



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Planeación de infraestructura del transporte: Identificación de tramos críticos para el funcionamiento de redes carreteras

Luz Angélica Gradilla Hernández

**Publicación Técnica No. 354
Sanfandila, Qro, 2011**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Planeación de infraestructura de transporte:
Identificación de tramos críticos para el
funcionamiento de redes carreteras**

Publicación Técnica No. 354
Sanfandila, Qro, 2011

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), por la Dra. Luz Angélica Gradilla Hernández. Se reconocen las aportaciones del Ing. Roberto Aguerrebere Salido, Director General del Instituto.

Se agradece la colaboración del Dr. Ovidio González Gómez, coordinador de la Maestría en Sistemas de Transporte y Distribución de Carga de la Universidad Autónoma de Querétaro; así como también del Dr. Erik Jenelius, investigador de la División de Tráfico y Logística, del Departamento de Transporte en el Instituto Real de Tecnología (KTH, por sus siglas en sueco). Por otra parte, se reconocen las facilidades prestadas por el Dr. Alberto Mendoza Díaz, Coordinador de Seguridad y Operación del Transporte en el IMT, así como la ayuda proporcionada por el Dr. Ricardo Montoya Zamora para la programación en el software TransCAD, quien fue investigador bajo dicha coordinación.

Índice

Resumen	iv
Abstract	vi
Resumen ejecutivo	viii
Introducción	1
1 Enfoques para la identificación de tramos críticos en redes carreteras	5
1.1 Cambios en conectividad	5
1.2 Cambios en la accesibilidad	7
1.3 Cambios en el costo de viaje	9
2 Metodología propuesta para México	13
2.1 Criterio 1: afectación en la conectividad entre pares origen-destino	15
2.2 Criterio 2: afectación en la accesibilidad	17
2.3 Criterio 3: afectación en el tiempo de viaje	20
2.4 Normalización de los valores para cada criterio	26
2.5 Caso de aplicación de la metodología a la Red Federal de Carreteras ...	27
3 Resultados de la aplicación de la metodología	35
3.1 Resultados de la aplicación del criterio 1: afectación en la conectividad .	35
3.2 Resultados de la aplicación del criterio 2: afectación en la accesibilidad .	38
3.3 Resultados de la aplicación del criterio 3: afectación en el tiempo	40
3.4 Análisis conjunto de los resultados	44
4 Análisis complementario	49
4.1 Grado de afectación regional	49
4.2 Vinculación con riesgos	53
4.3 Vinculación con planeación de infraestructura	58
5 Conclusiones	61

Resumen

La obstrucción de tramos carreteros causada por desastres naturales, clima adverso y accidentes vehiculares, -entre otros- puede provocar consecuencias negativas para las actividades económicas y sociales del país. El principal objetivo del análisis de vulnerabilidad de redes carreteras consiste en identificar aquellos tramos que producirían las mayores consecuencias si quedaran afectados y que, por ello, se considerarían críticos para el funcionamiento de la red de carreteras; por lo que en este trabajo se propone una metodología que permite identificarlos en la red mexicana de carreteras. En la metodología se miden, con una visión sistémica, las consecuencias de la obstrucción de un tramo; en términos de cambios en conectividad, accesibilidad y tiempo de viaje. Para la aplicación de la metodología a la red federal de carreteras se programaron *macros* en TransCAD y fue utilizado un Sistema de Información Geográfica. Se considera que la identificación de los tramos críticos puede ayudar a la toma de decisiones, ya que arrojan elementos para priorizar aquellos tramos que sería estratégico rehabilitar en primer lugar después de un desastre natural, en la fase de recuperación; que sería estratégico robustecer en una fase de prevención, por ejemplo, al ser considerados como prioridad en los programas de mantenimiento; o bien, para los que sería conveniente construir tramos redundantes con menor vulnerabilidad, para reducir la probabilidad de daños humanos, sociales y económicos por encadenamientos de peligros, y -por ende- de una mayor extensión geográfica y magnitud de afectación.

Abstract

The blocking of road segments by natural disasters, adverse weather, and car accidents, among others, can cause negative consequences for the social and economical activities in the country. The main goal of a highway network vulnerability analysis is to identify critical road segments leading to more severe consequences when are affected, and for that reason they are considered critical for the optimal operation of the highway network. In this study, a methodology is proposed to identify that kind of segments in the Mexican highway network. This methodology allows the evaluation, with a systems approach, of the consequences of road segment blocking, in terms of changes in connectivity, accessibility and travel time. For the application of the proposed methodology to the federal highway network, some macros were programmed in TransCAD and a Geographical Information System (GIS) was also used. It is considered that the identification of critical segments in the road network could be helpful to make decisions, because it gives a criteria to prioritize those road segments that would be strategic to rehabilitate after a natural disaster, in a recovery phase; would be strategic to bolster in a preparedness phase, for example, when the critical segments are considered a priority in maintenance programs; or when it would be convenient to built redundant segments with less vulnerability, with the purpose of reducing the probability of human, social and economic losses, related to the concatenation of hazards, and -in consequence- events with a bigger geographical extent and a higher caused damage.

Resumen ejecutivo

La obstrucción de tramos carreteros causada por desastres naturales, clima adverso y accidentes vehiculares puede provocar consecuencias negativas para las actividades económicas y sociales de México, ya que el sistema económico está supeditado en gran medida al autotransporte. Con el objetivo de brindar una herramienta para los planificadores y tomadores de decisiones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, se desarrolló el presente trabajo en el que se sugiere una metodología que permite identificar aquellos tramos que producen las mayores consecuencias si quedaran afectados y que, por ello, se consideran críticos para el buen funcionamiento de la red mexicana de carreteras.

Al inicio de este trabajo se revisan críticamente algunos enfoques para la identificación de tramos críticos que comparten las bases de conceptualización de vulnerabilidad, pero que difieren en las expresiones matemáticas o modelos utilizados para su cuantificación; es decir, la mayoría de los investigadores han propuesto índices y modelos para medir diversos tipos de consecuencias que provoca la falla de un tramo carretero, independientemente de la probabilidad de dicha falla; sin embargo, la mayoría de esos índices o modelos difieren entre sí.

Posteriormente, se describe la metodología sugerida, en donde se cuantifican los efectos de la obstrucción de un tramo a través de los cambios en la conectividad de la red, en la accesibilidad a localidades y puntos de interés, así como en el tiempo de viaje de todos los usuarios de la red. Es decir, a través de los tres criterios propuestos en la metodología es posible medir qué tan importante es un tramo para el buen funcionamiento de la red y determinar, para cada uno de ellos, un índice de importancia; dicho índice permite posteriormente la jerarquización de los tramos, del más importante al menos importante, así como su clasificación en críticos o no críticos.

Para aplicar la metodología se eligió un *software* que fungiera como un Sistema de Información Geográfica y en donde a su vez se pudieran programar *macros* para la realización de los cálculos requeridos; por ello se utiliza el *software* TransCAD y se describen cada uno de los algoritmos que fueron programados.

La metodología fue aplicada utilizando las carreteras pavimentadas, referenciadas geográficamente, del Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte (INIT) 2007; realizado por la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial (USIG) del IMT, en coordinación con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Para la utilización de la red de carreteras en TransCAD fue necesario una edición exhaustiva de ésta, principalmente fueron corregidos los problemas de

continuidad de las carreteras en zonas urbanas así como de conectividad entre los tramos.

Se describen los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología; es decir, del cálculo del índice de importancia de los tramos de la red federal de carreteras pavimentadas; en los que se puede apreciar que el centro del País muestra una configuración de red densa, producto de décadas de construcción de carreteras redundantes, en correspondencia a la mayor densidad poblacional y económica en los diferentes períodos de la historia de México. Por otro lado, saltan a la vista las escasas conexiones transversales al norte del país que explican lo crítico de varios tramos.

Gracias a la aplicación de la metodología en un caso de estudio, se pudo constatar la factibilidad de su implementación. En un análisis complementario, se dan ejemplos para mostrar parte de la información adicional con la que se podría trabajar, de tal forma que la metodología sea de ayuda en la planificación de la infraestructura.

Finalmente, se recomienda que el índice de importancia de los tramos sea tomado en cuenta para priorizar su rehabilitación después de un desastre natural, priorizar su mantenimiento y -por último- para planear aquellos tramos redundantes que sería necesario construir o determinar aquellos en donde sería conveniente aumentar la capacidad, de tal manera que se robustezca la red con un enfoque de sistemas.

Introducción

Desde los años noventa existe interés por realizar investigación en las áreas de confiabilidad y vulnerabilidad de las redes carreteras; dicho interés se ha incrementado después de eventos tales como el terremoto de 1995 -en Kobe, Japón- y por los atentados terroristas del 11 de septiembre de 2001, en la Ciudad de Nueva York, EE. UU. (Di Gangi y Luongo, 2005; Husdal, 2006; Jenelius *et al.* 2006).

La confiabilidad de una red de transporte ha sido definida como la probabilidad de que uno o más de sus tramos funcionen de acuerdo con una serie de variables operativas estándar (Husdal, 2004). Por lo que la estimación de la probabilidad de fallas en las redes carreteras es abordada en estudios de confiabilidad de redes. Sería deseable determinar la confiabilidad de redes de transporte en países en vías de desarrollo; sin embargo, es poco factible financieramente realizar un estudio geográfico integral y una ubicación detallada de los riesgos en cada tramo de una red extensa, así como determinar su probabilidad de ocurrencia (Taylor y D'Este, 2003a). Debido a la poca factibilidad económica del enfoque anterior, se ha justificado el realizar otro tipo de estudios relacionados con la vulnerabilidad de las redes de transporte, enfocados en las consecuencias de las fallas.

Por lo antes dicho, la mayoría de los autores (Lleras-Echeverri *et al.*, 2001; Berdica, 2002a; Jenelius *et al.*, 2006; Tampère *et al.*, 2007) que se han enfocado a estudiar la vulnerabilidad de las redes coinciden en que el término vulnerabilidad debería enfocarse en los efectos de las amenazas sobre la infraestructura de transporte; sin embargo, el concepto de vulnerabilidad de redes carreteras todavía no cuenta con una definición acabada y, mucho menos, con una expresión matemática aceptada (Husdal, 2006).

El concepto de vulnerabilidad ha sido relacionado con las consecuencias observables en la red, debidas a la falla de un tramo carretero, independientemente de su probabilidad de ocurrencia; es decir, se ubica en el nivel de funcionamiento del sistema de transporte, y en especial en la medición de los posibles cambios en la conectividad o costo generalizado, provocados por un rango amplio de causas tales como fluctuaciones en las condiciones de tráfico (congestionamiento recurrente) y fluctuaciones en la capacidad debido a eventos anormales tales como los desastres naturales, clima adverso, disturbios, accidentes vehiculares, ataques terroristas, etcétera.

Alan Nicholson y Zhen-Ping Du (1997) consideran que los sistemas de transporte, que incluyen a las redes carreteras, son los más importantes dentro de los

denominados sistemas vitales que incluyen las redes de comunicaciones, de drenaje, de distribución de agua y de suministro de energía; ya que después de un desastre natural, es esencial la utilización de los sistemas de transporte para reparar los daños que hayan sufrido el resto de los sistemas vitales.

Por otro lado, las interrupciones en los sistemas de transporte interurbano pueden implicar graves pérdidas económicas; pues la obstrucción en uno o más tramos carreteros puede provocar que se exceda la capacidad de otros tramos y, como consecuencia, el tráfico debe ser redirigido con un alto costo¹. Por lo general, en las redes urbanas existen más rutas alternas que en las carreteras regionales o nacionales, si queda obstruido un tramo dentro de una ruta óptima; de forma tal que una falla similar puede provocar efectos más drásticos en las redes regionales que en las urbanas. Una primera aproximación al concepto de vulnerabilidad tiene que ver, entonces, con la densidad de la red. En la medida que la red es más densa, el sistema resulta menos vulnerable (más robusto) y al revés; una red con escasas conexiones redundantes provoca un grado de vulnerabilidad mayor en su sistema de transporte.

En Latinoamérica, en general, el grado de afectación o vulnerabilidad de las redes carreteras puede ser alto, dado que existe una fuerte dependencia operativa (y por tanto económica) en pocas rutas carreteras (sin alternativas redundantes) que, en su mayoría y por la historia de dependencia económica, pertenecen a los senderos a través de los cuales se realizan los intercambios mercantiles hacia el exterior. Al incrementarse estos intercambios, con el proceso de globalización, más severo puede ser el problema económico derivado de la obstrucción de algún tramo; por lo que se estima de gran utilidad una metodología para identificar los tramos críticos de dichas rutas. Los tramos críticos serían aquellos que causan los mayores efectos negativos en el funcionamiento del sistema de transporte cuando se ven obstruidos; de tal forma que cuando fallan esos tramos, hacen vulnerable al sistema o a una región.

Existe la tendencia a creer que una red de carreteras es más vulnerable simplemente donde los flujos en los tramos son los mayores, pero: (1) pueden estar disponibles rutas alternas a esos tramos que provean de un nuevo patrón de equilibrio de los flujos con una pequeña reducción en el desempeño total de la red, (2) al considerar tramos en forma agregada pueden quedar sin identificarse vulnerabilidades en conexiones entre algunos orígenes y destinos. Por lo tanto, la clave del diagnóstico de la vulnerabilidad de redes es el desarrollo de herramientas analíticas que permitan identificar debilidades de la red, ya que los tramos críticos de la red puede estar ubicados de tal manera que no sea obvia su localización, en primera instancia (Taylor y D'Este, 2003a).

¹ Con la aplicación de Sistemas Inteligentes de Transporte podrían medirse, en tiempo real, algunos de los efectos que provoca la obstrucción de uno o más tramos en la red total de carreteras; sin embargo, en México aún es incipiente el uso de dichos sistemas, por lo que no sería factible financieramente el desarrollo de proyectos nacionales para dichos fines.

En los últimos diez años, se han realizado varios estudios para el desarrollo de medidas de vulnerabilidad de redes carreteras, en países como Australia (Taylor y D'Este, 2003a, 2003b, 2004; Taylor *et al.* 2006); Bélgica (Tampère *et al.* 2007); Canadá (Scott *et al.* 2006); Colombia (Lleras-Echeverri y Sánchez-Silva, 2001); Estados Unidos de Norteamérica (Murray-Tuite y Mahmassani, 2004; Sohn, 2006); Holanda (Schreuder *et al.* 2008); Italia (Di Gangi y Luongo, 2005) y Suecia (Berdica, 2002b; Berdica y Eliasson, 2004; Jenelius *et al.*, 2006). La mayoría de los trabajos abordan el análisis de vulnerabilidad de redes carreteras enfocándose en la medición de las posibles consecuencias de obstrucción total de los tramos; en el presente trabajo se abordará la vulnerabilidad bajo ese enfoque.

La principal utilidad de medir la vulnerabilidad de redes carreteras e identificar los tramos críticos para su funcionamiento estriba en proporcionar a los planificadores y tomadores de decisiones -a nivel federal, estatal y municipal- una de las herramientas necesarias para priorizar la rehabilitación y el mantenimiento de los tramos carreteros, así como la construcción de tramos redundantes y, como resultado, optimizar recursos al obtener beneficios sociales y económicos.

En México cada año ocurren desastres naturales que obstruyen tramos carreteros por horas o días; por tanto podría priorizarse su rehabilitación a partir de qué tan críticos son para el funcionamiento de la red de carreteras, regional y nacional. Entre los eventos recientes que han afectado la red de carreteras, podemos mencionar el huracán Kenna que afectó principalmente a los estados de Nayarit y Jalisco, en octubre de 2002; el huracán Wilma que afectó en octubre 2005, la península de Yucatán; el derrumbe ocurrido en septiembre 2007, en el kilómetro 32 de la autopista México-Toluca, debido a las continuas lluvias; el huracán Dean que, en agosto de 2007, provocó daños en la infraestructura carretera de ocho municipios de Quintana Roo; las inundaciones en Tabasco y Chiapas, en octubre 2007, a causa de crecidas históricas en los ríos que recorren ambas entidades; el huracán Jimena que, en septiembre de 2009, ocasionó entre otros daños; el cierre por varias horas de los tramos Guaymas-Hermosillo, Guaymas-Empalme, Estación Don-Navojoa de la carretera federal 15 México-Nogales; el cierre del aeropuerto Internacional de Guaymas; así como el cierre parcial de los puertos de Guaymas, Yavaros y Bahía Kinos.

En el caso del mantenimiento, también podría tomarse en cuenta qué tan críticos son los tramos para el funcionamiento de la red, aunado a los análisis que ya realiza la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC), de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en el software HDM-4 para la gestión del mantenimiento (Escalante, 2002). Actualmente, la SCT realiza dichos análisis a través de la aplicación de los modelos del HDM-4, en donde se toma en cuenta la disponibilidad de recursos y una serie de índices o medidas de las características del estado físico de los tramos, de la capacidad que tienen y del tránsito de vehículos a los que están sometidos, así como del clima; entre dicha información se incluye el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), la composición

vehicular, el Índice de Rugosidad Internacional (IRI), los deterioros superficiales, la deflexión y la profundidad de roderas.

Por otra parte, el encontrar los tramos críticos para el óptimo funcionamiento de la red también podría complementar las metodologías que aplica la SCT y las entidades estatales para la construcción de nuevos tramos carreteros; ya que actualmente se enfocan más en el análisis de costo-beneficio y no incluyen ningún elemento para estimar el impacto de dichos tramos en el funcionamiento de toda la red; por lo que, en general, no se considera viable la construcción de tramos redundantes que puedan mejorar el funcionamiento de toda la red, en caso de que se vea afectado un tramo identificado como crítico.

Debido a que en México no existen estudios sobre vulnerabilidad de redes carreteras, bajo ningún enfoque; se considera que podría ser útil la metodología desarrollada en el presente trabajo para identificar los tramos críticos de la Red Federal de Carreteras en México; es decir, aquellos tramos que al verse obstruidos provocarían la mayor afectación en el funcionamiento del sistema carretero.

Por lo que el objetivo general del presente trabajo radica en contribuir al estudio de la vulnerabilidad de la red carretera de México siendo los objetivos particulares el desarrollo de una metodología para la identificación de los tramos críticos de esta y su aplicación en la Red Federal de Carreteras; de tal manera que se obtenga una jerarquía de los tramos carreteros que permita enriquecer los análisis y la toma de decisiones en la priorización del mantenimiento, rehabilitación y construcción de tramos carreteros.

Los resultados podrían ser de utilidad para la Secretaría de Comunicaciones y Transportes; ya que los planificadores y tomadores de decisiones de la SCT requerirían herramientas complementarias para detectar, según ciertos criterios, cuáles son los tramos críticos de las redes carreteras e idear- en consecuencia,- estrategias y medidas correctivas para salvaguardar el funcionamiento de la red y para manejar los impactos de la degradación de la red carretera; con el objetivo de minimizar las consecuencias que afectan negativamente a la economía nacional y a las actividades sociales de las regiones. Sin embargo, la posible transferencia a la SCT de la metodología desarrollada en el presente trabajo sale de su alcance, por lo que el trabajo se centrará en la descripción de la metodología y en los análisis de su aplicación a un caso de estudio.

1 Enfoques para la identificación de tramos críticos en redes carreteras

En este capítulo, se revisan algunos enfoques para la identificación de tramos críticos en redes carreteras, que fueron tomados como base para el desarrollo de la metodología propuesta. Los casos abordados representan los trabajos realizados recientemente, en donde los investigadores han propuesto índices y modelos para medir diversos tipos de consecuencias que provoca la falla de un tramo carretero. En todos los trabajos no se toma en cuenta la probabilidad de que ocurra una falla que cause la obstrucción de un tramo, sino que fue enfocado solamente en cuantificar las posibles consecuencias en casos de simulación.

Sin embargo, cada uno de los autores ha cuantificado diferentes consecuencias y, por tanto, sus índices o modelos difieren entre sí. Para facilitar la presentación de cada uno de los trabajos, se describen a continuación en tres secciones, que son agrupadas de acuerdo con la similitud de las consecuencias que miden.

En el primer grupo, los autores se enfocaron en medir los efectos que tiene la obstrucción de un tramo en la conectividad de la red; es decir, cuántas rutas óptimas se ven afectadas al disminuir las conexiones de la red; en el segundo, miden los cambios en la accesibilidad hacia localidades o puntos de interés y, en el tercero, se agrupan los que ponen el énfasis en la medición de las consecuencias de la interrupción de un tramo carretero en función del tiempo o el costo del viaje.

1.1 Cambios en conectividad

Kannan Viswanath y Srinivas Peeta (2003) sugirieron un concepto de vulnerabilidad de la red en su conjunto. Este concepto es expresado como el grado de conexión que tengan los centroides de la red, dadas sus características topológicas. Pone atención, por tanto, en la conexión redundante entre centroides y es medida por la suma del número de rutas independientes entre cada par origen-destino de la red de carreteras en estudio (una ruta independiente difiere en todos sus tramos carreteros de otras rutas y por lo tanto provee redundancia). Mientras mayor sea esta sumatoria, menor será la vulnerabilidad de la red en su conjunto.

Por los objetivos del trabajo de estos autores, la medida pretende calcular el grado de vulnerabilidad de toda la red bajo estudio y no especifica estimación alguna de qué tan crítico sea cada tramo; por lo que la propuesta es insuficiente para planear y priorizar el mantenimiento, así como la rehabilitación después de un desastre de

los tramos carreteros. Las redes carreteras en Latinoamérica podrían contar con pocas rutas independientes debido a las escasas rutas carreteras utilizadas para el transporte doméstico e internacional de carga. Así, esta medida podría servir en las redes carreteras latinoamericanas para cuantificar la calificación subjetiva de su vulnerabilidad, pero no para encaminar los esfuerzos de prevención por tramos.

Posteriormente, Massimo Di Gangi y Angelo Luongo (2005) presentaron una medida similar en perspectiva, pero más completa en alcance; pues pretende atender la debilidad de la red debida a cada uno de los tramos. Con esta medida, los autores buscan determinar qué tan importante es cada tramo para el total de los pares origen-destino. Dicha medida (Ecuación 1.1) se obtiene con el cálculo del número de rutas origen-destino que comparten un mismo tramo, basado en modelos probabilísticos de elección de rutas. Entre más rutas O-D pasen por un mismo tramo, más rutas se verían afectadas por su obstrucción y se consideraría más crítico. En sí, no arroja un indicador de vulnerabilidad, sino una cuantificación relativa de la importancia de los tramos. La medida propuesta se enfoca en la medición de la conectividad, tomando en cuenta las características topológicas y la probabilidad de elección de rutas; sin considerar la circulación vehicular después de la obstrucción de un tramo y, por tanto, sin referencia al posible congestionamiento que pueda ocasionar.

$$LWI_{ij} = \frac{\sum_{od} N_{ij,od} \cdot P_{ij,od}}{\sum_{od} N_{od}^k} \quad (1.1)$$

Donde:

LWI_{ij} = índice de debilidad del arco (*Link Weakness Index*);

$N_{ij,od}$ = número de rutas que cruzan el arco (i, j) que conectan el par O-D;

$P_{ij,od}$ = probabilidad de elección del arco (i, j);

N_{od}^k = número total de rutas que conectan el par O-D.

De forma similar, Pamela Murray-Tuite y Hani Mahmassani (2004) presentaron un modelo de programación matemática multiobjetivo para identificar los tramos carreteros críticos. En este modelo proponen un índice que mide la importancia que tiene un tramo específico para la conectividad entre un grupo de pares origen-destino y toman en cuenta la disposición de rutas alternativas, el exceso de capacidad así como el tiempo de viaje. Sin embargo, esta propuesta no ofrece una forma específica para volver operable el índice, ya que no se encuentra implementada en un código de software para su aplicación y además requiere información detallada de la que difícilmente se puede disponer en países en desarrollo.

Este tipo de aproximaciones para medir directamente la vulnerabilidad o indirectamente a través de la calidad crítica de sus tramos ofrece un importante avance en torno al manejo de la conectividad derivada de la topología de la red.

Sin embargo, no sólo el primer modelo aquí descrito presenta limitaciones; sino que en su conjunto, estos modelos no incorporan ni permiten incorporar -tal como están planteados- la interacción de los flujos reales con la red.

1.2 Cambios en la accesibilidad

Una parte importante de los estudios de vulnerabilidad ha sido desarrollada tomando como base que esta debe estar relacionada con las consecuencias que tenga la obstrucción de uno o más tramos carreteros, en el acceso de algunos o todos los nodos de la red. Si bien la unidad de análisis es cada uno de los tramos, la atención está puesta en los efectos de la obstrucción en los nodos principales.

Así, diversos autores han desarrollado metodologías para medir la variación que provoca la obstrucción de uno o más tramos en los índices de accesibilidad (estándares o propuestos) de ciertas ciudades de interés en redes nacionales.

Como primer caso, Germán Lleras-Echeverri y Mauricio Sánchez-Silva (2001) propusieron medir los cambios en la accesibilidad nodal (Ecuación 1.2), que ocasionaría cada escenario evaluado; es decir, la falla de uno o más de los tramos que se encuentran en los caminos más cortos entre los centroides analizados, para posteriormente calcular un parámetro de clasificación, CP_k , de tramos (Ecuación 1.3) que permitiera identificar los que provocan mayores aumentos en el costo generalizado de viaje.

Los autores centran su atención en la generación de escenarios complejos de falla, sin precisar la medida específica de accesibilidad que utilizarían en la aplicación del modelo. Entonces, a pesar de que mencionan el costo generalizado de viaje, éste es entendido meramente como la suma del tiempo entre cada par origen-destino del viaje, en condiciones de tránsito libre. Es decir, sin considerar los efectos del posible congestionamiento que podría ocasionarse en otros tramos de la red.

Para la construcción y evaluación de cada escenario F , los autores desarrollaron un enfoque de fallas progresivas denominado escenario crítico (*Critical Scenario*) para el cual evalúan los efectos de la obstrucción de “s” tramos a la vez. Una de las reglas para detener la generación y evaluación de escenarios consiste en que el CP_k de todos los tramos alcance un valor de variación ε , definido por el analista, entre un tipo de escenario y otro; cuando todos los valores N_F alcanzan el valor de uno, también se detiene el análisis; de tal forma que disminuya el número total de escenarios evaluados. La metodología propuesta fue aplicada a un caso de estudio en una parte de la red carretera de Colombia; sin embargo, el enfoque no toma en cuenta la demanda de viajes dentro de la red y en consecuencia no se cubre la presencia de congestionamientos.

$$\Delta A_{iF} = \frac{A_{iF}}{A_{i0}} - 1 \quad (1.2)$$

Donde:

A_{iF} = accesibilidad del centroide i en el escenario de falla F ;

A_{i0} = accesibilidad del centroide i en el escenario base 0, en condiciones normales.

$$CP_k = \sum_{s=1}^m f(s) \max \left(\frac{N_F}{\max(N_F)_s} \right) \quad (1.3)$$

Donde:

CP_k = parámetro de clasificación del arco k ;

$f(s)$ = función de pesos, $1/s$;

N_F = accesibilidad de la red bajo el escenario de falla $F = \{k_1, k_2, \dots, k_s\}$;

S = número de tramos obstruidos al mismo tiempo en el escenario de falla F .

En un trabajo posterior, Katja Berdica y Jonas Eliasson (2004) desarrollaron un indicador (Ecuación 1.4) para determinar cómo se ve afectada la accesibilidad en una región determinada de Suecia, cuando una parte de la red de carretera, -por alguna razón- queda completa o parcialmente deshabilitada para su uso. Si el valor $\Delta\Omega_i$ es negativo indica un decremento en la accesibilidad.

$$\Delta\Omega_i = \theta \left(\overline{t}_i^{-0} - \overline{t}_i^{-1} \right) + \left(\overline{c}_i^{-0} - \overline{c}_i^{-1} \right) + \overline{T}_i^{-1} \quad (1.4)$$

Donde:

$\Delta\Omega_i$ = cambio en accesibilidad para el área i , entre el escenario de falla 1 y el escenario en condiciones normales 0;

θ = valor del tiempo;

\overline{t}_i = tiempo promedio de viaje;

\overline{c}_i = costo promedio de viaje;

\overline{T}_i = el viaje no realizado (*supressed travel*) comparado con un área de referencia o con la condición 0.

Posteriormente, Michael Taylor *et al.* (2006) presentaron otro enfoque para medir la vulnerabilidad de redes carreteras, en donde un tramo de red carretera es crítico si la obstrucción del tramo provoca una disminución significativa en la accesibilidad de determinadas ciudades; esta última medida con el índice *ARIA* (Ecuación 1.5) que pondera la accesibilidad de acuerdo con la población y con las

instalaciones de las ciudades de servicio; pero, al igual que en las metodologías antes descritas, no toman en cuenta el congestionamiento y ni siquiera el funcionamiento de la red ante la demanda.

$$ARIA_{iL} = \sum_L \min \left\{ 3, \frac{x_{iL}}{x_L} \right\} \quad (1.5)$$

Donde:

$ARIA_{iL}$ = índice de accesibilidad de Australia (*Accessibility/Remoteness Index of Australia*);

x_{iL} = distancia en carretera desde la localidad i al centro de servicio más cercano de categoría L ;

x_L = distancia media en carretera desde todas las localidades al centro de servicio más cercano de categoría L (según sea el tamaño de población).

En general, estos modelos ofrecen estimaciones diversas de la afectación de una obstrucción en la accesibilidad, ya sea de la red completa o de la sumatoria de las accesibilidades de sus nodos generadores de viajes.

1.3 Cambios en el costo de viaje

Por otro lado, Erik Jenelius *et al.* (2006) desarrollaron una medida (Ecuación 2.6) para determinar la importancia de un arco k para el funcionamiento de la red, que toma en cuenta el incremento del costo generalizado de viaje y pondera la demanda insatisfecha cuando un arco individual está bloqueado. La medida aplicada a un caso de estudio en el norte de Suecia. Sin embargo, supone una demanda constante de viajes que puede provocar una subestimación de los problemas de congestionamiento después de un bloqueo en los arcos carreteros, porque no considera que los usuarios podrían cambiar su decisión de viaje.

$$\text{Importancia}_{red}(k) = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}}, k \in E^{nc} \quad (1.6)$$

Donde:

$c_{ij}^{(k)}$ = costo de viaje, del *nodo* i al j cuando el arco k ha fallado;

$c_{ij}^{(0)}$ = costo de la red inicial, sin daño alguno;

x_{ij} = demanda de viajes utilizada como peso para denotar la importancia del par origen-destino en relación con todos los demás pares de la red;

E^{nc} : conjunto de arcos que no dividen la red en partes desconectadas.

Katja Berdica (2002b) reportó un caso de estudio, en el cual utiliza el modelo de asignación que está disponible en el software EMME/2, para estudiar la vulnerabilidad de algunas carreteras que pasan por Estocolmo. El estudio considera el comportamiento de elección de rutas solamente bajo condiciones de equilibrio del usuario y mide los efectos en el tiempo de viaje así como en las distancias recorridas en un nivel regional cuando se simulan escenarios en donde se obstruyen arcos de la red. Finalmente hace una estimación del costo total de la obstrucción de un arco a través del valor oficial de Suecia, para el tiempo de viaje.

En forma similar, Darren Scott *et al.* (2006) propusieron identificar los arcos críticos de una red carretera, empleando el modelo de asignación del que se dispone en el software TransCAD[®], bajo el equilibrio del usuario, y establecieron un índice (Ecuación 1.7) que mide los cambios en el tiempo de viaje. La ventaja del enfoque radica en que el modelo empleado sí toma en cuenta la capacidad de los arcos y el hecho de que los usuarios de la red que no utilizan el arco bloqueado pueden verse afectados por el congestionamiento provocado por los usuarios del arco bloqueado que fueron redirigidos a otras rutas alternas, si estas existen.

$$NRI_a = c_a - c \quad (1.7)$$

Donde:

NRI_a = índice de robustez de la red (*Network Robustness Index*);

c_a = tiempo de viaje de todo el sistema cuando está inhabilitado el arco a ;

c = tiempo de viaje de todo el sistema cuando está presente la totalidad de los arcos (condiciones normales).

En contraste, Michael Taylor *et al.* (2003b y 2004) propusieron un método para medir la vulnerabilidad a través de la aplicación de modelos probabilísticos de elección de rutas. Los autores presentaron una medida de vulnerabilidad (Ecuación 1.8) que toma en cuenta los cambios del costo generalizado de viaje entre dos localidades si un arco carretero falla; sin embargo, no toman en cuenta la capacidad de los arcos carreteros y, por lo tanto, implícitamente suponen que no existe congestionamiento.

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} \cdot v_{ijrs} \quad (1.8)$$

Donde:

V_{rs} = pérdida para una región provocada por la falla del arco "rs";

d_{ij} = demanda de viajes entre dos localidades (i, j);

v_{ijrs} = cambio del costo generalizado de viajar entre dos puntos o localidades (i, j) si un determinado arco (e_{rs}) falla.

Estos modelos sí ofrecen un índice de vulnerabilidad de la red (robustez en el segundo caso) que permite comparar diferentes redes o distintas situaciones en una misma red. Sin embargo, han argumentado que es posible obtener mejores estimaciones de los niveles de congestión con la aplicación de modelos de asignación dinámica de tránsito, como el denominado INDY²; al respecto se puede mencionar el trabajo de Chris Tampère *et al.* (2007) en donde aplica dicho modelo para determinar las secciones vulnerables de una red de carreteras, tomando en cuenta factores como el impacto en el tiempo de viaje que produce la obstrucción de una sección, en un periodo dado.

La revisión de estos tipos de modelos lleva a considerar que mientras el último tipo de modelos acerca más a una medida satisfactoria pues sí toma en cuenta la operación del sistema de transporte, parecería aconsejable recoger también las ventajas de los otros tipos de modelos que se centran más en las características topológicas de la red y en las modificaciones de la capacidad de acceso de los nodos generadores de viajes, características que no son recogidas en los últimos.

La virtud de los modelos en los que es considerada sólo la pérdida de conectividad de la red estriba en que reflejan efectos de ruptura o reconfiguración importantes que no necesariamente son incorporados con la medición del efecto en el costo generalizado y que se vuelven cruciales en redes poco redundantes como la red carretera troncal de México y, probablemente, sea similar la situación para la mayor parte de los países de América Latina. Por otro lado, un modelo que mida la vulnerabilidad en función de los cambios en accesibilidad está más relacionado con la medición de la inhibición de viajes que con el efecto en los tiempos de viaje; lo cual también es importante incorporar sobre todo para los traslados de mercancías pues ello repercute de manera directa en el sistema económico completo.

Así, un modelo que mida cambios en accesibilidad podría generar las primeras aproximaciones para medir la afectación en términos de la pérdida de accesibilidad; sin embargo, podrían complementarse con la estimación de otros efectos como la pérdida de conectividad entre pares origen-destino y la afectación en el costo generalizado.

A partir de lo antes abordado, se propone un modelo multicriterio para estimar los efectos que podría producir la obstrucción de un tramo en el funcionamiento de toda la red en términos de cambios en conectividad, accesibilidad y tiempo de viaje; es decir, cada criterio mide un tipo diferente de efectos o consecuencias. La propuesta de integrar tres criterios en un modelo, para obtener un índice de importancia de los tramos representa una variación a lo desarrollado por los

² Del inglés "*INtegrated DYnamic*" traffic assignment model.

diferentes investigadores ya mencionados a lo largo de este capítulo; ya que como se pudo apreciar, cada autor se enfoca en la medición de algún tipo de consecuencias.

En el presente trabajo se establece como hipótesis que existen diferencias significativas entre los tres criterios utilizados en el modelo propuesto; es decir, que cuantifican consecuencias diferentes de la obstrucción de un tramo. Por lo que es recomendable la medición de los tres criterios, en forma integrada, para identificar los tramos críticos de la Red Federal de Carreteras en México.

En el siguiente capítulo se describen los tres criterios que integran el modelo propuesto, así como el procedimiento de aplicación para cuantificar las consecuencias bajo dichos criterios y poder de esa forma obtener un índice de importancia para cada tramo carretero de la red bajo análisis.

2 Metodología propuesta para México

Actualmente las economías nacionales dependen aún más de los sistemas de transporte, por lo que sus interrupciones provocarán mayores afectaciones económicas en el futuro próximo; dicho problema será un reto para los investigadores en el área de transporte (Husdal, 2006), sobre todo para los países en desarrollo -como México- cuyo sistema económico está supeditado al autotransporte, en una red nacional poco densa y con pocas rutas redundantes.

Por tal motivo y dada la revisión presentada en el capítulo anterior, se realiza el presente trabajo para desarrollar una metodología multicriterio, que permita identificar los tramos críticos de la red y que a su vez considere las limitantes de información en México. Para la identificación de los tramos críticos se tomará el enfoque de la cuantificación de los efectos que provoca la obstrucción de tramos individuales, en el funcionamiento de la red de carreteras analizada; independientemente de la probabilidad de obstrucción de cada tramo.

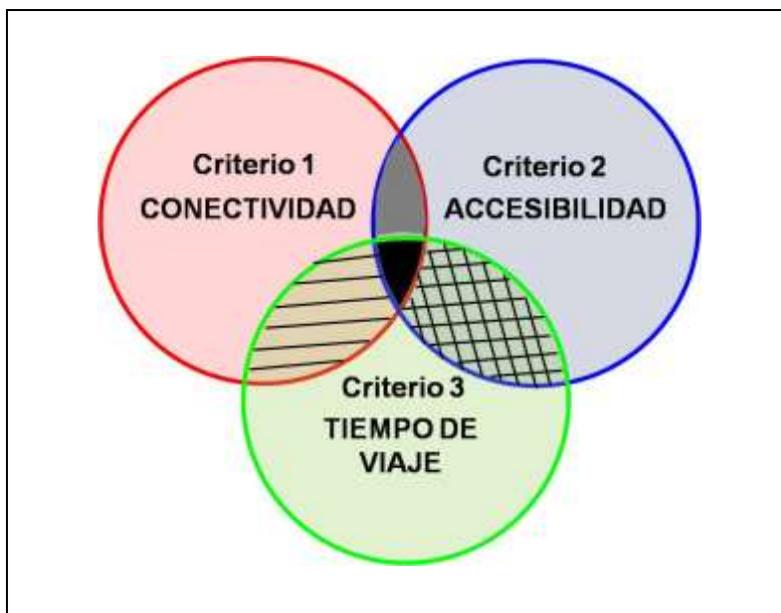


Figura 2.1 Criterios para la identificación de tramos críticos en redes carreteras

Fuente: Elaboración propia

Existe la hipótesis de que es conveniente que la cuantificación de los efectos se lleve a cabo considerando los tres criterios que presentados en la figura 2.1, ya que se piensa que los resultados variarán si los tramos críticos son determinados bajo un criterio por separado o con la combinación de dos de los criterios. Por lo que se propone un modelo multicriterio (Ecuación 2.1) para estimar los efectos que podría producir la obstrucción total de un tramo en el funcionamiento de toda la red carretera.

$$I_a = \left(\frac{R_a}{R_0} \right) + \left(\frac{A_a}{A_0} \right) + \left(\frac{c_a}{c_0} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

I_a = índice de importancia del tramo a ;

R_a = número de rutas óptimas que cruzan el tramo a y conectan los pares origen-destino de la red analizada;

R_0 = número de rutas óptimas totales que conectan la totalidad de los pares origen-destino de la red analizada;

A_a = suma de los índices de accesibilidad de todos los centroides de la red para el escenario en donde se simula la obstrucción total del tramo a ;

A_0 = suma de los índices de accesibilidad de todos los centroides de la red para el escenario base (en condiciones normales);

c_a = tiempo de viaje del sistema cuando está totalmente obstruido el tramo a ;

c_0 = tiempo de viaje del sistema cuando están presentes todos los tramos de la red analizada;

En el primer término del modelo propuesto (Ecuación 2.1) se cuantifica la afectación en la conectividad entre pares origen-destino (criterio 1); en el segundo término, la afectación en la accesibilidad (criterio 2); y en el tercer término, la afectación en el tiempo de viaje (criterio 3). Cada tramo podrá ser analizado por separado de tal forma que puedan ser identificados los tramos críticos de la red analizada; en las siguientes secciones se describen cada uno de los tres criterios y se hace una breve referencia a las *macros* programadas en el Software TransCAD para cuantificar dichos criterios.

2.1 Criterio 1: afectación en la conectividad entre pares origen-destino

El primer criterio propuesto hace referencia a la importancia que tiene un tramo específico para la conectividad entre un grupo de pares origen-destino y está basado en los trabajos desarrollados por Kannan Viswanath y Srinivas Peeta (2003); Massimo Di Gangi y Angelo Luongo (2005); Pamela Murray-Tuite y Hani Mahmassani (2004). En primera instancia son identificadas las rutas óptimas entre todos los pares origen-destino, dichas rutas serán aquellas que tengan la menor distancia entre los dos puntos. Para la determinación de dichas rutas se utiliza el algoritmo de Dijkstra (Taaffe *et al.* 2006).

Una vez que se tiene dicha información, se identifica el número de rutas óptimas que se verían afectadas por la obstrucción del tramo y se consideraría más crítico por afectar en mayor medida la conectividad de la red.

Por lo que la medida propuesta (Ecuación 2.2) refleja la pérdida de conectividad en una red y toma en cuenta sólo las características de distancia en la red; es decir, mide la afectación en la conectividad de la red sin consideración alguna a la circulación vehicular y, por tanto, sin referencia al posible efecto del congestionamiento debido a la obstrucción de un tramo.

$$AC_a = \left(\frac{R_a}{R_0} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

R_a = número de rutas óptimas que cruzan el tramo a y conectan los pares origen-destino de la red analizada;

R_0 = número de rutas óptimas totales que conectan la totalidad de los pares origen-destino de la red analizada.

Entre más alto sea el valor del criterio de Afectación en la Conectividad (AC_a), más importante será el tramo para preservar la conectividad entre los pares origen-destino de la matriz utilizada y por tanto se podría clasificar como crítico. Es decir, el valor del criterio estará entre 0 y 1; además, dicho valor representa el porcentaje de rutas que se ven afectadas por la obstrucción total del tramo a . La figura 2.2 muestra el procedimiento resumido para calcular el criterio AC_a .

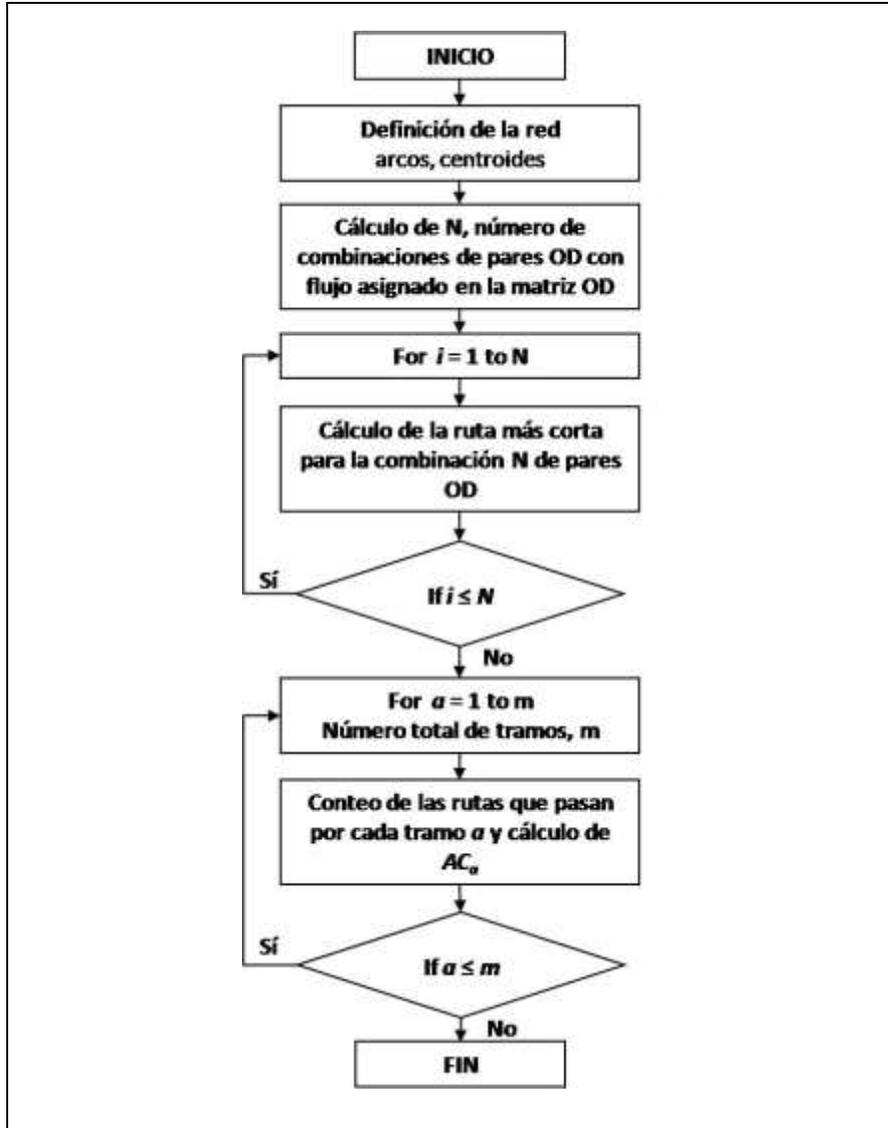


Figura 2.2 Algoritmo para el cálculo del criterio AC_a

Fuente: Diseño original, basado en Di Gangi y Luongo (2005)

El procedimiento para el cálculo del criterio fue programado en una macro³ para el software TransCAD®, que es un Sistema de Información Geográfica (SIG) para aplicaciones de transporte, y se desarrolló originalmente la interfaz de la figura 2.3. Para obtener los valores del criterio se debe correr dicha macro en TransCAD, alimentándola con la información que se especifica a continuación: en la sección 1 de la interfaz debe ser indicada la capa de líneas que contiene los tramos referenciados geográficamente de la red carretera; posteriormente, elegir el grupo

³ La *macro* fue programada con la ayuda de Ricardo Montoya Zamora, quien fue investigador de la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte, en el IMT.

de tramos por analizar y el campo que contiene el valor de la longitud de cada tramo de la red, para hacer referencia a la distancia; en la sección 2, se debe indicar la capa de los nodos origen-destino referenciados geográficamente y que corresponden a los nodos de la matriz de viajes; y finalmente, en la sección 3 señalar cuál es la matriz de viajes origen-destino que será tomada en cuenta para realizar el análisis.

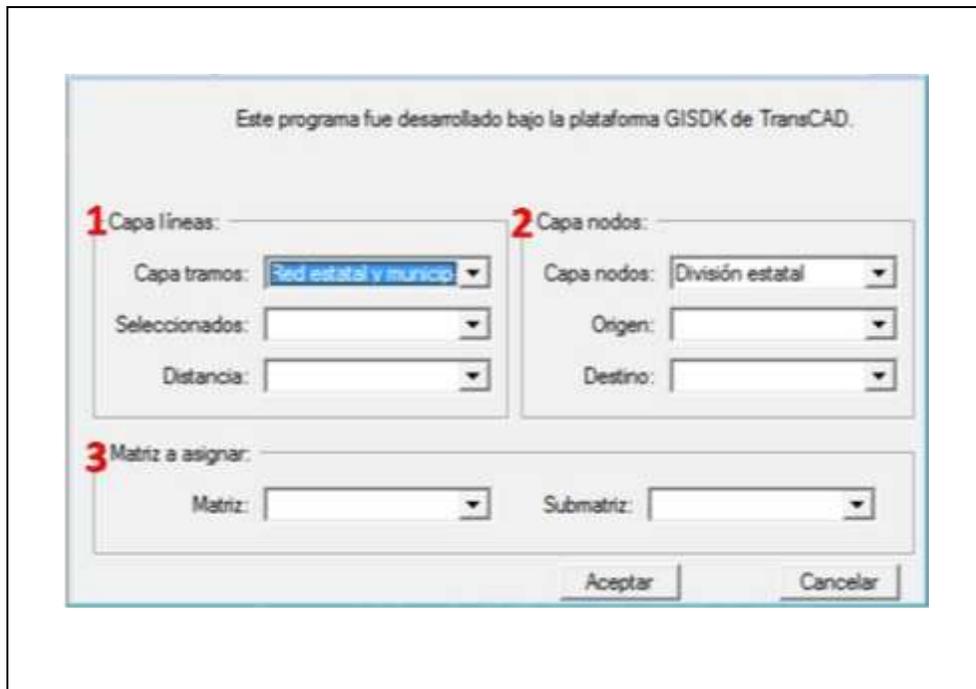


Figura 2.3 Interfaz de la macro para calcular el criterio AC_a

Fuente: Elaboración propia

2.2 Criterio 2: afectación en la accesibilidad

La accesibilidad ha sido definida como la facilidad con que podemos llegar a un sitio desde otras localidades o puntos de interés. Desde un enfoque espacial, la accesibilidad está determinada por la ubicación geográfica en relación con las localidades (centroides) elegidas y por los servicios de transporte disponibles para llegar a esos destinos.

Los autores Lleras-Echeverri y Sánchez-Silva (2001); Berdica y Eliasson, (2004) así como Taylor y D'Este (2006) propusieron medir los cambios en accesibilidad bajo un enfoque de vulnerabilidad de redes; es decir, tratar de determinar aquellos tramos que son importantes para la accesibilidad de ciudades importantes o puntos de interés. Específicamente, Michael Taylor y Glen D'Este (2006) definen

que un tramo de una red es crítico si la obstrucción total del tramo provoca una disminución significativa de la accesibilidad de ciertos nodos de la red.

Con base en lo anterior, se propone el criterio 2 (Ecuación 2.3) que medirá la Afectación en la Accesibilidad (AA_a) a los nodos origen-destino de la red, derivada de la obstrucción total de un tramo a . De tal manera que sea posible identificar aquellos tramos que son críticos, es decir, aquellos que en su ausencia provocan una afectación negativa en la accesibilidad de los nodos origen-destino (centroides). Entre mayor sea el valor del criterio AA_a , más importancia tendrá un tramo para salvaguardar la accesibilidad a los centroides y por lo tanto, podrá ser considerado como crítico.

$$AA_a = \left(\frac{A_a}{A_0} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

A_a = suma de los índices de accesibilidad de todos los centroides (nodos) de la red para el escenario en donde sea simulada la obstrucción total del tramo a ;

A_0 = suma de los índices de accesibilidad de todos los centroides (nodos) de la red para el escenario base (en condiciones normales).

$$A_a = \sum_i A_{ia} \quad (2.4)$$

$$A_0 = \sum_i A_{i0} \quad (2.5)$$

Donde:

A_{ia} = es el índice de accesibilidad del nodo i para el escenario en donde sea simulada la obstrucción total del tramo a ;

A_{i0} = es el índice de accesibilidad del nodo i para el escenario base.

$$A_{ia} = \sum_{j \neq i} w_{ij} t_{ij}^{(a)} \quad (2.6)$$

$$A_{i0} = \sum_{j \neq i} w_{ij} t_{ij}^{(0)} \quad (2.7)$$

Donde:

w_{ij} = es la demanda del nodo i al nodo j ;

$t_{ij}^{(0)}$ = es el tiempo de viaje del nodo i y al nodo j , a flujo libre y en ausencia del tramo a ;

$t_{ij}^{(a)}$ = es el tiempo de viaje del nodo i al nodo j , a flujo libre y en el escenario base.

La figura 2.4 muestra el procedimiento general para el cálculo del criterio 2, el que fue programado para obtener la interfaz de la figura 2.5, que permite el cálculo automatizado del criterio en el *software* TransCAD.

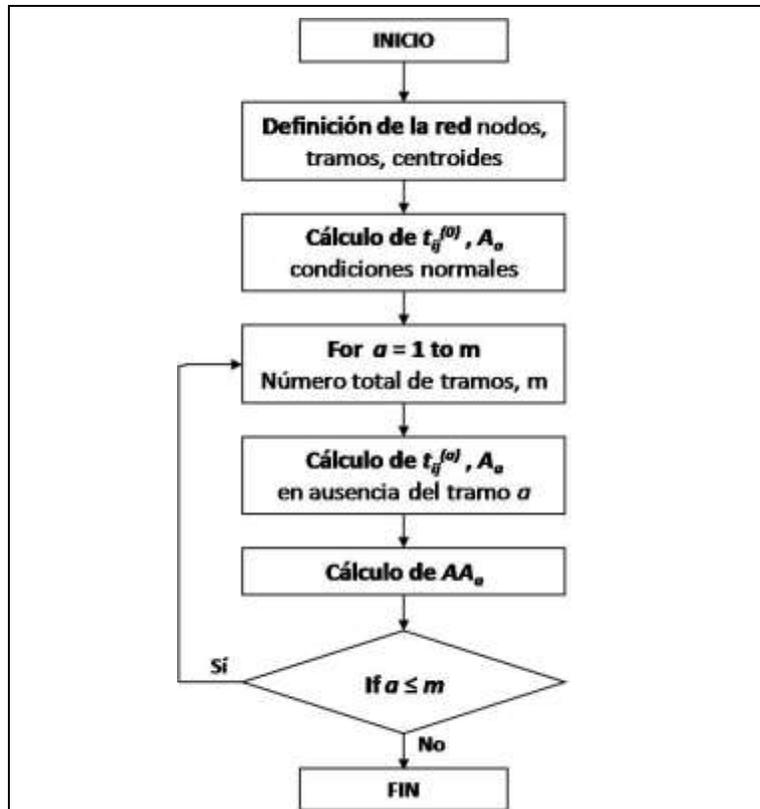


Figura 2.4 Algoritmo para el cálculo del criterio de accesibilidad

Fuente: Basado en Lleras-Echeverri y Sánchez-Silva (2001)

Para correr la macro, en la sección 1 de la interfaz (figura 2.5) se señala cuál es la capa que contiene los tramos de la red carretera, así como los tramos que serán analizados y el campo que contiene el tiempo que tomaría atravesar cada tramo; en la sección 2 se indica la capa que contiene los nodos referenciados geográficamente y que contiene la ubicación de los centroides; es decir, de los

nodos origen-destino de la matriz de viajes; y en la sección 3, se elige la matriz de viajes por utilizar.

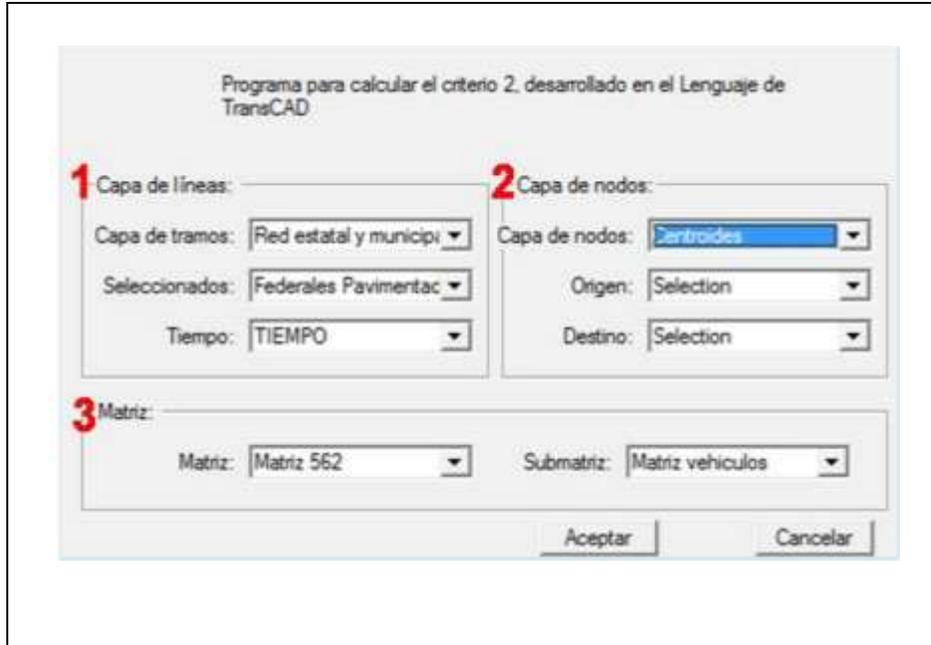


Figura 2.5 Interfaz para calcular el criterio de accesibilidad

Fuente: Elaboración propia

2.3 Criterio 3: afectación en el tiempo de viaje

El criterio de Afectación en el Tiempo de Viaje, AT_a , que será descrito a continuación está basado en el desarrollado por Darren Scott *et al.* (2006). El criterio AT_a es una medida para identificar tramos críticos de una red carretera con un enfoque de sistemas, ya que para calcular su valor para cada tramo son tomadas en cuenta las consecuencias en toda la red de que ese tramo esté obstruido, en términos del tiempo total del sistema; es decir, se obtiene una aproximación del costo que implica tomar otra ruta si un segmento está obstruido, en tiempo de viaje.

Específicamente, el criterio de Afectación en el Tiempo de Viaje determina el incremento que se da en el tiempo de viaje total de la red en ausencia del tramo a ; por lo tanto, el índice permite evaluar la importancia de un tramo carretero en función de su contribución en el grado de afectación al tiempo de viaje total del sistema cuando dicho tramo resulta obstruido por algún motivo y los usuarios deben tomar otra ruta alterna, si existe.

En la formulación de las siguientes ecuaciones, $t_a(x_a)$ representa el tiempo total que los vehículos usan en el tramo a .

$$t_a = t_a(x_a) \quad (2.8)$$

Donde:

t_a = tiempo de viaje de cada tramo a de la red;

x_a = flujo en el tramo a .

El criterio AT_a para cada tramo a puede se obtiene en tres etapas (Scott *et al.*, 2006):

Etapla 1. Se obtiene el tiempo de viaje de todo el sistema tomando en cuenta todos los tramos de la red (caso base), es decir, en condiciones normales; para ello se utiliza la siguiente ecuación.

$$c = \sum_a t_a(x_a) \quad (2.9)$$

Donde:

c = tiempo de viaje de todo el sistema cuando están presentes la totalidad de los tramos.

t_a = tiempo de viaje de cada tramo a de la red.

x_a = flujo en el tramo a .

Etapla 2. Se obtiene el tiempo de viaje de todo el sistema, removiendo el tramo a (es decir, sin tomar en cuenta el tramo a); el tiempo de viaje está representado por c_a y debe ser calculado con la ecuación 2.10.

$$c_a = \sum_a t_a(x_a) \delta_a \quad (2.10)$$

Donde:

c_a = tiempo de viaje de todo el sistema cuando está inhabilitado el tramo a .

t_a = tiempo de viaje de cada tramo a de la red.

x_a = flujo en el tramo a .

$$\delta_a = \begin{cases} 1 & \text{si el tramo } a \text{ no es el removido} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Etapa 3. Se calcula el incremento en el tiempo de viaje de todo el sistema, causado por la ausencia del tramo a .

$$q_a = c_a - c \quad (2.11)$$

Donde:

c = tiempo de viaje de todo el sistema cuando están presentes la totalidad de los tramos.

c_a = tiempo de viaje de todo el sistema cuando está inhabilitado el tramo a .

q_a = incremento en el tiempo de viaje de todo el sistema en que se incurre cuando se remueve el tramo a .

Y finalmente, el valor del criterio AT_a es calculado de la siguiente forma.

$$AT_a = \frac{c_a}{c} \quad (2.12)$$

Donde:

c = tiempo de viaje de todo el sistema cuando están presentes la totalidad de los tramos.

c_a = tiempo de viaje de todo el sistema cuando está inhabilitado el tramo a .

Es importante aplicar el criterio de Afectación en el Tiempo de Viaje (AT_a) en redes de carreteras que cuenten con información confiable y a través de un proceso automatizado. El modelo de asignación de equilibrio del usuario propuesto por John Wardrop (1952), es ideal para ser aplicado en esta metodología, por dos razones; primero, en el equilibrio, ningún usuario de la red puede mejorar su tiempo de viaje cambiando de ruta; es decir, se toma en cuenta el nivel de flujo en los tramos y el grado de congestión de los mismos. Esta condición es más realista que suponer que los usuarios utilizan únicamente las rutas con el tiempo mínimo de la red (Scott *et al.*, 2006).

Un segundo argumento que soporta el modelo de asignación de equilibrio del usuario consiste en su habilidad para reflejar el hecho de que los usuarios de la red que no utilizan el tramo removido pueden verse obligados a tomar otra ruta, como consecuencia de que otros usuarios que sí utilizan el tramo removido tuvieron que cambiar de ruta y con ello aumentaron el flujo en otros tramos. En otras palabras ambos -usuarios y no usuarios de los tramos removidos- pueden verse afectados. El hecho de que los usuarios cambien de ruta tendrá efectos al alza en el tiempo de viaje en otros tramos.

El criterio de Afectación en el Tiempo de Viaje (AT_a), de la Ecuación 2.12, se calcula en el *software* TransCAD. El *software* incluye el modelo de asignación bajo la condición de equilibrio del usuario, pero para este caso se requirió diseñar una *macro*⁴ utilizando el lenguaje propio de programación de TransCAD®, *Caliper Script*, para calcular las ecuaciones (2.9, 2.10 y 2.11) y finalmente el criterio AT_a (Ecuación 2.12) para cada tramo de la red.

Para la utilización de la *macro* que permite el cálculo del criterio AT_a se requiere contar con una red de carreteras georreferenciada con información sobre la velocidad, longitud y capacidad de cada tramo; también, que estén establecidos los centroides de la red así como la estimación de una matriz de viajes Origen-Destino de dichos centroides.

La *macro* en TransCAD® primero calcula el flujo y el tiempo de viaje para condiciones normales (sin ningún tramo obstruido), que son los valores de entrada para la ecuación 2.9, utilizando el modelo de asignación de equilibrio del usuario. Posteriormente, el programa deshabilita en forma secuencial cada tramo de la red. Después de deshabilitar un tramo, el programa utiliza el modelo de asignación de equilibrio del usuario para reasignar el tráfico en la red; de esta manera obtiene los valores de entrada para la ecuación 2.10. Finalmente, el criterio AT_a de la ecuación 2.12 se calcula para cada tramo. En total, el programa corre el modelo de asignación de equilibrio del usuario tantas veces como tramos se quieran deshabilitar y una más para el caso base. La figura 2.6 muestra el algoritmo requerido para obtener el criterio AT_a y que fue la base para escribir el programa que permitiera automatizar los cálculos.

En la figura 2.7 se muestra la interfaz de la *macro* para el usuario. La sección 1 de la interfaz define la metodología por usar, en esta versión solamente está disponible el criterio de Afectación en el Tiempo de Viaje; posteriormente define la forma de los cálculos; es decir, se tiene la opción de calcularlo en forma “Automática” para todos los tramos de la red, o en forma “Manual” si se desea obtenerlo para sólo algunos tramos de la red. En la sección 2 aparece definida la Matriz o Submatriz Origen-Destino que se va a utilizar, también se especifica la Equivalencia de Vehículos de Pasajeros (PCE, por sus siglas en inglés: *Passenger Car Equivalent*) para definir la equivalencia, en términos de automóviles, de los camiones de carga y de pasajeros. En este caso, por tomarse en cuenta sólo los vehículos de carga se considera un PCE con valor de 1.8 (Highway Capacity Manual, 2000; Webster y Elefteriadou, 1999). Finalmente, se asigna el valor del tiempo (VOT, por sus siglas en inglés: *Value Of Time*), que en este ejercicio se

⁴ La *macro* fue programada con la ayuda de Ricardo Montoya Zamora.

toma como unitario para no ser tomado en cuenta, ya que por falta de información no es factible integrarlo al modelo⁵.

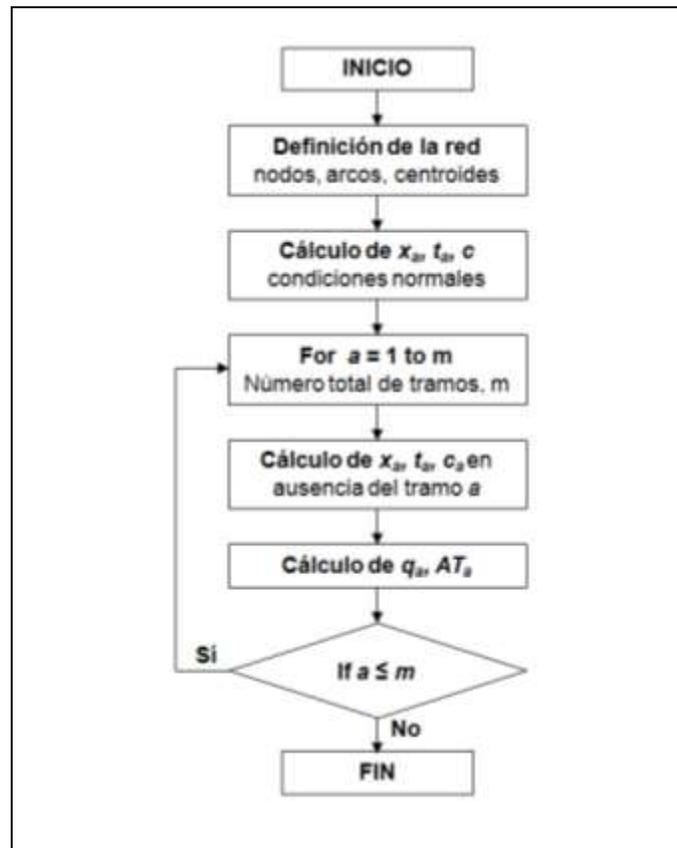


Figura 2.6 Algoritmo para el cálculo de AT_a

Fuente: Basado en Scott *et al.* (2006)

⁵ A nivel mundial, se han desarrollado innumerables proyectos que proponen modelos para estimar el valor del tiempo en el transporte de carga y pasajeros (Jara-Díaz *et al.*, 2008; Jenelius *et al.* 2011; Tseng y Verhoef, 2008); pero en México, aún es incipiente el desarrollo de dichos proyectos y sólo se puede mencionar el trabajo de Guillermo Torres y Salvador Hernández (2008), en donde se propone una metodología para estimar el valor del tiempo en el transporte de pasajeros.

The screenshot shows a software interface with the following sections:

- 1 Metodología a usar:** Radio buttons for "Criterio Afectación en el Tiempo" (selected) and "Escenarios de falla".
- Calculos de forma:** Radio buttons for "Automática" and "Manual" (selected).
- Aceptar** and **Cancelar** buttons.
- 2 Datos de la clase:**
 - Matriz:
 - Submatriz:
 - PCE:
 - VOT:
- 3 Datos de la red:**
 - Arcos:
 - Excluir:
- 4 Parametros de la función de demora:**
 - Tiempo:
 - Capacidad:
 - Alfa:
 - Iteraciones:
 - Convergencia:
 - Beta:

Figura 2.7 Interfaz de la *macro* para calcular el criterio AT_a

Fuente: Elaboración propia

En la sección 3 de la interfaz, se especifica la capa que contiene los tramos para posteriormente seleccionar aquel grupo de segmentos para los cuales se desea calcular el criterio AT_a . En la sección 4, hay que especificar el número de *iteraciones* del modelo de asignación, que es de veinte; debido a las recomendaciones del *software* TransCAD así como el valor de *convergencia* de 0.01 que representa el cambio absoluto de todos los flujos de los tramos, entre cada iteración consecutiva. Posteriormente, se indica el campo que contiene el valor del *tiempo* en flujo libre para transitar el tramo; el que debe estar previamente calculado en la tabla de datos adjunta a la red, así como el campo que contiene la *capacidad*.

Finalmente, se definen los parámetros Alfa y Beta de la función de impedancia (Ecuación 2.13), cuyos valores recomendados por el BPR (*Bureau of Public Roads*) son de 0.15 y 4, respectivamente, para carreteras de uno a cuatro carriles por sentido y con una velocidad promedio de 91 km/h.

$$t = t_f \left[1 + \alpha \left(\frac{v}{c} \right)^\beta \right] \quad (2.13)$$

Donde:

t = tiempo de viaje sobre el tramo congestionado;

t_f = tiempo de viaje a flujo libre en el tramo;

v = volumen en el tramo;

c = capacidad del tramo;

α = parámetro de calibración relacionado con el volumen;

β := parámetro de calibración relacionado con la demora.

Cabe señalar además que la ecuación 2.13 es la más utilizada en América y está disponible en el *software* TransCAD; pero existen otras funciones, como la desarrollada por el Departamento de Transporte del Reino Unido, que describe Juan de Dios Ortúzar (1994).

En el reporte realizado por William Martin y Nancy McGuckin (1998) aparecen algunos valores para los parámetros Alfa y Beta que fueron el resultado de estudios realizados en Estados Unidos de Norteamérica. Sin embargo, en México no existen ese tipo de estudios en campo para estimar dichos parámetros. Por tal motivo, se recomienda que cuando se disponga de los valores Alfa y Beta para el caso de México, sean utilizados para mejorar la estimación del tiempo de viaje en la función de impedancia.

2.4 Normalización de los valores para cada criterio

A partir de la ecuación 2.1 y sustituyendo las variables para cada criterio tendríamos lo siguiente:

$$I_a = (AC_a) + (AA_a) + (AT_a) \quad (2.14)$$

Es necesario normalizar los valores AC_a , AA_a y AT_a de la Ecuación 2.14, de tal manera que tengan una escala de 0 a 1 y puedan ser sumados. Para lo anterior, se utilizó uno de los procedimientos mencionados por Sergio Barba-Romero (1987) para dar solución a problemas de escala; es decir, que tengan valores entre 0 y 1 (ver Ecuación 2.15).

Partiendo del vector original $V = (V_1, \dots, V_i, \dots, V_m)^T$ se obtiene el vector normalizado $v = (v_1, \dots, v_i, \dots, v_m)^T$; que supone $V_i \geq 0$, para toda i .

$$v_i = \frac{V_i - \text{mín } V_i}{\text{máx } V_i - \text{mín } V_i} \quad (2.15)$$

Una vez realizada la normalización como vemos en la ecuación 2.16, se obtuvo el Índice de Importancia normalizado (In_a) de la ecuación 2.17.

$$In_a = \left(\frac{AC_a - \text{mín } AC}{\text{máx } AC - \text{mín } AC} \right) + \left(\frac{AA_a - \text{mín } AA}{\text{máx } AA - \text{mín } AA} \right) + \left(\frac{AT_a - \text{mín } AT}{\text{máx } AT - \text{mín } AT} \right) \quad (2.16)$$

$$In_a = (ACn_a) + (AAn_a) + (ATn_a) \quad (2.17)$$

Donde:

In_a = índice de importancia normalizado,

ACn_a = valor normalizado del criterio 1,

AAn_a = valor normalizado del criterio 2,

ATn_a = valor normalizado del criterio 3.

2.5 Caso de aplicación de la metodología a la Red Federal de Carreteras

La metodología descrita en las secciones anteriores fue aplicada a la Red Federal de Carreteras pavimentadas de México. En la Figura 2.8 se muestra la información referenciada geográficamente de las carreteras utilizadas, que corresponden al Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte (INIT) 2007⁶; cabe señalar que dichas carreteras en versión digital no estaban totalmente conectadas porque fueron editadas en el software ArcGIS 9.2 y la unión entre los tramos no es reconocida en otro software como TransCAD, ya que dicha unión es virtual.

Debido a que se requería utilizar la red en TransCAD, fue necesario identificar aquellos tramos que no estaban conectados y proceder a conectarlos

⁶ Realizado por la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial (USIG) del Instituto Mexicano del Transporte, en coordinación con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

manualmente en la plataforma de TransCAD, para que hubiera continuidad en la red digital; se revisaron los 21 mil tramos carreteros, de tal forma que se obtuviera una red confiable para la aplicación de la metodología propuesta.

Las figuras 2.9, 2.10 y 2.11 muestran diferentes acercamientos, en donde se indica con puntos rojos aquellos lugares en donde no había continuidad entre los tramos. Cuando se realizó el procedimiento de edición, fueron identificadas las intersecciones a desnivel; es decir, aquellos tramos que no tienen ninguna conectividad (porque no están conectados por gazas de acceso), para que no fueran alteradas. Para lo anterior se utilizó la capa de puntos de los pasos a desnivel del INIT 2007, así como las fotos satelitales de Google Earth.

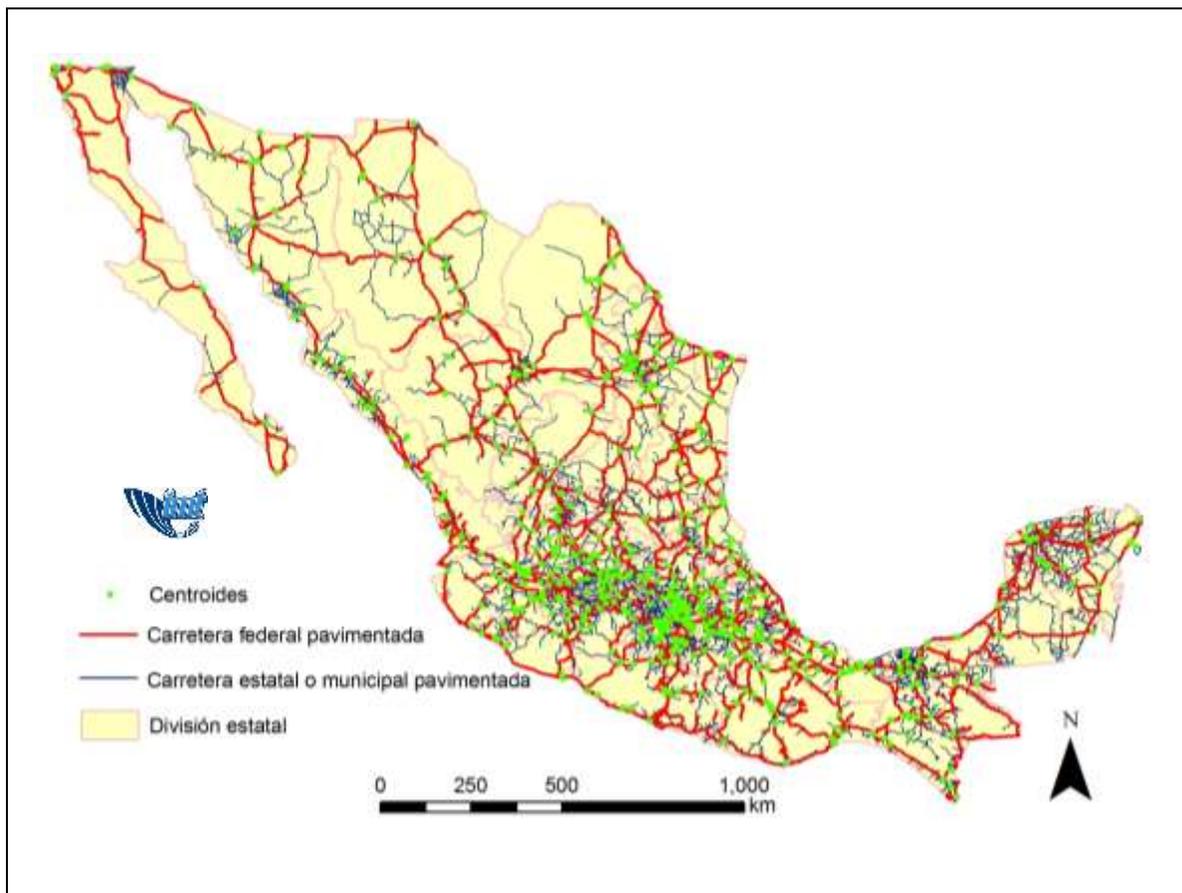


Figura 2.8 Información referenciada geográficamente utilizada para la aplicación de la metodología.

Fuente: elaboración propia.

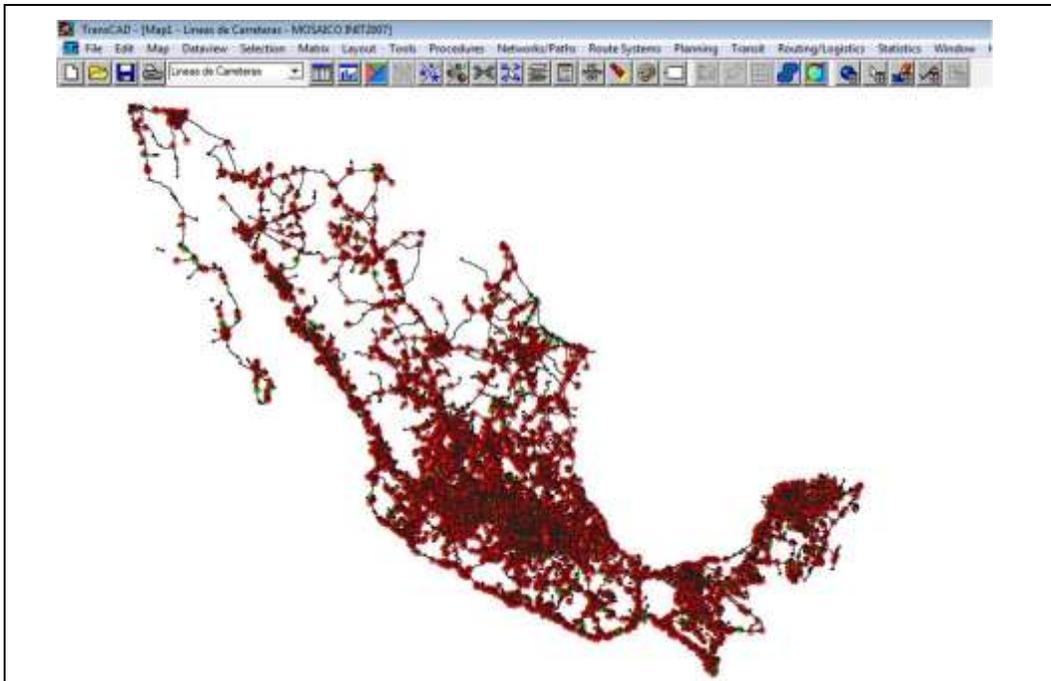


Figura 2.9 Identificación en color rojo de la falta de continuidad entre los tramos digitales del INIT 2007, vista nacional.

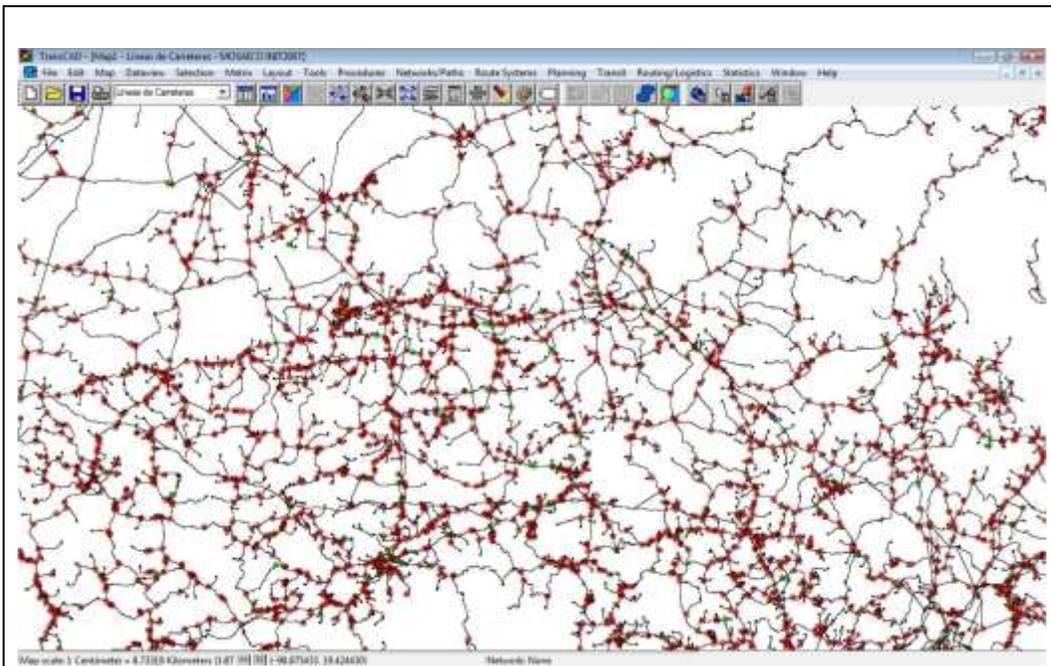


Figura 2.10 Identificación en color rojo de la falta de continuidad entre los tramos digitales del INIT 2007, vista regional.

Fuente: elaboración propia

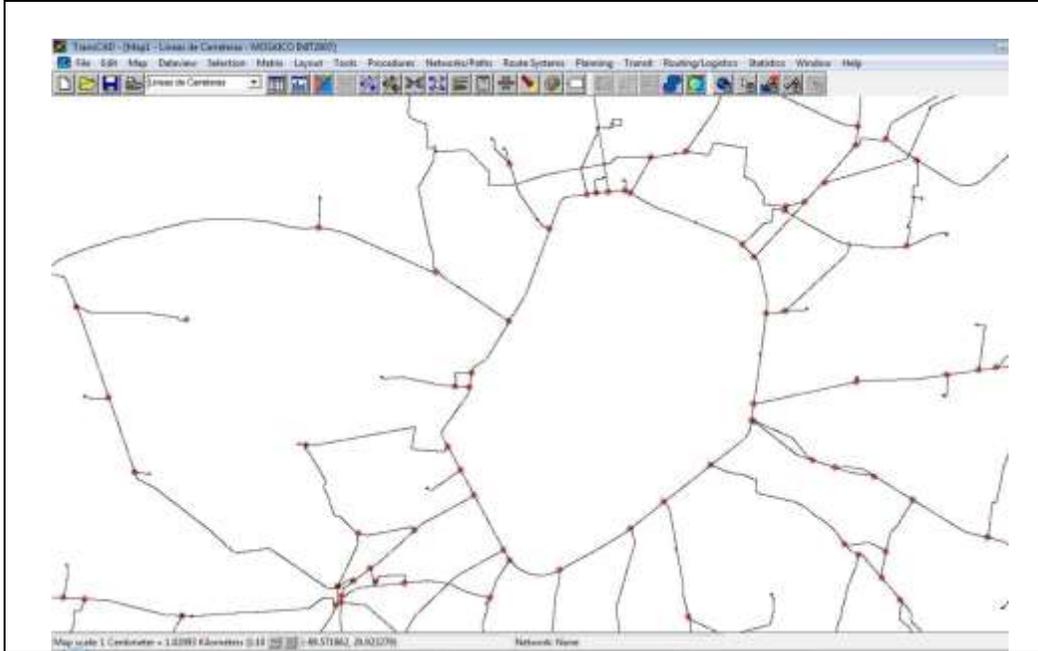
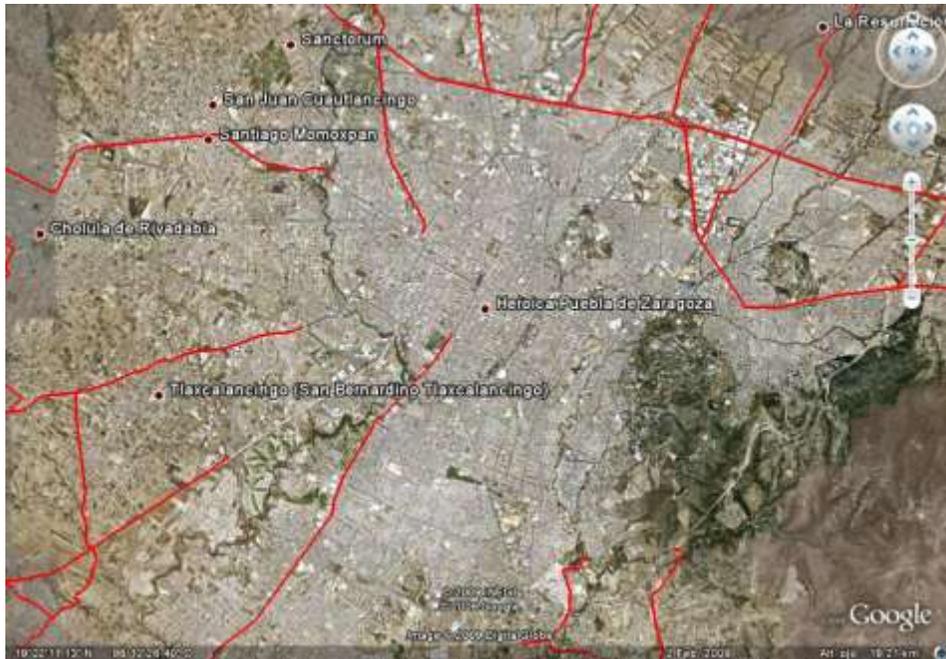


Figura 2.11 Identificación en color rojo de la falta de continuidad entre los tramos digitales del INIT 2007, vista en la ciudad de Mérida, Yucatán.

Fuente: elaboración propia

Aunado a lo anterior, se editaron los pasos por localidades, debido a que muchos de los tramos carreteros carecían de continuidad, al pasar por zonas urbanas; para ello se utilizaron las imágenes de Google Earth y las manzanas referenciadas geográficamente de INEGI. Para realizar el procedimiento, el formato *shape* (*.shp) que utiliza el software ArcGIS 9.2 fue transformado a la extensión *.kml empleada en Google Earth, de tal forma que la red de carreteras pudiera sobreponerse a las imágenes satelitales de Google Earth. En las figuras 2.12 y 2.13 muestran dos ejemplos de los resultados obtenidos al realizar la edición en las localidades.

Posteriormente, se estimó la velocidad promedio a la que se puede transitar por cada tramo y su capacidad, a partir de las especificaciones de la SCT para cada tipo de carretera, así como información del *Highway Capacity Manual* (2000). Finalmente, se determinó la longitud de cada tramo con el uso de ArcGIS y fueron incluidos dichos valores en la base de datos de las carreteras.



a) Carreteras discontinuas en zona urbana



b) Carreteras con continuidad después de la edición

Figura 2.12 Ejemplo de edición de la red en zonas urbanas, utilizando las imágenes de Google Earth

Fuente: elaboración propia

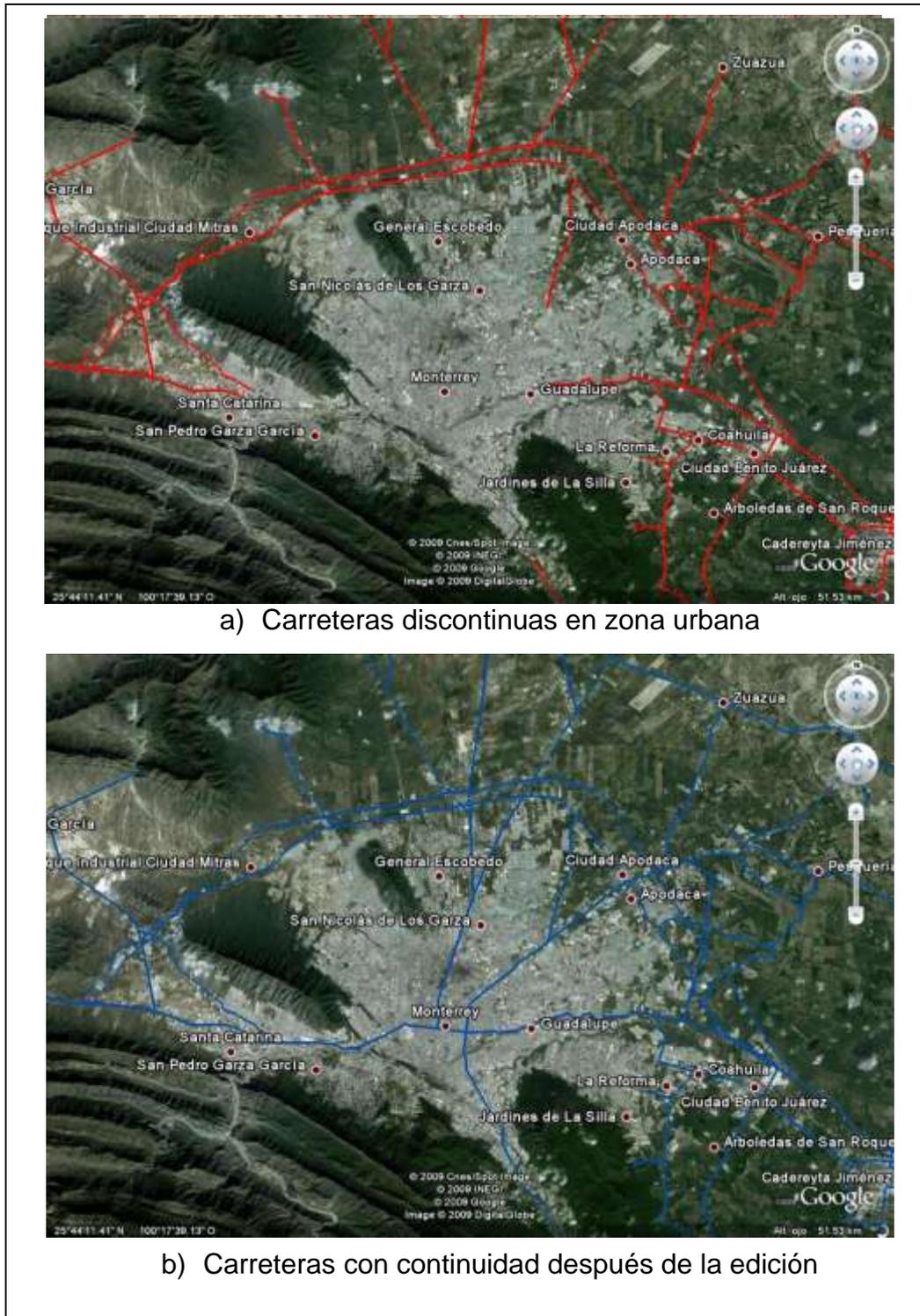


Figura 2.13 Ejemplo de edición de la red en la zona urbana de Monterrey, utilizando imágenes de Google Earth

Fuente: elaboración propia

Una vez que se finalizaron los procedimientos antes descritos para la edición de la red de carreteras, se procedió a relacionar los centroides que iban a ser utilizados para el caso de aplicación, estos corresponden a los 564 centroides de la Matriz de Viajes Origen-Destino para el autotransporte de carga desarrollada en el Instituto Mexicano del Transporte, por Juan Trejo, Jorge Deantes y Alberto Mendoza (1999) y actualizada por Agustín Centeno y Alberto Mendoza (2003).

Cada centroide de la matriz se encuentra ubicado en una localidad, por lo que no necesariamente está localizado sobre un tramo carretero. Se tenía la opción de construir conectores para los centroides, es decir, tramos que los conectaran con la red de carreteras; pero se decidió relacionar los centroides con los nodos más cercanos de la red; para ello fue programado en el software TransCAD una *macro* que ubicara el nodo de la red que estuviera más cercano a cada centroide y le adjudicara el número de este, en la Figura 2.14 se muestra un ejemplo.

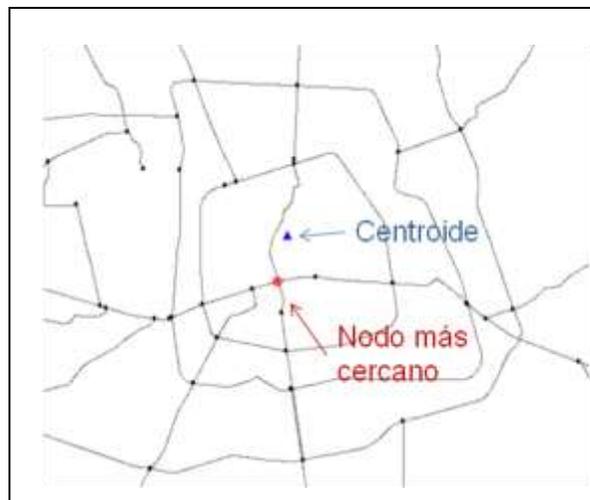


Figura 2.14 Ejemplo de ubicación de centroides

Fuente: elaboración propia

La figura 2.15 muestra el resultado obtenido; es decir, la red de carreteras completamente conectada, que contiene los centroides ubicados espacialmente y relacionados con sus nodos.

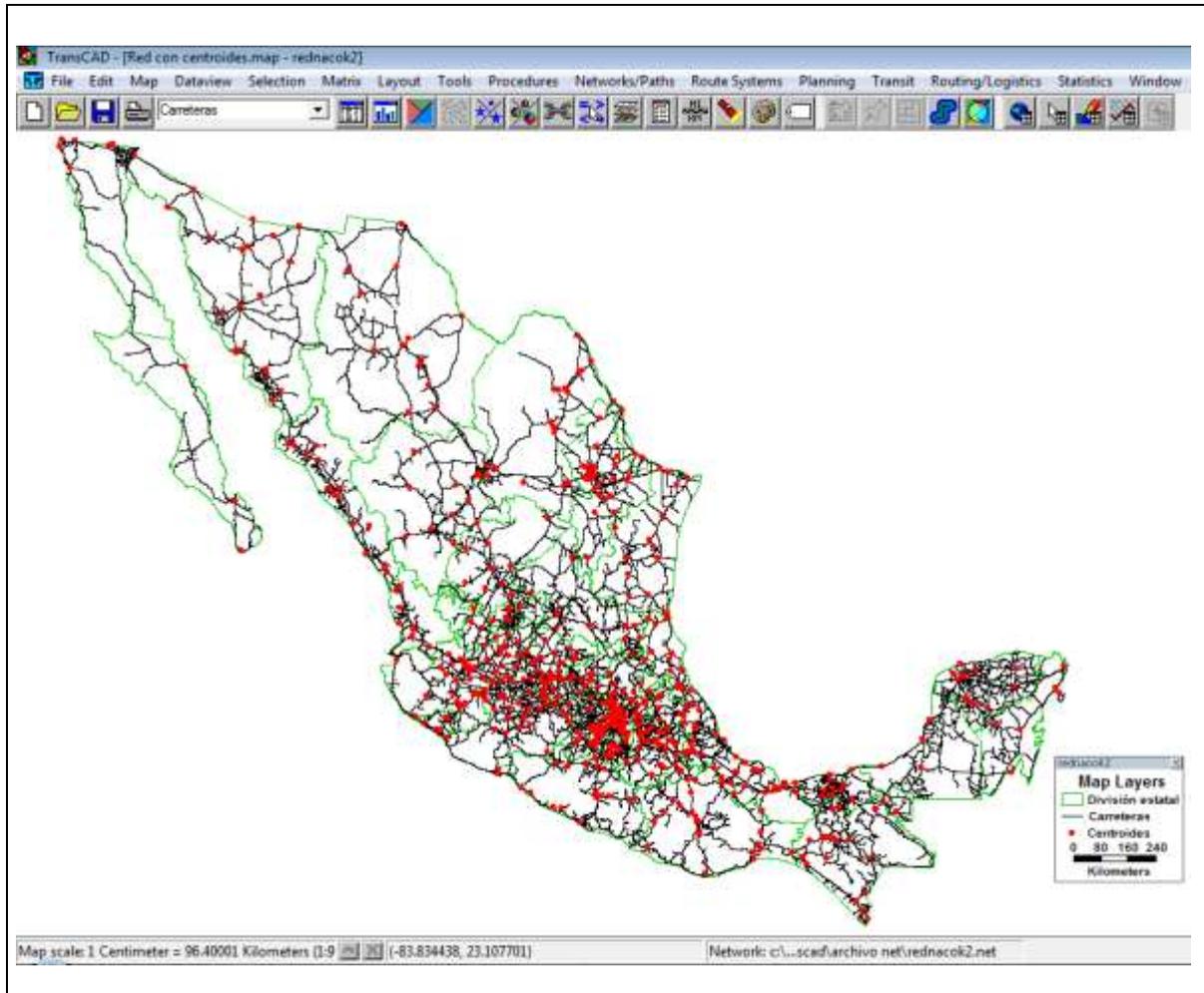


Figura 2.15 Centroides ubicados geográficamente y ligados a la red de carreteras.

Fuente: elaboración propia

En el capítulo siguiente, se muestran los resultados obtenidos en el caso de aplicación, donde se simuló la obstrucción de cada uno de los tramos federales y se calculó la afectación en la conectividad (criterio 1), en la accesibilidad (criterio 2) y en el tiempo de viaje (criterio 3); tomando en cuenta la red total de carreteras pavimentadas en México, que incluye las de administración estatal y municipal.

3 Resultados de la aplicación de la metodología

En las siguientes secciones se presentan los resultados y análisis del caso de aplicación de la metodología propuesta a la Red Federal de Carreteras.

3.1 Resultados de la aplicación del criterio 1: afectación en la conectividad

Se aplicó la metodología del criterio AC_a a la Red Federal de Carreteras⁷ pavimentadas de México; el procedimiento consistió en determinar las rutas óptimas, es decir, las de menor distancia entre todos los pares origen-destino y finalmente calcular el valor del criterio AC_a para cada tramo federal de la red. Para lo anterior, se utilizaron los nodos origen-destino especificados en la Matriz de Viajes para el autotransporte de carga desarrollada en el Instituto Mexicano del Transporte por Juan Trejo, Jorge Deantes y Alberto Mendoza (1999) y actualizada en Agustín Centeno y Alberto Mendoza (2003).

En la tabla 3.1 se muestra a manera de ejemplo algunos de los tramos carreteros que obtuvieron los valores más altos del criterio AC_a , es decir, aquellos tramos que si quedaran obstruidos afectarían un mayor porcentaje de rutas óptimas de la red. Los tramos con los valores más altos de AC_a obtienen mayores jerarquías de importancia, como es el caso de los ubicados en la autopista México-Querétaro; en donde pasa alrededor del 20% de las rutas óptimas que conectan los diferentes nodos origen-destino de la red de carreteras.

En la figura 3.1 podemos observar los resultados obtenidos, en donde los tramos federales son clasificados de acuerdo con el valor del criterio AC_a . Los tramos con el mayor valor del criterio AC_a están ubicados radialmente desde el centro del país a los diferentes puntos importantes de la periferia, dichos tramos se considerarían críticos y podrían obtener una jerarquía de importancia como la ejemplificada en la tabla 3.1.

⁷ Red referenciada geográficamente por la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial del Instituto Mexicano del Transporte, en coordinación con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Tabla 3.1 Ejemplo de jerarquización de los tramos críticos obtenidos bajo el criterio 1 (AC_a)

Tramo a	JERARQUIA	NOMBRE DE LA CARRETERA	ESTADO	AC_a
15043	1	Autopista México-Querétaro, 57	Querétaro	0.232
16583	2	Autopista México-Querétaro, 57	Estado de México	0.230
13387	3	Autopista México-Querétaro, 57	Estado de México	0.226
15021	4	Autopista México-Querétaro, 57	Querétaro	0.225
15094	5	Autopista México-Querétaro, 57	Estado de México	0.224
14983	6	Autopista México-Querétaro, 57	Querétaro	0.223
26627	7	Autopista México-Querétaro, 57	Querétaro	0.221

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.2 podemos observar que la mayoría de los tramos críticos son parte de los corredores troncales establecidos por la SCT, lo que refleja una fuerte dependencia en dichos corredores para salvaguardar la conectividad de la red. Este criterio de conectividad está directamente relacionado con las características de distancia e interconexión de la red, por lo que la simple ubicación de los tramos determinó si son críticos o no. Otros elementos como la capacidad de los tramos, el tiempo de viaje y los flujos vehiculares serán tomados en cuenta por los dos criterios restantes del modelo propuesto (Ecuación 2.1).

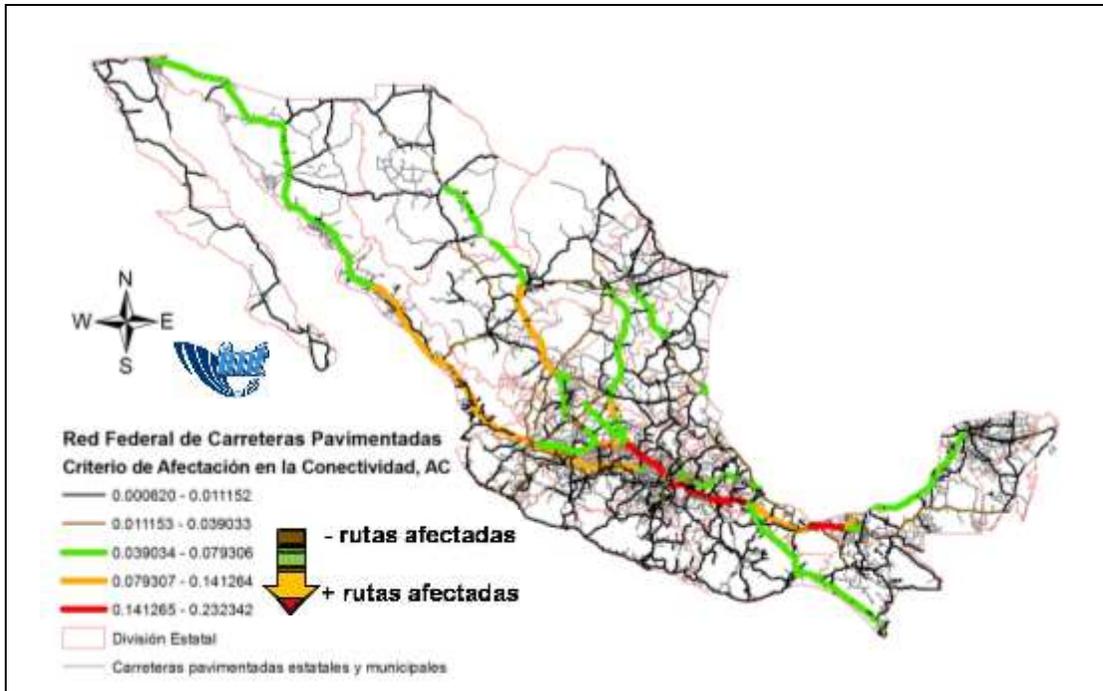


Figura 3.1 Resultados de la aplicación del criterio de conectividad

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.2 Tramos críticos del criterio 1 que forman parte de los corredores carreteros establecidos por la SCT

Fuente: Elaboración propia

3.2 Resultados de la aplicación del criterio 2: afectación en la accesibilidad

Se aplicó la metodología del criterio de Afectación en Accesibilidad AA_a a la Red Federal de Carreteras⁸ pavimentadas de México y se tomó en cuenta los nodos origen-destino empleados en el criterio 1. Se calculó el nivel de afectación a la accesibilidad de los nodos origen-destino de la red, de tal manera que se pudieran identificar aquellos tramos críticos; es decir, los que afectan en mayor medida a dicha accesibilidad cuando quedan obstruidos. Un ejemplo de los tramos críticos es presentada en el tabla 3.2, en donde también aparece la jerarquía que obtienen de acuerdo con el valor de AA_a .

Tabla 3.2 Ejemplo de jerarquización de los tramos críticos obtenidos bajo el criterio 2 (AA_a)

Tramo a	JERARQUIA	NOMBRE DE LA CARRETERA	ESTADO	AA_a
1874	1	Tepic – Mazatlán, 15	Sinaloa	1.654
1726	2	Tepic – Mazatlán, 15	Sinaloa	1.531
9545	3	Tepic – Mazatlán, 15	Sinaloa	1.336
100	4	México 15	Sonora	1.287
789	5	México 15	Sonora	1.189
7508	6	Durango – Torreón, 40	Durango	1.129
15960	7	Autopista México-Querétaro, 57	Estado de México	1.069

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.3 muestra los tramos de la red y su clasificación de acuerdo con el valor del criterio AA_a , los tramos críticos están ubicados radialmente desde el centro del país, pero en una forma dispersa; ya que no sólo se tomó en cuenta el tiempo de viaje a flujo libre para calcular los índices de accesibilidad sino también la demanda entre cada par origen-destino. Los tramos más críticos resultaron ser aquellos que se encuentran en la franja del Pacífico, en Nayarit, Sonora y Sinaloa; ya que dichos tramos son cruciales para el transporte de carga desde el centro del país y Guadalajara hacia la frontera norte.

⁸ Red referenciada geográficamente por la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial del Instituto Mexicano del Transporte, en coordinación con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

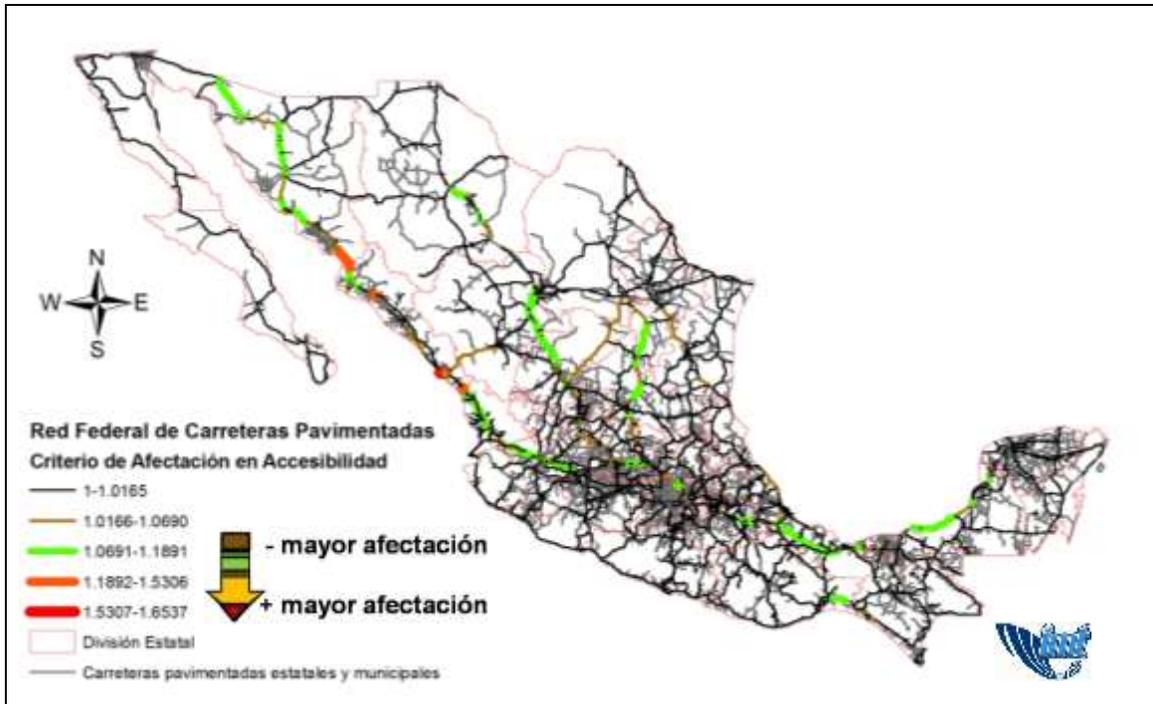


Figura 3.3 Resultados de la aplicación del criterio de accesibilidad.

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.4 Tramos críticos y corredores establecidos por la SCT.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.4 vemos que la mayoría de los tramos críticos son parte de los corredores establecidos por la SCT.

3.3 Resultados de la aplicación del criterio 3: afectación en el tiempo de viaje

En la figura 3.5 se representa gráficamente los valores estimados del criterio AT_a para cada tramo federal pavimentado, los valores más altos del criterio corresponden a los tramos críticos; es decir, aquellos que al ser obstruidos afectan en mayor medida el funcionamiento de toda la red. Los tramos críticos siguen un patrón que divide a la red nacional en cinco posibles secciones, tal como se indica con las bandas trazadas en la misma Figura 3.5; dichas bandas resultan de la unión virtual de varios tramos críticos que por su posición en la red tienden a provocar mayores desviaciones en las rutas de los usuarios, ya que en dichas zonas se carece de tramos cercanos redundantes y de circuitos que ofrezcan rutas alternas con poca variación en el tiempo de viaje.

Es notorio cómo la topología de la red influye de manera determinante en la configuración de la vulnerabilidad. Evidentemente, la topología actual de la red responde tanto a las características topográficas del territorio mexicano como a la construcción histórica de las sendas del comercio para la conformación de los mercados entre otras razones históricas que explican la configuración de la red actual (González, 1990). El centro del País- definido aquí de manera amplia como el altiplano, sus regiones costeras, el sur y el norte próximos- muestra una configuración de red densa, producto de décadas de construcción de carreteras redundantes, en correspondencia a la mayor densidad poblacional y económica en los diferentes períodos de la historia de México.

La amplia y densa red central muestra tramos limítrofes vulnerables al norte, pero no en la frontera misma; sino todavía a cientos de kilómetros antes de la frontera. La ausencia de ligas transversales suficientes y la escasa duplicidad en las conexiones desde el altiplano con los puertos fronterizos del norte provocan que algunos tramos al sur de Monterrey, Saltillo, Torreón, Durango y Mazatlán sean críticos a la vulnerabilidad total de la red.

La otra banda clara de ruptura que separa al centro del resto del país se encuentra en el Istmo de Tehuantepec. Esta banda de ruptura es explicable, también, por características topológicas y, más en específico, por la topografía de la zona que ha permitido sólo la construcción de carreteras cercanas a las costas, con una débil conexión intercostera. Aquí, las conexiones cercanas a los puertos marítimos de Coatzacoalcos-Minatitlán y de Salina Cruz son críticas.

Otras dos bandas de ruptura aparecen claramente en la figura 3.5. Una separa la península de Baja California y Sonora del resto del país. Esto corrobora la percepción generalizada de que esta parte de la nación gravita en torno al surponiente de Estados Unidos. Una muy escasa red nacional, conformada

fundamentalmente por la carretera federal 015 de Guadalajara a Tijuana, con muy escasas conexiones transversales, explica lo crítico de estos tramos. La otra separa, en el otro extremo del país, a la península de Yucatán -en la zona de Isla del Carmen- al poniente de Campeche. De nuevo aquí, la relativa independencia de esta zona del centro económico nacional influyó en que no fueran construidas algunas conexiones redundantes.

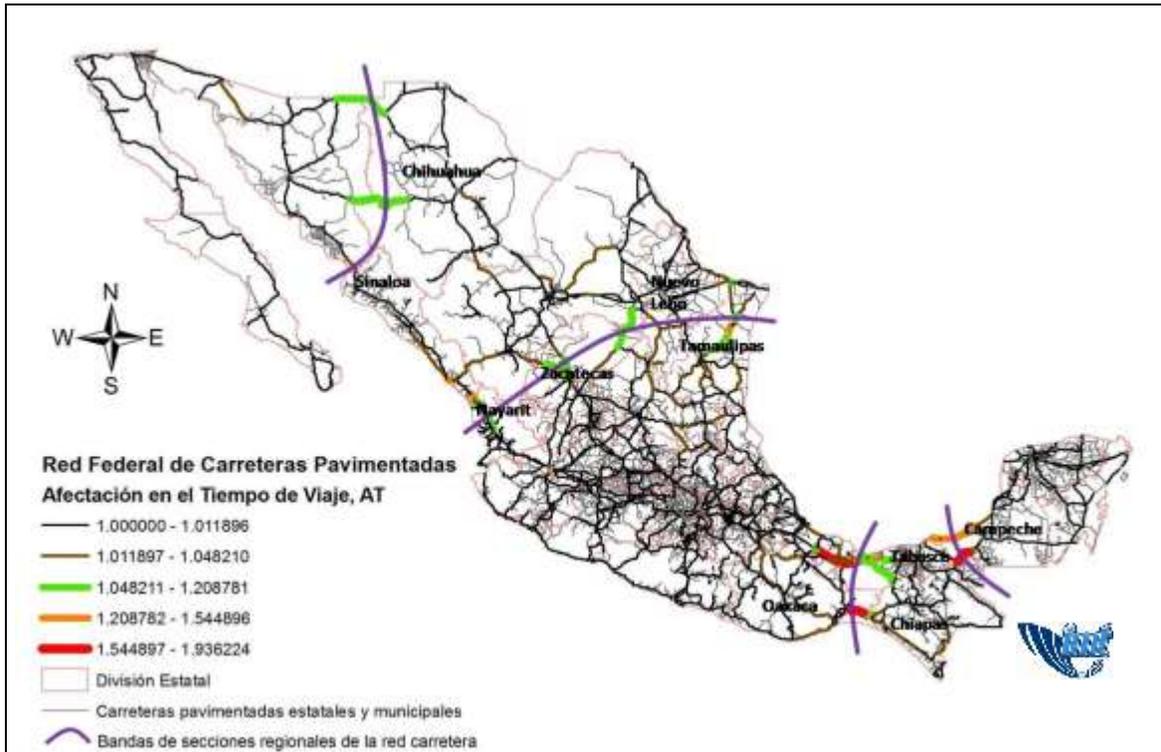


Figura 3.5 Resultados de la aplicación del criterio de la afectación en el tiempo de viaje

Fuente: Elaboración propia

La figura 3.6 muestra que de los catorce tramos críticos que atraviesan las bandas, diez forman parte de los corredores definidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Lo anterior nos indica que la red de carreteras depende para su funcionamiento adecuado, de los tramos troncales críticos que corresponden a los corredores, ubicados en regiones del norte y sur del país. A simple vista podemos observar que la mayor densidad de la red en el centro del país ayuda a que dicha zona sea menos vulnerable a la obstrucción de algún tramo; por otra parte, las zonas estratégicas para mantener conectada la región central con el resto de la red parecen ser aquellas que contiene menos circuitos y que caen en las cuatro bandas. En cambio, los cuatro tramos críticos que están en las bandas, y que no son parte de los corredores, nos indican que no todos los tramos críticos son obvios a simple vista.

Una vez que se tienen los resultados estimados de AT_a para cada tramo, es posible realizar una jerarquización de los tramos de la red, de tal manera que se muestren aquellos que debieran ser prioridad para ponerlos en funcionamiento, en caso de que quedaran obstruidos por algún accidente o desastre natural. En la fase de la prevención, los tramos con mayor jerarquía también deberían ser prioridad para el mantenimiento preventivo. En la fase de planeación, los tramos críticos podrían indicar aquellos lugares en donde sería estratégica la construcción de tramos redundantes. En la tabla 3.3 se presentan algunos de los tramos críticos de la Red Federal de Carreteras con su nivel de jerarquía.

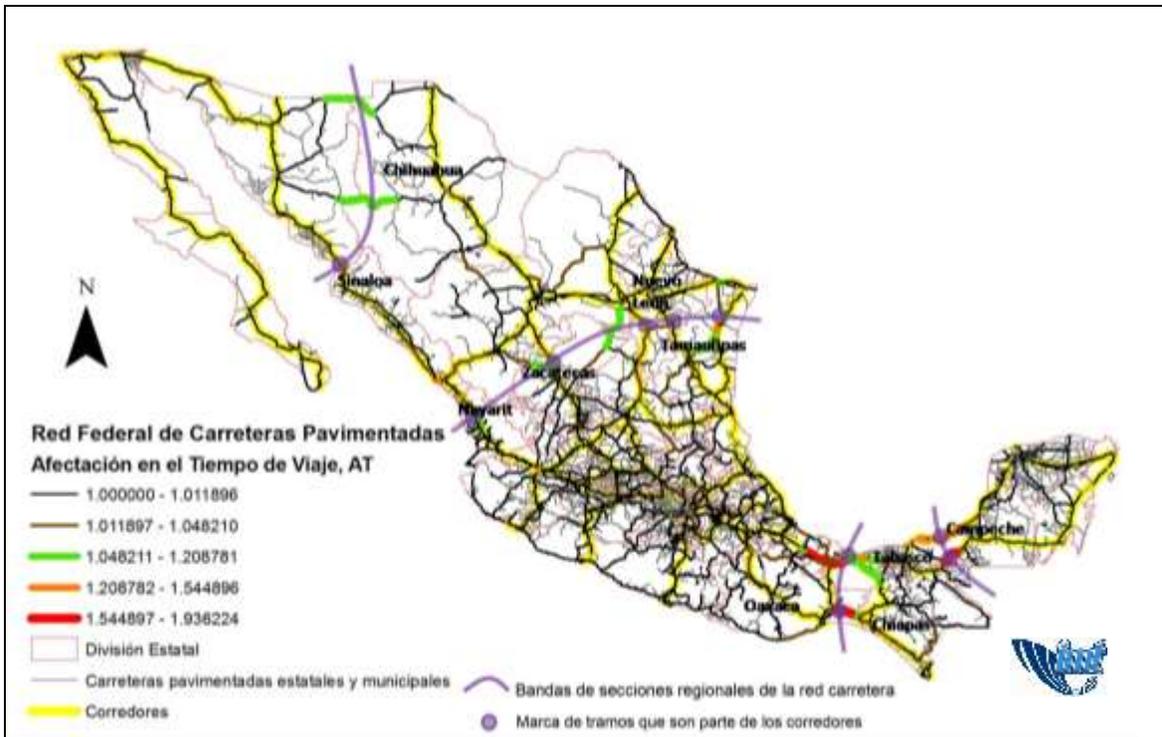


Figura 3.6 Tramos críticos del criterio 3 que forman parte de los corredores carreteros establecidos por la SCT.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados encontrados parecen corroborar la apreciación a simple vista de que la red mexicana de carreteras pavimentadas presenta una parte densa, con gran redundancia, en la zona central y sus inmediaciones costeras, así como su ampliación al norte. Esto corrobora asimismo la interpretación sobre la construcción de carreteras que ha seguido de cerca la instalación fabril desde mediados del siglo pasado y que ha permitido el crecimiento económico del norte mexicano. Discrepa un poco con las diversas interpretaciones sobre la profundización reciente, a raíz de la apertura económica de la década de los ochenta entre el norte y el sur del país, sobre todo los estados de Guerrero y Oaxaca y sólo coincide con esa interpretación la separación clara de Chiapas. Sin embargo, esta afirmación separatista encuentra argumentos contrarios en el

ámbito de las conexiones terrestres en la medida en que la apertura comercial también reforzó los vínculos comerciales a través de los puertos marítimos del Golfo de México y del Océano Pacífico, por lo cual también esos territorios fueron incorporados a una densidad mayor.

Tabla 3.3 Ejemplo de la jerarquía de los tramos federales en función del criterio AT_a

Tramo a	JERARQUIA	NOMBRE DE LA CARRETERA	ESTADO	AT_a
24002	1	Villahermosa – Escárcega, 186	Campeche	1.936
26966	2	México, 140D	Veracruz	1.708
21123	3	México, 140D	Veracruz	1.694
11345	4	La Ventosa – Tapaná	Oaxaca	1.652
21730	5	Coatzacoalcos – Villahermosa, 180	Tabasco	1.544
21754	5	Autopista Agua Dulce–Cárdenas, 180D	Tabasco	1.544
001858	6	Tepic-Mazatlán, 15	Sinaloa	1.476

Fuente: Elaboración propia.

Llama la atención, también, la esperada vulnerabilidad de los tramos que conectan el extremo norteño -cercano a la frontera norte- y, en particular, el extremo norponiente, incluida la Península de Baja California; de la misma manera que se presenta evidente la vulnerabilidad en la conexión con la Península de Yucatán.

Dado que al utilizar el criterio de tiempo de viaje, se está estimando la afectación en toda la red a todos los movimientos de carga, los tramos críticos que coinciden con los principales corredores de transporte de carga se vuelven más críticos.

Finalmente, los resultados de la aplicación de esta metodología son estimaciones que dependen en gran medida de la confiabilidad de la información utilizada, principalmente de la demanda de viajes contenida en la Matriz Origen-Destino utilizada; cuya validez ha sido ya probada en otras investigaciones del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Sin embargo, por los intereses investigativos del IMT, se ha realizado un esfuerzo por estimar y validar las matrices O-D de carga y no ha recibido la misma atención el flujo de automóviles o autobuses. Sería útil aplicar el mismo criterio AT_a empleando una matriz que contuviera los viajes de todo tipo de vehículos, pero debido a que no se cuenta con la estimación de esta en lo nacional, queda a nivel de recomendación para futuras investigaciones.

3.4 Análisis conjunto de los resultados

En la figura 3.7 está sombreado el conjunto de los tramos que se consideran críticos en cada uno los tres enfoques del modelo propuesto; es decir, tienen los valores más altos para cada criterio; y en la figura 3.8 podemos visualizar los 38 tramos que forman dicho conjunto.

Podría considerarse que los tramos identificados en la figura 3.8 son los realmente críticos de la red, pero si quisiéramos jerarquizar el resto de los tramos habría que recurrir a la sumatoria de los valores obtenidos para cada criterio, tal como fue propuesto en el modelo de la Ecuación 2.1. A manera de comparación, en la figura 3.9 se muestran los 38 tramos con el valor más alto del índice de importancia (I_a) para cada tramo, obtenido a partir de la suma de los tres criterios. Podemos observar que dichos tramos no coinciden totalmente con los de la Figura 3.8, ya que los tramos del centro del país obtuvieron una menor jerarquía al considerar su índice de importancia (I_a).



Figura 3.7 Conjunto de tramos que se consideraron críticos en los tres criterios

Fuente: elaboración propia

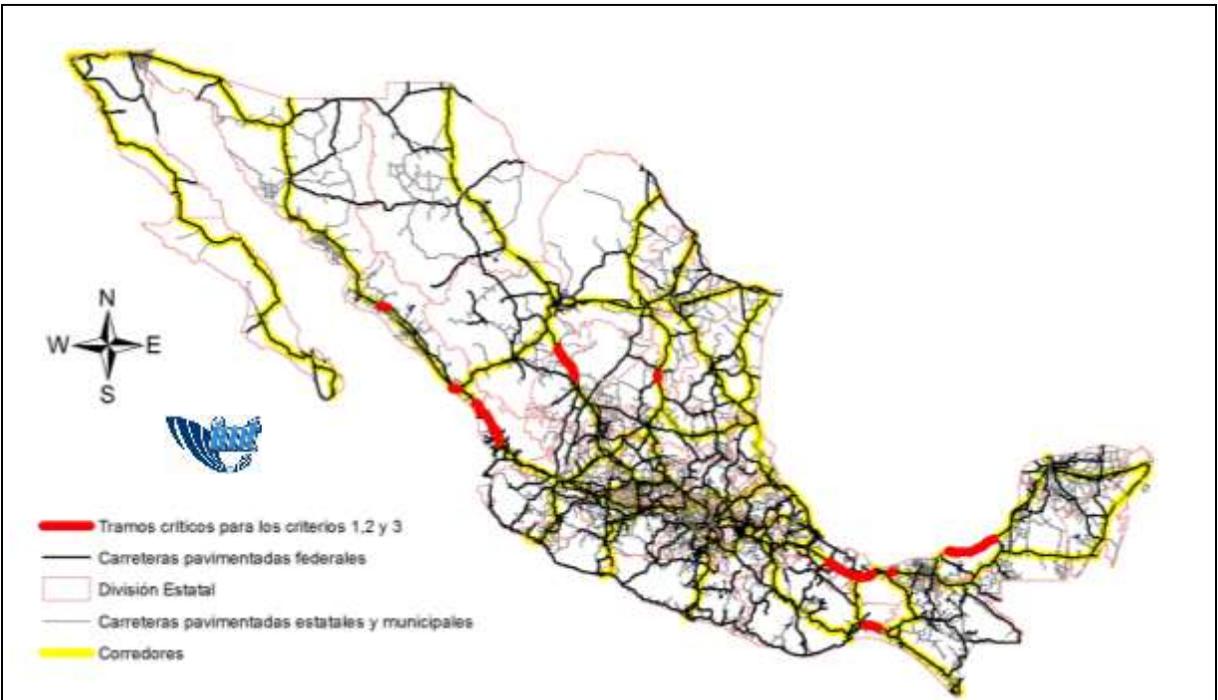


Figura 3.8 Tramos considerados críticos en cada uno de los tres criterios

Fuente: Elaboración propia

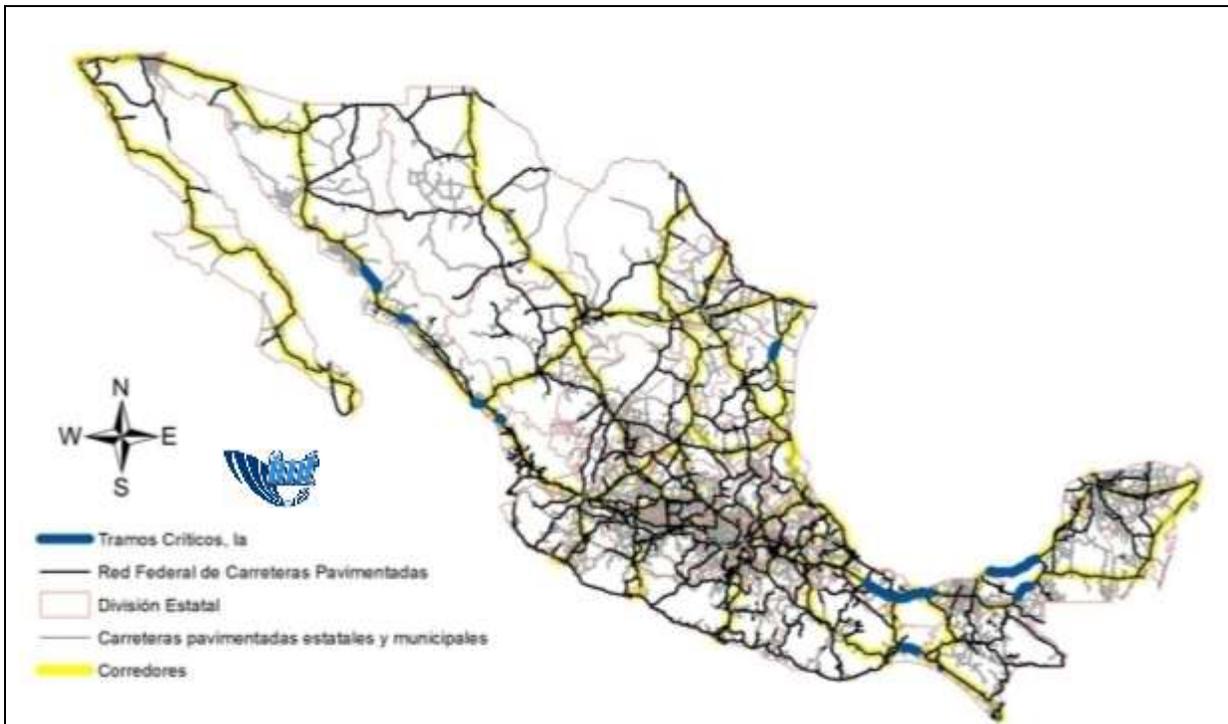


Figura 3.9 Los tramos más críticos de acuerdo con su índice de importancia, I_a

Fuente: Elaboración propia

En la tabla siguiente se muestran algunos de los tramos que obtuvieron el mayor índice de importancia I_a (Ecuación 2.1) y, por lo tanto, la mayor jerarquía.

Tabla 3.4 Ejemplo de la jerarquización de tramos los tramos críticos de acuerdo a su índice de importancia

Tramo a	JERARQUIA	NOMBRE DE LA CARRETERA	ESTADO	AC_a	AA_a	AT_a	I_a
01858	1	Tepic-Mazatlán, 15	Sinaloa	0.124	1.654	1.476	3.254
01726	2	Tepic-Mazatlán, 15	Sinaloa	0.108	1.531	1.296	2.935
11345	3	La Ventosa-Tapana	Oaxaca	0.059	1.069	1.652	2.780
09545	4	Culiacán – Los Mochis, 15	Sinaloa	0.082	1.336	1.040	2.458
21087	5	Victoria – San Fernando, 101	Tamaulipas	0.006	1.004	1.375	2.385
00100	6	México 15	Sonora	0.074	1.287	1.023	2.384

Fuente: Elaboración propia.

La clasificación de todos los tramos federales de acuerdo con su índice de importancia, I_a , aparece en la figura 3.10; en donde podemos observar que algunos de los tramos críticos están ubicados radialmente desde el centro a la periferia y otros en zonas donde existe una menor cantidad de circuitos o tramos redundantes.

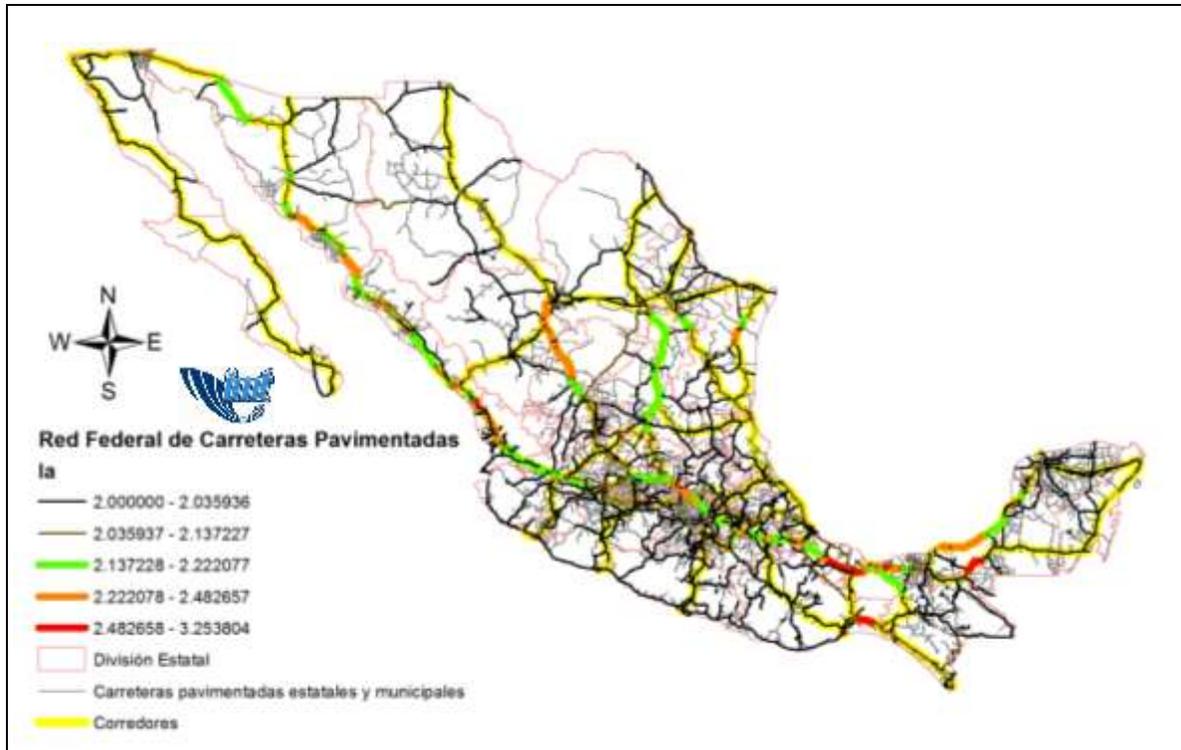


Figura 3.10 Tramos clasificados de acuerdo con su índice de importancia, I_a

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.5 se muestran algunos de los tramos que obtuvieron el mayor Índice de Importancia normalizado I_n (Ecuación 2.17) y, por lo tanto, la mayor jerarquía. Como ya se mencionó anteriormente, dicha jerarquía podría servir para priorizar la construcción, mantenimiento y rehabilitación de los tramos de la Red Federal de Carreteras.

La clasificación de todos los tramos federales de acuerdo con su Índice de Importancia normalizado, I_n , aparece en la figura 3.11.

Tabla 3.5 Ejemplo de la jerarquización de tramos los tramos críticos de acuerdo con su índice de importancia normalizado

Tramo a	JERARQUIA	NOMBRE DE LA CARRETERA	ESTADO	ACna	AAa	ATna	Ina
01858	1	Tepic-Mazatlán, 15	Sinaloa	0.534	1.000	0.508	2.042
01726	2	Tepic-Mazatlán, 15	Sinaloa	0.465	0.812	0.316	1.593
11345	3	La Ventosa-Tapana	Oaxaca	0.254	0.106	0.696	1.056
09545	4	Culiacán – Los Mochis, 15	Sinaloa	0.353	0.514	0.043	0.909
00100	5	México 15	Sonora	0.318	0.439	0.025	0.782
07356	6	T. Chicharrona–Cuencame, 49	Zacatecas	0.456	0.197	0.122	0.775

Fuente: Elaboración propia.

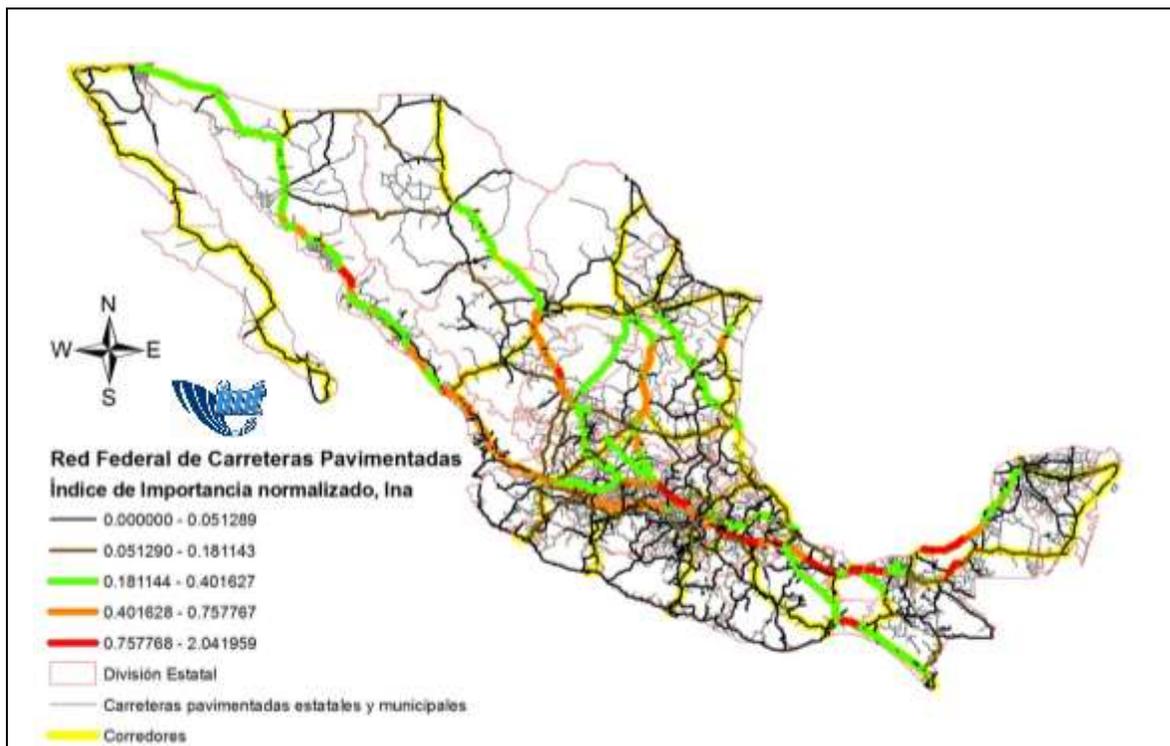


Figura 3.11 Tramos clasificados de acuerdo con su índice de importancia normalizado, In_a

Fuente: Elaboración propia

4 Análisis complementario

En este capítulo se dan ejemplos para un análisis complementario, los que permiten dar una idea de las aplicaciones de la metodología propuesta en el presente trabajo.

4.1 Grado de afectación regional

En el desarrollo de esta sección se colaboró con el Dr. Erik Jenelius⁹ para estimar el *grado de afectación* que tiene cada estado de la República Mexicana, en donde se añade un factor nuevo a la simulación que consiste en tomar en cuenta la duración de la obstrucción de los tramos carreteros.

Tal como fue realizado en Jenelius (2009), en esta sección se utiliza la *afectación total esperada (AT)* como una medida de exposición regional a tener pérdidas por retrasos en los viajes carreteros, ya que representa el incremento total esperado del tiempo de viaje vehicular para todos los viajes que inician en la región durante el cierre de un tramo carretero.

Como su nombre lo indica, la afectación total esperada representa los costos socioeconómicos en que incurrirá la región en caso de que algún tramo en la red esté cerrado, debido a que los cambios en el tiempo de viaje son generalmente un componente dominante en las evaluaciones económicas. Por lo tanto, el grado de afectación podría ser de interés para las autoridades estatales que están preocupadas por el bienestar y la eficiencia de su región. Cabe señalar que para traducir los tiempos de viaje en unidades monetarias, debemos utilizar algún valor del tiempo apropiado para México.

El enfoque está basado en dos suposiciones: primero, que la probabilidad de cierre está relacionada con la longitud del tramo carretero, por lo que los tramos con la misma longitud tendrán igual probabilidad de quedar obstruidos en su totalidad, independientemente del tipo de carretera que sea. Es verdad que la cantidad del tránsito que pasa por el tramo, el tipo de carretera y otras características de los tramos, así como lo que está a su alrededor, podrían influir en las probabilidades de cierre. El enfoque aquí propuesto es general y no impide que se haga posteriormente un refinamiento del modelo de probabilidad, que sea acorde con la información disponible de las relaciones de dichos factores.

En el nivel más básico, se considera un origen i , un destino j y el cierre del tramo k . El incremento total del tiempo de viaje para los usuarios, o el equivalente en

⁹ Investigador de la División de Tráfico y Logística, Departamento de Transporte, *Royal Institute of Technology* (KTH, por sus siglas en sueco).

vehículos, para viajar entre los pares Origen-Destino (i, j) durante el cierre, es denotado por ΔT_{ij}^k .

El tiempo de cierre de un tramo, hasta que la situación del flujo vehicular regresa al estado inicial (un estado totalmente funcional), es denotado por τ , y la demanda promedio de viaje (vehículos) por unidad de tiempo es denotada por x_{ij} . Si una región es denotada por r , l_k es la longitud del tramo k y $w_k = l_k / \sum_{\kappa} l_{\kappa}$ es la probabilidad de cierre del tramo k , entonces la *afectación total esperada*, AT , de la región r es

$$AT(r) = \sum_k w_k \sum_{i \in r} \sum_{j \neq i} \Delta T_{ij}^k \quad (4.1)$$

Supongamos que el tramo k , localizado a lo largo de la ruta más corta (asumida como única) entre el origen i y el destino j , es cerrado para todo el tránsito a las $t=0$ y es reabierto a las $t=\tau$. Se asume que la demanda de viaje de i a j es x_{ij} vehículos por unidad de tiempo, constante e inelástica. Durante el cierre del tramo, podría no haber rutas alternas de i a j , o haber al menos una. Si no hay rutas alternas, lo mejor que un usuario podría hacer es esperar hasta que el tramo k sea reabierto. De ahora en adelante, un tramo de este tipo será llamado *tramo cortante*. Debido a que se asume una demanda de viaje constante a través del tiempo, un usuario que desea partir durante el cierre del tramo, se retrasará en promedio $\tau/2$ unidades de tiempo. La demanda total durante el cierre es $x_{ij}\tau$ y el incremento total en el tiempo de viaje durante este periodo es

$$\Delta T_{ij}^k = \frac{x_{ij}\tau^2}{2} \quad \text{si } k \text{ es un tramo cortante} \quad (4.2)$$

Si existen rutas alternas, un usuario puede escoger la nueva ruta más corta o esperar hasta que el tramo k sea reabierto. Entonces Δt_{ij}^k denota la diferencia en el tiempo de viaje entre la ruta original más corta y la nueva ruta, la cual puede ser conocida por los usuarios. El retraso para una persona que desea marcharse en algún tiempo $t \in [0, \tau)$ será $\min(\Delta t_{ij}^k, \tau - t)$. Si $\Delta t_{ij}^k \geq \tau$, todos los usuarios que desean partir durante el cierre retrasarán sus viajes, lo que da el mismo resultado de un *tramo cortante*. Si $\Delta t_{ij}^k < \tau$, sólo quienes desean partir después $t = \tau - \Delta t_{ij}^k$ se beneficiarían del retraso de su viaje, en lugar de haber tomado otra ruta. Por lo que el incremento total del tiempo de viaje vehicular, en cualquier caso, es

$$\Delta T_{ij}^k = \begin{cases} \frac{x_{ij}\tau^2}{2} & \text{si } \Delta t_{ij}^k \geq \tau, \\ x_{ij}\Delta t_{ij}^k \left(\tau - \frac{\Delta t_{ij}^k}{2} \right) & \text{si } \Delta t_{ij}^k < \tau. \end{cases} \quad (4.3)$$

De acuerdo con las fórmulas antes descritas, el beneficio de las rutas alternativas cortas se incrementará con la duración del cierre τ , debido a que las consecuencias serán lineales en τ , mientras que serán cuadráticas en τ si no hay rutas alternas cortas.

Los cálculos fueron realizados sobre la misma red de carreteras y centroides de la figura 2.15, incluyendo la misma matriz de viajes Origen-Destino (descrita en la sección 2.5), con un programa desarrollado por el Dr. Erik Jenelius, escrito en C++/C#. En la figura 4.1 podemos observar los resultados obtenidos para el cálculo de la *afectación total esperada* para cada estado del país, en donde se modeló el cierre de cada tramo durante 12 horas; fueron divididos por niveles de afectación del 1 al 5, en donde el nivel 5 fue el de mayor afectación. El grado de afectación de un estado indica cuánto depende dicha región de todo el sistema de transporte carretero (es decir, a nivel nacional).

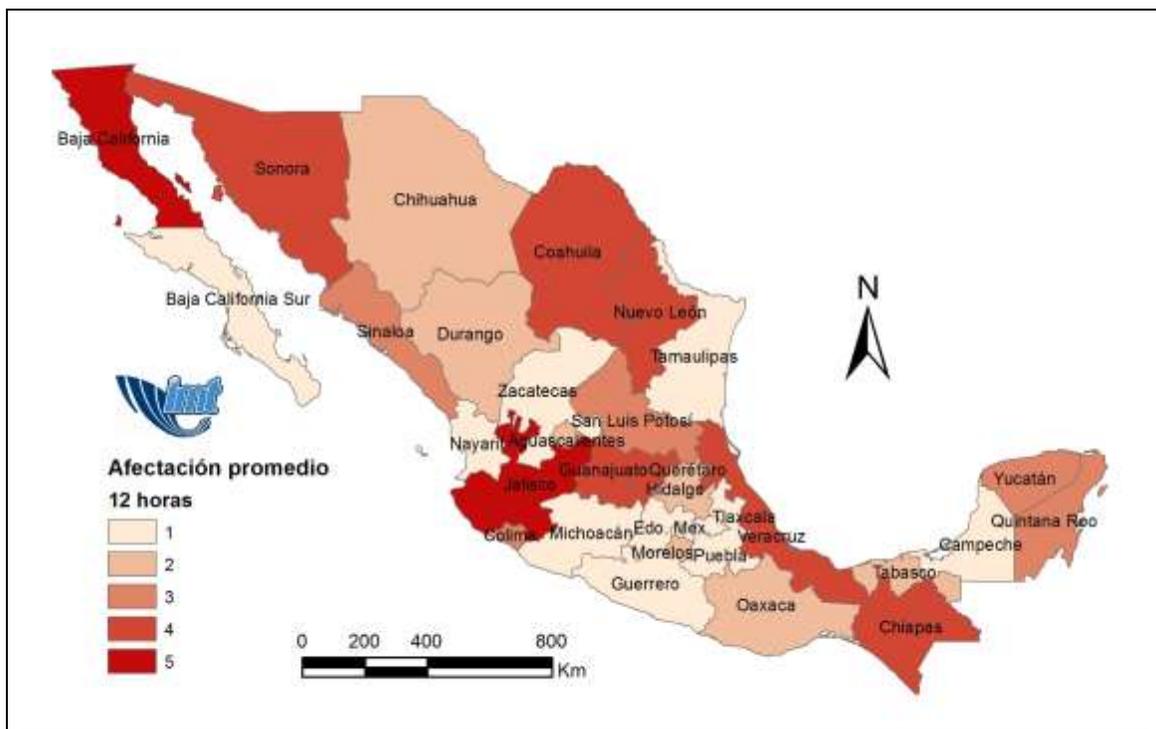


Figura 4.1 Afectación total esperada, para un cierre de 12 horas

Fuente: elaboración propia

En la figura 4.2 se muestra el grado de afectación de los estados para un cierre de 2 días (48 horas) y se puede observar cómo los estados de Sonora y Chiapas pasaron de un nivel 4 para un cierre de 12 horas a nivel 3 para un cierre de 48 horas; Quintana Roo y San Luis Potosí pasaron del nivel 3 al nivel 2 y Durango pasó del nivel 2 al nivel 1; es decir, sólo algunos estados bajaron su grado de afectación al aumentar el tiempo de cierre de un tramo. Lo anterior podría deberse a que el tiempo total que se retrasarían los usuarios al tomar una ruta alterna muy larga, si esta existe, no sería tan alto como las 48 horas de cierre; por lo que de alguna forma una parte de los flujos vehiculares llegan a su destino antes de que volviera a estar en operación el tramo obstruido.

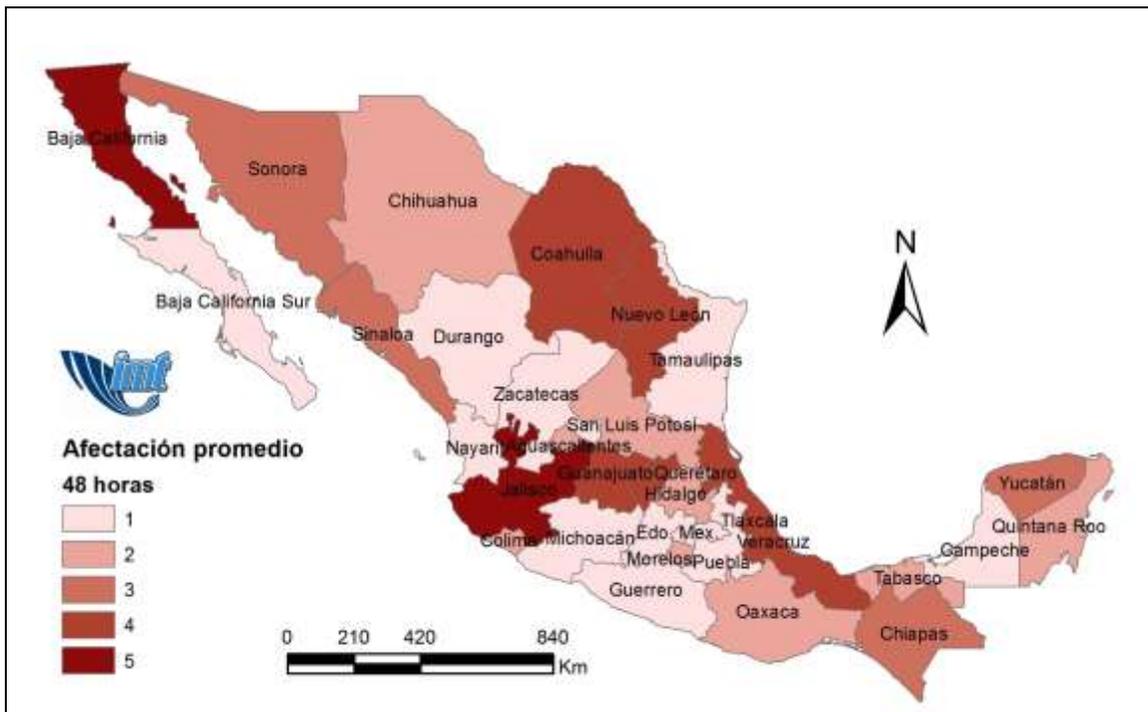


Figura 4.2 Afectación total esperada, para un cierre de 48 horas

Fuente: elaboración propia

Como se mencionó anteriormente, el grado de afectación estatal podría ser de interés para autoridades estatales y federales; de tal forma que se fomente la construcción de infraestructura carretera en ciertas regiones, pensando a su vez en robustecer al sistema carretero en su totalidad.

4.2 Vinculación con riesgos

México está situado en una región afectada por diversos fenómenos naturales, entre los que se encuentran los hidrometeorológicos y sísmicos. En el caso de los fenómenos hidrometeorológicos, las características geográficas del país favorecen el embate de huracanes que afectan principalmente las zonas costeras. Asociadas a los huracanes o de manera independiente, también se presentan lluvias torrenciales que provocan inundaciones y deslaves (CENAPRED, 2001).

En la figura 4.3 se muestra información para un análisis complementario, en donde se destacan aquellos tramos que son críticos para el funcionamiento de la red de carreteras y que caen en zonas con riesgo¹⁰ de inundación.

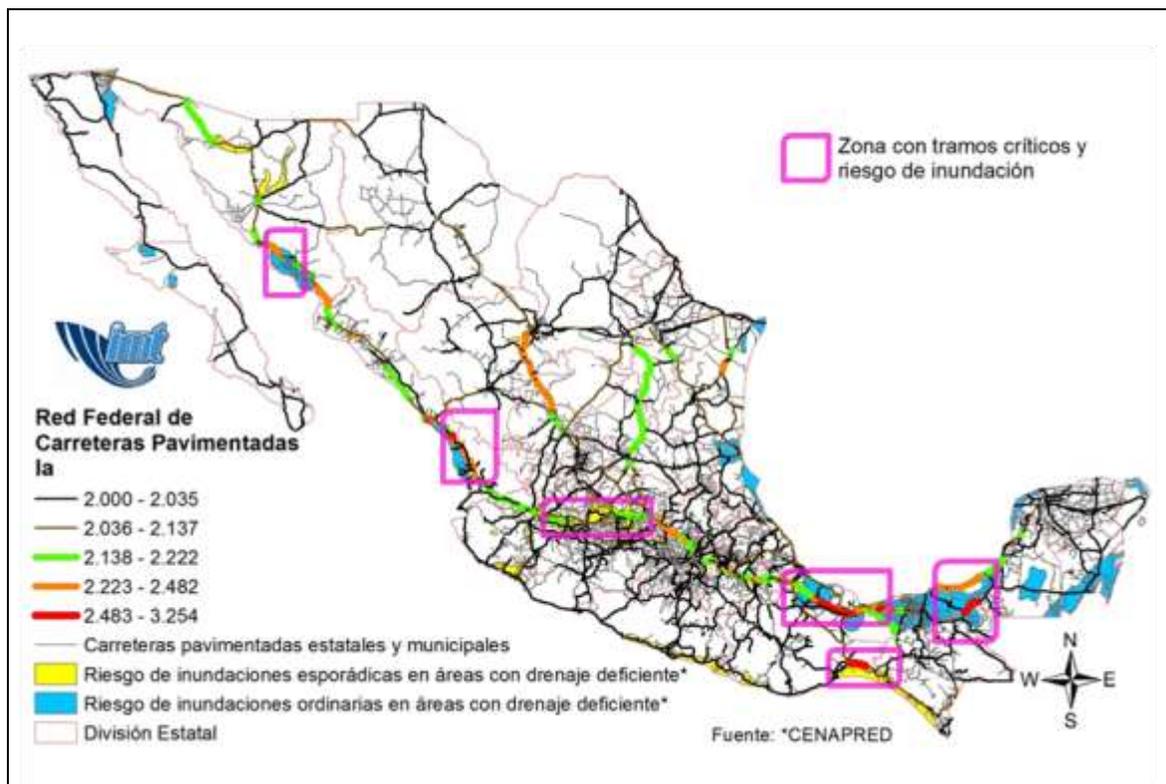


Figura 4.3 Riesgo de inundaciones

Fuente: elaboración propia, con información del CENAPRED y de la USIG-IMT

¹⁰ El término riesgo se puede entender como el producto del peligro o amenaza (agente perturbador), la vulnerabilidad (propensión a ser afectado) y la exposición (el valor del sistema afectable); CENAPRED, 2001.

En la figura 4.4 vemos una superposición de la capa de afectación promedio de cada una de las regiones (ver sección 4.1), así como los tramos críticos y las zonas de **riesgos de inundación**; por lo que podemos observar cómo algunos estados tenderán a sufrir mayores afectaciones e impactarán a su vez en mayor medida el funcionamiento de la red si alguno de sus tramos críticos se ven afectados. En la misma figura podemos observar cómo la red de Sinaloa y Sonora son clave para no aislar la península de Baja California, por otro lado la red de Jalisco y Nuevo León están en una posición estratégica para mantener la comunicación de la sección del centro del país hacia el Norte.

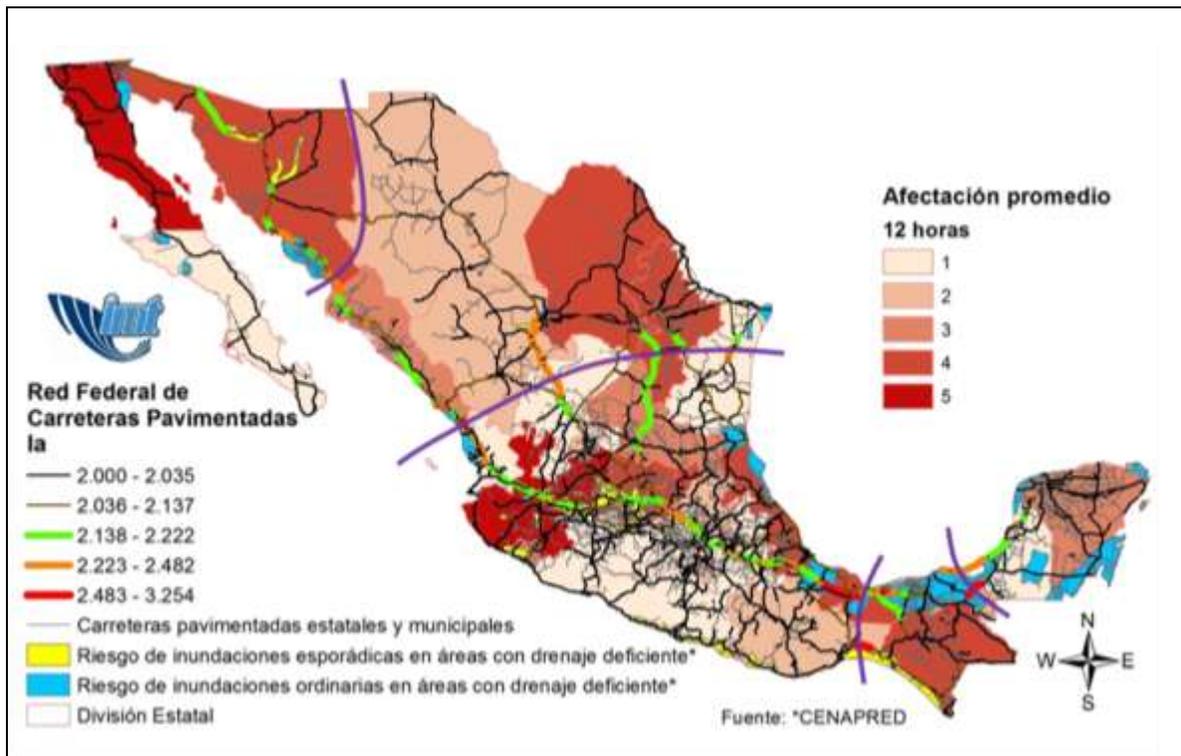


Figura 4.4 Superposición de afectación regional, tramos críticos y riesgos de inundación.

Fuente: elaboración propia, con información del CENAPRED y de la USIG-IMT

En la figura 4.5 se puede observar con mayor detalle las características de Jalisco y Nayarit; por su posición geográfica y por la configuración de la red nacional, los tramos de Nayarit tienen el riesgo de ser afectados por inundaciones ordinarias lo que a su vez afectaría en mayor medida a los flujos vehiculares que produce Jalisco; es decir, debido a que no existen rutas alternas óptimas, en promedio Jalisco tiene una afectación esperada de nivel 5 y sus tramos críticos están expuestos al riesgo de inundación esporádica.

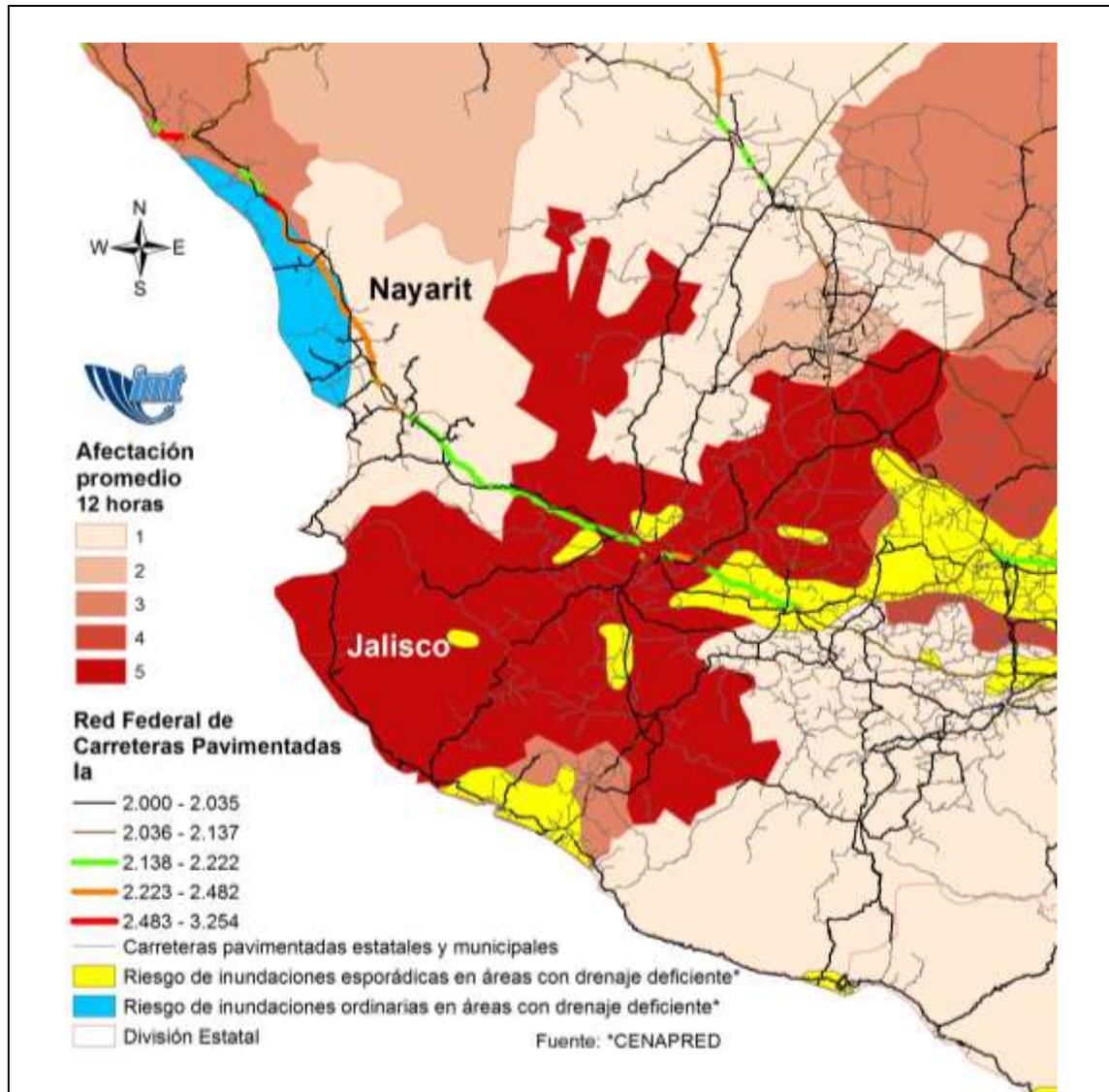


Figura 4.5 Vista regional, Nayarit y Jalisco

Fuente: elaboración propia, con información del CENAPRED y de la USIG-IMT

La figura 4.6 también muestra la región del Istmo de Tehuantepec, en donde podemos observar que Chiapas por su posición geográfica, y por la configuración de la red en el Istmo, tendría una afectación promedio de nivel 5 si alguno de los tramos críticos que pasan por el Istmo se vieran afectados; aunando a lo anterior, podemos observar en la misma figura que algunos de dichos tramos están en zonas con riesgo de inundación.

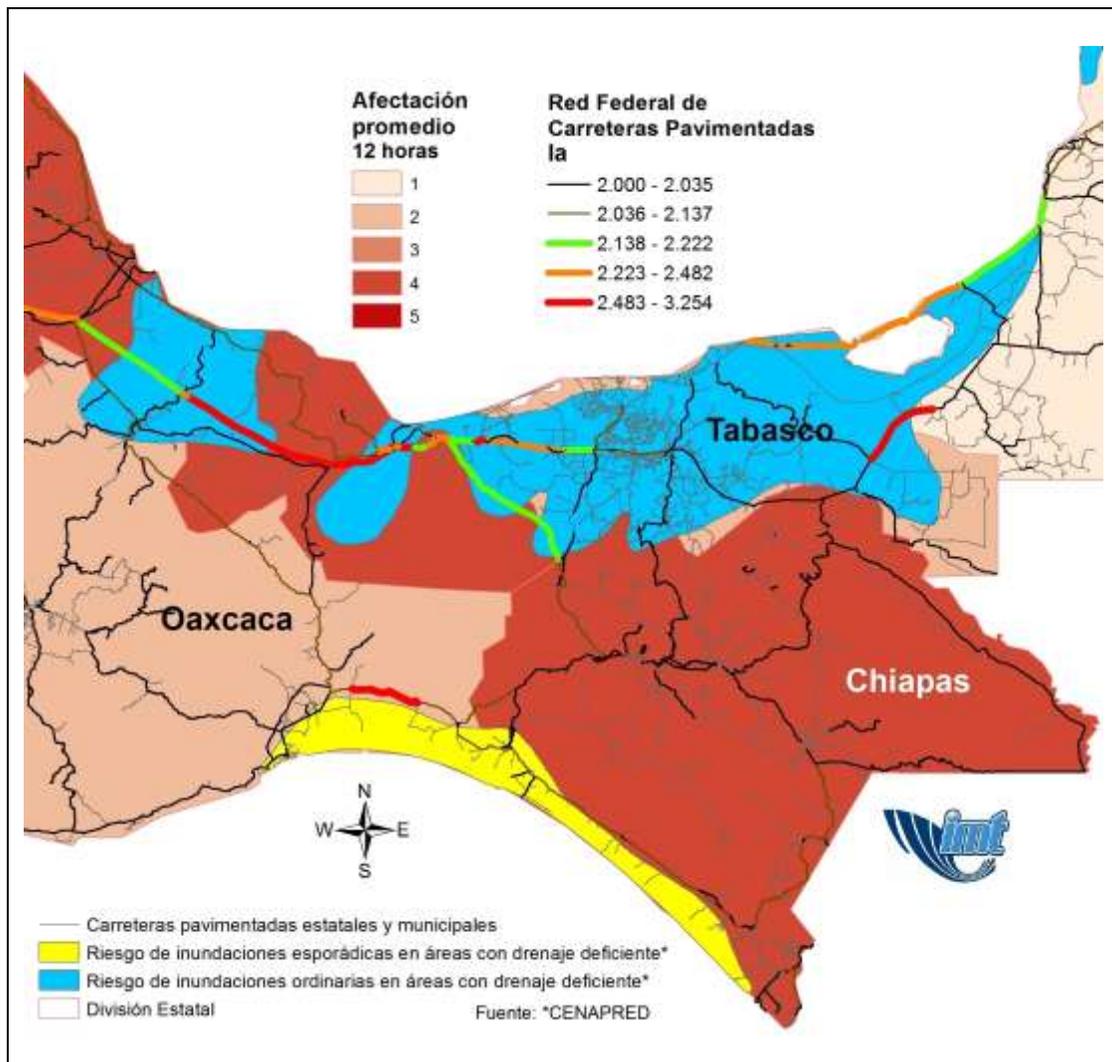


Figura 4.6 Vista regional, Chiapas y Tabasco

Fuente: elaboración propia, con información del CENAPRED y de la USIG-IMT

Para el caso de los **fenómenos sísmicos**, como se puede observar en la figura 4.7, México se encuentra situado en una zona de alta actividad sísmica provocada por el movimiento de 5 placas tectónicas; en dicha figura es posible observar cómo algunos de los tramos críticos para el buen funcionamiento de la red de carreteras caen en zonas de alta y media sismicidad.

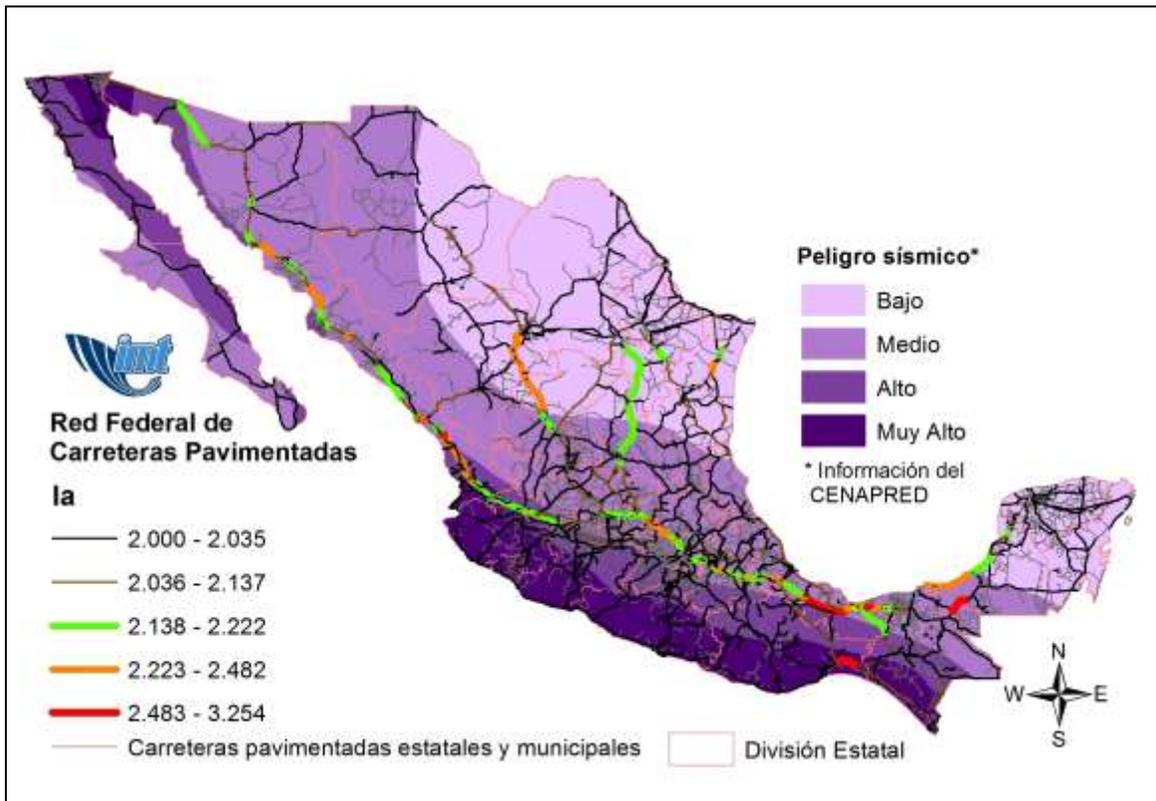


Figura 4.7 Peligro sísmico

Fuente: elaboración propia con información del CENAPRED y de la USIG-IMT

Un análisis espacial de la información referente a los riesgos a los que está sometida la infraestructura carretera en México, podría ser una herramienta más para la planeación del mejoramiento de esta; de tal forma que puedan ser reconstruidos aquellos tramos críticos para el funcionamiento de la red, después de un desastre natural; tomando en cuenta las nuevas especificaciones que los harán menos propensos a ser afectados. En la siguiente sección se muestran las aplicaciones para el caso de la planeación de nueva infraestructura o la ampliación de los tramos carreteros ya existentes.

4.3 Vinculación con planeación de infraestructura

En México, cada vez más se requiere planear proyectos carreteros que contribuyan a una mayor accesibilidad de las regiones y mejoren la competitividad de ciudades, así como la funcionalidad del transporte nacional. Para contribuir con el último rublo, se sugiere que sea tomado en cuenta cómo la nueva infraestructura o el aumento de su capacidad pueden robustecer a la red carretera.

Una muestra de lo anterior es presentada en la figura 4.8, en donde podemos observar los 32 proyectos prioritarios¹¹ 2010-2012 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en materia de infraestructura carretera. En la misma figura destacan aquellas zonas en donde cuatro proyectos (1: construcción de autopista Durango-Mazatlán; 2: ampliación carretera Zacatecas-Salttillo; 3: ampliación Acayucan-La Ventosa; 4: modernización Villahermosa-Escárcega) favorecen el robustecimiento de la red; es decir, se encuentran en zonas donde existen tramos críticos, que requerían el aumento de su capacidad o mejor aún, la construcción o mejoramiento de rutas alternas.

¹¹ Información referenciada geográficamente, generada por la Unidad GITS (Geotecnología Inteligente en Transporte y Sustentabilidad) del Instituto de Geografía, UNAM, bajo contrato con la SCT, 2011-2012.

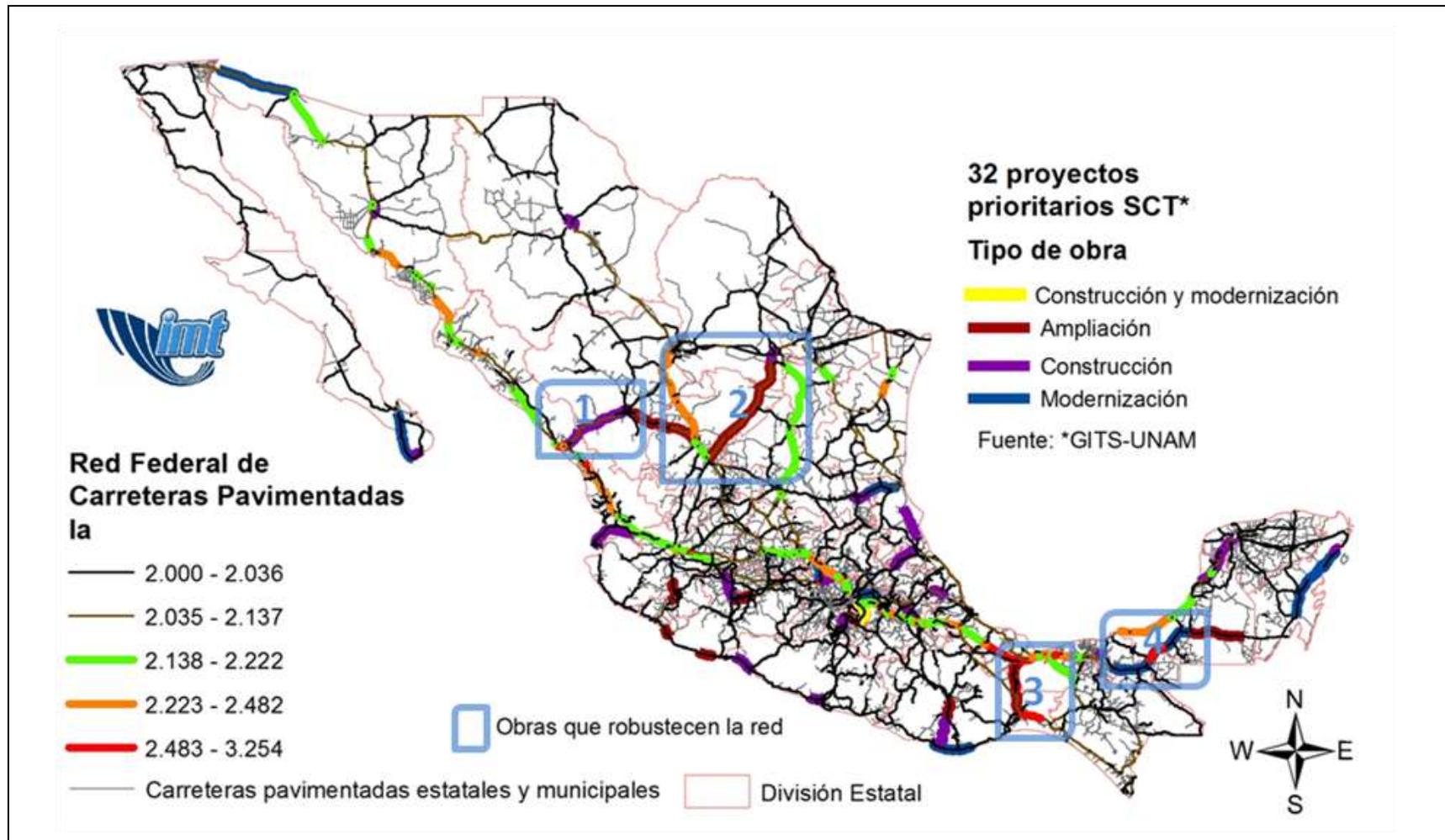


Figura 4.8 Proyectos prioritarios SCT

Fuente: elaboración propia con información de la USIG-IMT y de la unidad GITS-UNAM

Existen dos enfoques empleados internacionalmente para generar políticas de transporte, el de igualdad de oportunidades y de eficiencia social; el primero se refiere a que todas las carreteras son igualmente importantes y en el segundo se considera que las carreteras más importantes son las más utilizadas. Bajo el enfoque de eficiencia social es posible integrar el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) al análisis de los tramos críticos que sería menester tomar en cuenta cuando se esté planeando la construcción de nuevos tramos o el aumento de capacidad de los ya existentes. En la figura 4.9 se muestra un ejemplo de un tramo crítico que a su vez es muy utilizado.

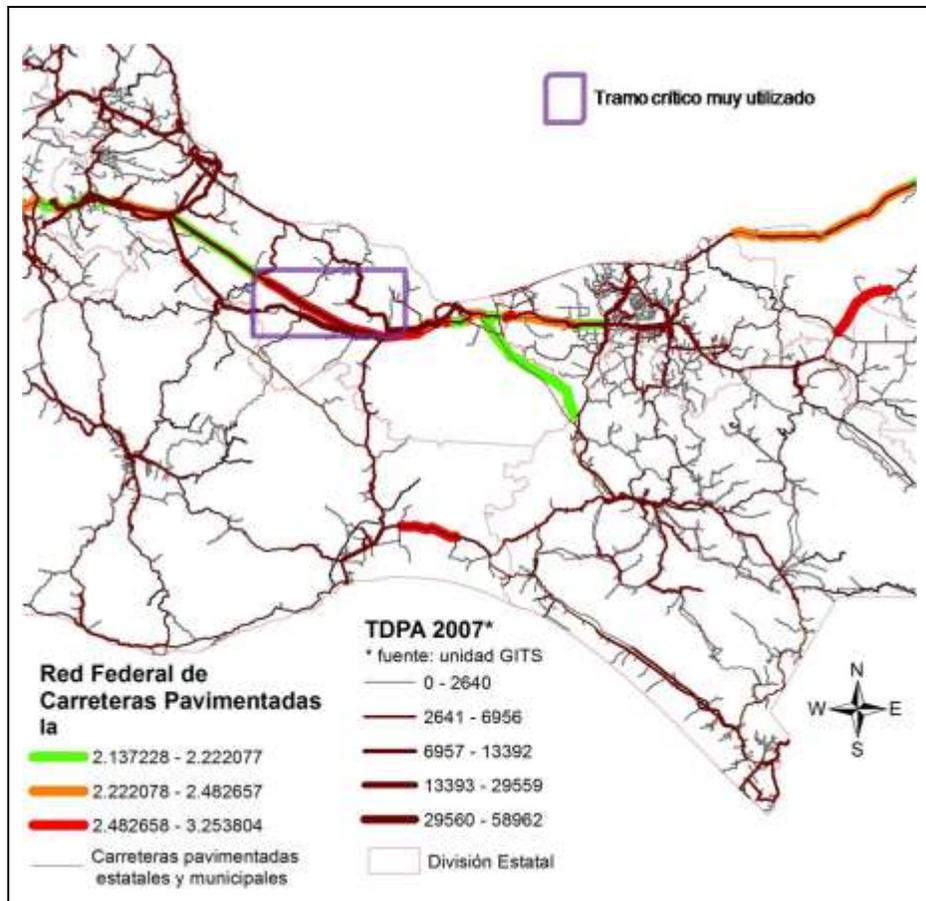


Figura 4.9 Tránsito diario promedio anual (TDPA)

Fuente: elaboración propia con información de la USIG-IMT y de la unidad GITS-UNAM

Para un análisis completo, se deben incorporar los tramos que se planean construir o aquellas nuevas especificaciones de los tramos que serán ampliados, de tal forma que se aplique nuevamente el modelo para la identificación de tramos críticos (desarrollado en los capítulos 2 y 3 del presente trabajo) y se corrobore la posible disminución de tramos críticos, es decir, si la nueva infraestructura o su mejoramiento contribuye al robustecimiento de la red de carreteras.

5 Conclusiones

Se desarrolló una metodología para identificar los tramos cuya obstrucción provocaría las mayores consecuencias negativas en términos de cambios en la conectividad, accesibilidad y tiempo de viaje, en alguna red de carreteras que se desee analizar, ya sea a nivel nacional, regional o estatal.

Se realizó un caso de estudio que permitiera evaluar si era viable la aplicación de dicha metodología, el que consistió en obtener los índices de importancia para los tramos de la Red Federal de Carreteras en México. De esa forma se obtuvieron los tramos críticos de dicha red, demostrando que es viable su aplicación con el uso de las herramientas propuestas y que, además, el trabajo constituye una aportación al área del análisis de vulnerabilidad de redes carreteras; ya que se toman en cuenta tres criterios que resultaron diferentes en cuanto a las consecuencias que cuantifican; por lo que no es recomendable el uso de alguno de ellos en forma aislada, como lo venían haciendo otros investigadores. Por tanto, los resultados permiten respaldar la hipótesis del presente trabajo y recomendar el uso del modelo propuesto para tomar en cuenta los criterios en forma integrada e identificar de esa manera los tramos críticos.

Por otro lado, se recomienda que los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología; es decir, la jerarquía de los tramos, sea tomada en cuenta por entidades como la SCT para priorizar su rehabilitación después de un desastre natural, priorizar el mantenimiento de los mismos y por último, para planear aquellos tramos redundantes que sería necesario construir o determinar aquellos en donde sería conveniente aumentar la capacidad.

La edición de la red de carreteras pavimentadas de México permitió generar una red confiable que podría ser un insumo valioso para futuros proyectos de modelación del sistema de transporte carretero en México. Con la utilización de dicha red y de información complementaria será posible hacer diferentes análisis regionales, como se ejemplificó en el presente trabajo con información de riesgos y de planes de proyectos de infraestructura. Se sugiere para futuros proyectos que sea tomado en cuenta este tipo de información aunada a indicadores económicos de la región, de tal forma que se obtengan mejores estimaciones de las posibles consecuencias negativas a nivel nacional y regional de la afectación de un tramo carretero así como de los posibles beneficios de proyectos de nueva infraestructura o de su mejoramiento.

Además, una vez que se disponga de una matriz actualizada de la demanda Origen-Destino para el transporte de carga y pasajeros, sería recomendable incorporarla a la metodología sugerida en este trabajo, ya que de esa forma se podrían obtener mejores estimaciones de los efectos provocados por la obstrucción de un tramo en el funcionamiento de la red de carreteras. Debido a que, si se tomara en cuenta el flujo de vehículos de carga y pasajeros para determinar los tramos críticos, podrían mejorarse las estimaciones de las

consecuencias de la interrupción de un tramo, sobre todo cuando los tramos de rutas alternas tienen poca capacidad remanente en condiciones normales.

También se recomienda que, incorporando la estimación del valor monetario del tiempo de viaje, tanto para el transporte de carga como para pasajeros, sean traducidos los efectos que provocaría la obstrucción de algún tramo crítico en términos monetarios. Finalmente, se sugiere que cuando exista información sobre el flujo vehicular en diferentes horarios y épocas del año, sea integrada a la metodología un modelo de asignación dinámica para algunas regiones de interés; la presente metodología es un antecedente para dichos estudios. Aunado a lo anterior, podrían ser realizados otros proyectos para simular la obstrucción de más de un tramo a la vez, es decir, crear áreas de afectación; ya sea por posibles inundaciones, y analizar cada una de las posibles rutas alternas, dando valores a estas de acuerdo con su capacidad para absorber el flujo vehicular desviado. De esa forma, se podrían realizar planes para redirigir el flujo vehicular e incluso organizar evacuaciones, cuando contemos con señales de información variable en las principales carreteras del país.

Bibliografía

Barba-Romero, S. *Panorámica actual de la decisión multicriterio discreta. Investigaciones Económicas*, Vol. XI, No. 2, pp. 279-308 (1987).

Berdica, K. *An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done*, *Transport Policy*, Vol. 9, pp. 117–127 (2002a).

Berdica, K. *Vulnerability: A model-based case study of the road network in Stockholm. TraVIS for Roads: Examples of Road Transport Vulnerability Impact Studies*, Tesis doctoral, TRITA-INFRA 02-029, KTH, Estocolmo (2002b).

Berdica, K. & J. Eliasson. *Regional accessibility analysis from a vulnerability perspective, Second International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)*, ed. A. Nicholson and A. Dantas, Christchurch, Nueva Zelanda, pp. 89–94 (2004).

Black, W. *Transportation: A geographical analysis*. Guilford Publications, New York (2003).

CENAPRED. *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*, Talleres Gráficos de México (2001).

Centeno Saad, A. G. & A. Mendoza Díaz. *Modelo de asignación multiproducto para las operaciones de carga por autotransporte y ferrocarril*. Publicación Técnica No. 222, Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México (2003).

Chias Becerril, L. *Articulación de las costas mexicanas*, *Revista Mexicana de Sociología*, año LII, número 3, julio—septiembre, pp. 69-84. México (1990).

Cova, T. J. & S. Conger. *Transportation hazards, en Transportation Engineers' Handbook*, editorial M. Kutz (2004).

Di Gangi, M. & A. S. Luongo. *Measures of network vulnerability indicators for risk evaluation and exposure reduction. Environmental Health Risk III*, Wessex Institute of Technology, Reino Unido (2005).

Escalante Sauri, C. I. *La conservación de carreteras en México, la experiencia reciente. Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C.* (2002).

González Gómez, O. *Construcción de carreteras y ordenamiento del territorio*, *Revista Mexicana de Sociología*, año LII, número 3, julio—septiembre, pp. 49-68. México (1990).

Highway Capacity Manual. *Transportation Research Board*, National Research Council, Washington D.C. (2000).

Husdal, J. *Reliability and vulnerability versus Costs and Benefits. Proceedings of the 2nd International Symposium on Transportation Network Reliability*, Queenstown and Christchurch, Nueva Zelanda, pp. 180-186 (2004).

Husdal, J. *Transport Network Vulnerability - which terminology and metrics should we use? NECTAR Cluster 1 Seminario*, mayo, Molde, Noruega, (2006).

Jara-Diaz, S. R.; M. A., Munizaga; P. Greeven; R. Guerra & K. Axhausen. *Estimating the value of leisure time from a time allocation model. Transportation Research Part B*, Vol. 42, pp. 946–957 (2008).

Jenelius, E.; T. Petersen & L.-G. Mattsson. *Importance and exposure in road network vulnerability analysis. Transportation Research Part A*, Vol. 40, pp. 537-560 (2006).

Jenelius, E. *Network structure and travel patterns: Explaining the geographical disparities of road network vulnerability. Journal of Transport Geography*, 17(3), pp. 234-244 (2009).

Jenelius, E. *User inequity implications of road network vulnerability. Journal of Transport and Land Use 2 (3-4)*, pp. 57-73 (2010).

Jenelius, E.; L.-G Mattsson & D, Levinson. *Traveler delay costs and value of time with trip chains, flexible activity scheduling and information, Transportation Research Part B 45(5)*, pp. 789-807 (2011).

Lleras-Echeverri, G. & M. Sánchez-Silva. *Vulnerability analysis of highway networks, methodology and case study. Institution of Civil Engineers, Transport*, Vol. 147, pp. 223-230 (2001).

Martin, W. A. & N. A. McGuckin. *Travel Estimation Techniques for Urban Planning, NCHRP, Report 365. National Research Council*, Washington, D.C. (1998).

Murray-Tuite, P. & H. Mahmassani. *Methodology for determining vulnerable links in a transportation network. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1882, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 88-96 (2004).

Nicholson, Alan & Z.-P. Du. *Degradable transportation systems: an integrated equilibrium model. Transportation Research Part B*. Vol. 31, No. 3, pp. 209-223. Elsevier Science Ltd. (1997).

Ortúzar Salas, J. de D. *Modelling Transport*. 2da edición. Editorial John Wiley & Sons. Chichester, Reino Unido (1994).

Potrykowski, M. & Z. Taylor. *Geografía del Transporte*. Ariel Geografía. Editorial Ariel, S. A., Barcelona (1984).

Schreuder, M.; G. Tamminga & M. Kraan. *Vulnerability of a National Road Network, 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C. (2008).

Scott, D. M.; D. Novak; L. Aultman-Hall & F. Guo. *Network robustness index: a new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. Journal of Transport Geography*, Vol. 14, pp. 215-227 (2006).

Seguí Pons, J. M. *Geografía de Redes y Sistemas de Transporte*. Editorial. Serie Espacios y Sociedades; No. 16. Madrid. Editorial Síntesis (1991).

Sohn, J. *Evaluating the significance of highway network links under the flood damage: An accessibility approach. Transportation Research Part A*, Vol. 40, No. 6, pp. 491-506 (2006).

Srinivasan, K. *Transportation Network Vulnerability Assessment: A quantitative framework. Transportation Security Papers 2002*. White paper, anderbilt University/Southeastern Transportation Center. Estados Unidos de Norteamercia (2002).

Taaffe, E.; H. Gauthier & M. O'Kelly. *Geography of Transportation*. Segunda edición. Prentice Hall, New Jersey (1996).

Tampère, C.; J. Stada; B. Immers; E. Peetermans & K. Organe. *Methodology for identifying vulnerable sections in a national road network, 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C. (2007).

Taylor, M. A. P. & G. M. D. D'Este. *Concepts of network vulnerability and applications to the identification of critical elements of transport infrastructure. 26th Australasian Transport Research Forum*, Wellington, Nueva Zelanda, 1-3 octubre (2003a).

Taylor, M. A. P. & G. M. D. D'Este. *Network vulnerability: An approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks. The network reliability of transport. Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)* eds M. G. H. Bell and Y. Iida, pp. 23-44. Pergamon, Oxford, Inglaterra (2003b).

Taylor, M. A. P. & G. M. D. D'Este. *Critical infrastructure and transport network vulnerability: developing a method for diagnosis and assessment, Second International Symposium on Transportation Network Reliability*, ed. A. Nicholson and A. Dantas, Christchurch, Nueva Zelanda, pp. 96–102 (2004).

Taylor, M. A. P.; G. M. D. D'Este & S. Sekhar. *Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. Networks and Spatial Economics*, Springer, Vol. 6, pp. 267-291 (2006).

Trejo Ramírez, J. M.; J. A. Deantes del Ángel & A. Mendoza Díaz. *Un análisis de la demanda del autotransporte nacional de carga*. Publicación Técnica No. 127, Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México (1999).

Tseng, Y.-Y. & E. Verhoef. *Value of time by time of day: A stated-preference study*. *Transportation Research Part B* 42, pp. 607–618 (2008).

Torres Vargas, G. & S. García Hernández. *Propuesta metodológica para la estimación del valor del tiempo de los usuarios de la infraestructura carretera en México: El caso del transporte de pasajeros*. Publicación Técnica No. 291, Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México (2006).

Viswanath, K. & S. Peeta. *Multicommodity maximal covering network design problem for planning critical routes for earthquake response*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1857, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 1-10 (2003).

Wardrop, J. G. *Some theoretical aspects of road traffic research*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part II, pp. 325-362. Londres, Reino Unido (1952).

Webster, N. & L. Elefteriadou. *A simulation study of truck passenger car equivalents (PCE) on basic freeway sections*, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 33, No. 5, pp. 323-336 (1999).

CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671



**INSTITUTO
MEXICANO DEL
TRANSPORTE**



www.imt.mx
publicaciones@imt.mx