



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Evaluación del beneficio en seguridad vial al modificar una carretera de cuota de dos carriles a una configuración 2+1 con barrera central de cables

Ana Cecilia Cuevas Colunga
Emmanuel Muñoz García
Emilio F. Mayoral Grajeda

**Publicación Técnica No. 465
Sanfandila, Qro, 2016**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Evaluación del beneficio en seguridad vial al
modificar una carretera de cuota de dos carriles a
una configuración 2+1 con barrera central de
cables**

Publicación Técnica No. 465
Sanfandila, Qro, 2016

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte, por Ana Cecilia Cuevas Colunga, Emmanuel Muñoz García y Emilio Francisco Mayoral Grajeda.

Para su financiamiento, el presente trabajo contó con fondos de la Red Temática de Accidentes Viales (Número 253411), como parte del programa de Redes Temáticas 2015 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

Contenido

Resumen		iii
Abstract		v
Resumen	ejecutivo	vii
Capítulo 1.	Introducción	1
	1.1. Antecedentes y objetivos	1
	1.2. Estado del arte	2
	1.3. Situación en México	15
Capítulo 2.	Metodología	21
	2.1. Lineamientos de diseño	21
	2.2. Caso de análisis La Pera-Cuautla	29
	2.3. Caso Las Choapas-Ocozocoautla	43
Capítulo 3.	Puntos de reflexión y conclusiones	59
Bibliografía		61

Resumen

El presente trabajo muestra una evaluación del beneficio en términos de seguridad vial al modificar carreteras de cuota de dos carriles a carreteras 2+1 con barrera central de cables, para lo cual se establecen los lineamientos de diseño y se plantea que el mejoramiento de la infraestructura aumentará la seguridad vial al reducir en más del 40% el número de víctimas. Con este objetivo, se revisó lo último en la materia o “estado del arte”, y posteriormente se definieron los requerimientos físicos y técnicos de las carreteras 2+1 que mejor se adaptan a las condiciones de las carreteras de México. Se muestran dos casos de estudio y se finaliza con algunas reflexiones y conclusiones.

Abstract

This work assesses the benefit in road safety when modifying two-lane toll roads to 2+1 roads with a central wire rope barrier, by developing design guidelines and asserting that improvements to infrastructure will enhance road safety thus reducing the number of victims in more than 40%. The state of the art was reviewed and the physical and technical requirements for 2+1 roads, that best meets the conditions of roads in Mexico, were defined. Two case studies are shown and insights are included as concluding remarks.

Resumen ejecutivo

En México cada año mueren más de 15 mil personas por colisiones de tránsito. Está demostrado que algunas características de la infraestructura constituyen un factor de riesgo tanto para la ocurrencia como para la severidad de los siniestros. El objetivo del presente trabajo es realizar una evaluación del beneficio en términos de seguridad vial al modificar carreteras de cuota de dos carriles a carreteras 2+1 con barrera central de cables, para lo cual se establecen los lineamientos de diseño de dicha configuración. Para ello se revisaron los desarrollos más recientes o el “estado del arte” en la materia y posteriormente se definieron los requerimientos físicos y técnicos de las carreteras 2+1 que mejor se adaptan a las condiciones de las carreteras de nuestro país.

“Carretera 2+1” son aquellas carreteras que se componen de tres carriles de circulación y una división central, la cual puede consistir en una barrera de cables tensados, una barrera de concreto o simplemente señalamientos horizontales. La operación de estos tres carriles es la siguiente: dos de los tres carriles (el central y el de un extremo) se utilizan en cierto tramo en el mismo sentido y posteriormente se alterna el carril central y se invierte hacia el otro sentido. La alternancia se deberá realizar en intervalos regulares, modificando el trazo de la barrera central, que servirá para separar los sentidos de circulación, restringir las maniobras de rebase y, con ello, evitar los choques frontales.

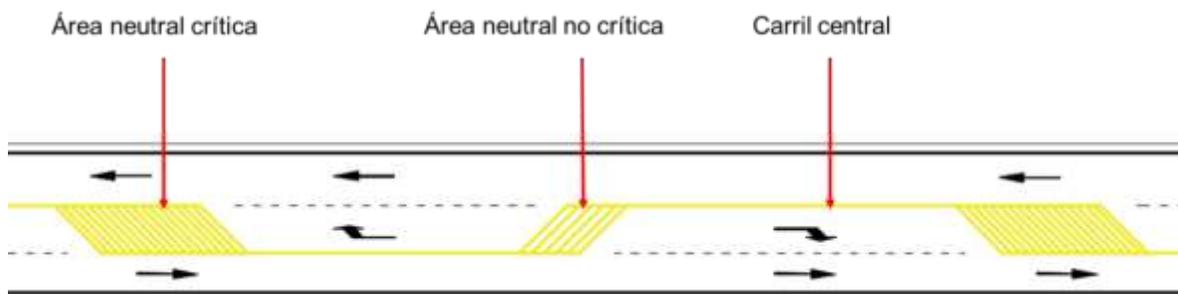


Figura I.1 Esquema de carretera 2+1

Esta alternancia tiene el objeto de permitir que ambos sentidos efectúen la maniobra de rebase de manera segura; un sentido a la vez. Tal como se observa en la figura anterior, a lo largo de la carretera 2+1 se presentan áreas neutras críticas y áreas neutras no críticas. Se denominan áreas neutras críticas a las zonas donde convergen el carril central y derecho, es decir, en el punto donde desaparece el carril central en un sentido. Recibe este nombre porque el vehículo que utiliza el carril central tiene que buscar la brecha ya sea acelerando o frenando para incorporarse al carril derecho sin colisionar de costado con otro vehículo. Por otra parte, se conocen como áreas neutras no críticas a aquellas

zonas que se encuentran donde comienza el carril central para cada sentido de circulación; su nombre obedece a que realizar la maniobra para acceder al carril central no representa un riesgo importante por tratarse de una maniobra de divergencia.

Siguiendo la política de “Visión Cero” que, pese a lo limitado de los recursos disponibles, tiene planteado como objetivo reducir en su totalidad las víctimas en accidentes viales, los suecos idearon una solución que en primera instancia no consideraron tan efectiva: las carreteras 2+1; para ello, no tenían que instrumentar grandes modificaciones ya que, al contar las vías con un ancho de 13 metros (m), esta medida fue catalogada como de bajo costo. Inicialmente la separación de sentidos se indicaba sólo con pintura y más adelante se colocó una barrera de cables tensados.

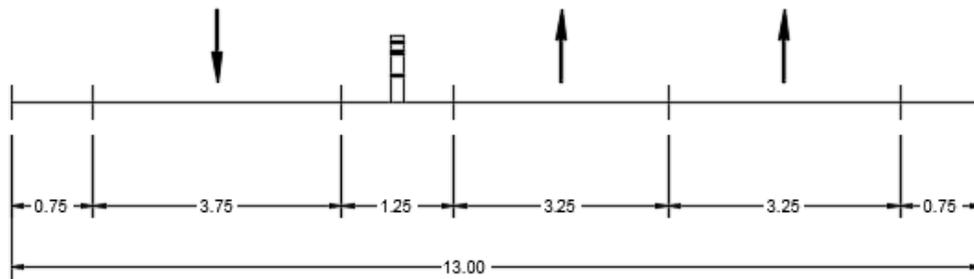


Figura I.2 Sección de carretera 2+1 con barrera de cables en Suecia

La barrera de cables en este tipo de carreteras tiene como objeto separar físicamente los flujos vehiculares para evitar los choques frontales. Respecto al desempeño que han tenido estas carreteras en materia de seguridad vial, diferentes estudios han reafirmado el excelente impacto en la reducción de muertes por choques frontales; en uno de ellos se concluyó que el factor de reducción que se tiene al implementar esta solución es de 60% en la tasa de mortalidad. De manera generalizada, se han observado resultados favorables en la implementación de la configuración 2+1, a pesar de que los países que han llevado a cabo dicha transformación, aplican características técnicas de diseño diferentes entre sí. Estas diferencias radican principalmente en las dimensiones de las áreas neutrales, la longitud del carril de rebase y el tipo de faja separadora.

Tabla I.1 Resultados en las modificaciones por país

País	Resultados
Alemania	Reducción promedio del 36% de accidentes con víctimas
Dinamarca	Reducción del 73% de los accidentes con muertos, superando el estimado de 18%
Finlandia	Una vez instalada la barrera de cables, se estima una reducción del 80% en accidentes
Francia	Reducción promedio del 70% del índice de mortalidad
Suecia	Reducción aproximada del 60% en la tasa de mortalidad

Un análisis realizado en 2012 sobre las carreteras mexicanas de dos carriles demostró que el índice de severidad es más elevado en las carreteras de cuota que en las libres. En un análisis exploratorio y utilizando el listado de carreteras publicado en los Anuarios Estadísticos de Accidentes, se seleccionaron 27 carreteras que cumplen con las características para el objeto de este estudio –carreteras de cuota con accesos controlados y de un carril por sentido–; para este grupo se obtuvo información de siniestralidad durante el periodo 2010-2013, lo que da como resultado un total de más de tres mil colisiones, con un saldo de 796 fallecidos y 3,477 lesionados, siendo los choques de frente los de mayor severidad, mismos que concentran el 25 y 17% de los muertos y lesionados, respectivamente.

La sección propuesta en este trabajo para la configuración 2+1 consta de tres carriles con diferente ancho cada uno. En la medida de lo posible, el sentido con un solo carril debe mantener un ancho mínimo de 5 m que permita alojar un vehículo que se encuentre detenido y el paso de otro vehículo a muy baja velocidad. Para el sentido con dos carriles de circulación, en el carril central se propone un ancho de 3.25 m, considerando que casi de manera exclusiva será utilizado por vehículos ligeros, permaneciendo los vehículos pesados en el carril derecho. La faja separadora central en las zonas 2+1 conserva un ancho de 1.5 m y esta separación es mayor en las zonas de transición. A los acotamientos se les asignó un ancho de 0.5 m, el cual se mantiene a lo largo de toda la carretera 2+1. A pesar de que este ancho no es suficiente para alojar a un vehículo, se considera de manera simbólica para no conducir sobre la orilla de la corona con el riesgo de chocar lateralmente con un muro o talud.

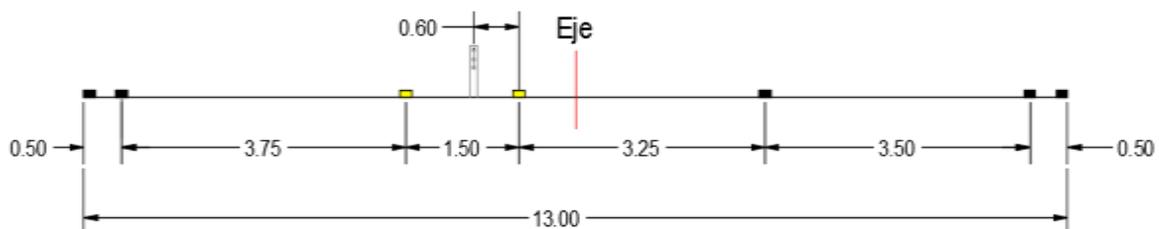


Figura I.3 - Sección tipo propuesta para carretera 2+1

Se sugiere que la barrera central sea de cables tensados ya que ante un impacto la energía liberada se disipa por la deflexión de los cables reduciendo la deformación del vehículo y en consecuencia las lesiones de los ocupantes. Es importante aclarar que estas barreras requieren un ancho de trabajo mayor, de tal manera que es muy probable que ante una colisión el vehículo invada parcialmente el sentido contrario, no obstante se esperaría que las consecuencias del impacto fueran menores, en comparación con un choque frontal.

Por otra parte, la deflexión de la barrera está en función de algunas variables como nivel de contención, espaciamientos entre postes y separación de puntos de anclaje; por lo tanto, se recomienda que para el caso específico de la barrera de

cables como separador de sentidos de circulación se adopten las medidas necesarias para reducir la deflexión del sistema.

En atención a las recomendaciones dictadas por Suecia y considerando las pautas de diseño geométrico de la AASHTO, la barrera central de cables se ubicará a 60 cm del carril central en el sentido con dos carriles de circulación; por lo tanto, en el caso de un impacto, la barrera tendrá mayor espacio para deflexionarse hacia el sentido del carril único.

El área neutral crítica se compone de tres tramos: el primero, en el cual uno de los sentidos tiene un carril de operación y en el otro sentido inicia la transición de convergencia a un carril; el segundo, donde ambos sentidos tienen un carril de circulación en una longitud que es aproximadamente el 40% de la distancia anterior y que sirve de holgura en caso de una maniobra de cambio de carril inconclusa; y el tercero, que conserva las mismas características que el primer tramo, solamente que ahora para el sentido contrario. Para el diseño de las transiciones en las áreas neutras críticas, se utilizó la fórmula de distancia longitudinal de encauzamiento (ecuación 1). Para el área neutral no crítica se propone que las transiciones sean de un tercio de la longitud de la transición crítica. En este caso, debido a que la maniobra de divergencia no presenta riesgos importantes, no se contempla la velocidad de operación.

$$L = 0.6 * W * S \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

L = Longitud de la transición en terminación de carril, en metros.

W = Ancho del carril que se cerrará, en metros.

S = Velocidad de operación, en km/h.

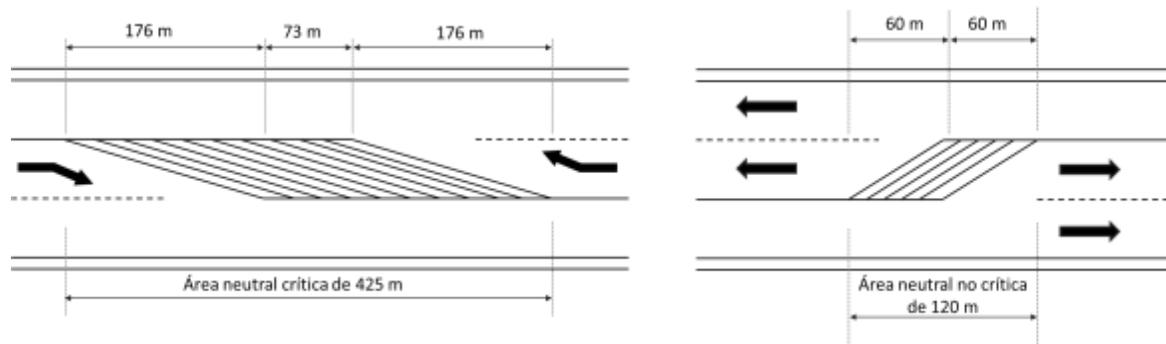


Figura I.4 Diseño de áreas neutras para una velocidad de 90 km/h

Debe ponerse especial cuidado en la ubicación de las zonas de transición crítica procurando que dichas zonas no se encuentren ubicadas en puntos donde la visibilidad se encuentre comprometida. El intervalo de longitud del carril central se mantuvo —según la propuesta de Suecia— entre 1 y 2 kilómetros. Esta longitud se mide a partir de la transición del área neutral no crítica, hasta la mitad del área neutral crítica. En la medida de lo posible, se debe buscar que la longitud del carril central sea uniforme para ambos sentidos; es decir, que se tengan los mismos

posibilidades de rebase. Por cuestiones de seguridad se recomienda que en puentes, túneles y entronques no se aplique la configuración 2+1 y que previamente a estos puntos la operación vehicular de la carretera sea convencional, es decir un carril por sentido.

En carreteras en las que se mantiene la configuración de 2+1 en toda su longitud, se debe proveer de aberturas en la faja separadora central para las maniobras de los vehículos de emergencia (policía, bomberos, ambulancia, grúa). También se deben considerar zonas de resguardo, que tienen la función de proporcionar espacio para que los vehículos puedan estacionarse en caso de emergencia sin entorpecer o impedir el flujo vehicular, y se deberán colocar en lado en el que se tiene un carril único.

Es importante reconocer que el conductor mexicano desconoce la operación de la configuración 2+1. Aunque puede estar familiarizado con el tercer carril de ascenso donde las maniobras las realiza el conductor del vehículo lento –desplazándose al carril de la derecha–, en la configuración 2+1 el carril derecho se mantiene en todo el trayecto, y el vehículo que desea rebasar es el que realiza las maniobras de divergencia y convergencia. De esta forma, el éxito de la configuración 2+1 está directamente relacionado con el señalamiento horizontal y vertical que le indique las características de la infraestructura y las maniobras que debe realizar, a través de un lenguaje de símbolos que sea claro y preciso, tratando en la medida de lo posible de respetar los lineamientos en vigor.

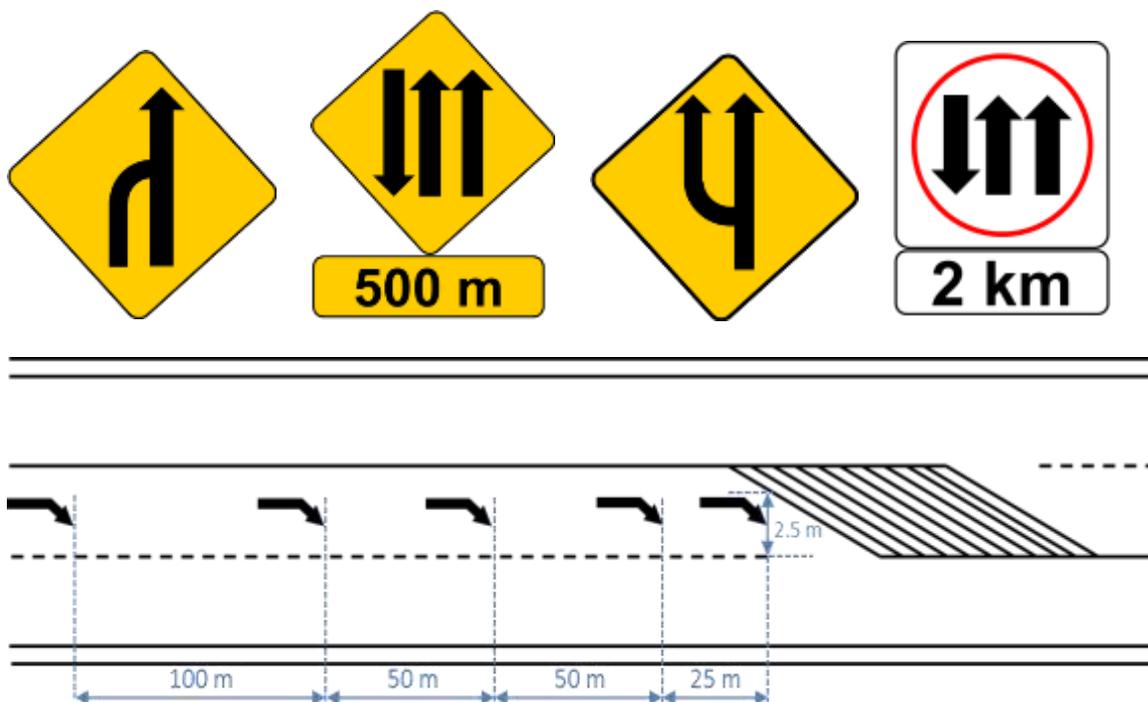


Figura I.5 Propuesta de señalamiento vertical y horizontal para las carreteras con la configuración 2+1

Se analizaron dos tramos de carretera que pueden ser candidatos a la configuración 2+1. En el tramo de La Pera-Cuautla resultó atractivo, ya que —según las estimaciones— arroja beneficios no sólo en la reducción de colisiones y víctimas, sino que también reduce el porcentaje de tiempo que los vehículos pasan en fila esperando una oportunidad de rebase. En esta vía existía un proyecto de ampliación a cuatro carriles que se ha suspendido de manera indefinida por cuestiones de impacto ambiental. Por ello, plantear un proyecto de ampliación para alojar una sección de 2+1 pudiera tener una mejor aceptación dado que el área de afectación sería menor.

El otro tramo analizado pertenece a la carretera Las Choapas-Ocozocuahtla, que en los últimos años ha reportado altos índices de siniestralidad. En este caso, los percances predominantes no son frontales y las condiciones de operación en cuanto al nivel de servicio aún son buenas, pero con todo la configuración 2+1 aportaría beneficios a la vía.

A manera de conclusión y no obstante las ventajas mencionadas de la configuración 2+1, ésta es una propuesta de solución de vida útil limitada y que subsana una deficiencia en el diseño geométrico de carreteras que se concibieron sin considerar zonas para efectuar las maniobras de rebase, y esta carencia no necesariamente se refleja en el nivel de servicio que ofrece la infraestructura sino en la siniestralidad. Ante este panorama, se propone la configuración 2+1, para carreteras existentes con altos índices de siniestralidad, asociados a maniobras de rebase no exitosas, mientras que, para carreteras nuevas, se invita a las autoridades a incluir dentro de los lineamientos de diseño que el trazo de la carretera cuente con un porcentaje mínimo de zonas de rebase de manera obligatoria.

Referencias

- AASTHO (2001), *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets 2001*, American Association of State Highway and Transportation Officials, EE. UU.
- B. Potts, Ingrid y Douglas W. Harwood (2003), *Application of European 2+1 Roadway Designs*, National Cooperative Highway Research Program, núm. 275, abril de 2003, EE. UU.
- Cuevas, Cecilia *et al.* (2012), *Evaluación de tramos carreteros en función de una siniestralidad esperada*, revista Vías Terrestres, núm. 16, página 14, Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C., Ciudad de México.
- Gerondeau, Christian *et al.* (2007), *Experiencia sueca y francesa en las carreteras 2+1L vías tan seguras como las autopistas*, revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, cuarta época, núm. 153, mayo-junio, pp. 26-37, España.
- IMT (2015), *Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales 2010 a 2013*, Instituto Mexicano del Transporte, documentos técnicos núm. 51, 56, 57 y 61, Sanfandila, Querétaro.
- Vallés R., Miguel (2011), “Comentarios a las normas de trazado; casos prácticos generales”, memorias del Curso Internacional de Seguridad en Carreteras 2011, Sanfandila, Querétaro.
- NCHRP (2012), “Guidance for the Selection, Use, and Maintenance of Cable Barrier Systems”, National Cooperative Highway Research Program , Report 711, Transportation Research Board of the National Academies, EE. UU.
- SAHOP (1977), *Manual de proyecto geométrico de carreteras*, Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), Ciudad de México.
- SCT (1984), *Normas de servicios técnicos: proyecto geométrico*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
- SCT (2012), *Norma Oficial Mexicana NOM-037-SCT2-2012*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México.
- SCT (2013), *Velocidades de punto 2013*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
- SCT (2014), *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.

- SCT (2015), *Volúmenes de tránsito registrados en las estaciones permanentes de conteo de vehículos*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
- SCT (2015), *Datos viales 2014*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
- TRB (2010), *Highway Capacity Manual*, capítulo 15 “Two-Lane Highways”, volumen II, Transportation Research Board, EE. UU.
- Weber, Roland *et al.* (2008), “2+1 roads – new findings from Germany”, Traffic Engineering & Control, volumen 49, núm. 4, abril de 2008, Inglaterra.

1. Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS) dicta que los traumatismos causados por accidentes de tránsito constituyen un problema importante pero descuidado de la salud pública mundial, cuya prevención efectiva y sostenible requiere esfuerzos concertados. En México cada año mueren más de 15 mil personas por colisiones de tránsito; además, está demostrado que algunas características de la infraestructura constituyen un factor de riesgo tanto para la ocurrencia como para la severidad de los siniestros.

1.1 Antecedentes y objetivos

Se ha demostrado que en las carreteras de cuota de dos carriles el índice de severidad es más elevado que en carreteras libres de dos carriles, lo que se traduce en un saldo de víctimas considerable. Este documento busca sentar las bases para la implementación de carreteras 2+1 en vías de cuota de un carril por sentido con problemas de siniestralidad, así como obtener estimaciones sobre la reducción del número de víctimas y la mejora en el nivel de servicio.

Actualmente en México, no se cuenta con información metodológica respecto al diseño de carreteras 2+1; solamente existen lineamientos para el diseño de carriles de ascenso (tercer carril de ascenso), implementados en algunas carreteras de dos carriles del país. Ambos tipos de infraestructuras comparten parcialmente el mismo objetivo: evitar la formación de pelotones y facilitar las maniobras de rebase.

Países como Suecia, Dinamarca, Finlandia, Alemania y Francia reaccionaron a la problemática que presentaban las carreteras de dos carriles con amplios acotamientos y que, además, por la demanda de flujo vehicular no se justificaba la ampliación a cuatro carriles. Bajo este esquema surgió la configuración de las carreteras 2+1, implementada por primera vez en Suecia en los años noventa, y que posteriormente formaría parte de una de las tantas medidas de la “Visión Cero”, cuyo objetivo es que no ocurra ninguna muerte o lesión grave por colisiones de tránsito.

Las carreteras modificadas a la configuración 2+1 han mostrado reducciones en cuanto al número y severidad de las colisiones; por lo tanto, un objetivo es:

Realizar una evaluación del beneficio en términos de seguridad vial a partir de la modificación de una carretera de

cuota de dos carriles con acotamientos, a una carretera 2+1 con barrera central de cables.

Mediante el análisis de los requerimientos internacionales físicos y técnicos de las carreteras 2+1, un segundo objetivo es:

Establecer los lineamientos para el diseño de carreteras 2+1 que mejor se adaptan a las condiciones de las carreteras de nuestro país.

1.2 Estado del arte

“Carretera 2+1” se denominan aquellas carreteras que se componen de tres carriles de circulación y una división central, la cual puede ser mediante una barrera de cables tensados, barrera de concreto o simplemente señalamiento horizontal. La configuración en cuanto a la operación de los tres carriles es que dos de ellos (el central y el de un extremo) se utilizan en cierto tramo para un sentido, y posteriormente se alterna el carril central para el otro sentido.

El carril central se alterna en intervalos regulares, modificando la trayectoria de la división central que separa los sentidos de circulación y que restringe las maniobras de rebase a fin de evitar los choques frontales. Esta alternancia permite que ambos sentidos efectúen la maniobra de rebase de manera segura, en un sentido a la vez; es decir, mientras el carril central se incorpora a uno de los dos sentidos de circulación, el otro sentido (con un solo carril) tiene que esperar a que el carril central se invierta y se incorpore a este otro sentido. La figura 1.1 muestra un esquema de la configuración 2+1; se observan zonas achuradas en la parte central que representan las áreas neutras críticas y no críticas.

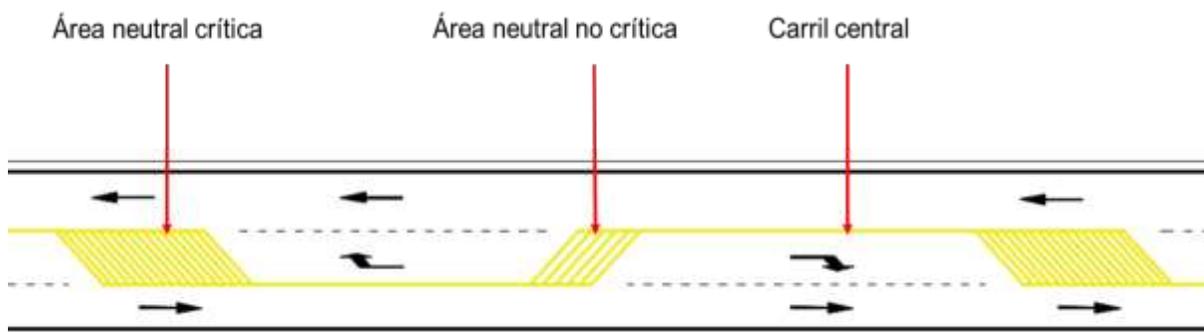


Figura 1.1 Esquema de carretera 2+1

Se llama “área neutral crítica” a la zona donde convergen el carril central y el del extremo, es decir en el punto donde termina el carril central y la oportunidad de rebasar; se califica como crítica ya que el vehículo que utiliza el carril central tiene que buscar la brecha, ya sea acelerando o frenando para incorporarse al carril de su derecha. Se llama “área neutral no crítica” a la zona donde comienza el carril

central; en este caso, la maniobra de cambiar al carril central no conlleva riesgos importantes; de ahí que reciba el nombre de “no crítica”.

Sobra decir que en las áreas neutrales solamente hay un carril para cada sentido de circulación; estas áreas están precedidas por la transición de convergencia y divergencia entre el área neutral crítica y no crítica, respectivamente. Son precisamente las maniobras de convergencia o divergencia las que definen la longitud del área neutral; es decir, el área neutral tiene mayor longitud cuando se encuentra en las zonas críticas (de convergencia), con lo cual se brinda un espacio de holgura en caso de que un vehículo no llegase a completar la maniobra de incorporación al carril de la derecha, y una menor longitud cuando se encuentra en las zonas no críticas (de divergencia).

Las reglas de operación se basan en la premisa de que los vehículos lentos o pesados deberán mantenerse en los carriles extremos, permitiendo que los vehículos que circulan a mayor velocidad utilicen el carril central para rebasar, y así evitar la formación de pelotones.

En los diferentes países que han implementado las carreteras 2+1 se han llevado a cabo estudios para determinar el intervalo de longitud para alternar el carril central. Todos coinciden en que éste no debe ser muy corto porque propician maniobras de rebase arriesgadas, pero tampoco muy largo porque el carril sería subutilizado y desincentivaría las maniobras de rebase. Otra característica de las carreteras 2+1 es que mejoran el nivel de servicio, sin que ello signifique que aumente la capacidad de la vía.

Caso Alemania

Antes de implementar el concepto 2+1, Alemania contaba con carreteras de dos carriles de características diferentes, pero que desde el punto de vista operativo funcionaban igual:

- La primera se distinguía por tener acotamientos amplios pavimentados, con el objetivo de resguardar vehículos que por alguna causa tuvieran que orillarse en la carretera o circular más lento (por ejemplo, averiados, de emergencia, agrícolas, o de mantenimiento).
- El segundo tipo proveía carriles de circulación amplios, que incluían el ancho del acotamiento con el objeto de que los vehículos lentos se orillaran y permitieran pasar a los más rápidos.

Posteriormente en 1996, se implementó la configuración 2+1, con la idea de no añadirle una barrera física entre los sentidos de circulación; por ello se optó por marcas en el pavimento y dentro de los “Lineamientos para Secciones Transversales” [1] estandarizaron la sección transversal denominándola “RQ15.5”.

La figura 1.2 muestra las tres configuraciones de las carreteras 2+1 utilizadas comúnmente en Alemania [2], notando que cada una tiene un ancho diferente de

sección y que seguramente se debe al espacio disponible; sin embargo, estas variantes también podrían obedecer al tipo de los vehículos que circulan por la carretera. Se podría asumir que la sección de 12 m es para carreteras que dan servicio a flujo mixto (vehículos pesados y ligeros), mientras que la sección de menor ancho, seguramente se destina a caminos con restricción de vehículos pesados. Además, se puede observar que en las tres secciones no hay variación en el acotamiento ni tampoco en la separación de los sentidos, siendo únicamente el ancho de los carriles el que varía dependiendo de la sección. La tabla 1.1 muestra un resumen con las principales características de las carreteras 2+1 en Alemania, con algunos datos específicos de la sección y de las características de operación.

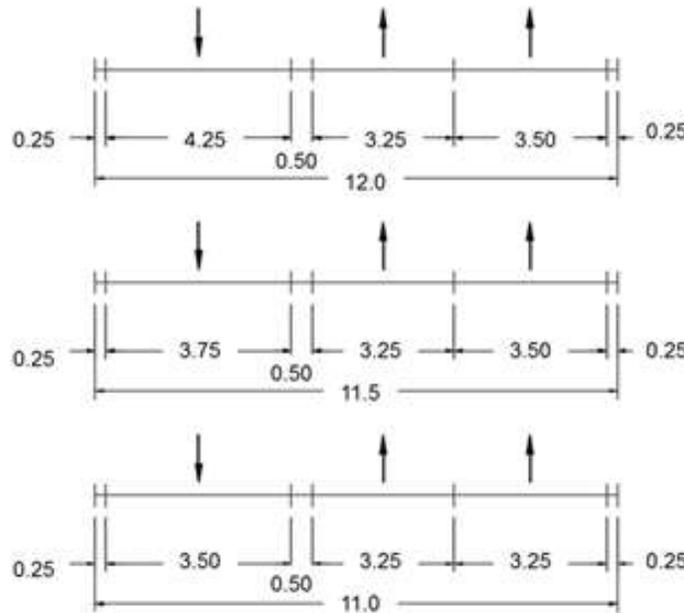


Figura 1.2 Secciones típicas de carreteras 2+1 utilizadas en Alemania

Después de la implementación de este concepto, se observó una disminución en las muertes por colisiones, lo que motivó el desarrollo de investigaciones para evaluar el desempeño en materia de seguridad vial. En 2003, como parte de un estudio [2], se analizaron siete tramos carreteros 2+1 con una longitud total de 60 km, para los cuales se recabó información sobre los siniestros ocurridos de 1999 al 2001. Se comparó la estadística y se observó que en el año 2000 en toda la red se registraron 38,754 accidentes, de los cuales 5,816 (15%) fueron choques frontales, y en los tramos analizados durante el mismo periodo solamente se registraron tres impactos de este tipo. Además, se menciona que durante el estudio no hubo ningún indicio de disminución u obstrucción del flujo vehicular, ni creación de pelotones por la apertura de la vía al tránsito mixto, a pesar de que se observaron algunas bicicletas y poca presencia de vehículos pesados. En otro de los estudios [2], se obtuvo información de colisiones, valores de tránsito diario promedio anual (TDPA) y las tasas de accidentes para diversos tipos de carreteras en Alemania (véase tabla 1.2).

Tabla 1.1 Características de las carretera 2+1 en Alemania

Características	Medidas
Ancho de calzada	11.0, 11.5, 12.0 m
Separación de sentidos	0.5 m con marcas de pintura
Ancho de acotamiento	0.25 m
Ancho de carriles	3.25, 3.50, 3.75, 4.25 m
Límite de velocidad	100 km/h
Longitud de transición crítica	180 m
Longitud de transición no crítica	30-50 m
Tipos de vehículos	Ligeros/Carga
Longitud del carril central	1.0-1.4 km
Intervalo del carril central	1-2 km (dependiendo del alineamiento)
Rangos actuales del TDPA	8,000-22,000 vehículos

TDPA: tránsito diario promedio anual.

Elaboración propia con base en la referencia 2.

Tabla 1.2 Tasa típicas de accidentes para diferentes carreteras en Alemania

Carriles	Tipo de vía	TDPA	Tasa de accidentes ¹	
			Colisiones con víctimas	Total de colisiones
6	Autopista libre	61,000	0.13	0.35
4	Autopista libre	31,000	0.13	0.39
4	Carretera dividida con acotamientos anchos	19,500	0.15	0.37
4	Carretera dividida	16,600	0.19	0.39
4	Carretera no dividida	12,100	0.21	0.39
2+1	Carretera	14,100	0.16	0.28
2	Carretera con carriles anchos	11,900	0.28	0.49
2	Carretera con acotamientos anchos ²	9,800	0.19	0.35
2	Carretera (convencional)	10,300	0.25	0.39
2	Carretera (carriles angostos)	3,500-6,300	0.22-0.44	0.39-0.71

¹ Por cada millón de vehículos-kilómetro

² Con acotamientos pavimentados suficientemente amplios que pueden utilizarse para circular y permitir el rebase

TDPA: tránsito diario promedio anual

Luego de analizar la información de la tabla anterior y recordando que el índice depende del número de accidentes y el flujo vehicular, sería lógico pensar que en este caso el menor índice de las carreteras 2+1 pudiera deberse al mayor tránsito que registran; desafortunadamente la fuente de información no proporciona datos

adicionales; sin embargo, haciendo un cálculo simple se estima que, cuando la carretera de dos carriles con acotamientos amplios alcance un TDPA de 14 mil vehículos, se esperaría un valor de 0.98 accidentes con víctimas por km, mientras que dicho valor para la carretera de configuración 2+1 es de 0.82.

Expertos alemanes concluyen que, en términos de seguridad, las carreteras 2+1 tienen un mejor desempeño que las carreteras de dos carriles con acotamientos anchos, las carreteras con carriles anchos e incluso las carreteras de cuatro carriles no divididas.

Caso Loira, Francia

Este departamento se encargó de modificar una sección 2+1 en nueve de los 10 km de la carretera denominada RD 201 con un TDPA de 30 mil vehículos, que se muestra en la figura 1.3. Aunque el índice de accidentes graves en este tramo no era superior en comparación con la media, el número de muertos en choques frontales era claramente superior al valor medio nacional.



Fuente: Google Maps

Figura 1.3 Puntos de convergencia en la carretera 2+1, en Francia

Inicialmente la separación de los sentidos de circulación estaba señalizada únicamente con pintura, hasta que en los años noventa se implementaron otras medidas con miras a reducir el número de colisiones; entre éstas se mencionan: (i) el refuerzo de las marcas horizontales, enmarcando ambas líneas de la faja separadora con una línea color rojo, (ii) la modificación de los intervalos del carril central y (iii) el refuerzo del señalamiento vertical en las zonas de intercambio del carril central. Todas las medidas fueron efectivas por muy poco tiempo, ya que los conductores continuaban realizando maniobras de rebase en zonas indebidas y no respetaban el señalamiento horizontal, lo que provocó nuevamente un alza en el número de muertos por choques frontales.

Ante este desfavorable panorama se llegó a la conclusión que se debía separar por completo ambos sentidos, por lo que se colocó una barrera central de concreto. Para alojar la barrera, se redujo el ancho del carril central y se prohibió que los vehículos pesados circularan por éste. Adicionalmente, a lo largo de este tramo de carretera 2+1 se dejaron zonas de resguardo para que los vehículos que necesitaran detenerse no interrumpieran el flujo del tránsito; también se habilitaron aberturas en la barrera central para facilitar las maniobras de los vehículos de emergencia o para la evacuación de vehículos accidentados, ya que el

acotamiento no era del ancho suficiente para proteger un vehículo ni era transitable. La modificación de los nueve kilómetros de la carretera a la sección 2+1 se realizó en tres fases:

- Fase I en 1997, del km 0+000 al km 2+500
- Fase II en 1999, del km 2+500 al km 5+500
- Fase III en 2000, del km 5+500 al km 9+000

La tabla 1.3 muestra las cifras totales por tipo de víctima para cada una de las fases antes y después de la colocación de la barrera de concreto. Dado que el número de años antes y después es distinto, se obtuvieron índices por año, por ejemplo: en la fase I, antes de la modificación (10 años) se contabilizaron dos fallecidos; por lo tanto, el índice medio anual es de 0.2 muertos por año.

Tabla 1.3 Número de víctimas e índice medio anual de la carretera RD 201, agrupado por fases antes y después de la modificación

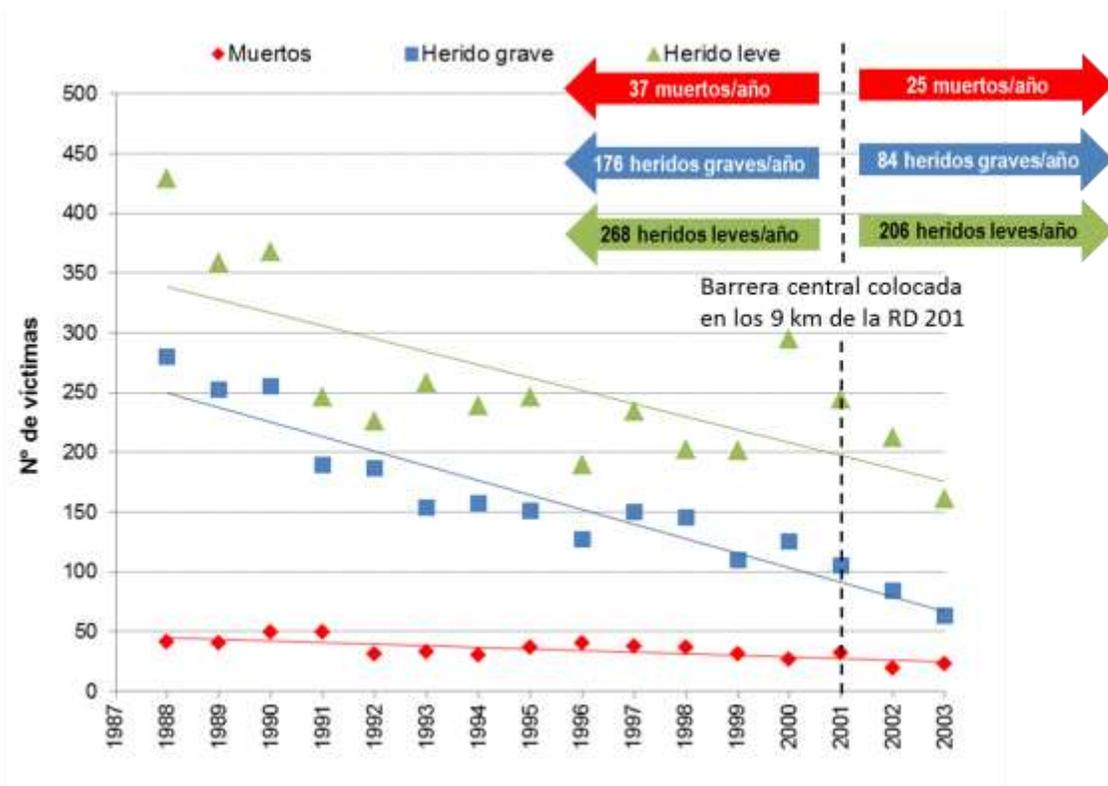
Fase y periodos de las modificaciones		Suma de víctimas			Índice medio anual		
		Muertos	Lesionados graves	Lesionados leves	Muertos/año	Lesionados graves/año	Lesionados leves/año
Fase I	1988 - 1997	2	7	18	0.20	0.70	1.80
	1998 - 2003	0	2	6	0.00	0.33	1.00
Fase II	1988 - 1999	3	6	12	0.25	0.50	1.00
	2000 - 2003	1	0	2	0.25	0.00	0.50
Fase III	1998 - 2000	4	8	23	0.31	0.62	1.77
	2000 - 2003	0	0	8	0.00	0.00	2.67
Antes de la modificación		9	21	53	0.26	0.60	1.51
Después de la modificación		1	2	16	0.08	0.15	1.23

Elaboración propia con base en la referencia 3

En la tabla anterior se observa que en la mayoría de las fases se registró una reducción en los indicadores, excepto en la fase III para lesionados leves (con un incremento de 1.77 a 2.67), así como el índice de muertos de la fase II, que se mantuvo igual, con 0.25. Los últimos dos renglones contienen los saldos de víctimas antes y después de la modificación en las tres fases y un promedio ponderado de los indicadores. Cada uno de éstos reporta buenos resultados —por ejemplo, el número de muertos se redujo un 69%, el de lesionados graves un 75% y el de lesionados leves reporta una reducción de 18%—, menor que los otros índices pero sigue siendo un desempeño positivo para la seguridad vial.

Ahora bien, cuando se analizan tendencias es importante ampliar el área de estudio para valorar si los resultados corresponden de manera exclusiva a la variable modificada, que en este caso corresponde a la colocación de la barrera central. En este sentido se revisó la información disponible para el departamento de Loira. La figura 1.4 muestra gráficamente el número de víctimas para un conjunto de vialidades durante el periodo de 1988 a 2003. Es evidente que el desempeño de la seguridad en todo el departamento es favorable, así que puede decirse que el efecto positivo en el tramo RD 201 pudiera no deberse únicamente a la colocación de la barrera central.

Se calculó el índice medio anual por tipo de víctima para el conjunto de vialidades del departamento, tomando como parteaguas el año 2001, ya que, a partir de este año, el tramo de 9 km operó con la barrera central. Antes de 2001 todo el departamento registró 37 muertos/año, y de 2001 a 2003 este valor fue de 25, es decir disminuyó 34%, mientras que para heridos graves y leves la disminución fue de 52 y 23%, respectivamente. En comparación con los porcentajes de reducción de todo el departamento y el tramo modificado de la RD 201, se concluye que el efecto de la barrera central fue muy positivo en cuanto al número de víctimas mortales y lesionados graves.



Elaboración propia con base en la referencia 3

Figura 1.4 Número de víctimas registrado en el conjunto de vías del departamento de Loira, en el periodo 1988-2003

Caso Dinamarca

Motivados por los buenos resultados observados en otros países, Dinamarca comenzó en 1993 con la modificación de algunos tramos de dos carriles a 2+1.[2] Inicialmente utilizaron pintura —en vez de barrera— para dividir los sentidos de circulación y conservaron el mismo ancho; en uno de los tramos la longitud para el carril central fue de 350 m, aunque posteriormente, reconocieron que la longitud óptima es de 1 km.

Un estudio de antes y después realizado en los tramos modificados a 2+1 reflejó que el desempeño en la seguridad vial fue de una reducción del 73% de las colisiones con muertos, superando por mucho sus expectativas, ya que estimaban una reducción del 18% (véase la tabla 1.4).

Tabla 1.4 Número de colisiones antes y después en los tramos modificados a 2+1 en Dinamarca

Colisión con:	Valores		
	Observado		Esperado
	Periodo antes	Periodo después	
Sólo daños materiales	42	50	35
Lesionados	61	49	50
Lesionados y/o muertos	100	83	83
Muertos	11	3	9

Elaboración propia con base en la referencia 2

En uno de los estudios realizados en Dinamarca respecto a las carreteras 2+1 se analiza el comportamiento de los conductores en los últimos 100 m del carril central, para determinar el porcentaje de vehículos que invadían el área neutral crítica o frenaban durante la maniobra de cambio de carril –convergencia-. Entre los hallazgos del estudio destacan los siguientes:

- Del 2 al 4% de los vehículos rebasa en los últimos 100 m del carril de rebase, pero este porcentaje se puede incrementar en relación directa con el volumen de tránsito.
- En dos de las secciones de prueba con velocidad restringida de 80 km/h, alrededor del 60% de los vehículos pasan del carril de rebase al carril derecho antes de que inicie la zona de transición, cerca del 30% realiza este cambio a lo largo de la transición y entre el 12 y 14% para realizar la maniobra de convergencia circulan sobre las marcas del pavimento que delimitan el área neutral crítica.
- En otra sección de prueba catalogada como vía rápida y con límite de velocidad de 90 km/h, un porcentaje alto realiza la convergencia del carril central al derecho durante la zona transición; sin embargo, sólo entre el 5 y

7% de los vehículos que pasan en los últimos 100 m circulan sobre las marcas del pavimento que delimitan el área neutral crítica.

- Alrededor del 80% de las convergencias se realizan sin accionar los frenos.

Caso Finlandia

En Finlandia [2] la única modificación que se realizó para adaptar sus carreteras de dos carriles a la configuración 2+1 fueron las marcas del pavimento, conservando el ancho de 13 m. Actualmente desean cambiar su sección, modificando el ancho de los carriles y acotamientos y agregando una barrera central de cables, para lo cual necesitan ampliar el ancho de la sección en 1.35 m (véase la figura 1.5). Con estos cambios estiman obtener una reducción del 80% en el número de colisiones.

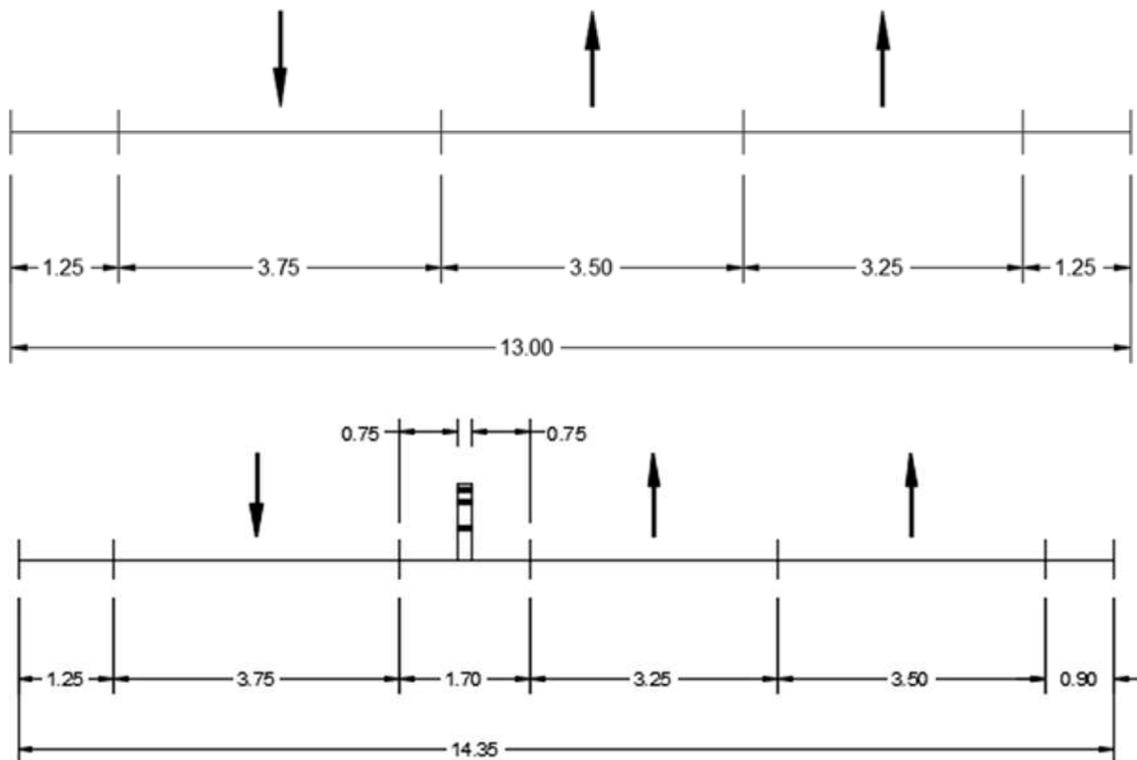
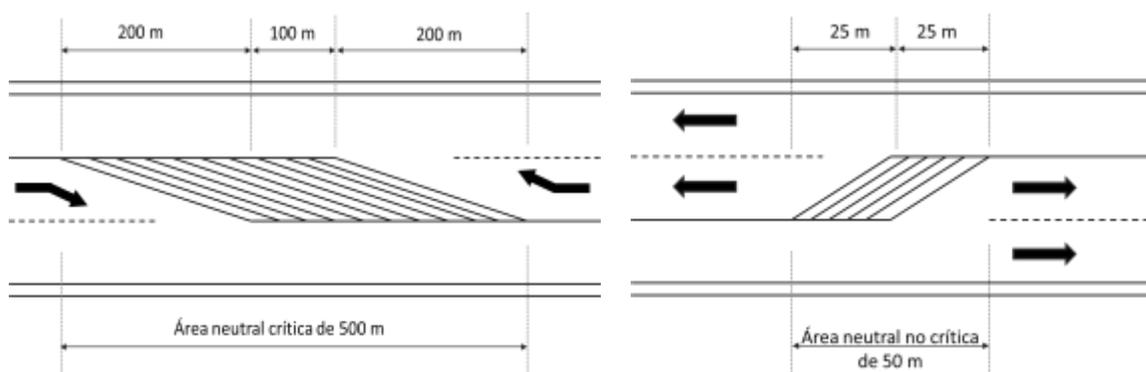


Figura 1.5 Sección transversal de la configuración 2+1 con y sin barrera central, Finlandia [2]

Para evitar la confusión de los usuarios respecto al uso del carril central, los finlandeses optaron por marcar las áreas neutras de manera que se distinguieran las áreas neutras críticas de las no críticas (véase la figura 1.6). El señalamiento horizontal para el área neutral crítica consiste en marcas en el pavimento en una longitud de 500 m y se componen de tres tramos: los tramos de los extremos son de 200 m y tienen la función de transición para reducir el ancho del carril central hasta la desaparición del mismo; el tramo intermedio tiene una longitud de 100 m en la cual el carril central ya forma parte del área neutral, y

solamente se tiene un carril por sentido. Mientras que las áreas neutras no críticas tienen una longitud total de 50 m y se componen de dos tramos de 25 m cada uno, la función es indicar el inicio del carril central. Evidentemente la probabilidad de un choque frontal es mayor en el área neutral crítica, por lo que se provee de una longitud de amortiguamiento, la cual puede utilizarse en caso de que un vehículo no haya terminado de incorporarse al carril extremo.



Elaboración propia con base en la referencia 2

Figura 1.6 Dimensiones del área neutral en la adición y desaparición del carril central en Finlandia

A manera de resumen, se muestra a continuación una tabla con información recopilada referente a las características de diseño y operación.

Tabla 1.5 Características de la carretera 2+1 en Finlandia

Características	Medidas
Ancho de calzada	13.0 m
Separación de sentidos	Pintura
Ancho de acotamiento	1.25 m
Ancho de carriles	3.25, 3.50, 3.75 m
Límite de velocidad	100 km/h
Longitud de transición crítica	500 m
Longitud de transición no crítica	50 m
Tipos de vehículos	Mixto
Longitud del carril central	1.5 km
Capacidad	1,600-1,900 veh/h

Elaboración propia con base en la referencia 2

Caso Suecia

Como se comentó anteriormente, el concepto 2+1 surge en Suecia y no se esperaba que el impacto en la seguridad fuera tan positivo; en aquel momento sus recursos eran limitados, por lo que no podían hacer grandes modificaciones. Las carreteras tenían un ancho de 13 m e inicialmente la separación de sentidos fue únicamente con pintura; posteriormente, se colocó la barrera central de cables tensados.

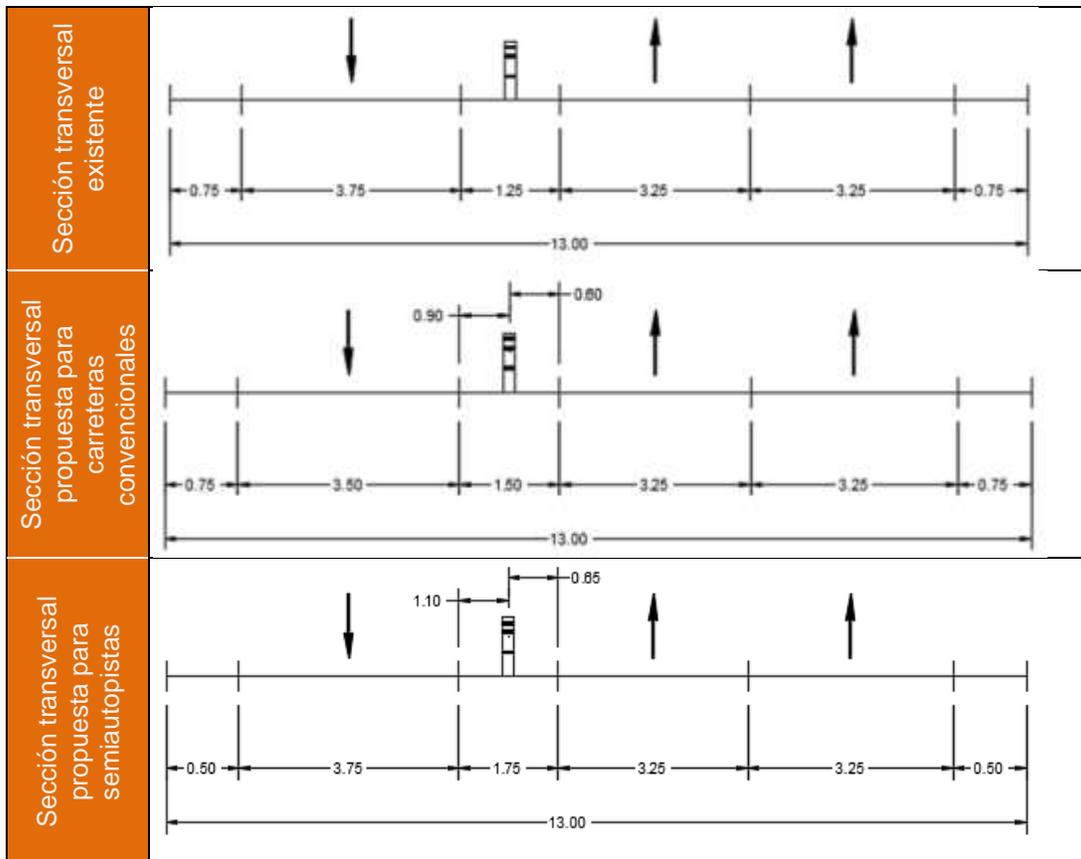


Figura 1.7 Carretera 2+1 en Suecia

Por ser el país pionero en este tipo de carreteras, Suecia es el que más estudios y experiencia tiene respecto a su diseño y operación. Con el tiempo han modificado ciertas características siempre en la búsqueda de reducir el número de muertes y heridos graves en accidentes. Los recientes cambios son recomendaciones que surgen de una revisión de lineamientos y proponen distribuciones distintas en cuanto a los anchos de carriles y acotamientos en función del tipo de carretera, ya sea convencional o semiautopista, para anchos de calzada de 13 y 14 m. La figura 1.8 muestra las diferentes secciones para las carreteras 2+1 en Suecia con un ancho total de 13 m, aunque también presenta diseños para 14 m de ancho.

La barrera de cables más utilizada por los suecos que, con base en su experiencia, ha sido la que mejor desempeño y resultados ha arrojado es la tipo “CEN N2” que puede estar compuesta por tres o cuatro cables. Ésta se ha sometido a pruebas de impacto con vehículos ligeros a una velocidad de 100 km/h y un ángulo de 20 grados alcanzando una deflexión de entre uno y dos metros. Ahora bien, para las secciones propuestas que se muestran en la figura 1.8, la barrera no se coloca al centro del espacio divisor de los sentidos de circulación, sino que el acotamiento interno es mayor para el sentido de un solo carril.

La tabla 1.6 muestra algunas características de diseño y operación de las carreteras 2+1 en Suecia.



Elaboración propia con base en la referencia 2

Figura 1.8 Diferentes tipos de secciones para carreteras 2+1 en Suecia

Tabla 1.6 Características de la carretera 2+1 en Suecia

Características	Medidas
Ancho de calzada	13 – 14 m
Separación de sentidos	1.50 – 1.75 m con barrera de cables CEN N2
Ancho de acotamiento	0.5-0.75m
Ancho de carriles	3.25, 3.5, 3.75 m
Límite de velocidad	90-110 km/h automóviles, y 80 km/h carga
Longitud de transición crítica	300 m
Longitud de transición no crítica	100 m
Tipos de vehículos	Mixto
Longitud del carril central	1 - 2 km
Intervalo del carril central	1 - 2 km
Capacidad	1,600-1,700 veh/h
Rangos actuales de TDPA	4,000 a 20,000 veh/día

Elaboración propia con base en la referencia 2

En algunas intersecciones a nivel, para las maniobras de vuelta izquierda, Suecia decidió dejar un carril de almacenamiento central; sin embargo, previamente a dicho carril los flujos se canalizan y en cada sentido de circulación sólo hay un carril.

En cuanto al desempeño de estas carreteras en materia de seguridad vial, diferentes estudios [3] han reafirmado el excelente impacto generado en la reducción de muertes por choques frontales; por ejemplo: en un estudio en las carreteras interurbanas convencionales de Suecia —que tienen un límite de velocidad de 90km/h—, se presenta una tasa de mortalidad que varía de 0.55 a 0.75 muertos por cien millones de kilómetros recorridos, esto dependiendo de la existencia o no de acotamiento. Una vez realizada la modificación de estas vías al tipo 2+1, las tasas bajaron en promedio a 0.2 y 0.3 muertos por cien millones de kilómetros recorridos si la velocidad se limitaba a 90 y 110 km/h, respectivamente. Estos datos indican de manera general que el factor de reducción que se tiene al implementar esta solución, es de tres.

En la mayoría de los países analizados, las intersecciones se modificaron para que los movimientos de mayor riesgo se realizaran a desnivel; no obstante aún existen cruces a nivel pero en éstos se suprime la configuración 2+1; es decir, previo a la intersección se deja un carril por sentido y en la proximidad de la intersección se diseñan los carriles necesarios para efectuar los movimientos direccionales (aceleración, desaceleración o de almacenamiento para vuelta izquierda). Eliminar la configuración 2+1 en las intersecciones ayuda a evitar confusiones en los usuarios. Otras zonas donde es recomendable eliminar la configuración son puentes largos, túneles y tramos con alta densidad de accesos, peatones frecuentes y ciclistas.

Como se ha explicado, la barrera de cables en este tipo de carreteras tiene como objeto separar físicamente los flujos vehiculares para evitar los choques frontales; sin embargo, hay otro tipo de colisión que se debe considerar al diseñar estas carreteras, por ejemplo, para evitar los impactos laterales se debe limitar el número de accesos. En el caso de atropellamientos, se debe tener en mente que si el flujo de peatones es importante, se deberá crear la infraestructura necesaria para alojarlos o canalizarlos, así como las paradas de autobuses, a fin de protegerlos del flujo vehicular directo. Finalmente, otro aspecto importante son las aberturas en la barrera central, las cuales deberán estar ubicadas aproximadamente a cada tres o cinco kilómetros, de uso exclusivo para vehículos de emergencia.

1.3 Situación en México

En un estudio realizado en 2012 [4] se compararon tramos carreteros de dos carriles libres y de cuota, y se concluyó que las colisiones en las carreteras de cuota suelen ser de mayor severidad que en las libres (véase la figura 1.9). Este deterioro en la seguridad vial está vinculado con la velocidad de operación y las maniobras de rebase que se realizan de manera indiscriminada. Respecto a este último punto cabe aclarar que existe señalamiento informativo de recomendación con la leyenda “PERMITA EL REBASE UTILICE EL ACOTAMIENTO”, colocado en las carreteras con anchos de calzada de 12 m. Evidentemente esta medida fue un error por parte de los diseñadores y encargados de la carretera, ya que ahora los conductores realizan los adelantamientos en cualquier punto, existan o no las condiciones de seguridad. Este fue un fenómeno que se vivió en otros países y que, debido a los problemas que esto conlleva, están adaptando el concepto de la configuración 2+1.

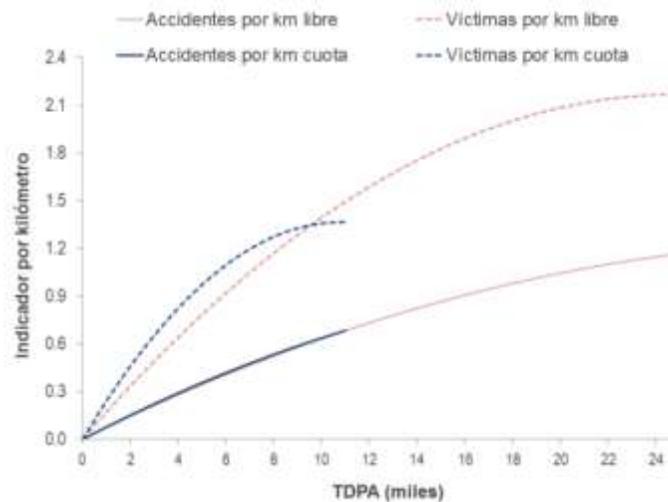


Figura 1.9 Comparación de indicadores de colisiones y víctimas por kilómetros en carreteras de dos carriles libres y de cuota [4]

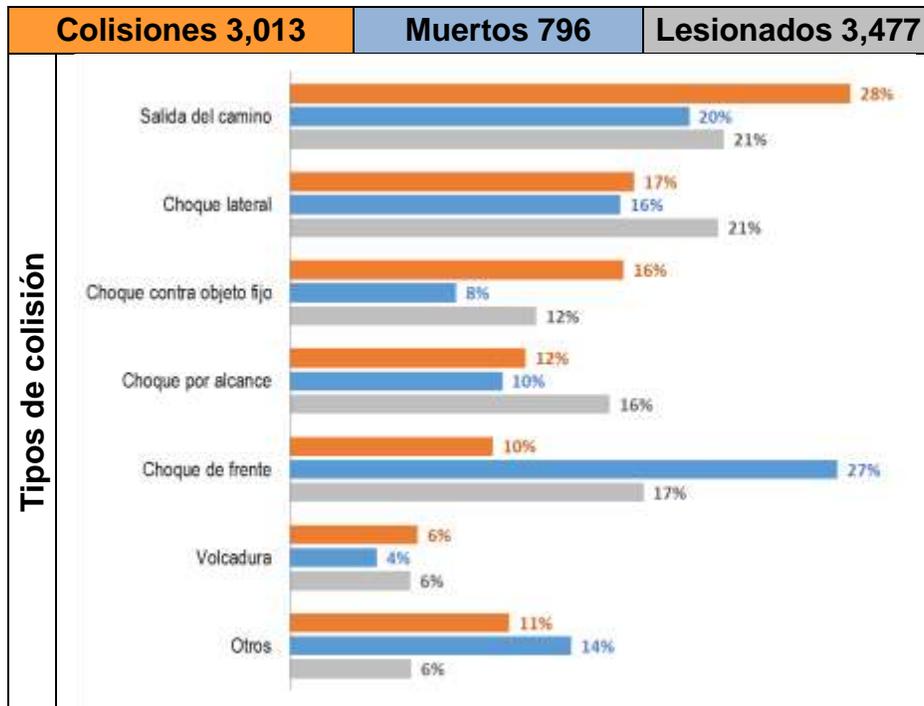
Como se ha comentado, este trabajo se enfoca en definir lineamientos para adaptar las carreteras de cuota de dos carriles a la configuración 2+1, y se plantea en primera instancia sólo para estas vialidades, porque son las que, en teoría, tienen accesos controlados, logrando identificar bajo este criterio 27 carreteras que se enlistan a continuación:

Tabla 1.7 Carreteras de dos carriles de cuota en México

Ruta	Clave	Nombre de carretera
MEX-132D	00026	Ent. Tulancingo - Túxpam (cuota)
MEX-140D	00030	Amozoc - Perote (cuota)
MEX-037D	00032	Uruapan - Lázaro Cárdenas (cuota)
MEX-095D	00043	Puente de Ixtla - Iguala (cuota)
MEX-145D	00077	Las Choapas - Ocozocuatla (cuota)
MEX-040D	00084	Durango - Mazatlán (cuota)
MEX-135D	00109	Cuacnopalan - Oaxaca (cuota)
MEX-002D	02323	Libramiento de Mexicali (cuota)
MEX-001D	03392	Libramiento San José del Cabo - Aeropuerto Los Cabos (cuota)
MEX-190D	07580	Chiapa de Corzo - San Cristóbal de Las Casas (cuota)
MEX-020D	11014	Libramiento Norponiente de Irapuato (cuota)
MEX-095D	12010	Zacapulco - Rancho Viejo (cuota)
MEX-014D	16011	Pátzcuaro - Uruapan (cuota)
MEX-160D	17161	La Pera - Cuautla (cuota)
MEX-068D	18004	Chapalilla - Compostela (cuota)
MEX-070D	28051	Libramiento Poniente de Tampico (cuota)
MEX-180D	30009	Gutiérrez Zamora - Tihuatlán (cuota)
MEX-045D	32558	Entronque Cuauhtémoc - Entronque Morelos (cuota)
MEX-043D	50002	Morelia - Salamanca (cuota)
MEX-080D	50004	Lagos de Moreno - Villa de Arriaga (cuota)
MEX-015D	50007	Tepic - Villa Unión (cuota)
MEX-040D	50502	Libramiento Norponiente de Saltillo (cuota)
MEX-200D	50705	Arriaga - Ocozocoautla (cuota)
MEX-095D	51202	Rancho Viejo - Taxco (cuota)
MEX-014D	51606	Distribuidor Zirimícuaro - Puente Ajuno - Uruapan
MEX-185D	52001	Salina Cruz - La Ventosa (cuota)
MEX-070D	52405	Rayón - La Pitahaya (cuota)

Elaboración propia

Con base en la información obtenida de los Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales [5], en estas carreteras se registró de 2010 a 2013 un total de 3,013 colisiones, que dejaron un saldo 796 personas muertas y 3,477 lesionados. Estos saldos se agruparon por tipo de colisión (mostrados en forma gráfica en la figura 1.10), y se observa que las salidas del camino son los eventos de mayor frecuencia, pero son las colisiones frontales las de mayor severidad al agrupar el 27% de las víctimas mortales y el 17% de los lesionados.



Elaboración propia con base en la referencia [5]

Figura 1.10 Distribución porcentual de saldos por tipo de colisión

Ahora bien, estas carreteras se dividen en tramos y cada uno tiene características propias de siniestralidad y de operación. Dado que no fue posible realizar estudios de campo para definir las características de operación como son: (i) Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), (ii) configuración vehicular, (iii) factor de distribución direccional “D” y (iv) el factor “K” que indica la proporción del TDPA que ocurre dentro de la hora pico, se utilizaron los datos contenidos en los Volúmenes de Tránsito Registrados en las Estaciones Permanentes de Conteo de Vehículos [6] y los libros de Datos Viales 2015 [7], ambos documentos publicados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). Una vez definido el valor del TDPA y los saldos de siniestralidad por tramo, se calcularon los siguientes indicadores:

Índice de accidentalidad (IA)

$$IA = \frac{(\sum \text{accidentes en 4 años})(100'000,000)}{(\sum \text{TDPA en 4 años})(\text{longitud})(365 \text{ días})} \quad (1)$$

Índice de mortalidad (IM)

$$IM = \frac{(\sum \text{muertos en 4 años})(100'000,000)}{(\sum \text{TDPA en 4 años})(\text{longitud})(365 \text{ días})} \quad (2)$$

Índice de morbilidad (IL)

$$IL = \frac{(\sum \text{lesionados en 4 años})(100'000,000)}{(\sum \text{TDPA en 4 años})(\text{longitud})(365 \text{ días})} \quad (3)$$

Índice de severidad 1 (IS1)

$$IS1 = \frac{\Sigma \text{víctimas en 4 años}}{\Sigma \text{accidentes con víctimas en 4 años}} * 100 \quad (4)$$

Índice de severidad 1 (IS2)

$$IS2 = \frac{\Sigma \text{accidentes con víctimas en 4 años}}{\Sigma \text{total de accidentes en 4 años}} * 100 \quad (5)$$

Índice de peligrosidad (IP)

$$IP = \frac{(\Sigma \text{accidentes con víctimas en 4 años})(100'000,000)}{(\Sigma \text{TDPA en 4 años})(365)(\text{longitud})} \quad (6)$$

Es importante hacer las siguientes aclaraciones: (i) en las fórmulas se hace referencia a un periodo de cuatro años ya que la información de colisiones disponible corresponde a este periodo y (ii) se emplea el término de víctimas para designar la suma de muertos y lesionados. Estos indicadores muestran diversas formas de evaluar las condiciones de seguridad, aunque la bibliografía recomienda aplicar el índice de peligrosidad (IP) para comparar redes carreteras con diferentes características, así como para identificar y dar seguimiento a tramos de alta concentración de accidentes.

Como se había mencionado, las 27 carreteras seleccionadas guardan uniformidad en ciertas características, pero presentan diferencias en cuanto al ancho de sección principalmente en el acotamiento; de hecho, en un mismo tramo carretero se observaron cambios en la sección transversal debido a la topografía del terreno y el espacio disponible. Los datos de siniestralidad permitieron efectuar una jerarquización para determinar en qué tramo se maximizan los beneficios cuando se modifica a una configuración 2+1, con base en el IP como criterio de selección, además de analizar de manera secundaria el IA, IM e IL.

Jerarquizando los tramos en función del IP, el valor más elevado se registra para el segmento que va del entronque izquierdo Malpaso en el km 143 al entronque izquierdo Apic Pac en el km 163 de la carretera Las Choapas-Ocozocuatla, con un valor de IP de 33.4 accidentes con víctimas por cada 100 millones de vehículos-kilómetro e índices de mortalidad y morbilidad de 18.1 y 80.1 muertos y lesionados por cada 100 millones de vehículos-kilómetro, respectivamente. Debido a las condiciones tan desfavorables en materia de seguridad vial, se decidió que este tramo podría ser un buen candidato, ya que es la principal vía que conecta al sur del país y que más del 20% de los vehículos que actualmente la utilizan son articulados.

Otra de las vías seleccionadas y que no necesariamente se justifica por sus saldos de siniestralidad es el tramo de La Pera-Caseta de Cobro Coacalco de la carretera La Pera-Cuautla. Para este tramo carretero se preparó un proyecto de ampliación a cuatro carriles (dos por sentido), debido al alto flujo vehicular que presenta. En 2014 se iniciaron labores de movimiento de tierra en ciertos tramos de la carretera,

pero debido al impacto mediático que se desató por el daño ambiental a la reserva natural protegida “Parque Nacional el Tepozteco”, los habitantes del municipio de Tepoztlán manifestaron su inconformidad interponiendo un amparo para evitar que continuaran las actividades de construcción. A principios de 2015 se detuvieron los trabajos, pero durante el mes junio del mismo año la SCT publicó la nueva licitación para continuar con las actividades (véanse las figuras 1.11 y 1.12). Nuevamente para finales del mismo mes, se detuvo el proceso de licitación a consecuencia del movimiento orquestado por los manifestantes.

Otorgan suspensión definitiva en ampliación de La Pera-Cuautla

Los activistas y pobladores de Tepoztlán agrupados en el FUDT reiteraron su rechazo al proyecto carretero, en virtud de que podría provocar daños ambientales

25/01/2015 19:39 PEDRO TONANTZIN/CORRESPONSAL

Para obras de ampliación a 8 carriles de la Autopista La Pera-Cuautla

Licitan la ampliación de autopista La Pera-Cuautla

Acto que atenta contra la legalidad ya que violan los decretos que protegen el territorio
Hacen un llamado a todas las personas y organizaciones a vigilar de cerca al gobierno

Dulce Maya | Miércoles, 17 de Junio de 2015

Figuras 1.11 y 1.12 Notas periodísticas publicada por *Excélsior* y *La Jornada de Morelos*

Con los antecedentes descritos, se decidió que esta carretera sería buen prospecto para modificarla a 2+1, ya que si se compara el ancho necesario que ocupa una carretera de cuatro carriles (20 m aproximadamente) con una carretera 2+1 (13 m), el impacto ambiental generado con la segunda sería mucho menor, lo que incrementa las posibilidades de aceptación por parte de los activistas y pobladores de la región. Adicionalmente se plantea que se mantendrán los anchos de corona en todas las zonas donde se tengan puentes y accesos, y se contempla aprovechar las zonas que ya se tienen trabajadas con terracerías (véase la figura 1.13).



Figura 1.13 Movimiento de tierras para la ampliación de la carretera La Pera-Cuautla, publicado en nota periodística por *Excélsior*

Las experiencias de los países citados en el apartado anterior reflejan que al implementar la configuración 2+1 se obtiene un beneficio en la seguridad vial y también un impacto positivo en el nivel de servicio (NS) que la infraestructura ofrece a los usuarios. Para evaluar la mejora en el NS se revisó la versión 2010

del *Highway Capacity Manual* (HCM) [8], específicamente el capítulo 15 “Two-Lane Highways”, el cual describe la metodología para el análisis de capacidad en carreteras de dos carriles, así como el efecto al añadirle un tercer carril de ascenso o el carril de rebase. La metodología de análisis presenta algunas variantes que básicamente están en función del tipo de carretera:

- La clase I son carreteras que operan a velocidades altas (la velocidad límite estipulada), y constituyen las rutas principales para conectar ciudades, enlazar estados y sus redes carreteras.
- La clase II corresponde a carreteras escénicas o recreacionales, funcionan como acceso a carreteras de la clase I, y sirven para viajes relativamente cortos o donde la vista del paisaje es un factor importante.
- La clase III atiende zonas ligeramente desarrolladas, atraviesa por poblados pequeños, tiende a mezclarse el tránsito local con el de largo itinerario, y refleja un nivel de actividad alto a consecuencia del límite de velocidad bajo.

En atención a esta clasificación, la gran mayoría de las 27 carreteras identificadas y los dos tramos seleccionados para someter a análisis corresponden a la clase I y en éstas se evalúa el NS considerando dos medidas de desempeño:

1. El porcentaje de tiempo promedio en fila o detrás de un vehículo lento (en inglés, “Percent of Time Spent Following” [PTSF]); a mayor valor del PTSF le corresponde un NS deficiente y, de manera inversa, a menor valor del PTSF le corresponde un mejor NS. Este parámetro representa la libertad para efectuar maniobras de rebase, así como el confort y comodidad del viaje.
2. La velocidad promedio de viaje (en inglés, “Average Travel Speed” [ATS]) representa la movilidad que ofrece una carretera de dos carriles, con una unidad de medida de velocidad en millas por hora. A un mayor valor de ATS corresponde un nivel de servicio mejor y, de manera inversa, a un ATS bajo corresponde un nivel de servicio deficiente.

Adicionalmente, para evaluar el impacto en el NS de la configuración 2+1, se considera la metodología del carril de rebase propuesta en el HCM, cuando el tipo de terreno es a nivel o lomerío. El terreno a nivel es cuando las pendientes son cortas y no superan el 2%, y se considera lomerío cuando las pendientes presentes hacen que los vehículos reduzcan su velocidad, con pendientes no muy largas. Se utilizará la metodología del tercer carril de ascenso, cuando el tramo tenga pendientes que sean mayores o iguales al 3%, y que se desarrollen en una longitud mayor o igual a 960 metros, es decir, se presente una pendiente específica.

Una vez descrito el estado del arte de las carreteras 2+1 en el contexto internacional y después de un breve análisis de siniestralidad de las carreteras de cuota de dos carriles en nuestro país, cerramos este capítulo para dar paso a la descripción de los lineamientos y la aplicación de los mismos a los tramos carreteros seleccionados.

2. Metodología

Este capítulo describe algunas recomendaciones para el diseño de carreteras 2+1 y que, a juicio de los autores, mejor se adaptan a las condiciones de las carreteras en México. En primer lugar se desglosan los lineamientos de diseño, que abordan la sección transversal, el diseño de las zonas de transición, consideraciones respecto a los alineamientos horizontal y vertical, así como zonas de resguardo. También se muestra una propuesta para el señalamiento horizontal y vertical, y finalmente se abordan los casos prácticos de los dos tramos seleccionados en el capítulo anterior.

2.1 Lineamientos de diseño

Sección transversal

La sección propuesta consta de tres carriles con diferente ancho cada uno (véase la figura 2.1). Se buscó que el sentido con un solo carril mantuviera un ancho de por lo menos 5 m (3.75 m de ancho de carril, 0.8 m de acotamiento interno y 0.5 m de acotamiento externo) para alojar un vehículo que por razones extraordinarias se encuentre detenido y permitir el paso de otro vehículo a muy baja velocidad.

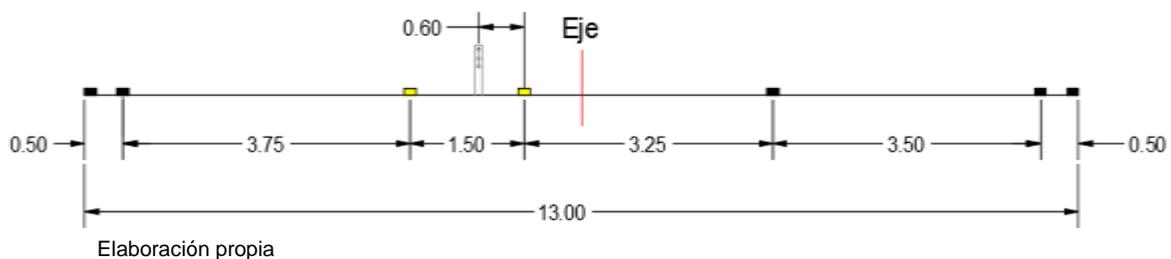


Figura 2.1 Sección transversal propuesta para carreteras 2+1

Para el sentido con dos carriles de circulación, se propone que el carril central sea de 3.25 m de ancho, considerando que éste será utilizado principalmente por vehículos ligeros y que los vehículos pesados permanecerán en el carril derecho. Esta medida es adecuada si consideramos las dimensiones de los vehículos estipuladas en la tabla 5-E “Características de los vehículos de proyecto”, del *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras* [9], en la cual se indica un ancho de 2.14 m para un vehículo ligero de proyecto DE-335. Finalmente, para el carril de la extrema derecha se propone un ancho de 3.5 m, considerando este valor adecuado con base en los anchos de carriles que se utilizan en las carreteras tipo A2 de México, según la tabla 004-4 “Anchos de corona, calzada, acotamientos y faja separadora central”, de las *Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico de 1984* [10].

La faja separadora central en las zonas 2+1 conserva un ancho de 1.5 m (medido a ejes de rayas delimitadoras de acotamiento interno), separación que será mayor en las zonas de transición. El ancho del acotamiento interno es diferente para cada sentido de circulación: para el sentido con un solo carril el acotamiento es de 0.8 m, mientras que para el sentido con dos carriles el ancho es de 0.6 m. Se considera que la barrera central de cables ocupa un ancho de 0.1 m; por otra parte, a los acotamientos externos se les asignó un ancho de 0.5 m, el cual se mantiene a lo largo de toda la configuración 2+1.

Es evidente que el acotamiento externo no está concebido para alojar un vehículo; para ello, se contempla como parte del diseño el empleo de zonas de resguardo, que se abordan más adelante. Además, el ancho del acotamiento interno es mayor en el sentido con un carril, por lo explicado anteriormente respecto al ancho mínimo de 5 metros.

Barrera de cables

Las barreras de contención se clasifican en tres tipos: flexibles, semirrígidas y rígidas. Esta categorización obedece a la deflexión que experimenta la barrera durante un impacto. Como su nombre lo indica una barrera rígida no sufre prácticamente ningún desplazamiento, mientras que una flexible puede tener una deflexión mayor a 3 metros.

Cuando un vehículo colisiona con una barrera rígida, una parte importante de la energía que se libera durante el impacto es absorbida por el vehículo con posibles consecuencias para sus ocupantes. En el caso de la barrera flexible, la energía del impacto se disipa por la deflexión de los cables y la deformación del vehículo es menor. Tomando en cuenta esta explicación y las experiencias de otros países, se consideró la barrera de cables como sistema de contención para la faja separadora, no obstante que, aunque la sección propuesta para la configuración 2+1 no tiene el ancho libre suficiente para la deflexión de la barrera, alojar una barrera rígida también implica un espacio adicional.

Actualmente existen diversas marcas y tipos de barreras de cables. Éstas se distinguen por la configuración en el acomodo de los cables, la fuerza con la que se tensionan, el número de cables (tres o cuatro), el espaciamiento entre los postes y la distancia entre puntos de anclaje. En conjunto, todas estas características definen el nivel de contención y la deflexión de la barrera. La deflexión del cable ante un impacto tiende a ser mayor, cuando el nivel de contención es bajo, y cuando el nivel de contención es alto, la deflexión es menor.

La Norma Oficial Mexicana NOM-037-SCT2-2012 [11] contempla únicamente las barreras de tres cables que ofrecen un nivel de contención tres (NC-3), es decir, que llegan a contener a un vehículo con una masa de hasta 2,000 kg a una velocidad de 100 km/h y un ángulo de impacto de 25 grados. En la actualidad ya existen barreras de cables que ofrecen un nivel de contención cuatro (NC-4), las cuales llegan a contener a un camión unitario de hasta 8,000 kg a una velocidad

de impacto de 80 km/h y un ángulo de impacto de 15 grados. Por lo tanto, en función del porcentaje de vehículos pesados que transiten por la carretera analizada, se definirá el criterio para la selección de la barrera con NC-3 o NC-4. El espaciamiento entre los postes, la longitud de los puntos de anclaje y la tensión de los cables se apegarán a las recomendaciones del fabricante de la barrera empleada; sin embargo, se sugiere que la separación de puntos de anclaje sea menor que 200 m, para que la deflexión al momento de un impacto no exceda de 2.5 m, según la recomendación del Reporte 711 del NCHRP [12].



Figura 2.2 Barreras flexibles de tres y cuatro cables

Zonas de transición

Debido a que el diseño de las carreteras 2+1 obliga a tener transiciones de divergencia y convergencia, en cada comienzo y terminación del carril central, respectivamente, se acudió al *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras y Calles 2001* [13] de los Estados Unidos, el cual proporciona una fórmula para determinar la longitud que debe tener la transición en la terminación o cierre del carril. Esta misma bibliografía sugiere que la longitud de transición al añadir un carril —maniobra de divergencia—, sea de la mitad a un tercio de la longitud de transición por cierre —maniobra de convergencia—. La fórmula utilizada se muestra a continuación:

$$L = 0.6 * W * S \quad (7)$$

donde:

- L = Longitud de la transición, en metros
- W = Ancho del carril que se cerrará, en metros
- S = Velocidad de operación, en km/h

Esta fórmula se utilizó a consideración de los autores, ya que en la bibliografía internacional no se encontraron fundamentos ni la justificación de cómo se obtiene la longitud de transición en las zonas neutras críticas y no críticas.

Evidentemente, el área neutral crítica es la que presenta mayor riesgo para los conductores. Considerando una velocidad de operación o límite de 90 km/h y un

ancho de carril central de 3.25 m y aplicando la ecuación (7) se obtiene una longitud de 176 m, pero esta distancia es exclusivamente para el cierre de carril en uno de los sentidos, por lo tanto se duplica; adicionalmente se contempló una distancia de holgura de 73 m, de tal forma que la distancia total del área neutral crítica es de 425 m (véase la figura 2.3).

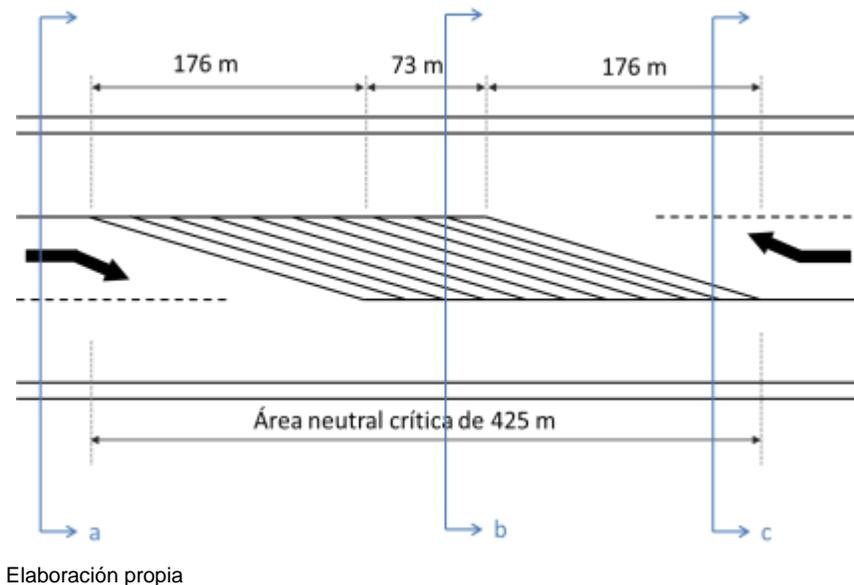
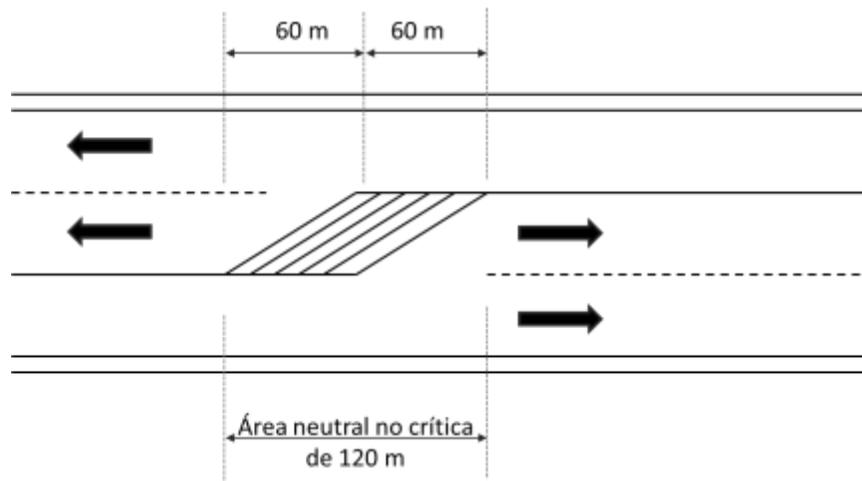


Figura 2.3 Diseño del área neutral crítica para una velocidad de 90 km/h y un ancho de carril central de 3.25 m

Como se observa en la figura anterior, el área neutral crítica se compone de tres tramos: en el primero (sección a), uno de los sentidos tiene un carril de operación y en el otro sentido inicia la transición de convergencia a un carril en una longitud de 176 m; en el segundo (sección b), ambos sentidos tienen un carril de circulación en una longitud de 73 m —aproximadamente el 40% de la longitud calculada con la ecuación 7—, la cual sirve de holgura en caso de una maniobra de convergencia inconclusa, en el tercero (sección c), se conservan las mismas características que en el primer tramo, solamente que ahora para el sentido contrario.

Es recomendable llevar a cabo estudios de velocidad de punto para medir la velocidad de operación y diseñar las áreas neutrales de acuerdo con las condiciones de operación prevalecientes.

Para el área neutral no crítica se propone una longitud de 120 m, compuesta por dos tramos de transición de 60 m cada uno, como se muestra en la figura 2.4. La longitud correspondiente a cada transición se calculó considerando que fuese aproximadamente un tercio de la longitud de la transición crítica. Debido a que la maniobra de divergencia no representa un riesgo importante, en este caso no se contempla la velocidad de operación.



Elaboración propia

Figura 2.4 Diseño propuesto del área neutral no crítica

Para las zonas de transición crítica, es importante revisar el alineamiento horizontal y vertical de la carretera, evitando que éstas coincidan con puntos donde la visibilidad esté restringida; por ejemplo, que la maniobra de convergencia se realice en una curva vertical (en cresta) o en una curva horizontal con características geométricas para velocidades reducidas o con restricciones de visibilidad. Estas circunstancias complican la toma de decisiones por parte del conductor, ya que tiene que hacer una maniobra en curva y, al mismo tiempo, observar el espejo retrovisor, corroborar que no haya vehículos para realizar la convergencia y decidir a qué velocidad incorporarse al carril derecho. Es probable que el conductor no pueda procesar tanta información y cometa un error que desencadene una colisión.

Al asignar los valores de longitud a los segmentos de las áreas neutras, se recomienda que, por cuestiones de practicidad, la longitud total se maneje en múltiplos de cinco.

Zonas 2+1 y alineamiento

El intervalo de longitud del carril central se mantuvo según la propuesta de Suecia entre uno y dos kilómetros. Se considera que en este rango los usuarios le darán el uso adecuado al carril, es decir, que los vehículos ingresen al carril central con el objetivo de realizar una maniobra de rebase. Esta longitud se mide a partir de la transición del área neutral no crítica, hasta la mitad del área neutral crítica.

Por cuestiones de seguridad, es recomendable que en puentes y túneles no se aplique la configuración 2+1 y se conserve el ancho, considerando solamente un carril por sentido; asimismo, es conveniente que en una distancia no menor a 100 m antes del inicio de un puente o túnel no existan transiciones en los carriles y la carretera funcione de manera convencional.

Dado que la configuración 2+1 sería una aplicación nueva en nuestro país y los conductores no están habituados a su operación, se recomienda que los accesos estén controlados y no se permitan las maniobras de vuelta a la izquierda ni retornos a nivel. En aquellos casos donde sea imposible eliminar estos movimientos previamente a la zona de influencia del entronque, la carretera deberá operar de manera convencional –un carril por sentido– y reforzar el señalamiento para orientar al conductor cuando existan carriles de deceleración y almacenamiento en la parte central para evitar confundirlo con el carril central de rebase. En la medida de lo posible, este tipo de maniobra deberá realizarse a desnivel.

En la proximidad a un enlace, también es recomendable que la carretera mantenga solamente dos carriles de circulación en total. En cambio, en la proximidad a casetas de cobro no se espera que la configuración 2+1 afecte negativamente la operación de la caseta. De hecho, se pueden aprovechar las zonas de transición de las casetas para hacer el cambio en el uso del carril central.

Otra consideración para el diseño es que se debe procurar que el carril central de rebase quede asignado al sentido de circulación con pendientes ascendentes pronunciadas y, en la medida de lo posible se debe buscar que la longitud del carril central sea uniforme para ambos sentidos, es decir, que se tengan las mismas posibilidades de rebase, aunque indiscutiblemente pudiesen existir limitantes como estructuras o restricciones por el alineamiento horizontal o vertical.

Aberturas en la faja

En carreteras en que se mantiene la configuración de 2+1 en toda la longitud y que no tienen pasos a desnivel, se debe proveer de aberturas en la faja separadora central para uso exclusivo de vehículos de emergencia (policía, bomberos, ambulancia y grúa); se recomienda que estas aberturas se encuentren a intervalos de 3 a 5 km. Cuando una carretera tenga la configuración en ciertos tramos como zona 2+1 y en los demás sea de dos carriles sin barrera central, no será necesario colocar estas aberturas.

Zona de resguardo

Con una tendencia a adquirir mayor importancia en este tipo de carreteras, las zonas de resguardo tienen la función de proporcionar espacio para que los vehículos puedan estacionarse en ciertos casos de emergencia (avería, falla de neumático, etc.) sin entorpecer o impedir el flujo vehicular. Debido a que en la configuración 2+1 el ancho de los acotamientos no es el suficiente como para resguardar ni siquiera un vehículo ligero, estas zonas se deberán colocar en cada tramo y en el sentido que tiene solo un carril (es decir, las zonas de resguardo estarán de forma alternada en cada zona 2+1).

Señalamiento vertical

Las carreteras 2+1 a nivel internacional utilizan diferentes señales verticales que orientan a los conductores sobre la operación del flujo vehicular. No obstante que en México no se dispone de este tipo de señalamiento, se consideraron los lineamientos en cuanto a dimensiones de tablero, colores y series de letras que establece el *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014* [14]. La tabla 2.1 muestra la propuesta de señales diseñadas para este tipo de caminos.

Tabla 2.1 Señalamiento vertical propuesto

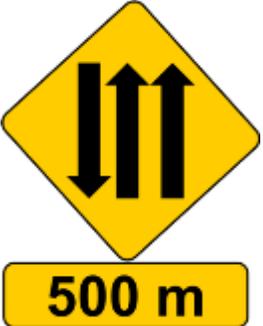
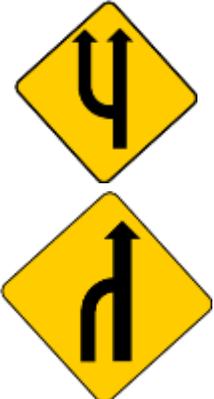
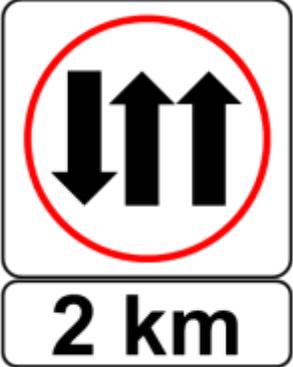
Señales	Observaciones
	<p>Variación a la SP-18</p> <p>Dimensiones: 117 x 117 cm u 86 x 86 cm con una diagonal en posición vertical¹.</p> <p>Ubicación: en ambos lados de la calzada, 500 m antes de que comience la transición en el área neutral crítica.</p> <p>Objetivo: indicar la presencia de la divergencia a 500 m para que los vehículos que circulan por el carril central se incorporen al carril de la derecha.</p> <p>Color: fondo amarillo; caracteres, símbolos y marcos en color negro.</p>
	<p>Variación a la SP-38</p> <p>Dimensiones: 117 x 117 cm u 86 x 86 cm con una diagonal en posición vertical¹.</p> <p>Ubicación: en ambos lados de la calzada previo al inicio de la transición en las áreas neutrales.</p> <p>Objetivo: indicar la presencia de la divergencia para que los vehículos más rápidos se incorporen al carril central de la izquierda o convergencia para que los vehículos del carril central se incorporen al carril derecho.</p> <p>Color: fondo amarillo; caracteres, símbolos y marcos en color negro.</p>
	<p>Variación a la SR-14</p> <p>Tamaño: 117 x 117 cm u 86 x 86 cm¹</p> <p>Ubicación: en ambos lados de la calzada a la altura donde comienza la raya discontinua para separación de carriles del mismo sentido, y ambas mostrándose hacia el mismo lado.</p> <p>Objetivo: indicar el sentido y longitud efectiva que tendrá el carril central a partir del punto en donde se coloque esta señal.</p> <p>Color: fondo blanco; caracteres, símbolos y marcos en color negro.</p>

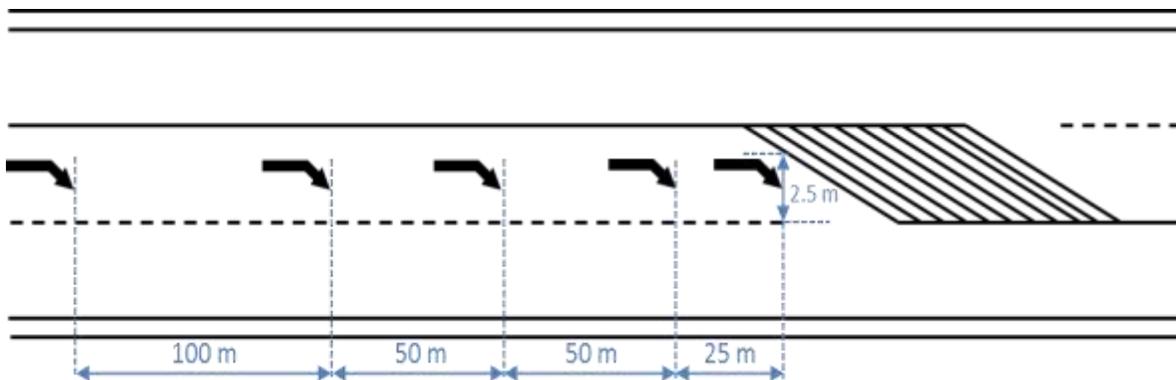
Tabla 2.1 Señalamiento vertical propuesto
(continuación)

Señales	Observaciones
	<p>Dimensiones: 178 cm de ancho por 71 cm de alto.²</p> <p>Ubicación: en el lado derecho de la calzada, dos kilómetros antes del comienzo de la línea discontinua de una zona 2+1.</p> <p>Objetivo: notificar al conductor a qué distancia tendrá oportunidad de efectuar el rebase de manera segura y permitida en una zona 2+1.</p> <p>Color: fondo blanco; caracteres, símbolos y marcos en color negro.</p>
<p>Referencia:</p> <p>¹ Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad [14].</p> <p>² Tabla II. 4-15 Guía para la distribución de texto en las señales informativas de recomendación [14].</p>	

Señalamiento horizontal

El señalamiento horizontal juega un papel muy importante en la operación, ya que junto con el señalamiento vertical, orienta al conductor sobre las maniobras a realizar por medio de la delimitación de los carriles, y sirve como guía para en casos que por condiciones climatológicas adversas se tenga poca visibilidad.

Por ejemplo, las flechas utilizadas para indicar a los conductores que se incorporen al carril lateral fueron diseñadas conforme a la figura III.2-20. Flechas de dirección para carriles para velocidades mayores a 60 km/h [14]. Se propone utilizar cinco flechas a intervalos variables, tal como se muestra de manera esquemática en la siguiente figura.



Elaboración propia

Figura 2.5 Intervalos propuestos para la colocación de flechas en el pavimento

Utilizando como referencia la terminación de la raya discontinua, es decir, cuando el ancho del carril central es de 2.5 m, la primera flecha se coloca a 225 m. A una velocidad de 90 km/h, a esta distancia el conductor tendrá nueve segundos para

realizar la maniobra de convergencia, ya sea que acelere o disminuya su velocidad para encontrar el intervalo e incorporarse al carril derecho. La siguiente flecha se coloca de manera estratégica a 125 m, es decir, a cinco segundos de que desaparezca la raya discontinua; la tercera flecha se encuentra a 75 m, lo que ofrece un tiempo para la maniobra de tres segundos; la penúltima flecha se coloca a 25 m, equivalente a un segundo de viaje hasta la desaparición de la raya discontinua, y finalmente la última flecha se coloca justamente a la misma altura donde desaparece la raya discontinua. Obviamente los tiempos que se tienen para la maniobra en cada flecha disminuyen 0.9 segundos aproximadamente por cada 10 km/h que excedan la velocidad de 90 km/h.

Las marcas utilizadas dentro de las áreas neutrales (críticas y no críticas) corresponden a las características mencionadas en el punto III.2.1.5 Rayas canalizadoras (M-5) [14], con un ancho de 20 cm, una inclinación de 45 grados trazadas de izquierda a derecha en el sentido del tránsito, de color amarillo reflejante y separadas dos metros entre sí (medidas de borde interior a borde interior).

A pesar de que la tabla III.2-2. Ancho de la raya [14] indica que para carreteras de un carril por sentido el ancho de las rayas longitudinales es de 10 cm, se recomienda que las rayas canalizadoras y de la faja separadora central sean de 15 cm. Adicionalmente, se sugiere que las rayas canalizadoras de las áreas neutrales sean provistas de botones.

2.2 Caso La Pera-Cuautla

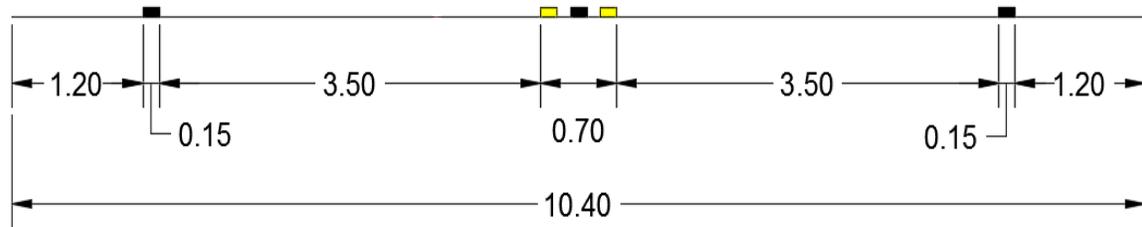
Esta carretera constituye la ruta principal para viajar de la Ciudad de México hacia los municipios de Tepoztlán y Cuautla pasando por el Parque Nacional el Tepozteco en el estado de Morelos. El km 0+000 de esta carretera se ubica en el entronque con la autopista México-Cuernavaca (km 70+500) y cuenta con dos plazas de cobro (Tepoztlán y Coacalco) ubicadas en los cadenamientos 7+958 y 21+210, respectivamente. La carretera termina en el km 34+160; sin embargo, el área de estudio se limita al tramo comprendido del km 1+200 al 21+210 ya que a partir de este punto la carretera es de cuatro carriles.

Características físicas actuales

Hoy día la sección transversal comprende un ancho total de 10.40 m con carriles de circulación de 3.65 m de ancho, acotamientos de 1.20 m y una faja separadora central de 0.70 m; todas las rayas tienen un ancho de 15 cm (véase la figura 2.6).

El terreno donde se ubica la carretera presenta una topografía accidentada, es decir, montañosa. El alineamiento horizontal presenta escasos tramos rectos que funcionan como transición entre curvas horizontales. La altura en el km 1+200 es aproximadamente de 2,103 metros sobre el nivel del mar (msnm) y de 1,300

msnm en el km 21+210, de tal forma que el alineamiento vertical, en el sentido del cadenamiento, tiene una pendiente descendente promedio de 4 por ciento.



Elaboración propia

Figura 2.6 Sección transversal de la carretera La Pera-Cuautla

Esta carretera cuenta en total con dos accesos de divergencia y dos de convergencia (una convergencia y una divergencia para cada sentido), que llevan al municipio de Tepoztlán, Morelos y se encuentran ubicados en los kilómetros 8+350 y 8+620. Asimismo, cuenta con diez zonas de resguardo (regulares e irregulares), algunas con servicio de agua o teléfono; tiene 14 accesos irregulares a propiedades privadas y se identificaron once estructuras de puentes tanto superiores como inferiores.

Desde el punto de vista estricto, el tramo analizado no tiene zonas de rebase; las rayas separadoras de sentidos de circulación así lo indican. No obstante, los conductores realizan adelantamientos en zonas con restricciones de visibilidad, tal como se observa en la figura 2.7.



Fuente propia

Figura 2.7 Maniobra de rebase con restricción de visibilidad por la proximidad de la curva

En general, el señalamiento vertical es adecuado; incluye el del tipo turístico y de servicios preventivos, restrictivos e informativos. No obstante, se identificaron algunas deficiencias, por ejemplo: en el kilometraje 18+700 para el sentido de circulación Cuautla-La Pera existe una señal SR-13 "Conserve su derecha" exclusiva para vialidades de dos o más carriles por sentido; inmediatamente

después se encuentra una señal preventiva que indica un ensanchamiento asimétrico —señal fuera de especificaciones— que podría interpretarse como si existiera un carril adicional, el cual no existe (véase la figura 2.8).



Fuente: Google maps

Figura 2.8 Deficiencias en el señalamiento vertical

En cuanto al señalamiento horizontal, éste se encuentra en buen estado, y todas las rayas, tanto continuas como discontinuas, son de 15 cm de ancho. Aunque no existe en la normativa ninguna especificación que avale la distribución de las rayas en la faja separadora central, compuesta por dos rayas continuas de color amarillo y una raya discontinua de color blanco en el centro, este arreglo se encuentra a lo largo de toda la carretera creando confusión a los usuarios, ya que pudiera interpretarse como que el rebase se permite en cualquier punto de la carretera por la existencia de la raya discontinua, no obstante que hay señalamientos prohibiendo tal maniobra (véase la figura 2.9).



Fuente: Google maps

Figura 2.9 Señalamiento horizontal en la faja separadora y SR-18

Características operativas actuales

Como se comentó en el capítulo anterior, los datos de operación referentes al tránsito diario promedio anual (TDPA), la configuración vehicular, el factor de ajuste “K” y el factor de distribución direccional “D” se obtuvieron de la información

publicada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), ya que no fue posible llevar a cabo estudios de campo para determinar estas variables.

Dado que se esperaba que los datos del tramo en estudio presentaran algunas variaciones respecto a las características de operación, se decidió dividirlo en dos subtramos: el primero que contempla el flujo con origen-destino La Pera-Tepoztlán y el segundo para el flujo con origen-destino Tepoztlán-Cuautla.

Respecto al TDPA, se utilizaron los datos publicados de los volúmenes de tránsito registrados en las estaciones permanentes de conteo [6]. Para el subtramo de La Pera-Tepoztlán se registró un flujo de 11,748 vehículos, de los cuales 87.2% son ligeros y 12.8% quedan en la categoría de pesados, autobuses incluidos, mientras que para el subtramo de Tepoztlán-Cuautla el volumen es ligeramente menor -11,384- con una participación de vehículos de carga y pasaje que representa el 13.7 por ciento.

En relación con el factor de ajuste K , se revisó la información publicada en *Datos viales* [7] y nuevamente se analizaron los datos para los dos subtramos. Para La Pera-Tepoztlán los valores del factor K oscilan en cada estación de aforo y van de 0.085 a 0.106, mientras que para Tepoztlán-Cuautla el rango es de 0.079 a 0.127; para el análisis de capacidad se tomaron los valores máximos.

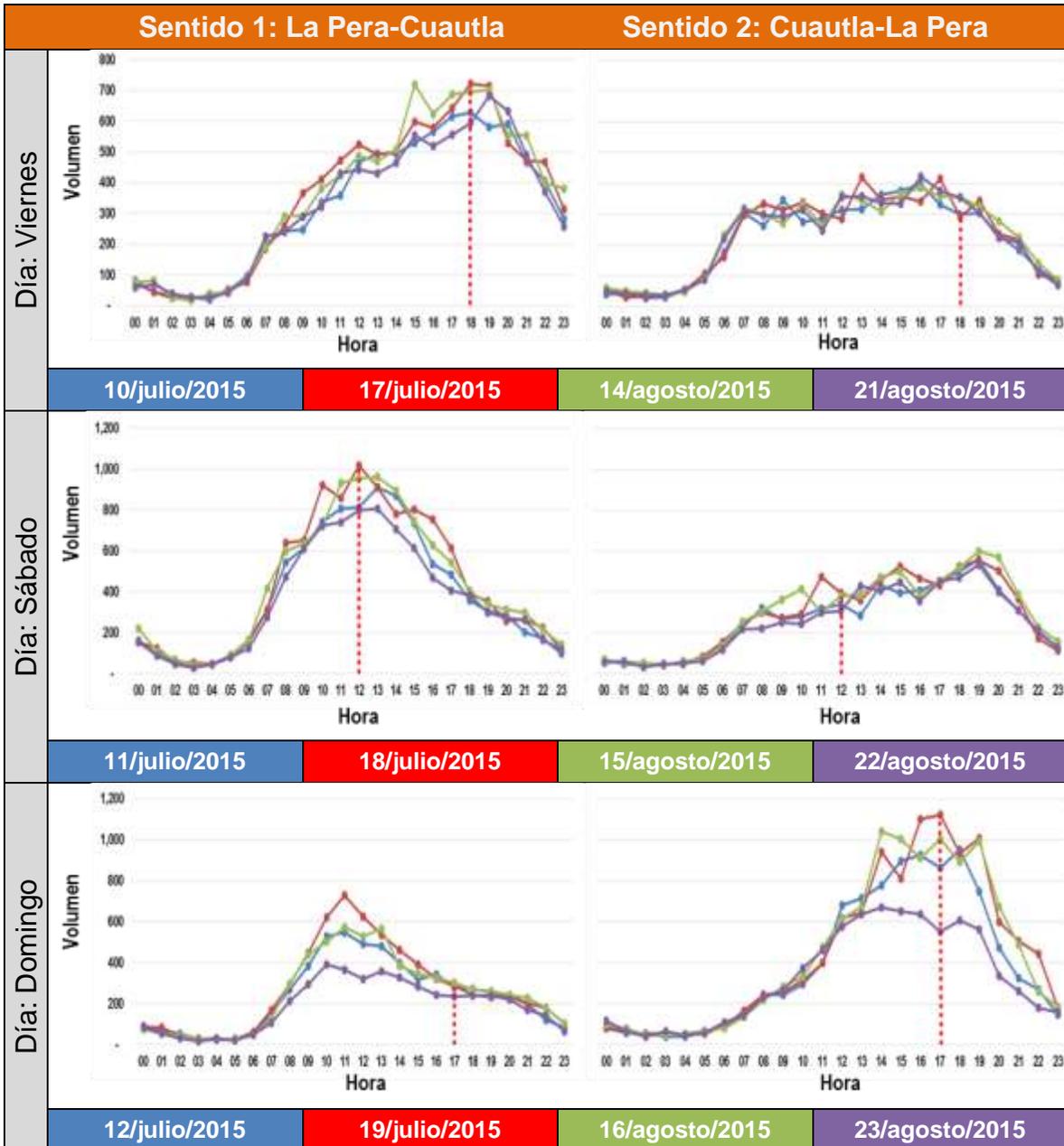
El libro *Datos viales* [7] contiene información para el factor D e indica valores cercanos a una distribución de 50/50; sin embargo, esta carretera brinda servicio a un destino turístico cercano a la Ciudad de México, lo que pone en duda dicho valor. Por ello, se solicitaron a las oficinas de Caminos y Puentes Federales (Capufe) datos referentes al volumen vehicular registrado en la caseta de cobro ubicada en Tepoztlán. Los datos proporcionados corresponden a los días viernes, sábado y domingo; específicamente cuatro fechas de los meses de julio y agosto, el sentido de circulación, la hora del día, el aforo, y el porcentaje por sentido. Con esta información se realizaron gráficas en las que se muestran las cuatro fechas del mismo día por sentido (véase la figura 2.10).

Analizando la gráfica obtenida para los días viernes de la figura 2.10, se desprenden los siguientes comentarios:

- Se observan tendencias similares para las cuatro fechas, pero varían de manera importante entre los sentidos de circulación.
- En el sentido 1 de La Pera hacia Cuautla, el intervalo de tiempo en el que se presenta el mayor volumen vehicular es entre las 17:00 y las 19:00 horas, y se alcanza un valor máximo de 723 veh/h el 17 de julio a las 18:00 horas; posteriormente el flujo vehicular disminuye pero aún a las 23:00 horas se registra un volumen similar al de las 10:00 horas, es decir, que incluso en la noche hay atracción vehicular hacia el destino de Tepoztlán.
- Se presume que habitantes de la Ciudad de México conforme se liberan de sus ocupaciones, se preparan y viajan a Tepoztlán para su estancia durante el fin de semana. El desempeño de la gráfica en el sentido 2 de Cuautla hacia La Pera refleja que el volumen horario de viajes equivale aproximadamente al 50%

del volumen del sentido 1. Lo que indica que pocos viajes se originan hacia la Ciudad de México.

- En el caso específico de las 18:00 horas del día 17 de julio, se compara el volumen horario del sentido 1 que es —de 723 vehículos— con el del sentido 2 —de 291 vehículos— (1,014 veh/h en total) para obtener una distribución direccional aproximada de 70/30, ya que los 723 vehículos representan el 71% del total, mientras que el restante le corresponde al sentido 2 con el 29 por ciento.



Elaboración propia con base en datos de Capufe

Figura 2.10 Variación horaria del volumen vehicular registrado

Los datos correspondientes a las gráficas de los días sábado y domingo indican lo siguiente:

- El comportamiento de los días sábados refleja que el rango con mayor volumen horario en el sentido 1 es de las 8:00 a las 17:00 horas, con una media de 702 veh/h, mientras que durante este periodo en el sentido contrario se tiene una media de 365 veh/h; es decir, que en el sentido a Tepoztlán se presenta el 65% del total de los vehículos por hora.
- En particular a las 12:00 horas del 18 de julio, se registró un total de 1,413 veh/h: 1,017 veh/h (72%) en el sentido 1 y 396 veh/h (28%) en el sentido 2; es decir, una distribución direccional de 70/30, al igual que para los días viernes.
- Finalmente, para el día domingo se observa que el mayor volumen horario se presenta en el sentido 2 a las 17:00 horas del 19 de julio, con un valor de 1,123 veh/h, lo que representa el 80% del total (1,410 veh/h), mientras que en el sentido 1 se registra el 20%, siendo éste el valor de la distribución direccional más crítico en comparación con los demás días analizados.

El análisis de los flujos y por sentido de circulación reafirma que la carretera da servicio a un flujo turístico en que los habitantes de la Ciudad de México se desplazan a Tepoztlán o Cuautla para pasar el fin de semana y retornan el domingo. Ante esto se llegó a la conclusión de que el valor de distribución vehicular que será utilizado para fines del análisis de capacidad vial será de 70/30, y no de 50/50 señalado por *Datos viales*.

La velocidad máxima permitida según el señalamiento existente es de 80 km/h y para ciertas curvas el límite es de 50 km/h. Dado que no fue posible realizar trabajos de campo para determinar la velocidad de flujo libre se revisaron datos de un estudio de velocidad de punto en el km 1+340 elaborado durante 2001. En aquel tiempo se determinó 93 km/h como la velocidad de operación. No obstante que desde entonces el flujo vehicular se ha incrementado en un 60%, sería razonable y conservador considerar 90 km/h como velocidad de operación actual considerando que ésta debe medirse bajo condiciones de poco tránsito y exclusivamente en vehículos ligeros.

Una vez definidas las características físicas y de operación y siguiendo la metodología para carreteras de dos carriles tipo I del *Highway Capacity Manual* (HCM) [8], el nivel de servicio (NS) que ofrece la carretera La Pera-Cuautla es "E", con el 90.5% del tiempo de viaje en fila (*Percent of Time Spent Following*, PTSF). Dicho NS corresponde a carreteras cuya demanda vehicular está muy próxima a su capacidad; la maniobra de rebase es casi imposible de efectuar; el PTSF es mayor al 80%, y la velocidad de operación se reduce en forma significativa.

Evidentemente, las condiciones de operación más críticas se presentan en el ascenso, es decir, en el sentido 2 Cuautla-La Pera. Los valores de entrada que se consideraron para la obtención del nivel de servicio fueron los siguientes:

- TDPA = 11,748 vehículos
- $K = 0.127$

- $D = 70/30$
- Porcentaje de zonas de no rebase = 100%
- Accesos totales = 4; la densidad de accesos es de 0.0185 acc/km
- Tipo de terreno = con pendiente específica de 4.2% ya que excede la pendiente del 3.5% en una distancia mayor a 400 metros (opcional, según el HCM)
- Porcentaje de vehículos pesados = 13.7%
- Velocidad de operación = 90 km/h
- Factor de hora pico = 0.95, valor recomendado por el HCM
- Longitud de segmento = 19.68 km
- Ancho de carril = 3.50 m
- Ancho de acotamiento = 1.3 m

El nivel de servicio tan deficiente se obtiene considerando que el 100% del tramo es zona de no rebase; sin embargo, los usuarios efectúan adelantamientos a discreción, por donde ellos consideran que no habrá riesgo y sin acatar las señales restrictivas. Hasta cierto punto esta conducta errónea se comprende porque la carretera no provee zonas de rebase, mas no se justifica. Ante esto, se puede concluir que el nivel de servicio tan deficiente no queda reflejado del todo en la formación de pelotones, aunque las colisiones pudieran ser un reflejo de las condiciones de operación tan deficientes.

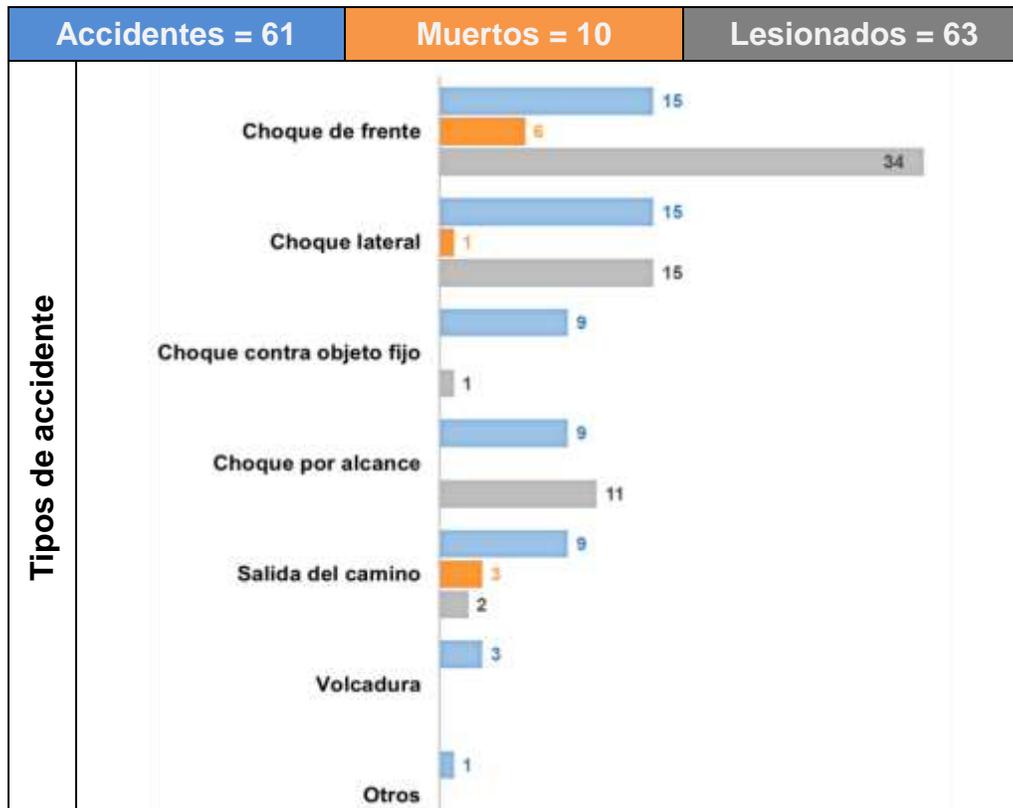
Análisis de la siniestralidad actual

El punto medular de este trabajo comprende la evaluación de los beneficios en términos de seguridad vial que ofrece la configuración 2+1, de donde se desprende la necesidad de efectuar un análisis de siniestralidad. En este sentido, en el periodo comprendido entre 2010 y 2013 se reportó en el tramo analizado un total de 61 accidentes que dejaron un saldo de 10 personas muertas y 63 lesionadas.

La figura 2.11 muestra los tipos de accidentes jerarquizados según su frecuencia. Se observan en primer lugar las colisiones frontales y laterales, con 15 eventos cada una. Estos dos tipos agrupan el 50% del total de los accidentes, el 70% de los muertos y aproximadamente el 78% de los lesionados. En segundo orden de importancia, con nueve colisiones cada uno, se encuentran el choque contra objeto fijo, el choque por alcance, y la salida del camino. Éstos concentran el 44% de los accidentes, el 30% de los muertos y el 22% de los lesionados.

Siendo los choques frontales y laterales los eventos predominantes y considerando los resultados del análisis de capacidad, se puede inferir que las maniobras de rebase no exitosas constituyen la principal causa que desencadena este tipo de colisiones. Se entiende por choque frontal la invasión de carril derivada de una maniobra de rebase o una pérdida de control en la que los conductores no realizan una acción evasiva; el impacto lateral o de costado, en cambio, puede obedecer a las mismas causas, pero en este caso los conductores tratan de evitar el impacto. Aunada a las condiciones prevalecientes, es importante señalar la presencia de usuarios vulnerables en la carretera, especialmente

motocicletas con los factores de riesgo asociados a su conducta, tal como se muestra en la figura 2.12. Respecto a la temporalidad de los accidentes, el 22% aconteció en domingo, seguido por los días lunes y viernes, con el 16% cada uno.



Fuente: Elaboración propia con base en los datos de los Anuarios Estadísticos de Accidentes.

Figura 2.11 Tipos de accidente con saldos registrados en 2010-2013



Fuente propia

Figura 2.12 Conducción temeraria por parte de motociclistas en la carretera La Pera-Cuautla

Características de la propuesta de modificación a 2+1

Como se comentó en el capítulo anterior, para el tramo analizado existía un proyecto de ampliación que fue suspendido por aspectos relativos al impacto ambiental. Tratando de minimizar los efectos negativos por el ensanchamiento de la sección transversal que se requiere para la configuración 2+1, esta propuesta contempla que la ampliación se lleve a cabo hacia el extremo derecho del sentido 1 y, de esta manera, se aprovecharían las terracerías que existen en algunos tramos y que se trabajaron en el proyecto de cuatro carriles cancelado (véase la figura 2.13).



Fuente propia

Figura 2.13 Trabajos cancelados para el proyecto de ampliación en la margen derecha del sentido 1

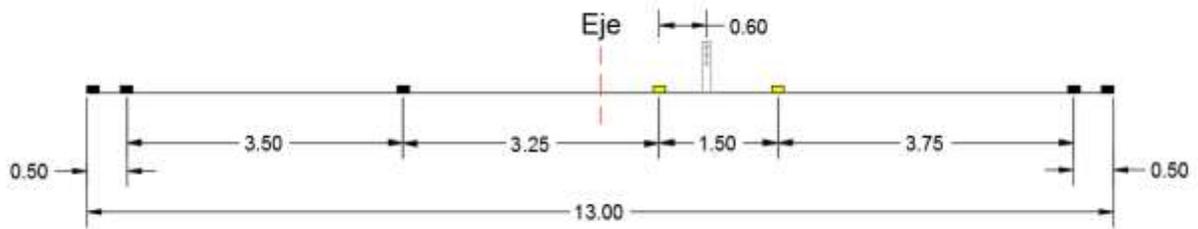
Por otra parte, esta propuesta no contempla la configuración 2+1 a todo lo largo del tramo analizado, ya que existen algunos puntos en los cuales la ampliación implicaría la modificación de estructuras como puentes, tal y como se muestra en la figura 2.14; tampoco se considera en tramos donde existen accesos ya sean enlaces de entrada o salida, con el objeto de evitar conflictos que desencadenen colisiones (por ejemplo, un vehículo circulando por el carril central y que desee desincorporarse repentinamente para tomar un enlace pudiera impactar con un vehículo que transite por el carril derecho). En dichas zonas se mantendría la sección transversal actual y bajo condiciones de operación convencional, es decir un carril por sentido.

La sección propuesta de carretera 2+1 es de 13 m de ancho; por lo tanto, sería necesario hacer una ampliación de 2.6 m que, en comparación con un proyecto de cuatro carriles, supone una obra mucho menor. La figura 2.15 muestra la distribución de los anchos por carril, acotamientos y faja separadora. Se propone que el ancho de las rayas en la faja central sea de 15 cm y las delimitadoras de los acotamientos y carriles sean de 10 cm.



Fuente propia

Figura 2.14 Estructura limitante para ampliar la sección



Elaboración propia

Figura 2.15 Sección transversal propuesta para la configuración 2+1

Para la designación de las zonas de resguardo es necesario contar con un levantamiento topográfico del entorno de la carretera, datos que para este proyecto no fue posible obtener. Sin embargo, se reitera que estas zonas se deberán ubicar en cada sección 2+1, del lado en el que se tiene carril único, es decir, irán cambiando de lado a la par que cambia la configuración 2+1.

En relación con la barrera central de cables, se sugiere la utilización de un dispositivo que ofrezca un nivel de contención tres (NC-3) dado que en este tramo carretero el porcentaje de vehículos pesados (transporte de pasajeros y carga) registrado es moderado (13.7%). Asimismo, se sugiere el empleo de la barrera solamente para las zonas en las cuales se tiene la configuración 2+1 y sus áreas neutras; y en los tramos donde se mantiene la sección actual se propone que la separación de los sentidos se mantenga con las marcas de pintura en la faja separadora. Estos tramos sin barrera central podrían ser utilizados por los vehículos de emergencia para hacer maniobras de retorno en caso de ser necesario.

Tomando en cuenta los aspectos descritos anteriormente, la tabla 2.2 muestra la distribución de las zonas 2+1 propuestas, indicando el cadenamamiento de inicio y fin del carril central para cada sentido, así como la pendiente del tramo, quedando el arreglo del carril central de rebase de la siguiente manera:

Tabla 2.2 Zonas 2+1 para ambos sentidos y pendientes

Cadenamiento	Pendiente sentido 1	Carril central sentido 1	Carril central sentido 2	Pendiente sentido 2	Diagrama carretera 2+1
1 + 200	-4.2%	↓4+000 ↓ ↓5+900	↑2+000 ↑ ↑ ↑4+000	4.5%	
1 + 500					
2 + 000					
2 + 500					
3 + 000					
3 + 500					
4 + 000					
4 + 500					
5 + 000					
5 + 500					
6 + 000					
6 + 500					
7 + 000					
7 + 500					
8 + 000	Caseta	Caseta			
8 + 500	-3.3%	↓11+500 ↓ ↓12+700	↑10+000 ↑ ↑11+300	4.6%	
9 + 000					
9 + 500					
10 + 000					
10 + 500					
11 + 000					
11 + 500					
12 + 000					
12 + 500					
13 + 000					
13 + 500					
14 + 000	-4.0%	↓15+500 ↓ ↓17+500	↑13+700 ↑ ↑15+000	4.1%	
14 + 500					
15 + 000					
15 + 500					
16 + 000					
16 + 500					
17 + 000					
17 + 500					
18 + 000	-3.7%	↓19+500 ↓ ↓21+000	↑17+500 ↑ ↑19+500	4.8%	
18 + 500					
19 + 000					
19 + 500					
20 + 000					
20 + 500					
21 + 000					

Elaboración propia

Para el sentido 1 La Pera-Cuautla

- Cuatro zonas de rebase, todas en pendiente descendente
 1. Del km 4+000 al 5+900 y pendiente del -4.2%
 2. Del 11+500 al 12+700 y pendiente del -3.3%
 3. Del km 15+500 al 17+500 y pendiente -4%
 4. Del 19+500 al 21+000 (plaza de cobro Coacalco), con una pendiente de -3.7%
- En total la longitud del carril central para el sentido 1 es de 6.6 km.

Para el sentido 2 Cuautla-La Pera

- También cuatro zonas de rebase, todas en pendiente ascendente
 1. Del km 19+500 al 17+500 y pendiente del 4.8%
 2. Del 15+500 al 13+700 con pendiente del 4.1%
 3. Del km 11+300 al 10+000 y pendiente del 4.6%
 4. Del km 4+000 al 2+000 en una pendiente de 4.5%
- En total la longitud del carril central para el sentido 2 también resultó de 6.6 km.

Zonas sin carril central

- Se dejaron tres tramos donde no se contempla la configuración 2+1 por diferentes situaciones, por ejemplo:
 1. Del km 1+200 al 2+000, no se considera por la cercanía con el entronque a la autopista México-Cuernavaca.
 2. Del km 5+900 al 10+000 existen diversas estructuras que limitan la ampliación, además del entronque de Tepoztlán.
 3. Del km 12+700 al 13+700 por la existencia del puente (figura 2.14).
- Las zonas en las que no se contempla la configuración 2+1 representan 5.9 km de longitud.

Como ejercicio inicial, esta distribución ofrece una alternativa, pero cabe aclarar que es necesario revisar que las áreas neutrales críticas no queden en zonas con restricciones de visibilidad. Cada una de estas zonas 2+1 requiere un diseño de señalamiento horizontal y vertical, cuyas pautas se describen en el apartado de lineamientos al inicio de este capítulo.

Actualmente, no existe una metodología para determinar el nivel de servicio ni la capacidad vial de una carretera de configuración 2+1. Sin embargo, el HCM incluye un anexo que define los procedimientos para determinar la mejora en el NS de una carretera convencional de dos carriles al añadir un carril de rebase o un tercer carril de ascenso. Considerando que la situación más crítica para el tramo analizado se presenta en el sentido 2 Cuautla-La Pera por la pendiente ascendente, se consideró el procedimiento del tercer carril de ascenso.

Los resultados de las medidas de desempeño del PTSF y la velocidad promedio de viaje (*Average Travel Speed, ATS*) para las condiciones prevalecientes representan los datos de entrada para calcular nuevamente estos valores de desempeño una vez que se ha agregado el carril central. El cálculo es iterativo, ya que para evaluar el efecto de la siguiente zona de rebase se utilizan los valores de las medidas de desempeño del tramo anterior y así sucesivamente hasta obtener el nivel de servicio de la carretera al haberle agregado el último carril central de rebase considerado en el proyecto. Para llevar a cabo el análisis fue necesario segmentar el tramo en cuatro secciones (véase la tabla 2.3).

Tabla 2.3 Definiciones de secciones para el análisis

Características	Sección			
	1	2	3	4
Límite inicial = kilometraje en el que comienza la sección analizada	21+000	16+250	12+500	7+900
Límite final = kilometraje en el que termina la sección analizada	16+250	12+500	8+300	1+200
Longitud total de la sección analizada (km)	4.75	3.75	4.20	6.70
Longitud aguas arriba del carril central (km)	1.50	1.25	1.05	3.90
Longitud del carril central incluyendo ambas áreas neutrales (km)	2.00	1.30	1.30	2.00
Longitud aguas abajo del carril central (km)	1.25	1.20	1.85	0.80

Elaboración propia

Además de los datos del PTSF y ATS, se requiere: (i) la tasa de flujo de demanda direccional (volumen horario de demanda en el sentido de análisis dividido por el factor de hora pico), (ii) la longitud total de la sección analizada y (iii) la longitud efectiva del carril central.

Como ya se mencionó, actualmente la carretera se encuentra en un nivel de servicio "E" con un valor de 90.5% del PTSF, al agregarle las cuatro zonas 2+1, se reduce el PTSF a 55.4% lo que ubicaría la operación en un nivel de servicio "C" sin embargo, no se logra un incremento sustancial en la ATS por lo tanto la carretera permanece en el nivel de servicio "E".

Expectativa en la reducción de siniestralidad

La longitud de carretera que permaneció con la sección actual de dos carriles representa el 30% de la longitud del tramo analizado; por lo tanto, se presume que

el potencial en la reducción de accidentalidad será del 70%, que corresponde al porcentaje de longitud con la configuración 2+1. Esta reducción tendría impacto únicamente en las colisiones frontales y laterales, aunque no se descartan otras colisiones que tengan origen en una maniobra evasiva por la invasión del carril, por ejemplo: la salida del camino y el choque por alcance.

Durante el periodo de análisis de 2010-2013 se registraron 30 percances del tipo lateral y frontal, que dejaron un saldo de siete personas muertas y 49 lesionadas; estas cifras representan 7.5 accidentes, 1.75 muertos y 12.25 lesionados al año. Considerando que la configuración 2+1 está diseñada para el 70% de la longitud, se estima que estas cifras se reducirán a 2.26 accidentes y 3.68 lesionados al año y una víctima mortal cada dos años.

Tabla 2.4 Expectativa en la reducción de colisiones frontales y laterales

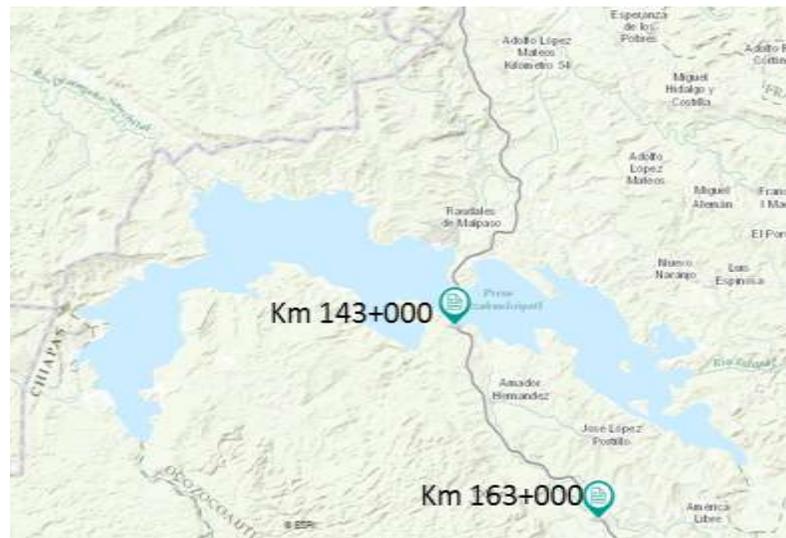
Tipo de colisión	Situación	Accidentes/año	Muertos/año	Lesionados/año
Choque de frente	Sin modificación	3.75	1.50	8.50
	Con modificación	1.13	0.45	2.55
Choque lateral	Sin modificación	3.75	0.25	3.75
	Con modificación	1.13	0.075	1.13

Elaboración propia

Bajo este esquema las colisiones frontales y laterales dejarían de ser los eventos predominantes dejando paso al choque contra objeto fijo, el choque por alcance y la salida del camino (véase la figura 2.11). La posible reducción de los impactos frontales y laterales representaría para el tramo analizado una reducción del 34% de los percances, 31% de las víctimas mortales y 54% de los lesionados. Ahora bien, es importante mencionar que, de llevarse a cabo esta propuesta, no resultaría extraño que durante los primeros meses se incrementarán las colisiones laterales básicamente, por la maniobras de convergencia sin que sea ésta una señal de alarma por tratarse de un fenómeno que han experimentado otros países y cuyo origen obedece a que los conductores no están habituados a la operación de este tipo de carretera.

2.3 Caso Las Choapas-Ocozocoautla

Dentro del análisis de siniestralidad resalta el tramo de 20 km comprendido entre el Entronque izquierdo Malpaso-Apic Pac del 143+000 al 163+000 de la carretera Las Choapas-Ocozocoautla. Esta carretera constituye la vía principal para viajar hacia el sur del país pasando por los estados de Veracruz y Chiapas.



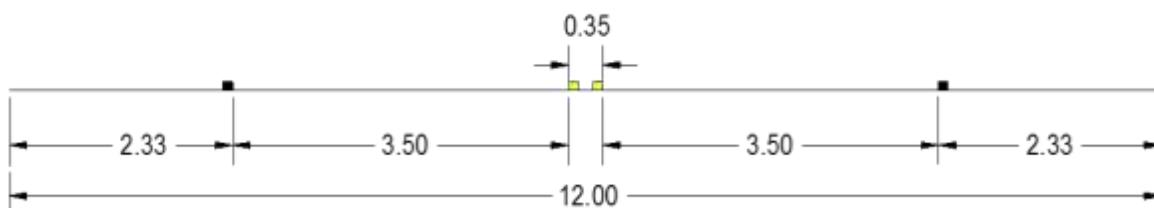
Fuente: INEGI

Figura 2.16 Ubicación del tramo en la carretera Las Choapas-Ocozocoautla

Se decidió que el tramo en estudio iniciaría después del puente que cruza la presa Netzahualcóyotl en el sentido 1 de dirección sur, ya que por cuestiones de seguridad no se recomienda colocar la configuración 2+1 a lo largo del puente.

Características físicas actuales

La sección con la que cuenta actualmente la carretera tiene un ancho de 12 m, con acotamiento en ambos lados de 2 m de ancho, y con carriles de 3.50 m. La faja separadora está delimitada con rayas de color amarillo de 0.10 m de ancho y con una separación entre caras internas de 0.60 m. Las rayas delimitadoras de acotamiento son de color blanco de 0.10 m. En la siguiente figura se aprecian las características mencionadas.



Elaboración propia

Figura 2.17 Sección transversal actual de la carretera Las Choapas-Ocozocoautla

Las pendientes longitudinales a lo largo del tramo son muy variadas, presentándose pendientes de hasta 7%. Debido a la topografía accidentada del terreno, el alineamiento horizontal se compone en gran parte de curvas.

Se identificaron 23 tramos de carretera que se encuentran sobre grandes terraplenes, con cañones y cauces naturales en ambos lados, lo que limita la posibilidad de ampliar la sección en estos puntos por la inclinación y la altura del talud. Otra limitante para la ampliación propuesta estriba en las siete estructuras en pie (puentes para el flujo directo y puentes transversales que cruzan la carretera). Ante la presencia de una pendiente descendente, en el km 160+300 se dispone de una rampa de frenado para los vehículos que circulan en el sentido 2.



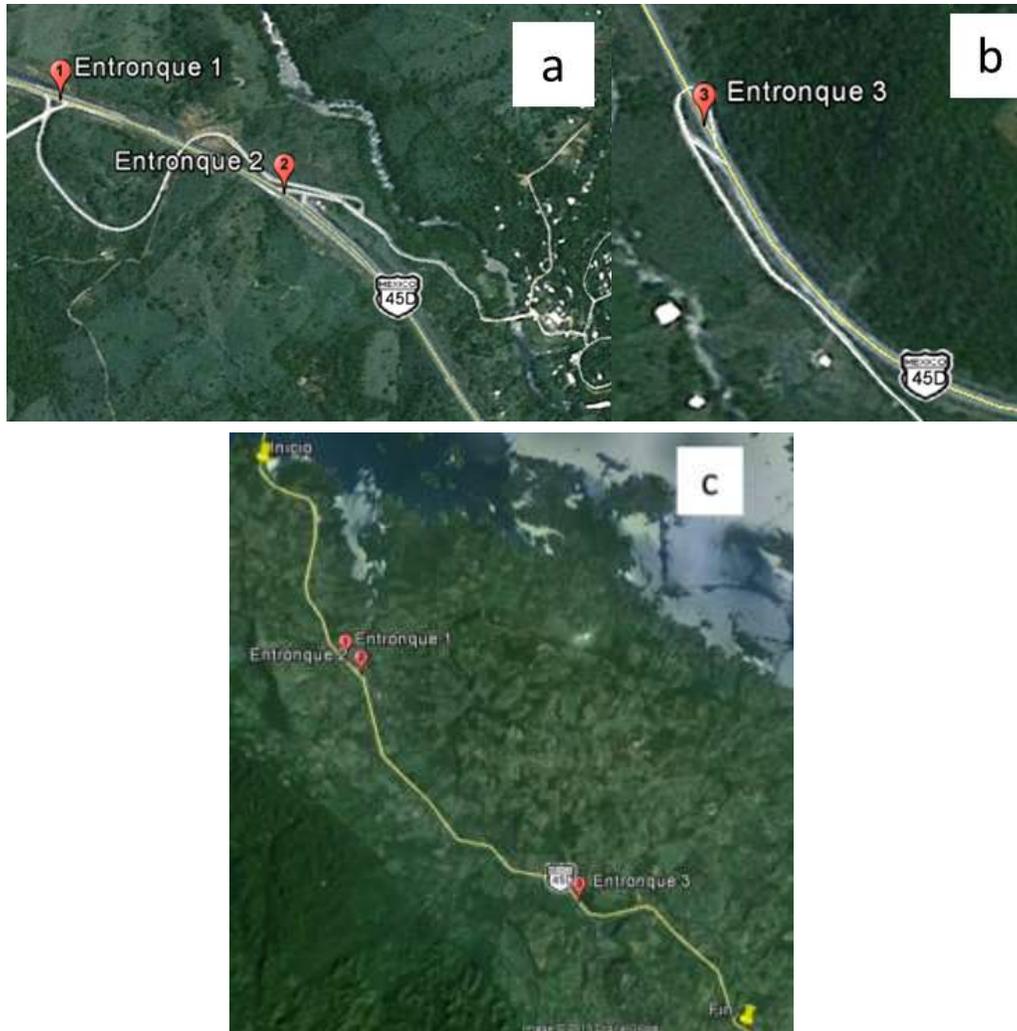
Fuente: Google maps

Figura 2.18 Rampa de frenado ubicada en el km 160+300

A lo largo del tramo analizado existen tres entronques que dan acceso a los poblados Francisco I. Madero, Amador Hernández y CNC. En el entronque 1, los accesos de entrada y salida de la carretera se encuentran en el sentido 1 (en el sentido del cadenamiento); en el entronque 2, ambos accesos de entrada y salida se encuentran colocados en el sentido de circulación 2 (véase la figura 2.19a), y para el entronque 3, el acceso de salida de la carretera se encuentra en el sentido 2 y el acceso de entrada a la carretera se encuentra en el sentido 1 (véase la figura 2.19b). Este último acceso se utiliza para ambos sentidos como entrada y salida, y sin restricción para los usuarios de dar vuelta hacia la izquierda a nivel (véase la figura 2.20).

Los accesos a los entronques no cuentan con carriles de deceleración ni aceleración, de acuerdo con el diferencial de velocidades de la carretera en comparación con el de los caminos rurales.

Los entronques 1 y 2 se encuentran interconectados por un camino de terracería (véase la figura 2.21). Este camino tiene la función de que los vehículos puedan realizar la maniobra de incorporación a la carretera en el sentido deseado. Además de estos accesos, se cuenta con 12 zonas de resguardo (descanso o servicios) para ambos sentidos y con diez accesos irregulares a propiedades privadas.



Fuente: Google Earth

Figura 2.19 Ubicación de entronques: (a) Poblados Amador Hernández y CNC, (b) Poblado Francisco I. Madero y (c) Conjunto de entronques



Fuente: Google maps

Figura 2.20 Entronque 3: (a) salida de la carretera y (b) entrada de la carretera



Fuente: Google Earth

Figura 2.21 Camino conector de entronques 1 y 2

En este tipo de carretera las zonas de rebase se determinan sumando las longitudes en donde la raya de la faja separadora se vuelve discontinua en el lado del sentido al que se va a permitir esta maniobra. El tramo analizado en toda su longitud no brinda ninguna zona de rebase, es decir, las rayas de la faja separadora son continuas en los 20 km, lo que indica que, en sentido estricto, no hay zonas de rebase en este tramo. Cabe mencionar que a pesar de lo anterior, se observan conductas arriesgadas por parte de los conductores para efectuar rebases (véase la figura 2.22).



Fuente propia

Figura 2.22 Maniobra de rebase

El señalamiento vertical existente en la carretera se considera adecuado, ya que contempla las señales informativas, preventivas y restrictivas necesarias, y estas señales en su mayoría se observan en buen estado. De igual manera, el señalamiento horizontal se encuentra en buen estado, con las rayas del tipo, color y dimensiones adecuadas para carreteras de dos carriles (véase la figura 2.23).



Fuente: Google Earth

Figura 2.23 Señalamiento horizontal

Características operativas actuales

Los valores más recientes publicados del TDPA y de la composición vehicular corresponden al año 2014 y se obtuvieron del documento *Volúmenes de tránsito registrado en las estaciones permanentes de conteo* [6]. Para el tramo analizado se registraron 5,430 vehículos por día, con una composición de 64.8% vehículos ligeros y 35.2% vehículos pesados.

La distribución direccional factor “D” y el porcentaje de vehículos del TDPA en la hora pico factor “K” se obtuvieron del libro de *Datos viales* del año 2014 [7], y los valores registrados son 0.504 y 0.087, respectivamente.

El límite de velocidad varía dependiendo del tramo de la carretera, identificando señalamientos con límites que van de 50 a 110 km/h. Esta variación indica la falta de consistencia en el diseño de la carretera, ya que las condiciones óptimas serían un límite de velocidad único y adaptar el alineamiento para una velocidad constante y que corresponda a las expectativas del conductor.

Dado que no fue posible realizar estudios de campo y tomando en cuenta que se trata de una carretera de cuota, se consideró una velocidad de operación de 110 km/h. Ahora bien, aunque existen datos publicados por la SCT [15] que indican velocidades de operación para vehículos ligeros que oscilan alrededor de 106 km/h, es importante mencionar que dichos valores corresponden a puntos cercanos a entronques o casetas de cobro y que por la interacción vehicular tienen un efecto en la velocidad, razón por la cual no se consideraron para el presente análisis.

Para la determinación del nivel de servicio se analizó el sentido 1 y debido a las variaciones de pendiente se dividió el tramo en tres segmentos:

1. Del cadenamiento 143+000 al 148+000, este segmento tiene pendientes excesivas —la más crítica de 7.1% y se presenta en una longitud de 1 km—, de tal manera que el NS que resulte en esta longitud será el que rija en los 5 km.

2. El segundo segmento con una longitud de 10 km —148+000 al 158+000— y tipo de terreno lomerío.
3. El tercer segmento del 158+000 al 163+000 —longitud de 5 km—, que para el análisis se consideró una pendiente promedio de 5.2%.

Para la obtención del nivel de servicio, se utilizaron los siguientes datos de entrada en los tres segmentos:

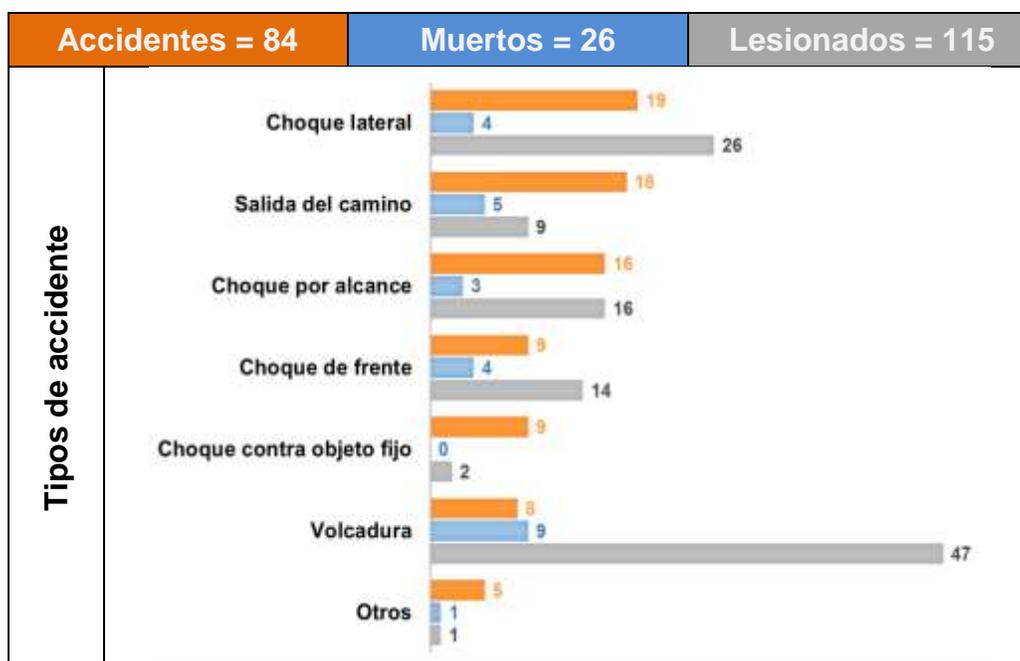
- TDPA = 5,430 veh/día
- D = 50/50
- K = 0.087
- Porcentaje de zonas de no rebase = 100%
- Porcentaje de vehículos pesados = 35.2%
- Velocidad de operación (BFFS) = 112 km/h
- Factor de hora pico (PHF) = 0.95
- Ancho de carril = 3.5 m
- Ancho de acotamiento = 2.5 m
- Densidad de accesos = 0.625 acc/km (sólo para el segmento 2)

Estos datos permitieron obtener el nivel de servicio actual de todo el tramo, lo que se traduce en un valor de ATS de 87.2 km/h, al cual le corresponde un nivel de servicio B, y un valor de 57.2% para PTSF, con un nivel de servicio C. No obstante que en la carretera se observaron rebases indebidos, para fines del análisis se consideró ausencia de zonas de rebase; aun así el nivel de servicio obtenido se considera bueno.

Análisis de siniestralidad actual

Durante el periodo de análisis de 2010 a 2013, en el tramo carretero analizado se contabilizó un total de 84 colisiones, de las cuales 48 registraron víctimas, con un saldo de 26 muertos y 115 lesionados. Cabe mencionar que este saldo de muertos corresponde a los registrados en el lugar y no incluye a aquellos que hayan muerto en camino al hospital o en un periodo de 30 días después del percance. La figura 2.24 muestra la distribución porcentual de los saldos por tipo de colisión: se observa que en primer lugar se presenta el choque lateral con 19 eventos, 4 muertos y 26 lesionados. Es probable que algunas de estas colisiones se atribuyan a maniobras de rebase no exitosas o a la invasión de carril por una pérdida de control.

Los accidentes a destacar en esta gráfica son: la salida del camino y el choque por alcance sin descartar los lesionados debido a volcaduras. Este tipo de evento reitera los efectos que la falta de consistencia en el diseño geométrico ocasiona en la operación de la carretera.



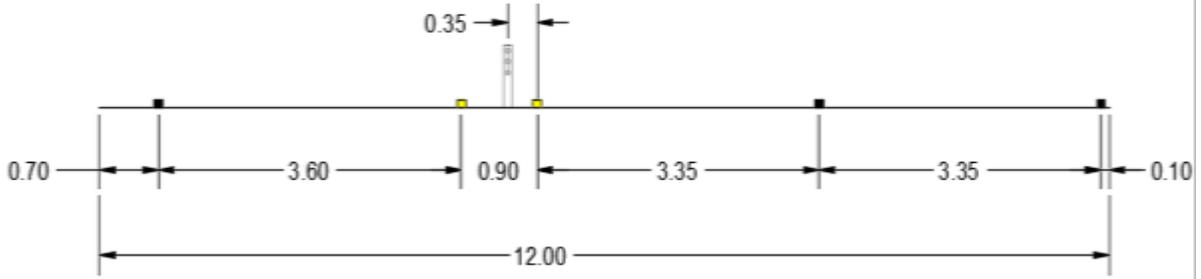
Elaboración propia con base en los datos de los Anuarios Estadísticos de Accidentes, IMT.

Figura 2.24 Distribución de saldos por tipo de accidente, 2010-2013

Características de la propuesta de modificación a 2+1

Como se mencionó anteriormente, en el tramo analizado se identificó un número importante de secciones en terraplén, así como puentes. Bajo estas condiciones plantear una ampliación de un metro implicaría un costo importante, que tal vez en este momento no se justifique; en un futuro, no obstante, cuando el tránsito lo demande, será necesaria la ampliación, pero ésta significará construir un cuerpo adicional. De esta manera, la propuesta de 2+1 en este tramo carretero se centra primordialmente en mejorar las condiciones de seguridad vial y no tanto en mejorar el nivel de servicio.

Ante este panorama y considerando que el flujo vehicular aún es bajo, se considera pertinente proponer un arreglo de configuración 2+1 que se ajuste a los 12 m de ancho de la sección actual. Ahora bien, aunque esto no cumple con los lineamientos de diseño planteados en el apartado 2.1, recordemos que en el capítulo 1 el caso de Alemania maneja secciones de 12 m o inferiores (figura 1.2). Sin embargo, para nuestro análisis no podemos tomar el dimensionamiento de los carriles y acotamientos tal cual, ya que se tiene que contemplar el espacio para la barrera central, lo que deriva en la distribución que se muestra en la figura 2.25.

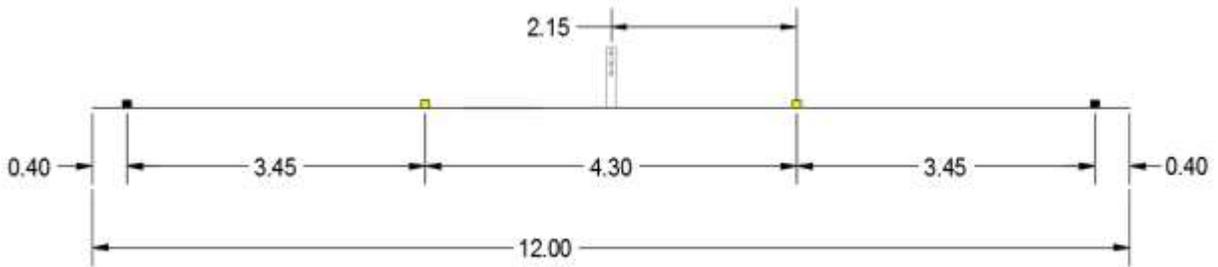


Elaboración propia

Figura 2.25 Sección transversal propuesta de 12 m para la configuración 2+1

Obsérvese que para el sentido con dos carriles los acotamientos se redujeron en su totalidad y se proponen carriles de 3.35 m. Es importante mencionar que aunque no cumplen con el ancho recomendado por la SCT para caminos tipo A2, existe un estudio realizado por Roy Jorgensen y Asociados en 1978 en el cual se demostró que un ancho de carril de 3.20 a 3.35 m registraba menores datos de accidentalidad que aquellos con 3.65 m [16]. Por ello, se considera la opción adecuada para las condiciones existentes de anchos disponibles.

Por otra parte, en el sentido con un solo carril el ancho del mismo se estableció en 3.6 m, y los acotamientos externo e interno de 0.7 y 0.5 m, respectivamente, quedando este sentido con un ancho total de 4.8 metros. Para las áreas neutrales también se propuso una sección tipo, que se ajusta al ancho de 12 m (véase la figura 2.26). Se asignó un ancho de 0.4 m para los acotamientos externos, 3.45 m para los carriles de circulación y una faja separadora de 4.3 m; nuevamente la barrera en esta zona se coloca a la mitad de la sección.



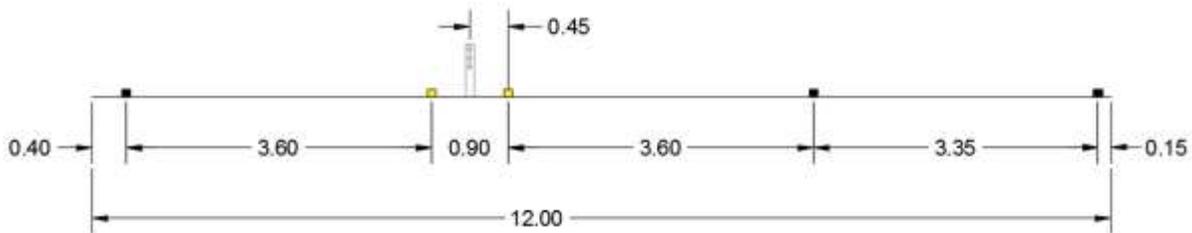
Elaboración propia

Figura 2.26 Sección transversal propuesta para áreas neutrales de la configuración 2+1

Aunque en primera instancia en esta propuesta no se contemplan cambios en el alineamiento de la carretera, se recomienda realizar un análisis de consistencia del alineamiento horizontal en el cual se evalúen los radios de curvatura y las deflexiones.

Un punto medular en el análisis de este tramo estriba en los entronques, y con el objeto de evitar conflictos, el diseño contempla que el señalamiento encauce a los conductores hacia la operación convencional de la carretera: es decir, un carril por

sentido y, posteriormente incluir carriles para el cambio de velocidad, ya sean de aceleración o deceleración, según sea el caso. Para evitar maniobras de vueltas izquierdas se propone darle continuidad a la barrera central de cables. La siguiente figura muestra la sección transversal propuesta para alojar el carril de cambio de velocidad de 3.35 m de ancho.



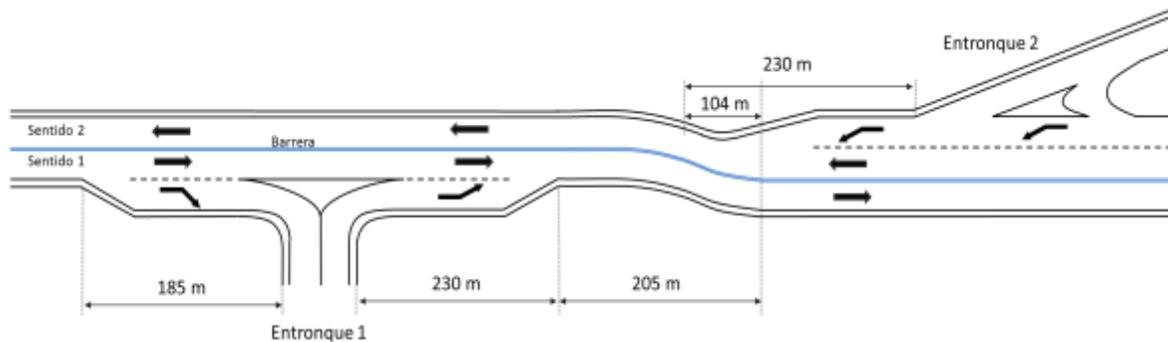
Elaboración propia

Figura 2.27 Sección transversal con carril de cambio de velocidad para entronques

Para el diseño de los carriles de cambio de velocidad, en la medida de lo posible, se consideraron los lineamientos de la tabla 11-J “Longitudes de los carriles de cambio de velocidad” del *Manual de proyecto geométrico de carreteras* [11], aunque cada acceso demandó un análisis particular que a continuación se describe:

- Para el entronque 1 ubicado en el cadenamamiento 148+670 y con los accesos en el sentido 1, se consideraron carriles de deceleración y aceleración. Debido a las características geométricas del entronque tan limitadas, en comparación con la velocidad de operación de la carretera, el diseño del carril de deceleración se contempla en 185 m, con el objeto de reducir la velocidad de 110 km/h a una condición de parada (véase la figura 2.28). Para el carril de aceleración, las consideraciones fueron otras, ya que el entronque 2 se ubica a 555 m, y en este espacio se deben alojar los dos carriles de aceleración (para el entronque 1 y 2) y la transición (para alojar los carriles de cambio de velocidad en el sentido 2). Bajo estas condiciones solo fue posible alojar carriles de aceleración de 230 m que corresponden a una condición de parada y una velocidad de la carretera de 80 km/h; la longitud de transición quedó de 205 m. Cabe aclarar que 104 m del carril de aceleración del entronque 2 se empalman con dicha transición.
- Aunque las distancias de los carriles de aceleración son menores a las señaladas en la tabla 11-J [11], al menos en el sentido 1 existen por lo menos 400 m de distancia de visibilidad que permitirían realizar la maniobra de incorporación de manera segura. Ahora bien, en el sentido 2 la distancia de visibilidad es menor -aproximadamente de 200 m- debido a la presencia de una combinación de alineamientos de curva horizontal y cresta. No obstante, se considera que el flujo vehicular que se incorpora a la carretera en el sentido 2 es bajo, ya que la ciudad más cercana es Ocozocuatla y está en dirección contraria; esta teoría se refuerza al observar las imágenes del navegador

Google Earth que muestra la acumulación de material granular en el acceso (véase la figura 2.29).



Elaboración propia. Croquis fuera de escala

Figura 2.28 Arreglo de carriles para el cambio de velocidad de los entronques 1 y 2 y transición



Fuente: Google Earth

Figura 2.29 Acumulación de material granular en la incorporación a la carretera del entronque 2

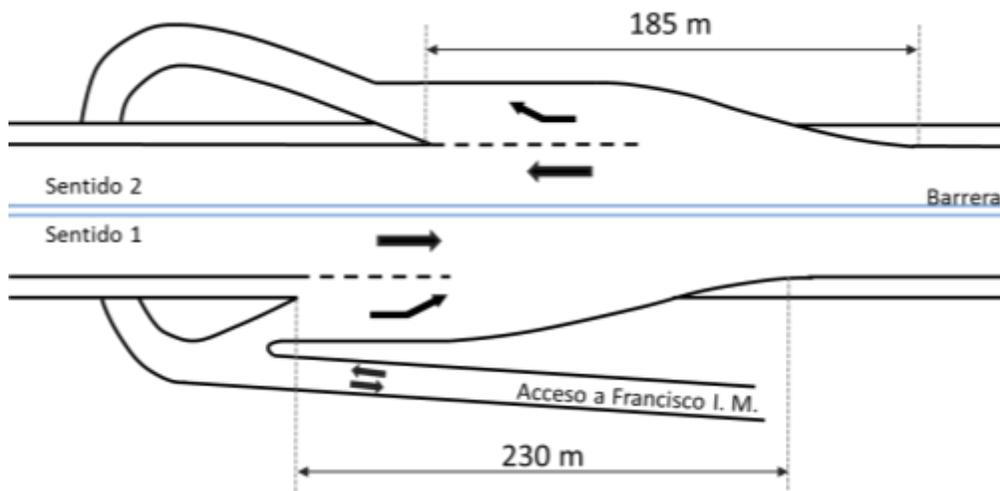
- Para el carril de deceleración del entronque 2, no existen impedimentos físicos en la colocación del mismo, ya que la longitud disponible es mayor que la longitud necesaria de 185 m; sin embargo, se detectaron vehículos pesados estacionados sobre el acotamiento debido a un pequeño restaurante (véase la figura 2.30). Históricamente se han tenido problemas de este tipo en las carreteras y la prohibición del estacionamiento no ha resultado ser una medida efectiva, por lo que se sugiere habilitar un área para el estacionamiento de los vehículos, ya que existe un espacio junto a la carretera, cuidando en todo momento la correcta canalización para que los vehículos estacionados no se incorporen de manera intempestiva al carril de circulación.



Fuente: Google Earth

Figura 2.30 Presencia de vehículos pesados estacionados sobre el acotamiento

- Para el entronque 3 ubicado en el cadenamiento 157+390, se requiere alojar dos carriles de cambio de velocidad en la misma zona, tal como se muestra en la figura 2.31. Para los vehículos procedentes de Ocozocuatla y que desean ingresar al poblado Francisco I. Madero, se propone un carril de deceleración de 185 m que permita reducir la velocidad de 110 km/h a una condición de parada. Aunque evidentemente la sección actual no permite otro carril, existe un espacio que podría aprovecharse para la construcción de un carril de aceleración de 230 m de longitud (véase la figura 2.32) que permitiría a los vehículos procedentes de dicho poblado incorporarse a la carretera con dirección Ocozocuatla a una velocidad de 80 km/h.



Elaboración propia. Croquis fuera de escala

Figura 2.31 Arreglo de carriles para el cambio de velocidad del entronque 3

De igual manera que en La Pera–Cuautla, en este caso no se cuenta con un levantamiento topográfico del entorno de la carretera; por lo tanto, no fue posible

definir las zonas de resguardo. No obstante, se reitera que dichas zonas se deberán ubicar en cada sección 2+1, del lado en el que se tiene carril único.



Fuente: Google Earth

Figura 2.32 Espacio disponible para carril de aceleración en el entronque 3

Debido a la alta presencia de vehículos de carga, se recomienda que la barrera de cables cumpla con los requerimientos para un nivel de contención 4 (NC-4). En el tramo analizado existen nueve puentes que pueden ser habilitados para que los vehículos de emergencia puedan realizar maniobras de retorno, razón por la cual no se contemplan aberturas en la barrera para las maniobras de retorno, de tal forma que la longitud de la barrera será igual a la longitud del tramo analizado. Se hace extensiva la recomendación respecto al arreglo de la separación de postes y puntos de anclaje que permitan reducir al máximo la deflexión de los cables.

Tomando en cuenta aspectos como la ubicación de los entronques, las pendientes longitudinales, las zonas de descanso existentes y que las transiciones de las zonas 2+1 no coincidieran con curvas pronunciadas verticales u horizontales, la tabla 2.5 muestra la distribución de las zonas 2+1 propuestas, que indica el cadenamamiento de inicio y fin del carril central para cada sentido, así como la pendiente del tramo.

Para el sentido 1 Las Choapas-Ocozocuautila

- Tres zonas de rebase, todas en pendiente ascendente
 1. Del km 143+000 al 145+500 y pendiente del 7.1%
 2. Del 150+500 al 153+000 y pendiente del 0.3%
 3. Del km 158+000 al 160+500 y pendiente 5.2%

En total la longitud del carril central para el sentido 1 es de 7.5 km.

Para el sentido 2 Ocozocuautila-Las Choapas

- También tres zonas de rebase, todas en pendiente descendente
 1. Del km 163+000 al 160+500 y pendiente del -5.2%
 2. Del 155+500 al 153+000, con pendiente del -0.3%
 3. Del km 148+000 al 145+500 y pendiente del -7.1%

En total la longitud del carril central para el sentido 2 también resultó de 7.5 km.

Zonas sin carril central

- Se dejaron dos tramos donde no se contempla la configuración 2+1 por la existencia de entronques:
 1. Del km 148+000 al 150+500 por los entronques 1 y 2
 2. Del km 155+500 al 158+000 por el entronque 3

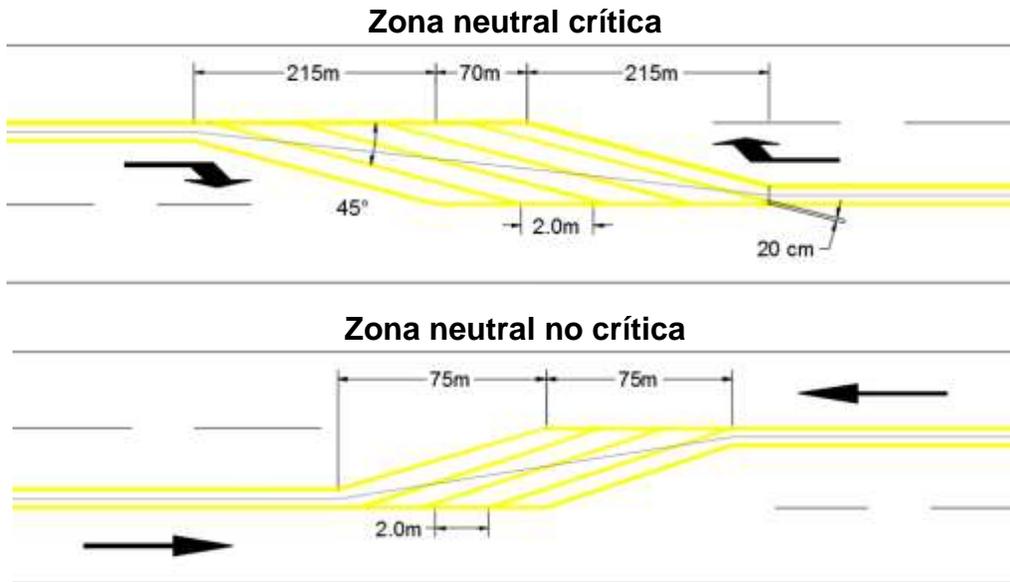
Las zonas en las que no se contempla la configuración 2+1 representan 5 km de longitud.

Tabla 2.5 Zonas 2+1 para ambos sentidos y pendientes longitudinales

Cadenamiento	Pendiente sentido 1	Carril central sentido 1	Carril central sentido 2	Pendiente sentido 2	Diagrama carretera 2+1	
143 + 000	7.1%	↓ 143+000		-7.1%		
143 + 500		↓				
144 + 000		↓				
144 + 500		↓				
145 + 000		↓				
145 + 500		↓ 145+500	↑ 145+500			
146 + 000			↑			
146 + 500			↑			
147 + 000			↑			
147 + 500			↑ 148+000			
148 + 000	0.3%			-0.3%		
148 + 500						
149 + 000						
149 + 500						
150 + 000						
150 + 500		↓ 150+500	↑ 153+000			
151 + 000		↓	↑			
151 + 500		↓	↑			
152 + 000		↓	↑			
152 + 500		↓ 153+000	↑ 155+500			
153 + 000		↑				
153 + 500		↑				
154 + 000		↑				
154 + 500		↑				
155 + 000						
155 + 500						
156 + 000	5.2%			-5.2%		
156 + 500						
157 + 000						
157 + 500						
158 + 000		↓ 158+000				
158 + 500		↓				
159 + 000		↓				
159 + 500		↓ 160+500	↑ 160+500			
160 + 000		↑				
160 + 500		↑				
161 + 000		↑				
161 + 500		↑				
162 + 000		↑				
162 + 500		↑				
163 + 000		↑ 163+000				

Elaboración propia

En el apartado de lineamientos se propone que las longitudes de las zonas 2+1 sean de 2 km como máximo, aunque para este ejemplo se plantearon zonas de 2.5 km. Este cambio obedece a que se estiman velocidades de operación en torno a 110 km/h y el diseño de las áreas neutras (críticas y no críticas) debe hacerse para dicha velocidad, lo que implica extender las transiciones y restando longitud efectiva al carril central. Tomando como base la ecuación 7, se propone una longitud para el área neutral crítica de 500 m, compuesta por dos segmentos de transición de 215 m cada uno, y un tramo intermedio de holgura de 70 m. Para el área neutral no crítica se propuso una longitud de 150 m, compuesta por dos tramos de transición de 75 m (véase la figura 2.33).



Elaboración propia

Figura 2.33 Áreas neutras y su señalamiento horizontal para velocidad de operación de 110 km/h

Es importante aclarar que la distribución propuesta del carril central ofrece una alternativa, pero es necesario revisar que las áreas neutras críticas no queden en zonas con restricciones de visibilidad. De igual forma, cada una de estas zonas 2+1, junto con los entronques, requieren un diseño de señalamiento horizontal y vertical, aspectos que no contempla este trabajo.

Después de haber realizado el análisis de capacidad vial para el estado actual, se realizó nuevamente un análisis considerando carriles y acotamientos de 3.40 y 0.35 m de ancho (valores medios), respectivamente, debido a que los carriles y el acotamiento se reducen para alojar el carril de rebase y esto produce un efecto en la operación. Sin embargo, los niveles de servicio (NS) que se obtuvieron para ambas medidas de desempeño (ATS y PTSF) a lo largo del tramo fueron iguales. Para ATS se obtuvo un NS "B", con un valor de 80.13 km/h, es decir, 6.94 km/h menos que el estado actual debido a la reducción de los carriles y el acotamiento, mientras que para el PTSF se obtuvo el mismo NS "C" y el mismo porcentaje de

57.2%; es decir este nivel de eficiencia no se ve impactado por la reducción de la sección.

El objetivo de realizar la modificación anterior obedece a la disminución de los anchos mencionados al implementar las zonas 2+1, y como la metodología empleada utiliza los valores obtenidos de las medidas de desempeño del estado actual de la carretera, si se hubiera trabajado con los anchos originales de la sección, el resultado que se obtendría no sería necesariamente el más apegado a la realidad.

Posteriormente y una vez obtenidos los nuevos valores del nivel de servicio con las modificaciones correspondientes, se decidió utilizar las metodologías propuestas para las carreteras de dos carriles: a) la que considera un carril de rebase para la sección 2 con tipo de terreno lomerío y b) la de un tercer carril de ascenso para el análisis de las secciones 1 y 3 con pendiente específica ascendente. Los datos de entrada utilizados en cada sección para las zonas de rebase en el sentido 1 fueron los siguientes:

Tabla 2.6 Zonas 2+1 en el sentido 1

Características	Sección		
	1	2	3
Límite inicial = kilometraje en el que comienza la sección analizada	143+000	148+000	158+000
Límite final = kilometraje en el que termina la sección analizada	148+000	158+000	163+000
Longitud total de la sección analizada (km)	5.00	10.00	5.00
Longitud aguas arriba del carril central (km)	*	2.50	*
Longitud del carril central incluyendo ambas áreas neutrales (km)	2.50	2.50	2.50
Longitud aguas abajo del carril central (km)	*	5.00	*

Elaboración propia

* Datos no requeridos para el análisis de tercer carril de ascenso

Finalmente, al agregarle las tres zonas de rebase al análisis, comprobamos que el impacto generado en la fluidez del tránsito es positivo. El NS obtenido para ATS fue "A" con un valor de 104.2 km/h. Lo que nos indica un aumento de 17 km/h en la velocidad promedio de viaje a lo largo del tramo en comparación con la situación actual. Para el PTSF, el NS obtenido fue de "A" registrando una disminución de 2.8% de tiempo en fila en comparación con la situación actual.

Expectativa en la reducción de siniestralidad

Este caso de estudio considera la colocación de una barrera central en toda la longitud del tramo, por lo que podría estimarse una reducción total de los impactos frontales y laterales, presuponiendo que éstos se originen por maniobras de rebase inconclusas. Durante el periodo 2010-2013, dichos percances ascendieron a 28 colisiones, que dejaron un saldo de ocho fallecidos y 40 lesionados (véase la figura 2.24). Si se lograrán abatir estos eventos, se reducirían en un 33% los accidentes y en 31 y 35% los muertos y lesionados, respectivamente.

Tabla 2.7 Expectativa en la reducción de colisiones

Situación	Accidentes/año	Muertos/año	Lesionados/año
Sin modificación	21.00	6.50	28.75
Con modificación	14.00	4.50	18.75
Reducción	33.3%	30.8%	34.8%

Elaboración propia

Se reitera que, de llevarse a cabo esta propuesta, no resultaría extraño que durante los primeros meses se incrementarán las colisiones laterales básicamente, por las maniobras de convergencia, sin que ello represente una señal de alarma por tratarse de un fenómeno que han experimentado otros países y cuyo origen obedece a que los conductores no están habituados a la operación de este tipo de carretera. Es probable también que la modificación ejerza un impacto en otros tipos de percance, por ejemplo: la reducción de colisiones por alcance y salida del camino que tengan como origen una maniobra defensiva para evitar la colisión frontal; sin embargo, son valores que, con los datos de accidentes disponibles, no es posible estimar.

3. Puntos de reflexión y conclusiones

Es innegable que las carreteras con calzadas de 12 m han resuelto problemas de movilidad conectando centros urbanos con relaciones beneficio-costos muy atractivas para los inversionistas de los sectores tanto público como privado. Desafortunadamente, los usuarios están asumiendo un alto riesgo al circular por dichas vialidades, ya que realizan maniobras de rebase de manera indiscriminada, y este comportamiento se explica básicamente por dos razones: primero, porque los mismos gestores del camino colocaron señalamiento en el que incitaban al conductor del vehículo lento a circular por el acotamiento para permitir el rebase y segundo, en el diseño geométrico de la carretera no se contemplaron zonas para rebasar. Respecto a este último punto, cabe aclarar que la normatividad mexicana dicta que en el 40% de la longitud debe permitirse el rebase, pero este lineamiento tiene un carácter de sugerencia y no de obligatoriedad.

Ante este panorama, en México prevalece un problema de siniestralidad que merece atención, y como se explicó en el apartado de este documento titulado “Estado del arte”, éste punto constituye una dificultad que han enfrentado otros países y que han logrado abatir con las carreteras 2+1. Este trabajo propone algunos lineamientos y expone dos casos de estudio en los cuales la implementación de la configuración 2+1 plantea beneficios no sólo en términos de seguridad vial sino en el nivel de servicio de la operación de la carretera.

En primera instancia, se propone la configuración 2+1 para carreteras de dos carriles de cuota, y los casos de estudio de estudio analizados así lo plantean, ya que existe un control de accesos que permiten darle continuidad al carril central de rebase.

Es importante reconocer que el conductor mexicano desconoce la operación de la configuración 2+1. Aunque puede estar familiarizado con el tercer carril de ascenso donde las maniobras las realiza el conductor del vehículo lento –desplazándose al carril de la derecha–, en la configuración 2+1 el carril derecho se mantiene en todo el trayecto, siendo el vehículo que desea rebasar el que realiza las maniobras de divergencia y convergencia. De esta forma, el éxito de la configuración 2+1 está directamente relacionado con el señalamiento horizontal y vertical que indique las características de la infraestructura y las maniobras que debe realizar, a través de un lenguaje de símbolos que sea claro y preciso, tratando en la medida de lo posible de respetar los lineamientos existentes.

Países como Alemania no colocan un elemento físico que separe los sentidos de circulación; en Francia, por otra parte, se recurre a barreras de concreto. Los casos de estudio analizados en este trabajo se basan en la ideología Sueca y

proponen la instalación de una barrera central de cables tensados, con el objeto de reducir las colisiones frontales y los impactos laterales que pudieran ser producto de una maniobra de rebase no exitosa.

Todas las modificaciones que se efectúan en una infraestructura requieren un tiempo para que los usuarios se familiaricen con la operación y el funcionamiento; no resultaría extraño que al inicio, los tramos con la configuración 2+1, experimentaran aumentos en el número de percances –principalmente impactos laterales por las maniobras de convergencia– que gradualmente irán disminuyendo, pero lo más importante es la reducción en el número de víctimas. También se podría esperar un cierto nivel de rechazo por parte de los conductores al ver restringida su libertad de maniobra para los adelantamientos.

Bibliografía

1. Weber, Roland *et al.* (2008), “2+1 roads – new findings from Germany”, *Traffic Engineering & Control*, volumen 49, núm. 4, abril de 2008, Inglaterra.
2. B. Potts, Ingrid y Douglas W. Harwood (2003), *Application of European 2+1 Roadway Designs*, National Cooperative Highway Research Program, núm. 275, abril de 2003, EE. UU.
3. Gerondeau, Christian *et al.* (2007), “Experiencia sueca y francesa en las carreteras 2+1 vías tan seguras como las autopistas”, *Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera*, 4.^a época, núm. 153, mayo-junio, pp. 26-37, España.
4. Cuevas, Cecilia *et al.* (2012), “Evaluación de tramos carreteros en función de una siniestralidad esperada”, *revista Vías Terrestres*, núm. 16, p. 14, Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres, A.C., Ciudad de México.
5. IMT (2015), *Anuarios estadísticos de accidentes en carreteras federales 2010 a 2013*, Instituto Mexicano del Transporte, documentos técnicos núm. 51, 56, 57 y 61, Sanfandila, Querétaro.
6. SCT (2015), *Volúmenes de tránsito registrados en las estaciones permanentes de conteo de vehículos*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
7. SCT (2015), *Datos viales 2014*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
8. TRB (2010), *Highway Capacity Manual*, capítulo 15 “Two-Lane Highways”, volumen II, Transportation Research Board [Junta de Investigación sobre Transporte], EE. UU.
9. SAHOP (1977), *Manual de proyecto geométrico de carreteras*, Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), Ciudad de México.
10. SCT (1984), *Normas de servicios técnicos: proyecto geométrico*, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
11. SCT (2012), *Norma Oficial Mexicana NOM-037-SCT2-2012*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México.

12. NCHRP (2012), *“Guidance for the Selection, Use, and Maintenance of Cable Barrier Systems”*, National Cooperative Highway Research Program, Report 711, Transportation Research Board of the National Academies, EE. UU.
13. AASTHO (2001), *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets 2001*, American Association of State Highway and Transportation Officials, EE. UU.
14. SCT (2014), *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad 2014*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
15. SCT (2013), *Velocidades de punto 2013*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura, Dirección General de Servicios Técnicos, Ciudad de México.
16. Vallés R., Miguel (2011), *Comentarios a las normas de trazado, casos prácticos generales*, memorias del Curso Internacional de Seguridad en Carreteras 2011, Sanfandila, Querétaro.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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