datos a gran escala, e incluso en tiempo real (big data), así como el progreso de los modelos de integración de datos vinculados a las tecnologías de procesamiento de la información, ha extendido el campo de estudio hacia redes de diferentes características técnicas, como las de distribución eléctrica, internet de banda ancha, o incluso redes inmateriales como las que gestionan el consumo habitual mediante transacciones realizadas por plataformas digitales ([Grubésic et al, 2008 y 2012](#)).

Actualmente son pocos los trabajos centrados en el tráfico de cargas: algunos (p. ej. [Tran y Namatame, 2015](#); [Dunn y Wilkinson, 2016](#)) se centran en el transporte aéreo, dado que este modo de transporte

configura sus redes en base a esquemas hub and spoke y resulta particularmente útil medir su vulnerabilidad. Menos comunes son los intentos de medir vulnerabilidad en redes intermodales: [Burgholzer et al. \(2013\)](#) aplican un modelo propio sobre un tramo específico de la red de transporte austríaca, mientras que otros trabajos ([Miller-Hooks et al., 2012](#); [Chen y Miller-Hooks, 2012](#)) desarrollaron modelos para cuantificar la resiliencia de la red de transporte de cargas entre Nueva York y Washington DC.

3. Cambio climático y vulnerabilidad del transporte

Con el cambio de siglo, se hizo necesario delimitar las nociones utilizadas en estudios de redes más allá del horizonte de seguridad previsto en las primeras investigaciones. Los dos conceptos principales para tener en cuenta en el presente análisis son los de vulnerabilidad, aplicado al total de la red; y criticidad, aplicado a cada uno de sus elementos.

El concepto de vulnerabilidad, tomado de otras disciplinas (redes eléctricas, telecomunicaciones, hidráulica) refiere en el caso de las redes de transporte a la capacidad de éstas para seguir funcionando tras sufrir alteraciones, esto es: cuán susceptibles son de causar una reducción en la accesibilidad o en su capacidad de servicio, luego de producirse incidencias en alguno o varios de sus elementos ([Berdica, 2002](#); [Burgholzer et al., 2012](#)). Una red se compone de tramos y nodos, representados gráficamente como arcos y puntos. Toda incidencia en un tramo o nodo afectará los tiempos de tráfico de la red, dado que obliga a utilizar una ruta alternativa, generalmente más extensa o compleja -se supone que el tráfico deriva hacia la ruta óptima-, por lo que el tiempo de llegada a su destino será mayor. Un estudio de vulnerabilidad se enfoca en cuantificar dichas demoras, identificando los puntos débiles o críticos de la red mediante el desarrollo de diferentes hipótesis de interrupción de tramos o congestión en los nodos. Algunos estudios se dedican a un tramo específico, al que se aplican diversas hipótesis de afectación; otros cuantifican la posibilidad de interrupción en todos los tramos de una red, probados de uno en uno, para identificar los elementos críticos. Esto es, estudian la criticidad relativa de los distintos elementos de la red.

Para el estudio de redes de transporte, el foco está puesto en la funcionalidad del sistema más que en la materialidad de la red, si bien la discontinuidad puede ser causada por una falla física. Es decir, las variaciones en la accesibilidad son más importantes que el motivo real de los incidentes ([Berdica, 2002](#)). En este punto, Berdica diferencia entre el concepto de accesibilidad, que enfoca el problema desde el punto de vista de la demanda, dado que involucra la potencialidad para movilizarse hacia un destino determinado; y el de capacidad de servicio, que opera desde el punto de vista de la oferta, esto es de la existencia de una ruta viable entre una locación y otra. Si bien la perspectiva de la demanda es útil a la hora de cuantificar consecuencias (demoras), Berdica cree mejor describir la performance de un sistema de transporte vial en términos de capacidad de servicio, a la que define como la descripción de la posibilidad de uso de un determinado nodo/ruta/red vial durante un período de tiempo determinado. También es aplicable la definición de calidad de transporte hecha por [Goodwin \(1992\)](#): “la cualidad básica de un sistema para llevar a alguien de donde está a donde quiere estar, en el momento en que quiere viajar, y a un costo que justifique el viaje” (p. 662).

Si bien este tipo de estudios es relativamente reciente en la literatura académica, algunos elementos de análisis tienen una antigüedad mayor: [Jenelius \(2009\)](#) cita un estudio de 1964 sobre redes de comunicaciones donde ya se consideraba que las redes malladas eran más robustas ante fallos aleatorios en un tramo o nodo, en comparación con redes más centralizadas, del tipo hub and spoke: como puede advertirse, es posible realizar una analogía con las redes de transporte y encontrar que, justamente, las localizaciones hoy privilegiadas por las grandes cadenas logísticas globales son las más propensas a la vulnerabilidad como un todo.

Dicho esto, Jenelius considera que tan importantes como el trazado físico de la red resultan los patrones de tráfico que determinan su funcionalidad. El estudio concluye que pueden considerarse dos niveles de vulnerabilidad a escala regional: desde el punto de vista de la oferta, una región es particularmente vulnerable si las consecuencias de una disrupción en términos de tiempos de viaje son graves para el tráfico general de la red. En cuanto al punto de vista de la demanda, una región es más vulnerable si las consecuencias de las disrupciones afectan sobre todo a los usuarios de dicha región.

3.1. Vulnerabilidad

Con el cambio de siglo, se hizo necesario delimitar las nociones más utilizadas en los estudios de redes más allá de los alcances del conocimiento desarrollado en las primeras investigaciones. Los dos conceptos principales para tener en cuenta en el análisis son los de vulnerabilidad, aplicado al total de la red; y criticidad, aplicado a cada uno de sus elementos.

El concepto de vulnerabilidad, tomado de otras ciencias como las biológicas, refiere en el caso de las redes de transporte a la capacidad de éstas para seguir funcionando tras sufrir alteraciones, esto es: cuán susceptibles son de causar una reducción en la accesibilidad o en su capacidad de servicio, luego de producirse incidencias en alguno o varios de sus elementos ([Berdica, 2002](#); [Burgholzer et al., 2013](#)). Una red se compone de tramos y nodos, representados gráficamente como arcos y puntos. Toda incidencia en un tramo o nodo afectará los tiempos de tráfico de la red, dado que obliga a utilizar una ruta alternativa, generalmente más extensa o compleja -se supone que el tráfico deriva hacia la ruta óptima-, por lo que el tiempo de llegada a su destino será mayor. Un estudio de vulnerabilidad y adaptación se enfoca en cuantificar dichas demoras, identificando los puntos débiles o críticos de la red mediante el desarrollo de diferentes hipótesis de interrupción de tramos o congestión en los nodos.

Algunos estudios se dedican a un tramo específico, al que se aplican diversas hipótesis de afectación; otros cuantifican la posibilidad de interrupción en todos los tramos de una red, probados de uno en

uno, para identificar los elementos críticos. Esto es, estudian la criticidad relativa de los distintos elementos de la red.

Para el estudio de redes de transporte, el foco está puesto en la funcionalidad del sistema más que en la materialidad de la red, si bien la discontinuidad puede ser causada por una falla física. Es decir, las variaciones en la accesibilidad son más importantes que el motivo real de los incidentes (Berdica, 2002). En este punto, Berdica diferencia entre el concepto de accesibilidad, que enfoca el problema desde el punto de vista de la demanda, dado que involucra la potencialidad para movilizarse hacia un destino determinado; y el de capacidad de servicio, que opera desde el punto de vista de la oferta, esto es de la existencia de una ruta viable entre una locación y otra. Si bien la perspectiva de la demanda es útil a la hora de cuantificar consecuencias (demoras), Berdica cree mejor describir la performance de un sistema de transporte en términos de capacidad de servicio, a la que define como la descripción de la posibilidad de uso de un determinado nodo/ruta/red durante un período de tiempo determinado. También es aplicable la definición de calidad de transporte hecha por Goodwin (1992), la cualidad básica de un sistema para llevar a alguien de donde está a donde quiere estar, en el momento en que quiere viajar, y a un costo que justifique el viaje.

3.2. Incidencias y Eventos

Las incidencias que afectan a una red de este tipo pueden definirse como eventos ocurridos en la misma, predecibles o no, y que afectan su funcionamiento óptimo. Pueden ser de origen natural, como los derivados de condiciones climáticas extremas, o estar relacionados con accidentes de la red física o de quienes circulan por ella (accidentes de tráfico, daños en la infraestructura), o incluso ser provocados por actores relacionados con ella o extraños a ella (congestión, cortes por protestas, actos de terrorismo). Estos eventos son diferentes en su frecuencia, predictibilidad, extensión geográfica y cantidad, pero tienen en común su influencia negativa en la capacidad de servicio de la red, tanto por sí mismos o como causa de una cadena de eventos que termine en la interrupción o reducción considerable del tráfico. Son conocidos como incidencias o incidentes, y pueden causar tanto una reducción de la capacidad como un incremento en la demanda (Berdica, 2002). Cuando un tramo es afectado por una incidencia o evento, se dice que ese tramo es crítico, surgiendo la vulnerabilidad total de la red del promedio de las criticidades de los tramos afectados y su proporción respecto de aquellos donde el flujo continúa siendo normal.

En este punto, cabe acotar que el término 'incidencia' se utiliza generalmente para referir a fenómenos extraordinarios como los citados en el párrafo anterior, y que son los habitualmente ponderados en los estudios de vulnerabilidad. Para los efectos menores y ordinarios del tráfico se reserva el término 'evento', constituyendo la incidencia un evento no ordinario. No obstante, las herramientas utilizadas para el estudio de la afectación de redes por incidencias también pueden ser aplicadas al estudio de los eventos y su afectación del flujo normal de los tráficos derivados de fenómenos climáticos.

Un ejemplo de combinación de incidencias y eventos en una red real de transporte de cargas es el de Burgholzer et al. (2013), dedicado a un tramo intermodal (Linz-Viena) de la red austríaca de cargas, que incluye transporte fluvial, ferroviario y carretero. Cada incidencia o evento es cuantificado por el tiempo durante el cual interrumpe un tramo de la red: así, la caída de un árbol sobre las vías provoca una demora estimada en 2 horas; los trabajos de mantenimiento en una compuerta del río Danubio, una demora de 6 horas; e interrupciones del tráfico fluvial debido a subidas del río, entre 1 y 6 días de demora. Un modelo de simulación distribuye estas interrupciones aleatoriamente a lo largo de la red y simulando 100 veces cada uno de los escenarios posibles, con el agregado de datos reales de la carga de tráfico habitual sobre la red, para obtener información sobre la manera en que los actores del tráfico reaccionan a las incidencias, teniendo en cuenta por ejemplo que éstos están constantemente informados del estado de las rutas, y que a la hora de tomar una decisión, y siguiendo un criterio de reducción de costos, tenderán a inclinarse por el camino más corto. Los resultados son luego tabulados y utilizados para asignar índices de criticidad a cada tramo, y de vulnerabilidad a toda la red.

Algunos estudios, como el de Burgholzer, eligen un tramo específico para ensayar sobre él todo tipo de eventualidades; otros relevan la influencia de cortes en todos los enlaces de una red, anulándolos uno a uno (Rodríguez Núñez y Gutiérrez Puebla, 2012).

3.3. Robustez, resiliencia, redundancia

Robustez, en oposición a vulnerabilidad, es una noción muy utilizada en informática para referir a la capacidad de una red para resistir tensiones; algunos estudios en redes de transporte utilizan este concepto (Jenelius, 2009). La idea es que una red robusta tiene la suficiente capacidad de absorción del impacto de

situaciones críticas en sus arcos y/o nodos, como para mantener una capacidad de funcionamiento similar a la habitual. Es utilizada con mayor frecuencia como una noción cualitativa.

La resiliencia, noción proveniente de la ecología, expresa la capacidad de un sistema para volver a la normalidad después de un desequilibrio. Involucra los factores de escala -cuán grande puede ser un desequilibrio sin afectar la resiliencia de la red- y velocidad de recuperación. Cabe destacar que el nuevo estado de equilibrio puede ser el anterior o bien uno nuevo, debido a la imposibilidad de retornar al equilibrio anterior, fundándose por tanto una nueva 'normalidad' susceptible de evolución ante futuros y periódicos desequilibrios. Habitualmente, las incidencias de una red de transporte tienen una duración acotada, por lo que la red puede volver al equilibrio anterior sin problemas ([Berdica, 2002](#)). [Chen y Miller-Hooks \(2012\)](#) desarrollaron un índice de resiliencia para redes intermodales de transporte de cargas, subrayando la importancia de estudiar las características de las redes en operatoria normal y la previsión de medidas para ser aplicadas con posterioridad a una interrupción, que pueden incluir la construcción de nuevos tramos, y que son definidas como medidas de recuperación potencial. También mencionan la importancia de medidas proactivas para mejorar la resiliencia de una red antes que se produzca la perturbación. Este tipo de medidas puede afectar la estructura, por ejemplo, agregando redundancias al tráfico que circula por ella y relocalizándolo para mejorar su accesibilidad en caso de desastre.

La redundancia es un término utilizado en electrónica para definir la duplicación de sistemas ante la necesidad de cumplir funciones básicas que no pueden ser interrumpidas; la redundancia de un sistema permite, en caso de que una incidencia impida el funcionamiento de la red, al sistema redundante entrar en acción impidiendo la interrupción del servicio (un grupo electrógeno sería el ejemplo más obvio). Este concepto puede ser trasladable a una red de transporte, dado que a menudo el mejoramiento de los encaminamientos hace que dos vías corran paralelas ofreciendo una misma alternativa de accesibilidad (por ejemplo, una autopista y el camino antiguo que vino a reemplazar). Es posible dividir entre redundancias activas -aquellas siempre disponibles, por lo que el tráfico se distribuye normalmente entre la vía principal y la alternativa- y pasivas, que son aquellas que sólo entran en operación cuando la vía principal se ha bloqueado (por ejemplo, un ferry que reemplaza un puente fuera de servicio) ([Berdica, 2002](#)).

"La estructura de red más frágil es el árbol, donde todos los enlaces están interrumpidos. Cuantos más enlaces se añaden, esto es cuando se incrementa la redundancia de enlaces, más rutas alternativas hay disponibles; a su vez, más rutas alternativas significa mejores atajos, en términos del número de enlaces en las rutas". ([Jenelius, 2009, p. 236](#))

La redundancia puede ser medida con el llamado índice beta ([Haggett y Chorley, 1969](#)), dividiendo la cantidad de enlaces interrumpidos en la red de una región por la de nodos interrumpidos presentes en la misma red. En redes del tipo árbol extendido el índice beta tiende a 1; en mallas hexagónicas (tipo peineta), a 1,5; en mallas rectangulares, a 2; y en mallas triangulares -las redes planas con mayor redundancia- tiende a 3. El índice alfa, de los mismos autores, mide la robustez de una red, con un mínimo de 0 (malla arbórea) y un máximo de 1 (malla triangular).

3.4. Fiabilidad

En relación con la vulnerabilidad de una red, varios estudios introducen el concepto de fiabilidad, que sería la capacidad de la red de proporcionar certidumbre o estabilidad a sus usuarios en cuanto a la llegada a destino en tiempo y forma. Es decir, una red fiable sería poco o nada vulnerable, y los estudios de fiabilidad se concentran en la probabilidad de que dicha red sufra incidencias y pueda recuperarse de éstas. Este último aspecto -el de la recuperación- es introducido por Berdica para una definición más amplia que incluya las consecuencias de los desequilibrios que sufre una red. "El opuesto complementario de la vulnerabilidad en un sistema de transporte es la fiabilidad, significando una adecuada capacidad de servicio bajo las condiciones de operación encontradas durante un período de tiempo determinado" ([Berdica, 2002, p. 120](#)).

Esto llevaría a jerarquizar niveles de performance de una red según su capacidad para hacer frente a las incidencias; por ejemplo, en ingeniería es común cuantificar las posibilidades de falla de un sistema y sus consecuencias respectivas en el desempeño de dicho sistema. Los datos resultantes son conocidos como índices de fiabilidad.

Nótese en este punto que, a diferencia del similar concepto de robustez -definido por simple oposición-, el de fiabilidad es introducido para habilitar su medición, la cual se propone como alternativa al propio estudio de vulnerabilidad, puesto que algunos especialistas consideran más factible cuantificar las ventajas o puntos fuertes de una red que sus vulnerabilidades ([Chen y Miller-Hooks, 2012](#)).

Los principales índices de fiabilidad relacionados con sistemas de transporte en los estudios conocidos son los referidos a la conectividad (probabilidad de llegar a un destino determinado), el tiempo de llegada y la capacidad de circulación del tráfico. El uso de esos índices proporciona cierta elasticidad al concepto de fiabilidad, ya que el mismo depende de la capacidad de servicio a la que aspira la red, y puede variar tanto en el flujo del tráfico como en la capacidad operada ([Berdica, 2002](#)).

Diversos estudios han realizado modelos de simulación de las fluctuaciones diarias de tráfico en una red dada en operatividad 'normal'. Para esto se analizan pares de origen y destino OD, cuya variación es comúnmente aleatoria -los estudios se centran en el tráfico de transporte- y la manera en que esta aleatoriedad es alterada por dos tipos de variables independientes entre sí: aquellas que afectan a un tramo específico, es decir un par OD, y aquellas que afectan a toda la red (por ejemplo, mal clima en la región). A partir de allí, algunos estudios realizan una estimación de dos medidas de fiabilidad: la conectividad, es decir la probabilidad de transitar un par OD sin encontrar congestión más allá de un nivel aceptable; y la fiabilidad de los tiempos de viaje, es decir la probabilidad de hacer dicho tránsito en un tiempo razonable dentro de la aleatoriedad de tiempos estimados para dicho par OD ([Asakura y Kashiwadani, 1991](#); [Bell e lida, 1997](#)). Bell e lida también introducen la capacidad como variable.

Si bien es posible realizar modelos de simulación cortando enlaces de manera aleatoria, es notorio que en la realidad factores como la carga de la red, el tipo físico del camino y otras características propias tanto del camino como del área que atraviesa, son de gran influencia en la probabilidad de que dicho camino sufra incidencias. Algunos estudios tienen en cuenta la progresiva degradación de la red, concretamente de los caminos más usados ([Nicholson y Du, 1997](#); [Jenelius, 2009](#)). Estos estudios, llamados de 'sistemas degradables de transporte' (DTS, por su sigla en inglés), contemplan períodos más extensos de variación, tanto en el estado físico de la red como en la capacidad vehicular de la misma, y permiten el análisis multimodal. El análisis de DTS considera como componentes tanto los arcos como los nodos, si bien sólo los arcos son sujetos a degradación. Este tipo de estudio, más relacionado con el análisis de los tráficos de cargas, asume que la demanda en cada par OD puede ser formulada como una función del costo general del viaje. La función de la oferta es multivariable, y su representación es implícita: los flujos de una ruta son determinados a partir de los flujos OD, asumiendo que cada tráfico elige su ruta buscando minimizar los costos generales, bajo la habitual condición de Wardrop de equilibrio del usuario. El tiempo de viaje sobre un enlace es una función del flujo vehicular y el estado de los componentes, que a su vez influencia el costo general del viaje en dicho enlace. Los excesos del sistema son luego observados como medida del desempeño para fijar los impactos socioeconómicos de la degradación. [Chen et al. \(1999\)](#) introdujeron un medidor de fiabilidad de la capacidad de la red, definido como la probabilidad de que una cierta demanda de tráfico pueda ser servida a un nivel aceptable. Para esto consideran la noción de capacidad de reserva de la red, definida como "el más alto múltiplo aplicable a un par OD existente que pueda ubicarse en una red de transporte, sin violar las capacidades de los enlaces involucrados ni exceder una proporción predefinida entre volumen y capacidad" ([Chen et al., 1999, p. 187](#)). Estos estudios muestran que la fiabilidad del tiempo de viaje y la capacidad de la red están relacionadas a través de parámetros de referencia conocidos como "umbrales" para ambas categorías ([Yang et al., 2000](#)).

Los métodos referidos pueden ser del tipo orientado a un objetivo específico, en donde la falla de algunos elementos es compensada por el uso de otros para llevar a cabo el objetivo; o del tipo sinfín, donde la fiabilidad es mejor definida como disponibilidad del sistema, esto es, la probabilidad de encontrarlo en funcionamiento en cualquier momento. En el caso de las redes de transporte, el tipo cambia según la escala: el sistema como un todo es de operación continua o sinfín, mientras que sus componentes son una cantidad determinada de subsistemas de objetivo específico (los pares OD), y debe existir funcionalidad en ambos niveles ([Berdica, 2002](#)).

4. Afectación y adaptación por factores climáticos

Algunas unidades de medida usualmente encontradas en modelos de simulación de tráfico enfocados al estudio de la vulnerabilidad de una red de transporte multimodal son el tiempo de viaje, la cantidad de viajes, la cantidad de atrasos o demoras (medidas en porcentaje del tiempo total del viaje), la demora total, la tasa de demora relativa, y la accesibilidad del sistema -especialmente en la evaluación conjunta entre transporte y uso del suelo-medida en términos del tiempo promedio de llegada a un destino, o porcentaje de destinos alcanzables dentro de un tiempo determinado ([Berdica, 2002](#)).

El tiempo de viaje es utilizado no sólo como unidad directa de medida, sino como elemento de otros indicadores: en general es considerado como un medidor evidente de la accesibilidad de una red ([Jenelius, 2009](#)). Además, puede ser traducido en costos y distancias. La velocidad es afectada directamente por el flujo de tráfico, en forma inversamente proporcional (cuanto menos tráfico, mayor la velocidad). En

este sentido, el volumen del tráfico debería ser mantenido a un nivel menor que la capacidad del camino o calle, para mantener una alta calidad de transporte. La diferencia entre ambas variables, expresada preferentemente en términos de volumen real de tráfico como porcentaje de la capacidad diseñada para la vía por donde circula dicho tráfico, fue definida por [Goodwin \(1992\)](#) como 'margen de calidad'; en teoría, cuanto más amplio es dicho margen, menor la sensibilidad a incidencias del sistema; no obstante, [Berdica](#) apunta que aumentar el margen de calidad no es el mejor método para reducir la vulnerabilidad de la red, dado que en la práctica este tipo de sistemas opera casi al límite de su capacidad. También es importante recordar que todos estos son valores estáticos destinados a representar un proceso esencialmente dinámico, como es la circulación de tráfico por una red, con lo cual los valores de medida serán siempre insuficientes a la hora de estimar la capacidad de servicio adecuada de una red y su evolución en el tiempo.

El tiempo de demora, que refleja las consecuencias de incidencias en el tramo interrumpido, puede ser desglosado entre la demora total para todos los trayectos de la región, y la demora de cada usuario afectado. La demora total es de utilidad para calcular el costo económico y, por lo tanto, de interés para las autoridades del área ([Jenelius, 2009](#)). Se trata, como en los tiempos de viaje, de promedios surgidos de cálculos sobre los tiempos informados por las instituciones que miden y analizan el tráfico sobre las infraestructuras de transporte.

Para medir escala, un elemento utilizable como parámetro es la extensión promedio de los enlaces/arcos de la red, así como el tiempo promedio de viaje a lo largo de dicho enlace/arco. La densidad vial de una región, así como su población, suelen ser indicadores lineales de su importancia relativa en la red total.

Inicialmente, estos estudios se centraban en redes informáticas y de distribución de energía; a partir de los años '90 comenzaron a aplicarse a las redes de transporte, y hoy son un campo de estudio en continuo crecimiento. La aparición de sistemas portables de geoposicionamiento (GPS) y comunicación (radiofrecuencia, telefonía celular) ha permitido la interacción de los propios usuarios y el cambio de ruta una vez comenzado el trayecto, lo que complejiza el estudio de las variables y debe ser tenido en cuenta en el diseño de nuevas herramientas de medición.

Los estudios actuales hacen uso de eficaces herramientas informáticas como los sistemas GIS, que permiten realizar cálculos a partir del ingreso de datos reales recopilados de una red, mediante algoritmos que vienen siendo estudiados y perfeccionados desde la década del '70 para identificar los tramos más críticos de una red dada. También en esto siguen una evolución paralela a la de los estudios de accesibilidad tradicionales, dado que ambos utilizan, por ejemplo, sistemas GIS para la asignación de viajes en una red, aprovechando que estos sistemas cartográficos permiten agregar valor (datos) a elementos básicos de la red como arcos y nodos, y por tanto calcular relaciones entre ellos, obteniendo caminos preferenciales entre un origen y un destino a partir de valores como velocidad, tiempo de circulación, extensión de los diferentes tramos, y otros con ellos relacionados (para un ejemplo de asignación de rutas en un modelo GIS, ver [Gutiérrez Gallego et al., 2013](#)).

Este tipo de estudios debe ser considerado a la hora de planificar nuevos tramos o enlaces en las redes existentes, bien para conectar nuevos pares OD o para aliviar los tramos que soportan grandes volúmenes de tráfico. Simular la anulación de tramos determinados de una red permite observar la variación de los flujos que por ella transitan y por ende determinar sus puntos más críticos; el añadido de tramos al modelo permite analizar con cierto grado de certidumbre cómo se comportarían los flujos existentes ante la disponibilidad de nuevas opciones. En este sentido, puede decirse que los estudios de vulnerabilidad analizan el impacto directo de la infraestructura en la conectividad de una red, y por ende en la captación de tráfico; estos impactos, afectan no sólo al territorio estudiado sino también a los espacios colindantes, modificando la accesibilidad general ([Condeço Melhorado, 2011](#)). En los últimos veinte años se han realizado diferentes estudios sobre redes viales e intermodales europeas, en países escandinavos ([Jenelius y Mattsson, 2005](#); [Berdica y Mattsson, 2007](#)), alpinos ([Burgholzer et al., 2013](#)) y mediterráneos ([Rodríguez Núñez y Gutiérrez Puebla, 2012](#); [García Palomares et al., 2018](#)), entre otros. También en regiones de EE UU ([Murray et al., 2008](#)) y Australia ([Taylor et al., 2006](#)), así como de China ([Chang, 2003](#)).

Asimismo, el estudio de los cortes siempre contiene algún grado de simplificación. Por ejemplo, es común que los caminos a ser cortados en el modelo representado se elijan al azar, lo cual supone la presunción de que todos los tramos poseen una misma probabilidad de sufrir incidencias, cuando en realidad hay factores (tipo de camino y cantidad de tráfico, por ejemplo) que influyen en esta probabilidad de manera diferente según el tramo. Aun en el caso de representarse cortes reales, los escenarios resultantes cuentan con algún grado de distorsión dado que, por ejemplo, en una red extensa o de gran densidad es conveniente representar los cortes de a uno a la vez, dado que la cantidad de alternativas a considerar en el caso de la interrupción simultánea de varios tramos conectados entre sí puede exceder las posibilidades de cálculo del sistema de análisis seleccionado (en el caso de dos cortes no vinculados directamente, éstos pueden ser analizados de forma independiente).

Una red ferroviaria, frente a una vial, es mucho menos compleja a pesar de contar con distancias por lo general mayores, dada la ausencia de rutas alternativas; por lo tanto, el principal factor a considerar es el tiempo de duración del corte (en este caso, una opción a contemplar es que el usuario decida no esperar la rehabilitación del tramo cortado y decida utilizar otro modo para transportarse, en cuyo caso el número de viajes una vez que el tramo vuelve a estar operativo será menor al original). La complejidad está dada en el tipo de incidencia: se estiman diferentes tipos de eventos (naturales o provocados) para dar comienzo al corte, y la diferente afectación generada por cada uno de ellos. Según el tipo de evento, se cierra sólo el tramo principal cortado o también otros a él conectados; en tal caso, se supone que la afectación de los tramos secundarios será menor, por ejemplo, en capacidad. [Miller-Hooks et al. \(2012\)](#) realizan un estudio de este tipo en una red ferroviaria de cargas (contenedores) que abarca el oeste y centro oeste de EE UU, con conexiones intermodales (carreteras) cuyo tráfico se incrementará al recibir más carga en los tramos ferroviarios cortados. A pesar de las grandes distancias que abarca, la red simplificada cuenta con 8 nodos, 24 arcos ferroviarios unidireccionales y 22 arcos de carretera bidireccionales, considerándose apenas 17 pares origen-destino. Es un ejemplo de red relativamente sencilla, que permite analizar efectos con un mayor nivel de detalle. En comparación, el Metro de Madrid (estudiado por [Rodríguez Núñez y García Palomares, 2014](#)) resulta más complejo aun tratándose de una red de subterráneo urbano: 12 líneas con 239 estaciones, configurando un total de 268 arcos. Aun así, fue lo suficientemente simple como para que pudieran incluir un escenario de cortes múltiples, simulando una situación no habitual (por ejemplo: ataque terrorista, piquetes). La afectación en las estaciones sin una vía alternativa se midió en cantidad de viajes no realizados durante la duración del corte, mientras que para las estaciones donde se cruzaban dos o más líneas se calculó el tiempo adicional que tomaban los viajes realizando rodeos por fuera de la línea habitual. En este caso, el bajo impacto relativo de los caminos alternativos -todos ellos parte de la red subterránea- permitió crear un escenario de corte simultáneo de varios arcos o tramos.

De la revisión de los estudios mencionados y otros similares puede concluirse que, en función de la escala del territorio y la extensión de la red, podrá aumentarse el detalle de la información considerada, calculándose por ejemplo la totalidad de las interacciones ente nodos; mientras que en las redes de gran extensión y densidad (conjuntos de regiones o países), parte del nivel de detalle del análisis no alcanza una alta precisión como resultado de la profundidad y el volumen de datos requeridos.

Por lo tanto, el modelo de representación será relativamente simplificado, para facilitar los cálculos y evitar desvíos en la medición y representación de las afectaciones.

5. Gobernanza posible para la adaptación del transporte

Varios países han comenzado a implementar estrategias de adaptación y planes de acción a través de diversas medidas con el objetivo de promover la implementación de acciones de adaptación en todos los sectores críticos, incluyendo el transporte. Estas medidas van desde la provisión y producción de información, el fortalecimiento de capacidades institucionales, la revisión de normas técnicas, hasta el aprovechamiento de nuevas oportunidades surgidas de las tecnologías de la información y comunicación. La participación de todos los actores relacionados con el sector del transporte es fundamental desde una perspectiva de equidad y eficiencia, por lo tanto, las autoridades reguladoras, los responsables políticos y los expertos deben hacer cada vez mayores esfuerzos para involucrar a las partes interesadas en sus actividades de gestión política, desarrollo técnico y difusión de información.

La inclusión de la adaptación al cambio climático como un criterio de relevancia en los distintos niveles de toma de decisiones y formulación de políticas públicas reviste una importancia sumamente alta. Es fundamental contar con una guía metodológica concreta que permita llevar a cabo esta integración de manera efectiva, abarcando desde la planificación de las redes de transporte hasta la evaluación de proyectos. Si se logra una mayor integración de la adaptación al cambio climático en el transporte, es posible obtener beneficios significativos en términos de resiliencia de la infraestructura y costos de adaptación a largo plazo. En resumen, se espera que incorporar la adaptación en el diseño de nuevas infraestructuras sea menos costoso que añadirla en etapas posteriores.

La infraestructura en Argentina sufre habitualmente afectaciones por la ocurrencia de fenómenos naturales, ante lo cual en algunos casos se actúa en forma preventiva y, en otros, reactiva, principalmente a través de programas de emergencia. Si bien existen estudios sobre estos fenómenos y sobre la identificación de zonas de riesgo o peligro frente a la ocurrencia de un evento de esta naturaleza, (por ejemplo, del Servicio Meteorológico Nacional, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria -INTA-, del Servicio de Hidrografía Naval, del Servicio Geológico Minero Argentino -SEGEMAR-) es complejo prever el momento de su ocurrencia y localización exacta en un determinado territorio, como también dimensionar sus efectos.

En virtud de lo expuesto, resulta fundamental contar con una base de datos actualizada que contenga información acerca de las posibles zonas de riesgo y peligro que hayan afectado o puedan afectar la infraestructura de transporte del país. Hasta el momento, esta base de datos no ha sido desarrollada. Dicha base de datos debe incluir un registro actualizado de eventos, así como las condiciones físicas, económicas y sociales de los territorios en los cuales se encuentran dichas infraestructuras. Esto permitirá avanzar hacia una planificación ambiental y territorial más integrada.

6. Conclusiones

La recopilación de datos sobre eventos climáticos históricos y sus consecuencias puede ser un punto de partida valioso para evaluar la vulnerabilidad y formular estrategias de adaptación al cambio climático. La producción de conocimientos sobre las prácticas óptimas de adaptación, así como el análisis detallado de casos de estudio y las evaluaciones comparativas, tienen el potencial de generar diferentes perspectivas que fortalezcan la innovación en la planificación y diseño de políticas públicas. La implementación de estrategias específicas de difusión destinadas a concientizar sobre los impactos y la vulnerabilidad asociados al cambio climático podría facilitar el desarrollo e implementación de iniciativas de adaptación.

Los actores del transporte, como las empresas operadoras (públicas y privadas), organismos viales, aeropuertos, puertos y vías navegables, entre otros, están teniendo en cuenta los efectos del cambio climático y la necesidad de adaptarse. Es necesario implementar medidas concretas, ya sea a través de intervenciones duras o blandas. Los altos costos de reconstrucción, procesos prolongados de recuperación e interrupciones graves en los sistemas de transporte requieren llevar a cabo planes que contemplen la vulnerabilidad y adaptación en sus conceptos de diseño en forma creciente. Estas acciones, relacionadas con políticas públicas, planes y proyectos, deben considerar las infraestructuras de transporte proyectadas, como la actualización y mejora de las ya existentes.

Referencias bibliográficas

- Asakura, Y. y Kashiwadani, M. (19 de enero de 1991). Road network reliability caused by daily fluctuation of traffic flow. *19th PTRC Summer Annual Meeting (73-84)*, Brighton, Reino Unido. <http://worldcat.org/isbn/086050234173-84>.
- Bell, M. G. H. e Iida, Y. (1997). *Transportation Network Analysis*. West Sussex, Wiley.
- Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9(2), 117-127. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00011-2)
- Berdica, K. y Mattsson, L. G. (2007). Vulnerability: A model-based case study of the road network in Stockholm. En A. T. Murray y T. H. Grubestic (eds.), *Critical Infrastructure. Reliability and Vulnerability*.
- Burgholzer, W., Bauer, G., Posset, M. y Jammernegg, W. (2013). Analysing the impact of disruption in intermodal transport networks: A micro simulation-based model. *Decision Support Systems*, 54(4), 1580-1586. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.060>
- Chang, S. E. (2003). Transportation planning for disasters: An accessibility approach. *Environment and Planning A*, 35, 1051-1072.
- Chen, A., Yang, H., Lo, H. K. y Tang, W. H. (1999). Capacity-related reliability for transportation networks. *Journal of Advanced Transportation*, 33(2), 183-200.
- Chen, L. y Miller-Hooks, E. (2012). Resilience: An indicator of recovery capability in intermodal freight transport. *Transportation Science*, 46(1), 109-123. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0376>
- Condeço-Melhorado, A. M. (2011). *Spatial spillovers of transport infrastructure* [Tesis doctoral, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá].
- Dunn, S. y Wilkinson, S. M. (2016). Increasing the resilience of air traffic networks using a network graph theory approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 90, 39-50.
- García Palomares, J. C., Gutiérrez, J., Martín, J. C. y Moya Gómez, B. (2018). An analysis of the Spanish high-capacity road network criticality. *Transportation*, 45(4), 1139-1159. <https://doi.org/10.1007/s11116-018-9877-4>

- Gavira Narváez, A. y Ventura Fernández, J. (2013). Procesos actuales y perspectivas para el transporte ferroviario de viajeros en Andalucía. *Investigaciones Geográficas*, 59, 25-41.
- Goodwin, P. B. (1992). A Review of new demand elasticities with special reference to short and long run effects of price changes. *Journal of Transport Economics and Policy*, 26(2), 155-169. <http://www.jstort.org/stable/20052977>
- Grubestic, T. H., Matisziw, T. C., Murray, A. T. y Snedicker, D. (2008). Comparative approaches for assessing network vulnerability. *International Regional Science Review*, 31, 88-112.
- Grubestic, T. H., Murray, A. T., Pridemore, W. A., Tabb, L. P., Liu, Y. y Wei, R. (2012). Alcohol beverage control, privatization and the geographic distribution of alcohol outlets. *BMC Public Health*, 12, 1015.
- Gutiérrez Gallego, J. A., Ruiz Labrador, E. E., Jaraíz Cabanillas, F. V. y Pérez Pintor, J. M. (2013). Diseño de un modelo de asignación de viajes con aplicaciones S.I.G. para la gestión de planes de movilidad urbana sostenible en ciudades medias.
- Gutierrez Gallego, J. A. G., Nieto, R. B., Labrador, E. E. R., Cabanillas, F. J. J. & Jeong, J. S. (2014). Análisis de la accesibilidad al autobús urbano de Mérida (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (64), 249-272. <https://doi.org/10.21138/bage.1697>
- Haggett, P. y Chorley, R. J. (1969). *Network Analysis in Geography*. Edward Arnold.
- Jenelius, E. y Mattsson, L. G. (2005). Developing a methodology for road network vulnerability analysis. *Ponencia en Nectar Cluster 1 Seminar*, Molde University College, Noruega.
- Jenelius, E. (2009). Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability. *Journal of Transport Geography*, 17, 234-244.
- López-Escolano, C. y Pueyo Campos, A. (2018). Medida y valoración de la accesibilidad viaria en España: Revisión de casos. *Ciudad y Territorio*, L (197), 473-486.
- Miller-Hooks, E., Zhang, X. y Faturechi, R. (2012). Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks. *Computers & Operations Research*, 39, 1633-1643.
- Murray, A., Matisziw, T. C. y Grubestic, T. (2008). A methodological overview of network vulnerability analysis. *Growth and Change*, 39, 573-592.
- Nicholson, A. J. y Du, Z. P. (1997). Degradable transportation systems: An integrated equilibrium model. *Transportation Research*, 31(3), 209-223. [https://doi.org/10.1016/S0191-2615\(96\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S0191-2615(96)00022-7)
- Rodríguez Núñez, E. y Gutiérrez Puebla, J. (2012). Análisis de vulnerabilidad de las redes de carreteras mediante indicadores de accesibilidad y SIG: Intensidad y polarización de los efectos del cierre de tramos en la red de Mallorca. *GeoFocus*, 12, 374-394.
- Rodríguez Núñez, E. y García-Palomares, J. C. (2014). Measuring the vulnerability of public transport networks. *Journal of Transport Geography*, 35, 50-63.
- Sheffi, Y. (2016). *El poder de la resiliencia: Cómo las mejores empresas gestionan lo inesperado*. TEMAS.
- Taylor, M. A. P., Sekhar, S. V. C. y D'Este, G. M. (2006). Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks & Spatial Economics*, 6(3), 267-291. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-9284-9>
- Tran, Q. H. y Namatame, A. (2015). Worldwide aviation network vulnerability analysis: a complex network approach. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 12(2), 349-373.
- Yang, H., Lo, K. K. y Tang, W. H. (2000). Travel time versus capacity reliability of a road network. *Ponencia en 79th Annual Meeting, Transportation Research Board*, Washington DC.

Notas

[i] Plan de Acción Nacional del Transporte y Cambio Climático 2022.