



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Propuesta metodológica para justificar la construcción de intersecciones a desnivel

Juan Fernando Mendoza Sánchez
Favio M. Quezada Bermúdez
José Adrián Trejo Trejo

**Publicación Técnica No. 436
Sanfandila, Qro., 2015**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Propuesta metodológica para justificar la
construcción de intersecciones a desnivel**

Publicación Técnica No. 436
Sanfandila, Qro., 2015

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por el MC Juan Fernando Mendoza Sánchez, el Ing. Favio M. Quezada Bermúdez y el Ing. José Adrián Trejo Trejo, investigadores del Grupo de Medio Ambiente.

Contenido

Resumen		iv
Abstract		vi
Resumen	Ejecutivo	viii
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	5
Capítulo 2.	Metodología para justificar la construcción de intersecciones a desnivel	39
Capítulo 3.	Casos de estudio	55
Capítulo 4.	Conclusiones	67
Bibliografía		69
Anexo 1	Escenarios de análisis	73

Resumen

La presente investigación muestra el desarrollo de una metodología para justificar la construcción de una intersección a desnivel, con base en la distribución de probabilidades de Poisson, donde variables como el volumen de tránsito, velocidad de punto, tiempo de maniobra y la geometría de la intersección se conjuntaron para determinar la probabilidad de que dos vehículos se encuentren.

Dicha metodología permite a los tomadores de decisiones evaluar el momento adecuado en que la seguridad vial en una intersección se ve comprometida, en términos de su capacidad vial, la geometría y el resto de variables del tránsito incluidos en el modelo.

Aunque el resultado no pudo validarse mediante la estadística de siniestralidad en los casos de estudio, las gráficas obtenidas se comportaron conforme a los objetivos y la hipótesis planteada del proyecto, consiguiendo asegurar que el producto de esta investigación sea una herramienta técnica preventiva útil para justificar la mejora de una intersección, la cual pudiera ser una geometría a desnivel.

La revisión bibliográfica permite también tener un panorama sobre el estado del arte actual sobre la siniestralidad, la importancia de las intersecciones en un sistema vial y cómo éstas, si se descuidan, pueden contribuir a un incrementar el índice de accidentes de tránsito, así como una visión global de las metodologías actuales para evaluar intersecciones en términos de seguridad.

Abstract

This research shows the development of a methodology to justify the construction of an overpass intersection, based on the probability distribution of Poisson, where variables such as traffic volume, speed, maneuvering time and the geometry of the intersection were conjoined to determine the probability that two vehicles are intersected.

This methodology allows decision makers to assess the appropriate time where road safety at an intersection is exceeded, in terms of road capacity, geometry and other traffic variables included in the model.

Although the results could not be validated by statistical accident in the case studies, graphs obtained had a behavior in accordance with the objectives and the hypothesis of this project, ensuring that the product of this research is a useful tool to justify a preventive technique to improve an intersection, which could be an overpass intersection geometry.

The literature review also allows an overview of the current state of the art about accident rates, the importance of the intersections in the road system as they are if neglected can contribute to increasing the rate of traffic accidents, as well as current overview methodologies for evaluating intersections in terms of safety.

Resumen ejecutivo

En el año 2011, las Naciones Unidas formularon el “Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020”, el cual busca que todos los países tengan más seguridad vial para el futuro, donde los países firmantes se comprometen a adoptar medidas para salvar vidas en las carreteras, mejorando principalmente la seguridad vial.

El informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2013, el cual incluye información de 128 países, indica que las cifras de víctimas mortales fue de 1.24 millones de muertes por accidentes de tránsito por año.

Las lesiones causadas por el tránsito son la octava causa mundial de muerte, y la primera entre los jóvenes de 15 a 29 años. Las tendencias actuales indican que, si no se toman medidas urgentes, los accidentes de tránsito se convertirán en 2030 en la quinta causa de muerte. Tan solo en México se tiene una mortalidad estimada por accidentes de tránsito de 20.7 por cada 100,000 habitantes (OMS, 2009).

A partir de las cifras anteriores, se vuelve prioritario contar con un sistema de tránsito seguro que permita contrarrestar la vulnerabilidad humana y reducir el número y severidad de los accidentes de tránsito. Para ello en 2011, en México se publicó la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020, cuyo objetivo general es reducir en un 50% las muertes, así como disminuir al máximo posible las lesiones y discapacidades por accidentes de tránsito en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, promoviendo la participación de las autoridades de los tres niveles de gobierno, atendiendo a su ámbito de competencia y facultades.

Algunas estadísticas reflejan que las colisiones en las intersecciones comprenden aproximadamente el 40% de todos los accidentes de vehículos a motor.

Por ello es importante estudiar las intersecciones viales dentro de los sistemas de transporte, principalmente porque es en ellas donde se presenta la mayor cantidad de conflictos viales, los cuales pueden derivarse en accidentes potenciales cuando dos vehículos se encuentran.

Las intersecciones a desnivel son aquellas donde los conflictos del tránsito prácticamente desaparecen, quedando solo aquellos donde el impacto en un accidente de tránsito es mínimo, pero para un país en desarrollo es muy difícil contar con un sistema vial conformado por este tipo de intersecciones a fin de evitar comprometer la seguridad de los usuarios.

De esta manera se busca sugerir a los tomadores de decisiones una herramienta metodológica basada en funciones de probabilidad de que dos vehículos se encuentren, para poder evaluar el nivel de seguridad de la intersección y, con base en ello, justificar la construcción de intersecciones a desnivel, sin remordimiento de los costos que estos entronques viales implican.

Hasta ahora la construcción de un entronque a desnivel se ha justificado en términos de la seguridad vial en la intersección y los conflictos de tránsito que en ésta se presentan, empleando diversas metodologías, pero no se ha establecido un mecanismo mediante el cual se facilite la visualización a fin de evitar que ocurran accidentes cuando resulta necesario la evolución de las intersecciones simples a nivel. Estudiar el tipo de accidentes, su causa, los costos materiales, así como incluir las pérdidas humanas, permite evaluar y comparar contra el costo por concepto de construcción y mantenimiento de dicho paso a desnivel, lo cual permite justificar un cambio de intersección de nivel a una a desnivel, pero no es una herramienta técnica preventiva, sino un análisis socioeconómico, en el que se contemplan variables de costo y beneficios.

A efecto de alcanzar una mayor comprensión de la problemática y la búsqueda de posibles soluciones ante la accidentalidad en los entronques, con este trabajo se busca establecer una herramienta preventiva para evaluar los entronques a nivel ya existentes, a partir de la cual podría determinar de forma más precisa el momento en el que su funcionalidad, seguridad y comodidad se han visto comprometidas, lo que representa un peligro para los usuarios. En este mecanismo se incorporan variables como la intensidad del tránsito y su composición actual, quiénes serán los futuros usuarios, junto con la accidentalidad, el nivel de servicio que dicha intersección brinda al usuario, etc., para así poder decidir con exactitud cuándo es que resulta necesaria la modificación total o parcial de una intersección, así como de sus dispositivos de control.

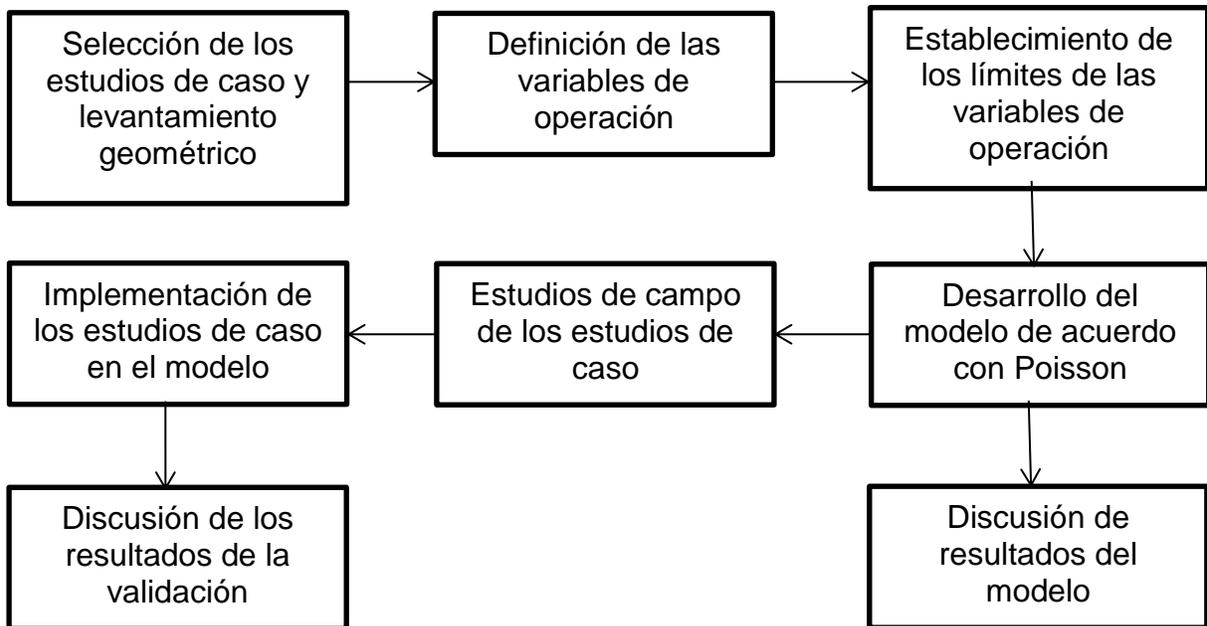
Por eso es importante concebir un modelo que se centre en el uso de distribuciones de probabilidad. El uso de dichas distribuciones de probabilidad constituye una herramienta básica para predecir el comportamiento futuro de diferentes acontecimientos o fenómenos naturales, sin que éstos lleguen a materializarse.

Las distribuciones de probabilidad están integradas por variables que pueden asociarse a las características del tránsito y de la vialidad, si se aplican a la ingeniería de tránsito, ejercicio que se realiza en muchos análisis actualmente. El planteamiento propuesto en el presente trabajo pretende aplicar la probabilidad de ocurrencia de accidentes entre dos vialidades al conformar una intersección, en función de sus volúmenes de tránsito, velocidades de operación y características geométricas, es decir la probabilidad de que dos vehículos puedan encontrarse en una intersección.

La distribución de probabilidades de Poisson permite determinar el número de ocurrencias de un evento específico, por lo que si es posible establecer un vínculo entre las características de operación del tránsito y de la vía, entonces se obtendría una metodología que permita justificar la necesidad de intersecciones a desnivel en carreteras con base en la probabilidad de ocurrencia de accidentes viales.

La revisión del estado del arte de la presente investigación se basa en dos partes principalmente. La primera de ellas se centra en la descripción teórica de los elementos que integran la ingeniería de tránsito para puntualizar cómo una intersección forma parte de la infraestructura del transporte. La segunda parte consiste en una revisión internacional de la práctica de cómo en la ingeniería de carreteras se justifica la toma de decisiones cuando se requiere construir una intersección a desnivel en esos sitios.

La figura siguiente muestra un esquema de cómo se llevó a cabo la metodología del proyecto de investigación, a partir de la cual se pueden evaluar las intersecciones a nivel en función de la probabilidad de ocurrencia de accidentes de acuerdo con la distribución de Poisson.



Metodología del proyecto

En función de la geometría se seleccionaron dos tipos de intersecciones para realizar el análisis: una de ellas será del tipo “T” y la otra en cruz “+”.

Para las intersecciones tipo se definieron las variables de operación de acuerdo con los casos más comunes que se presentan en las carreteras en México, para lo cual se incluye un análisis de sensibilidad de dichas variables. Las variables del tránsito a utilizar son: volúmenes de tránsito, velocidad de operación, y, en su caso, la clasificación vehicular.

Se determinarán las condiciones de diseño geométrico ideales para las intersecciones tipo, tales como ancho de carriles, número de carriles y distancia de visibilidad, entre otras.

Los límites de las variables de tránsito que se utilizarán para el desarrollo del modelo son importantes, dado que establecen los valores máximos y mínimos que se incluyen en la caracterización del tránsito.

Las variables definidas fueron el volumen de tránsito, la velocidad y el tiempo de maniobra.

De acuerdo con el *Manual de capacidad vial* del Transportation Research Board (HCM por sus siglas en inglés), en su versión 2010, la capacidad en el carril principal será de 1,800 vehículos ligeros por hora, por lo que el análisis de probabilidades comenzará desde un 10% de ese valor, hasta incrementarse porcentualmente del 0, 20, 40, 50, 60, 80 y 100 por ciento, para cada uno de los movimientos, hasta alcanzar su máxima capacidad. De esta manera se obtuvieron los diversos escenarios de la investigación.

El tiempo estimado para las intersecciones de estudio fue de 4 segundos, incluido el tiempo de reacción y el tiempo necesario para la maniobra de acuerdo con el movimiento rectilíneo uniformemente variado; sin embargo, este valor no se utilizó puesto que resultan más conservadores los valores que establece el HCM.

Cuando se aplica a la ingeniería de tránsito en eventos como la llegada aleatoria de vehículos a un punto sobre una vialidad y la ocurrencia de accidentes, Poisson nos permite obtener una ecuación del tipo siguiente:

$$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!}$$

Dicho planteamiento se pretende aplicar a la probabilidad de ocurrencia de accidentes entre dos vialidades que conforman una intersección, en función de sus volúmenes de tránsito, velocidades de operación y características geométricas de la vialidad.

El modelo se aplicó a dos casos de estudio:

- Para la intersección en “T” se seleccionó el entronque de las carreteras estatales 400 y 420, que conforma la red de caminos del estado de Querétaro.
- Para la intersección en “+” se seleccionó el entronque de las carreteras estatales 200 y 500, que conforma la red de caminos del estado de Querétaro.

Los resultados se ajustan adecuadamente a lo esperado, a fin de poder modelar la probabilidad de que dos vehículos se encuentren; de esta manera, los umbrales integrados a la gráfica permiten identificar las zonas críticas.

Con la información de los aforos de las intersecciones de estudio se pudo evaluar en qué nivel de probabilidad se encuentran dichos cruceros, que para el caso en “T” el nivel de seguridad se encuentra por debajo del 50%, y para la intersección en “+” el nivel está por encima del 75 por ciento.

Los resultados muestran la efectividad de la herramienta para la toma de decisiones, sin que la solución tenga necesariamente que ser un entronque a desnivel —tema objeto del presente trabajo—, ya que de las intersecciones de estudio se pueden evaluar otras opciones para mejorar los entronques, aunque la probabilidad de encontrarse dos vehículos no cambiaría. Por ello, para el caso de la intersección en “+”, se recomienda que a la brevedad posible se modifique la intersección a fin de evitar accidentes.

Para una mayor efectividad del modelo, era deseable validarlo con base en información histórica sobre la siniestralidad de la zona, sin embargo, no se pudo completarse la validación por la escasez de información sobre los accidentes registrados en las intersecciones de estudio.

De acuerdo con la hipótesis planteada, con la distribución de probabilidades de Poisson, fue posible determinar la probabilidad de ocurrencia de que dos vehículos se encontraran en una intersección, para lo cual se estableció una conexión entre las características de operación del tránsito y de la vía, obteniendo a través de esta función de probabilidad una metodología que permite justificar la necesidad de contar con intersecciones a desnivel en carreteras basados en la probabilidad de ocurrencia de que dos vehículos se encuentren en el entronque vial.

Las gráficas nos proporcionan una idea del comportamiento del tránsito y de la probabilidad de que ocurra un accidente en la intersección a distintos volúmenes de tráfico, permitiéndonos, de esta manera, saber cuándo una vialidad presenta problemas de accidentes o los tendrá en el futuro.

Al aplicar el modelo en las intersecciones que actualmente están en operación, se podrá definir la probabilidad de ocurrencia de accidentes, lo que permite sugerir una justificación técnica preventiva para que una intersección a nivel puede convertirse en una a desnivel en función de las probabilidades de ocurrencia de accidentes, sin que estos lleguen a materializarse, tomando en cuenta los ahorros que representan los daños materiales y los costos de vidas humanas o los traumatismos derivados de los accidentes viales.

A partir de la información operacional y de las variables del tránsito en las intersecciones, se podrán evaluar las tendencias y pronósticos de los parámetros relacionados con la circulación vial, y con estos realizar un seguimiento periódico

de las intersecciones, principalmente aquellas que estén a punto de generar una alta siniestralidad.

Esta metodología aplica un precedente como una herramienta técnica preventiva de la accidentalidad en los entronques. Ello permite seguir investigando el tipo de accidentes que se presentan, así como sus causas, para aplicar los resultados al modelo y poder pulirlo con mayor detalle, para cada caso de estudio en particular. Al mismo tiempo, esta operación arroja resultados más precisos y certeros del momento en que se van a presentar problemas de accidentes en una intersección.

Por último, esta metodología también facilita el estudio en torno a cuándo es que resulta necesaria la canalización de los distintos flujos vehiculares en un entronque a nivel, para así reducir al mínimo los conflictos que se generan cuando los volúmenes de tránsito comienzan a incrementarse en las intersecciones.

Introducción

En el año 2011, las Naciones Unidas formularon el “Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020”, cuyo objetivo es que todos los países alcancen una mayor seguridad vial en el futuro. En el marco de esta iniciativa, los países firmantes se comprometen a adoptar medidas encaminadas a salvar vidas en las carreteras, mediante el mejoramiento principalmente de la seguridad vial.

El informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2013, que incluye información de 128 países, indica que las cifras de víctimas mortales fue de 1.24 millones de muertes por accidentes de tránsito por año.

Las lesiones causadas por el tránsito constituyen la octava causa mundial de muerte y la primera entre jóvenes de 15 a 29 años. Las tendencias actuales indican que, si no se toman medidas urgentes, en 2030 los accidentes de tránsito se convertirán en la quinta causa de muerte. Tan solo en México se tiene una mortalidad estimada por accidentes de tránsito de 20.7 por cada 100,000 habitantes (OMS, 2009).

Con base en las cifras anteriores es prioritario contar con un sistema de tránsito seguro que permita contrarrestar la vulnerabilidad humana y reducir el número y severidad de los accidentes de tránsito. Para ello en 2011, en México se publicó la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020, cuyo objetivo general es reducir un 50% las muertes, así como abatir al máximo posible las lesiones y discapacidades por accidentes de tránsito en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, mediante una mayor participación de las autoridades de los tres niveles de gobierno, atendiendo a su ámbito de competencia y facultades.

Algunas estadísticas reflejan que las colisiones en las intersecciones corresponden a aproximadamente el 40% de todos los accidentes de vehículos a motor.

Por ello es importante estudiar las intersecciones viales dentro de los sistemas de transporte porque es en ellas donde se presenta la mayor cantidad de conflictos viales, los cuales pueden derivarse en accidentes potenciales cuando dos vehículos se encuentren.

En el presente trabajo se efectúa un análisis de una propuesta metodológica, sobre la cual se examinan las diversas variables del tránsito en una intersección tipo, bajo un modelo probabilístico, a fin de identificar el nivel de seguridad en que se encuentra una intersección a nivel.

Las intersecciones a desnivel son aquellas donde los conflictos de tránsito prácticamente desaparecen y quedan únicamente aquellos donde el impacto en un accidente de tránsito es mínimo. Sin embargo, para un país en desarrollo es muy difícil contar con un sistema vial conformado por este tipo de intersecciones a fin de evitar comprometer la seguridad de los usuarios.

De esta manera, se busca sugerir a los tomadores de decisiones una herramienta metodológica basada en funciones de probabilidad de que dos vehículos se encuentren, para poder evaluar el nivel de seguridad de la intersección y, con base en ello, justificar la construcción de intersecciones a desnivel, sin remordimiento de los costos que estos entronques viales implican.

En el capítulo 1 de esta publicación, a manera de exposición de antecedentes, se revisa el estado del arte, a manera de antecedentes, se plantea la problemática que conllevan las intersecciones y la razón por la cual es importante estudiarlas. En este capítulo, además, se brinda contexto a todo lector no experto en vías terrestres explicando qué es una intersección vial, qué elementos la integran, cómo se clasifican las intersecciones, y cuáles son las condiciones de riesgo derivadas de los movimientos direccionales.

Asimismo, en el capítulo 1 se hace una revisión de la literatura en la materia para identificar cómo se evalúa, en los ámbitos nacional e internacional, la seguridad en las intersecciones —desde metodologías simples de forma cuantitativa hasta aspectos conceptuales que permitan identificar deficiencias viales—, así como también el uso de las diferentes funciones de probabilidad aplicadas a la ingeniería de tránsito, dado que la metodología propuesta busca hacer uso de ellas.

Se concluye el capítulo presentando un análisis comparativo de los diferentes métodos y cómo se han aplicado; esto solamente en una matriz para el lector.

En el capítulo 2 se describe la metodología a utilizar para proponer una herramienta metodológica que auxilie en la toma de decisiones, con miras a justificar una intersección a desnivel. Los casos de estudio presentados corresponden a dos intersecciones tipo a nivel, es decir, de tipo “T” y “+”. Para cada caso de estudio, se requieren las variables de operación que serán necesarias para los análisis, tales como el volumen de tránsito, la velocidad y el tiempo necesario para realizar la maniobra, entre otras. En ambos casos de estudio se deben establecer los límites máximos de las variables de acuerdo con la capacidad de la intersección, y con ello, poder modelar los escenarios probables.

La aplicación de la metodología se explica en el capítulo 3, donde se muestran los casos de estudio. El capítulo incluye, además, los resultados del levantamiento geométrico para la configuración de las intersecciones, los estudios de ingeniería de tránsito para determinar el volumen y las velocidades de operación, la estimación de la capacidad vial y de los parámetros de los tiempos de maniobra.

Se realiza un análisis de los casos de estudio para evaluar gráficamente los resultados obtenidos, y poder identificar en qué nivel de probabilidad se encuentran operando actualmente las intersecciones estudiadas.

Para poder entender los resultados se expone una pequeña discusión de los mismos. Se completa este capítulo con un primer intento de validación de la metodología a través de la estadística de siniestralidad de las intersecciones de estudio; sin embargo, los registros no se encuentran completos en las dependencias, ni tampoco se consideraron representativos de la situación prevaleciente en las intersecciones, por lo que no resultaron suficientes para validar el modelo.

Finalmente, se extraen conclusiones sobre el modelo y su potencial uso, así como los sesgos que comprende la metodología, y cómo es posible replicar el modelo a otros casos, y se destaca la importancia de replicarlo a escala de sistema de transporte.

1 Antecedentes

La infraestructura para el transporte terrestre constituye la parte física necesaria para su operación. Forman parte de la infraestructura terrestre, las calles y carreteras, las cuales permiten la circulación de vehículos en condiciones de continuidad en el espacio y el tiempo, con niveles adecuados de seguridad y comodidad.

Uno de los sitios en los que se presentan más conflictos dentro de la infraestructura vial son las intersecciones, definidas como el lugar donde confluyen dos o más vías y que permiten la mezcla de las corrientes de tránsito que provienen de diferentes orígenes y buscan diferentes destinos.

El cruce de caminos se puede dar con una intersección a nivel o con una intersección a desnivel. Las intersecciones a nivel son las más simples: son aquellas en donde las características del tránsito no ameritan ningún trabajo especial más que el de nivelar las vialidades, redondear las esquinas y facilitar la visibilidad, para permitir que los vehículos pasen de un lado a otro. Cuando los volúmenes de tránsito y la importancia de los caminos lo ameritan, se hace uso de intersecciones canalizadas, permitiendo encauzar los vehículos de manera que al usuario no se le presenten varias decisiones al mismo tiempo. Las intersecciones a desnivel se utilizan para separar las corrientes de tránsito, cuando el índice de accidentes de tránsito en estas muestran que los volúmenes son demasiado altos para que coexistan al mismo nivel, por lo que se sugiere entonces que el intercambio en la misma intersección se realice en un nivel diferente.

Las intersecciones a nivel son muy comunes, debido a que estas permiten la comunicación entre las comunidades, por lo que a lo largo de la red nacional existe un gran número de entronques a nivel, resultando muchos de estos con una alta peligrosidad para el usuario que la transita, principalmente por una mala canalización del tránsito o una mala señalización, aunque también por las velocidades de operación y los volúmenes de tránsito que circulan en las vías que confluyen a la intersección.

El diseño de las intersecciones de una carretera debe corresponder a su función, buscando satisfacer las necesidades de los vehículos automotores que confluyen o se mezclan en dicha área de encuentro, al igual que al tipo de vías que se intersectan (principales, secundarias, etc.), clasificación vehicular, tipo de control de accesos (señales o semáforos), velocidad, preferencia de paso, y todas aquellas características de funcionalidad contempladas en la planificación en desarrollo que puedan afectar la intersección (MOPU, 1987).

Las intersecciones permiten la circulación vehicular desde diferentes accesos, que al ingresar al área de intercambio se pueden encontrar simultáneamente, lo que implica un peligro potencial de colisión. Según lo establecido por la normativa de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte (AASHTO, por sus siglas en inglés) en el *Manual de diseño geométrico para calles y carreteras* (AASHTO, 2011), el objetivo principal del diseño de una intersección es reducir la gravedad de los posibles conflictos entre vehículos, autobuses, camiones, bicicletas, peatones, y las instalaciones, al tiempo que se procura la comodidad, la facilidad y comodidad de las personas que la atraviesan.

Las intersecciones son un elemento crítico en la infraestructura del transporte desde el punto de vista de la seguridad, tanto en zonas urbanas, como en las interurbanas. En las intersecciones los vehículos pueden seguir distintas trayectorias, durante un determinado itinerario de viaje, por lo que dicha infraestructura requiere cierto ordenamiento para reducir el número de conflictos entre los distintos movimientos y evitar accidentes de tránsito. Por otra parte y especialmente en zonas urbanas, las intersecciones son elementos fundamentales en términos de la capacidad vial, ya que producen una disminución sensible del nivel de servicio, principalmente por la reducción de las velocidades. Otro factor es la elevada intensidad de tránsito, por lo que se generan demoras de tiempo antes de poder atravesar una intersección. Estas son sólo algunas de las causas principales por las cuales las intersecciones viales son de especial interés.

Hasta ahora, la construcción de un entronque a desnivel se ha justificado en términos de la seguridad vial en la intersección y los conflictos de tránsito que en esta se presentan, empleando diversas metodologías, pero no se ha establecido un mecanismo mediante el cual se auxilie la visualización sin que ocurran accidentes cuando la evolución de las intersecciones simples a nivel resulta necesaria. Estudiar el tipo de accidentes, su causa, los costos materiales que suponen, así como incluir las pérdidas humanas, permite evaluar y hacer una comparación contra el costo por concepto de construcción y mantenimiento de dicho paso a desnivel. Ello permite justificar un cambio de intersección de nivel a una a desnivel, pero no supone una herramienta técnica preventiva, sino un análisis socio-económico, que involucra variables de costo y beneficio.

Para la comprensión de la problemática y la búsqueda de posibles soluciones para la accidentalidad en los entronques, con este trabajo se busca establecer una herramienta preventiva para la evaluación de los entronques a nivel ya existentes, la cual nos permita visualizar de forma más precisa cuando su funcionalidad, seguridad y comodidad se han visto comprometidas, resultando con esto un peligro para los usuarios. Este mecanismo contempla variables como la intensidad del tránsito y su composición actual, así como a quién servirá en el futuro, la accidentalidad, el nivel de servicio que dicha intersección brinda al usuario, etc., para así poder decidir con exactitud cuándo es que resulta necesaria la modificación total o parcial de la intersección, así como de sus dispositivos de control.

Por eso es importante desarrollar un modelo que se centre en el uso de distribuciones de probabilidad. Este uso de las distribuciones de probabilidad constituye una herramienta básica para predecir el comportamiento futuro de diferentes acontecimientos o fenómenos naturales, sin que estos lleguen a materializarse.

Las distribuciones de probabilidad están integradas por variables que pueden estar asociadas a las características del tránsito y vialidad, si se aplican a la ingeniería de tránsito, tarea que se realiza en muchos análisis actualmente. El planteamiento propuesto en el presente trabajo pretende aplicar la probabilidad de ocurrencia de accidentes entre dos vialidades al conformar una intersección, en función de sus volúmenes de tránsito, velocidades de operación y características geométricas de la vialidad, es decir la probabilidad de que dos vehículos puedan encontrarse.

La distribución de probabilidades de Poisson permite determinar el número de ocurrencias de un evento en específico, por lo que, si es posible ligar las características de operación del tránsito y de la vía, entonces se obtendría una metodología que permita justificar la necesidad de intersecciones a desnivel en carreteras basados en la probabilidad de ocurrencia de accidentes viales.

La revisión del estado del arte de esta investigación se divide en dos partes principalmente. La primera se centra en la descripción teórica de los elementos que integran la ingeniería de tránsito para puntualizar cómo una intersección forma parte de la infraestructura del transporte. La segunda es una revisión internacional de la práctica de cómo en la ingeniería de carreteras se justifica la toma de decisiones cuando se requiere construir una intersección a desnivel en las carreteras.

1.1 Intersecciones dentro de los sistemas de transporte

El transporte es una actividad fundamental para el buen funcionamiento de las actividades económicas y el desarrollo de los países. Éste asegura la movilidad cotidiana de las personas y es crucial para la producción y distribución de bienes. Una infraestructura para el transporte adecuada constituye un requisito primordial para los sistemas de transporte.

La infraestructura para el transporte se refiere a las estructuras físicas básicas necesarias para el funcionamiento del sistema, las cuales se interconectan para proporcionar movilidad de personas y mercancías.

Además de formar parte de los sistemas para el transporte, las vías terrestres están integradas por un sinnúmero de infraestructuras, entre las que destacan las siguientes: calles (vialidades urbanas), carreteras, estructuras (puentes, túneles, alcantarillas, etc.), intersecciones, marcas y señalamientos y sistemas eléctricos (semáforos, alumbrado público, etc.). Las vías terrestres también comprenden otros modos de transporte, como la infraestructura requerida para ferrocarriles, el transporte público urbano y otros, que forman parte también de esta área del conocimiento.

Este proyecto se centra en el estudio de intersecciones, es decir, el sitio donde confluyen dos o más caminos, y es través de esta infraestructura que los usuarios tienen la opción de realizar intercambios entre los caminos, ya sea a nivel o a desnivel. En algunos países de Latinoamérica también pueden llamarse “entronques” o “cruceos”.

Las intersecciones constituyen elementos de discontinuidad en una red vial, por lo que representan situaciones críticas que deben resolverse de forma especial. Para realizar estas maniobras los conductores necesitan un intervalo de espacio y tiempo en la corriente de circulación, regularmente en la vía principal. La magnitud que ha de tener este intervalo, entre otras variables, representa el buen funcionamiento de la intersección.

1.1.1 Componentes de una intersección

Cada camino que confluye en la zona de conflicto en una intersección se denomina “acceso” o “rama”, independientemente de si llega a la intersección o solo sale de ella. La “zona de conflicto” es la sumatoria de las áreas donde se interceptan las trayectorias de los diferentes movimientos que se presentan en la intersección (véase la figura 1).



Figura 1. Componentes de una intersección a nivel

Un “movimiento” es la acción que realiza cada vehículo en la intersección al entrar y salir de la misma de acuerdo con el origen o destino de su ruta.

En las intersecciones, por lo general se presentan cuatro tipos de movimiento: vuelta a la derecha, movimiento directo o de frente, vuelta a la izquierda y movimiento en “U” o de retorno. Para que estas maniobras puedan realizarse, la intersección debe estar conformada por diferentes componentes para resolver estas necesidades de los usuarios (véase la figura 2).

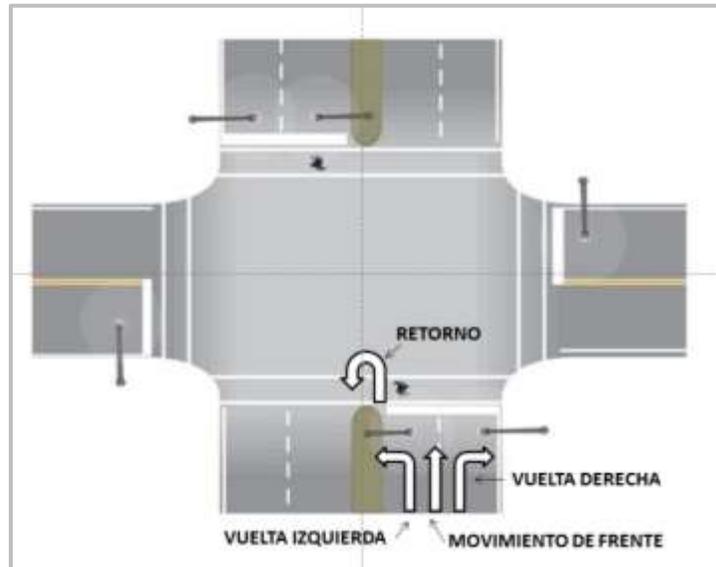


Figura 2. Movimientos direccionales de una intersección a nivel

Algunas intersecciones también cuentan con carriles exclusivos de vuelta a la derecha o a la izquierda, con el objetivo de garantizar la seguridad de los conductores e incrementar la capacidad de la intersección en términos de la calidad del servicio al disminuir las demoras.

Cada movimiento direccional requiere realizar diferentes maniobras en las intersecciones, tales como maniobras de convergencia, divergencia y cruce (véase la figura 3). Las maniobras entonces generarán los conflictos posibles de acuerdo con el número de movimientos que existan en una intersección.

Los puntos de conflicto son los cruces de cada una de las trayectorias que se presentan en una intersección, e incluyen el movimiento direccional y la maniobra. Entre más puntos de conflictos tenga una intersección mayor será la probabilidad de que un vehículo se encuentre con otro, en función del volumen de tránsito de cada vialidad.

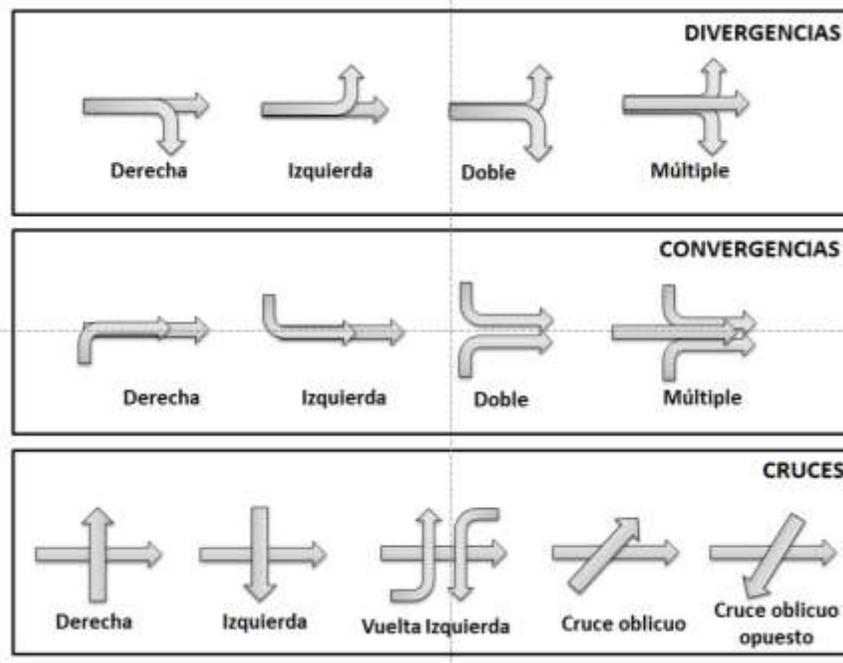


Figura 3. Maniobras en intersecciones

Por ejemplo: para una intersección a nivel de cuatro ramas y con tres movimientos direccionales en cada rama, se pueden presentar 32 conflictos entre las trayectorias de los vehículos. El esquema de la figura 4, desarrollado por ingenieros de Transporte de los Estados Unidos, muestra claramente los conflictos mencionados.

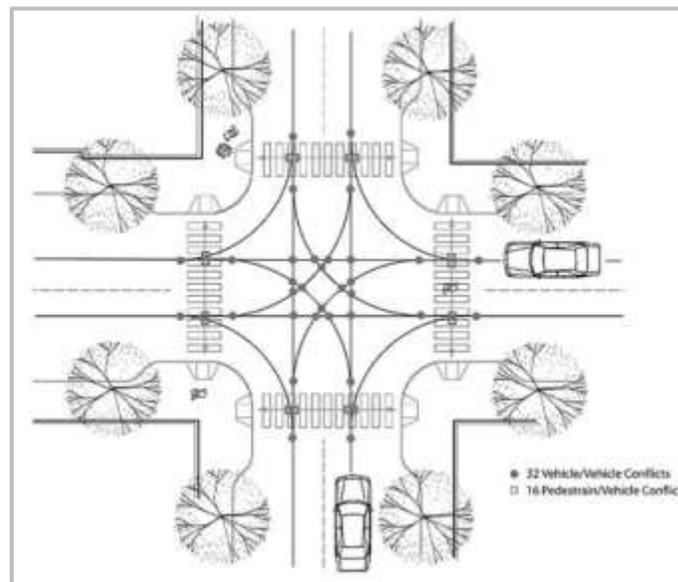


Figura 4. Número de conflictos en una intersección

Fuente: ITE.

Las vías que unen las distintas ramas de la intersección se denominan “enlaces” o “rampas”. Esta última se utiliza comúnmente cuando el enlace se realiza mediante un cambio de nivel (véase figura 5).

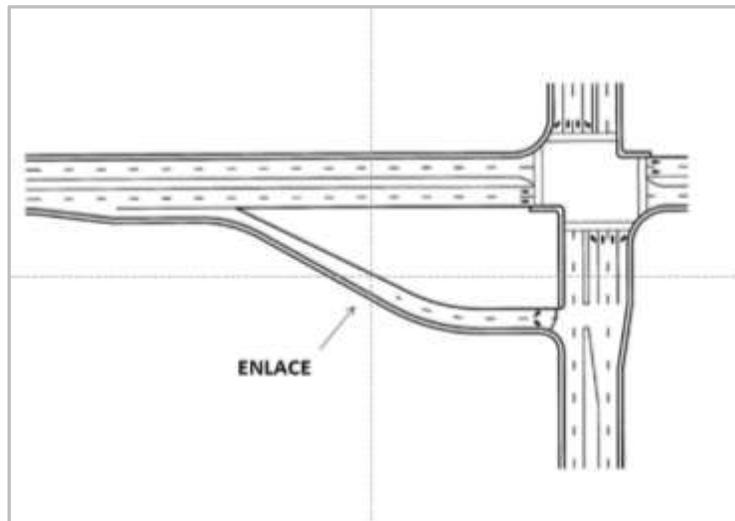


Figura 5. Enlace en una intersección

1.1.2 Características de las intersecciones

Las características de una intersección conforman un grupo de factores que se toman en consideración al momento de diseñar cualquier intersección.

Algunas características actúan como controles, mientras que otras son el resultado de las decisiones para el diseño. A continuación se mencionan varias de ellas.

Características físicas:

- Tipo de carretera
- Banquetas
- Esquinas
- Fajas separadoras
- Isletas
- Características del drenaje
- Obstáculos físicos
- Otros

Características operacionales:

- Configuración y uso de carriles
- Tipo de control de tráfico
- Control de peatones
- Delimitación de carriles
- Prohibiciones de vueltas
- Configuración de pasos peatonales
- Programación de fase y tiempo de semáforos
- Accesibilidad
- Otros

Características del tránsito:

- Volúmenes vehiculares
- Composición vehicular
- Factor de hora pico
- Volúmenes peatonales
- Volúmenes de bicicleta u otros modos

Características del sitio:

- Clasificación de la vía, localización
- Uso del suelo junto a la vía
- Proximidad a sitios (escuelas, hospitales, etc.)

Características de los usuarios:

- Edad
- Requerimientos especiales para discapacitados y otros

1.1.3 Tipos de intersecciones

Dependiendo de la zona en que se ubique el cruce, se tienen intersecciones urbanas y suburbanas, y estas, a su vez, se dividen en tres tipos generales: a nivel o a desnivel, y pasos a desnivel sin ramales de conexión. Estos dos últimos se caracterizan por la separación física de una o más maniobras de cruce mediante pasos superiores o inferiores. La figura 6 muestra un diagrama del *Manual de proyecto geométrico de carreteras* de la SCT.

Otra clasificación del tránsito va asociada al tipo de control del tránsito que opera en la misma, aunque la primera de ellas es una intersección sin control, es decir, que no cuenta con dispositivos para el control del tránsito, tales como señales, etc. Las intersecciones controladas pueden ser mediante señales verticales y marcas, o a través de semáforos.

Estos controles pueden estar parcialmente o en la totalidad de las ramas que conforman la intersección, obedeciendo a los volúmenes predominantes de tránsito en las vialidades que la conforman.

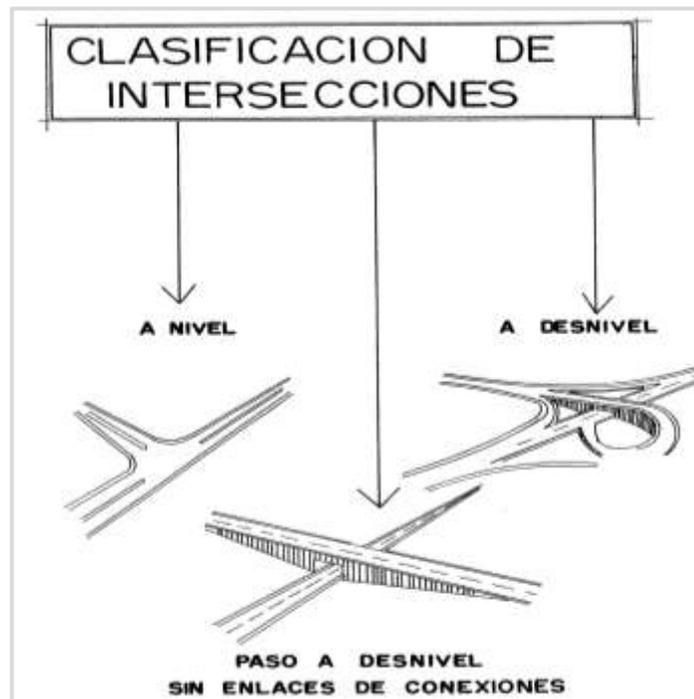


Figura 6. Clasificación de las intersecciones en México

Fuente: *Manual de proyecto geométrico* (SCT).

De esta manera, cualquier clasificación de intersecciones obedece principalmente a volúmenes de tránsito —sean altos o bajos—, así como a la prioridad de ciertos movimientos direccionales.

Se llaman “pasos” las zonas donde dos vías terrestres se cruzan sin que puedan unirse las corrientes de tránsito. Estos pueden ser para vehículos, ferrocarriles, personas o animales. Estas estructuras se encuentran a desnivel para evitar conflictos con los movimientos directos de la vía principal.

A continuación se detallan las intersecciones a nivel y a desnivel.

1.1.3.1 Intersecciones a nivel

Las intersecciones a nivel pueden ser de tres ramas, denominadas tipo “T” o “Y”, o de cuatro ramas (cruz “+”), multi-ramas o circulares (glorietas).

Las intersecciones a nivel requieren algún tipo de control para que puedan operar de forma segura, ya sea mediante señales o semáforos. Este tipo de intersección a nivel se denomina “intersección controlada”.

Las “intersecciones sin control”, como su nombre lo indica, carecen de dispositivos verticales para el control del tránsito, aunque suelen tener marcas en el pavimento. Su funcionamiento no difiere de un país o una ciudad a otra. En ocasiones la prioridad se concede en función de las vías que circulan de norte a sur, si la vialidad se encuentra pavimentada, o se adopta el mecanismo “el que llega primero cruza primero” (es decir, todos se detienen en la intersección); la prioridad puede también ser conforme a la derecha o izquierda según el sentido de circulación predominante en el país en cuestión, entre otras variables. Se recomienda este tipo de intersección en ciudades pequeñas o poblaciones rurales, salvo que el índice de siniestralidad refleje una necesidad de implementar dispositivos de control más efectivos.

Las glorietas (rotondas en algunas ciudades de México u otros países) funcionan con movimientos circulares alrededor de una isleta circular o similar, donde la prioridad está dada para los vehículos que circulan en el interior, por lo que todos los vehículos que arriben tendrán que hacer alto independientemente de la rama a la que acceden en la intersección. Este tipo de intersección es de suma utilidad cuando el tránsito registra volúmenes de bajos a medios, y cuando el área de la glorieta es lo suficientemente grande para permitir los entrecruzamientos.

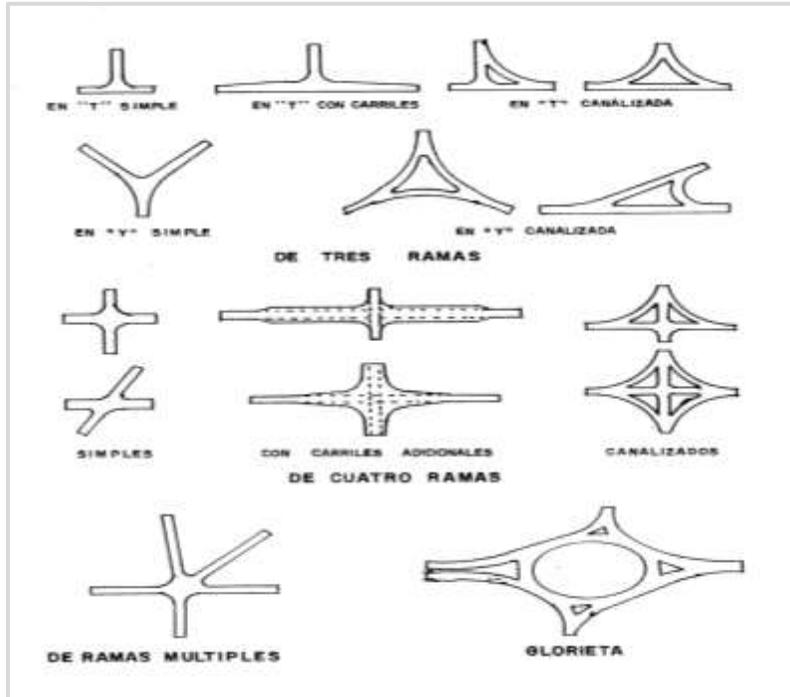


Figura 7. Tipos generales de entronques a nivel

Fuente: *Manual de Proyecto Geométrico (SCT)*.

Son numerosos los factores que intervienen en la selección del tipo de intersección a nivel, pero los controles principales son el volumen horario de proyecto, el carácter del tránsito (directo y de vuelta) y la velocidad de proyecto.

1.1.3.2 Intersecciones a desnivel

Las intersecciones a desnivel son las de mayor capacidad al reducir el número de conflictos de manera directa. El objetivo es separar los flujos en diferentes niveles por medio de vías inferiores o superiores, usando estructuras tales como puentes, túneles, viaductos, etc. El término se aplica ampliamente para describir un cruce de carreteras en el cual no se interrumpe el flujo directo del tráfico en uno o más caminos.

El volumen de tránsito que atraviesa una intersección puede aproximarse o ser igual a la suma de las capacidades de los caminos que se cruzan, si están colocados a diferentes niveles, permitiendo así el tránsito directo de cada uno de ellos sin interrupción. Si la intersección está provista de ramas de conexión para el tránsito que va a dar vuelta y de dispositivos adecuados para que los vehículos aumenten o disminuyan su velocidad en los carriles de tránsito directo, todo el tránsito puede circular a través de la intersección, con poca o ninguna interferencia.

El tipo adecuado de paso o intersección a desnivel, así como su proyecto general, depende de muchos factores, siendo los principales, el volumen horario de proyecto, el carácter y composición del tránsito, la velocidad de proyecto, la topografía, el derecho de vía disponible y el costo.

Los diferentes niveles en la intersección se conectan por medio de rampas. Estas conexiones permiten realizar intercambios de caminos.

Las intersecciones a desnivel se clasifican similarmente a las intersecciones a nivel; su tipo y formas pueden ser muy variadas, aunque principalmente corresponde a si están total o parcialmente separadas. En el primer caso, todos los intercambios están separados en dos niveles —aunque pueden presentarse casos de tres o hasta cuatro—; en el segundo, sólo se separa un camino a desnivel y el otro es controlado mediante señalamientos.

En la práctica las variantes de las intersecciones a desnivel son muy variadas, (por ejemplo: las intersecciones en forma de trébol, en forma de diamante, con glorietas, etc.).

Las intersecciones a desnivel suelen ser soluciones muy costosas, por eso es importante contar con metodologías que permitan justificar la inversión en términos de seguridad y fluidez para los usuarios.

múltiples factores, a saber: número de accesos, tipos de carreteras que confluyen, volumen del tránsito, velocidad de operación, área disponible y condiciones ambientales.

Cuando se presentan accidentes de tránsito en las intersecciones, estos responden a numerosas variables, entre las que se incluyen las siguientes: la velocidad de operación es mayor a la velocidad de diseño de la intersección, visibilidad insuficiente para realizar las maniobras, longitudes inadecuadas para las incorporaciones y desincorporaciones, falta de carriles para acelerar o desacelerar, radios de giro inadecuados, vehículo de proyecto no ideal para el tipo de intersección, número excesivo de entradas y salidas en un mismo punto y falta de canalizaciones de los flujos vehiculares de ciertas trayectorias.

En algunos países las intersecciones dan cuenta de aproximadamente un tercio de los accidentes de tránsito, por lo que es de gran importancia aprovechar la información disponible y estudiar la forma en que se presentan, para obtener el máximo beneficio de ellas, con el objetivo de aumentar las condiciones de seguridad lo mismo en las intersecciones que en los sistemas de transporte.

De acuerdo con cifras de la Organización Mundial de la Salud, las lesiones causadas por accidentes de tránsito constituyen un grave problema de salud pública y una causa importante de las muertes, lesiones y discapacidades que se registran en todo el mundo. Todos los años, más de 1.2 millones de personas fallecen como consecuencia de accidentes en las vías de tránsito y entre 20 y 50 millones sufren traumatismos no mortales (OMS, 2009).

Las lesiones por accidentes de tránsito son la causa principal de muerte de personas entre los 15 y 29 años de edad en todo el mundo. Se estima que, al menos que se tomen medidas inmediatas, las víctimas mortales en las vías de circulación se incrementarán hasta convertirse en la quinta causa principal de mortalidad para 2030, lo que daría como resultado unos 2.4 millones estimados de víctimas mortales por año. Tan solo en México se tiene una mortalidad estimada por accidentes de tránsito de 20.7 por cada 100,000 habitantes (OMS, 2009).

De las cifras anteriores se desprende lo apremiante que resulta contar con un sistema de tránsito seguro que permita contrarrestar la vulnerabilidad humana y reducir el número y severidad de los accidentes de tránsito.

Las investigaciones hacen cada vez más patente la existencia de sistemas para prevenir los accidentes o reducir la gravedad de los traumatismos resultantes, elegir el tipo adecuado de cruce o intersección a desnivel, así como su proyecto en general.

México, se encuentra entre los diez países en donde ocurre el mayor número de muertes por accidentes de tránsito: al año se registran alrededor de 470 mil accidentes, donde mueren 24 mil personas (tan solo en el estado de Querétaro, los accidentes de tránsito han aumentado un 25% con respecto a 2010 y

constituyen la principal causa de muerte entre jóvenes de 15 a 29 años (INEGI, 2012). Las propuestas actuales para enfrentar la crisis en esta materia reclaman el desarrollo de una ingeniería que se adecue a las necesidades de los usuarios y una mayor eficiencia de las autoridades encargadas de la regulación.

Al estudiar el tipo de accidentes, junto con su causa, los costos materiales que implican, así como incluir las pérdidas humanas, será posible evaluar y comparar contra el costo en construcción y mantenimiento de un determinado paso a desnivel, lo cual permitiría justificar un cambio de intersección a nivel a desnivel, sin que ello suponga una herramienta técnica preventiva, sino un análisis socioeconómico, que incluye variables de costo y beneficio.

1.2 Metodologías para la justificación de intersecciones a desnivel

En la práctica existen algunas técnicas o metodologías que se utilizan para justificar la necesidad de implementar una intersección a desnivel, las cuales se describirán a continuación. Posteriormente se hará la discusión sobre las mismas, para identificar la oportunidad de realizar el presente trabajo.

1.2.1 Análisis de lugares con historial de accidentes

Existen diferentes técnicas para el análisis de sitios con accidentes. En este trabajo se abordará el método descrito por Gallegos *et al.* De acuerdo con sus notas, el procedimiento para analizar un sitio donde ocurre un alto número de accidentes debe considerar los siguientes puntos:

- Obtener una copia de los informes de accidentes que ocurrieron en ese lugar en los dos últimos años. Si para ese lugar se ha efectuado un estudio antes-después, la información debe considerar dos años durante el periodo antes, y por lo menos un año en el periodo posterior. Preferentemente, el tiempo debe ser de dos o tres años.
- Elaborar un diagrama de choque para mostrar gráficamente los detalles del accidente y del lugar.
- Elaborar un diagrama de localización y el inventario geométrico correspondiente.
- Obtener información vehicular sobre la hora en que se produce el máximo de giros en la intersección.
- Determinar velocidades de aproximación, si fuera pertinente.
- Efectuar un estudio de conflictos, si fuera necesario.

- Realizar un estudio de velocidad de aproximación, si el lugar no tuviera dispositivos de control y la característica de los accidentes fuera en ángulo recto.
- Efectuar una inspección del sitio para verificar el diagrama de localización y aportar nuevos antecedentes, tales como visibilidad, ubicación de dispositivos de control, estado de la señalización, etc. Esta visita también deberá efectuarse por la noche.
- Verificar el ciclo y fases del semáforo, si lo hubiere.
- Utilizar la información obtenida para seleccionar el tratamiento adecuado para el lugar analizado, teniendo presente la importancia de la situación y los recursos disponibles.
- Tomadas las medidas de corrección, se recomienda realizar una evaluación ex-post.

1.2.1.1 Diagrama de choque

Los elementos más importantes en un diagrama de choque, son:

- Identificar la acción que realizaba el conductor antes del accidente, por ejemplo: girar a la izquierda, reducir la velocidad o parar para estacionarse.
- Definir la trayectoria del vehículo.
- Determinar las situaciones en el momento del incidente, tales como el estado del tiempo o de la superficie del camino.
- Establecer la fecha, el día y la hora.

La consideración primaria del diagrama es mostrar la trayectoria de los vehículos, así como la presencia de personas o vehículos no impactados.

1.2.1.2 Inspección en sitio

La inspección en sitio puede ser guiada por las siguientes preguntas:

- ¿La causa de los accidentes fueron las condiciones físicas del lugar? ¿Pueden estas condiciones corregirse o eliminarse?
- ¿La falta de visibilidad es la causa de los accidentes? ¿Puede mejorarse? ¿Puede informarse del peligro a los conductores si la causa no puede eliminarse?

- La señalización, las marcas y semáforos ¿están cumpliendo el rol que corresponde? ¿Alguno de estos elementos puede, de alguna manera estar contribuyendo a producir un accidente en vez de prevenirlo?
- El tránsito vehicular ¿está canalizado teniendo en mente minimizar la ocurrencia de accidentes?
- ¿Pueden prevenirse accidentes prohibiendo algún movimiento vehicular? ¿Un giro a la izquierda de poca magnitud, por ejemplo?
- El número de accidentes nocturnos ¿tiene una proporción distinta a los diurnos en relación con el volumen vehicular?
- ¿Muestran las condiciones que falta alguna disposición especial o un mayor control policial?
- ¿Contribuyen los estacionamientos a la ocurrencia de accidentes?
- ¿Existe una adecuada señalización previa al lugar en consideración?
- ¿Se aprecia una demora que puede impacientar a los conductores?

1.2.2 Conflictos de tránsito

Un conflicto de tránsito puede definirse como un accidente potencial, es decir, la probabilidad de que dos vehículos se encuentren.

Varios autores exponen que, en general, existen dos tipos de conflictos de tránsito: las acciones evasivas con el objeto de evitar el accidente, tales como frenar o cambiarse de carril, y las transgresiones a los reglamentos de tránsito, definidas en el marco jurídico correspondiente.

El análisis de una muestra de los conflictos de tránsito permite identificar el número y tipo de conflictos en un lugar determinado donde pueda presentarse una situación de riesgo. Es importante que el tamaño de la muestra esté definido con criterios estadísticos. Los estudios requeridos para determinar el número de conflictos de tránsito se deben efectuar en los periodos del día en los que se presenta la máxima demanda vehicular.

Los conflictos de tránsito a observar son: vuelta a la izquierda, vuelta a la derecha, cambio de carril, cruce de izquierda a derecha o viceversa, flujos directos y su interferencia con vueltas izquierdas opuestas, etc.

Un segundo tipo de conflicto a observar son las acciones evasivas para evitar choques por atrás: detención con amarillo, reducción de velocidad para girar a la izquierda o derecha, entradas y salidas.

Otros conflictos son: vehículos lentos (camiones), congestión en intersección, abandono de intersección, vehículos detenidos, vehículos en marcha atrás y cruce de peatones.

Al concluir la recolección de datos, se estiman los totales, y con base en cada situación en particular se podrá elegir el mejor método para encauzar el tránsito de manera que se disminuya la severidad de los accidentes o se eviten los mismos.

1.2.3 Modelo de clasificación de riesgo en intersecciones

Torres *et al.* sugieren el uso de la metodología como modelo de clasificación del riesgo en intersecciones rurales en “T” y la validación del tiempo de evasión como medida alternativa de la seguridad de tránsito en intersecciones.

Las mediciones alternativas de seguridad son medidas de tiempo, las cuales se registran durante la ocurrencia de un conflicto de tránsito. Estas mediciones evalúan cuán cerca estuvo un conflicto entre vehículos que circulan a través de una intersección de terminar en una colisión, así como la gravedad que hubiese tenido dicha colisión.

La medida alternativa de severidad de un conflicto más aceptada es el Tiempo hasta la Colisión (TC), aunque otras medidas, tales como el Tiempo Posterior a la Invasión (TPI) o la Tasa de Desaceleración (TD) han sido propuestas como medidas para definir otras características en las situaciones de conflicto. La medida más utilizada es el TC, el cual se define como la diferencia entre el tiempo final de encuentro del vehículo que gira y el tiempo estimado en que llegará al punto de conflicto el vehículo que se traslada en línea recta y que posee la prioridad de paso, si éste continuara con la misma trayectoria y con la misma velocidad que poseía antes de comenzar a frenar para evitar la colisión.

Torres *et al.* sugieren utilizar como medida el Tiempo de Evasión (TE), definida como el tiempo medido en segundos que transcurre al momento de realizar una maniobra evasiva (frenado) hasta que el parachoques delantero del vehículo llega al punto de conflicto definido.

El análisis metodológico considera realizar la medición en campo de las variables en las intersecciones, resumir la información para construir indicadores; se construye un árbol de regresión independiente para determinar las variables originales con una variable de respuesta y se validan los resultados seleccionando también el modelo que más se ajuste, de acuerdo con los errores arrojados en el análisis.

El modelo propone un índice que represente el nivel de riesgo de cada conflicto de tránsito en una intersección, determinándose que los valores más altos del índice están relacionados con un mayor riesgo de que un conflicto termine en accidente, mientras que valores bajos indican un menor riesgo.

Posteriormente, se desarrolla un modelo de clasificación del riesgo en intersecciones, aplicando la teoría de árboles de decisión. Por último, se valida el Tiempo de Evasión (TE) como variable cuantificadora de la severidad de los conflictos de tránsito, tomando como base variables ya estudiadas a nivel mundial, como el Tiempo hasta la Colisión (TC) y el Tiempo de Post-Invasión (TPI).

1.2.4 Método de mejoras para priorizar intersecciones

Larson y Mannering (1997), mediante sistemas computacionales, realizaron el análisis para determinar la necesidad de vueltas a la izquierda o mejoras de vueltas a la derecha en una intersección y priorizar su necesidad.

El sistema se basa en dos vertientes: la primera se basa en las condiciones prevalecientes del tránsito y determina los volúmenes y el historial de accidentes; el segundo guarda relación con la necesidad de implementar el carril de vuelta izquierda en la intersección y asigna valores económicos para las condiciones de espera y accidentes históricos específicos en la intersección.

Con base en los valores económicos asignados a los accidentes, el sistema calcula la reducción en el retraso que resultaría en la instalación del giro a la derecha o a la izquierda mediante el uso de ecuaciones de regresión a partir de estudios de ingeniería publicados o normas como el *Manual de capacidad de carreteras*. La suma acumulada de accidentes y demoras es la puntuación de la gravedad de la mejora de la intersección en específico.

Los beneficios de este sistema estriban en que se trata de un método objetivo de la clasificación de intersecciones, en comparación con otros y que es fácil de usar. Con el propósito de aplicar este método, es necesario que los datos sean fácilmente obtenibles a partir de los recursos disponibles en la mayoría de las oficinas que administran el tránsito en las ciudades.

1.2.5 Evaluación de seguridad en el tratamiento de zonas de conflicto en intersecciones

Es muy común recurrir a un análisis de las zonas de conflicto en intersecciones — también conocidas como “puntos negros”— para mejorar la seguridad del tránsito, especialmente en las intersecciones.

El término “punto negro” se refiere a lugares que registran un número de accidentes mayor que el esperado, en comparación con lugares similares, como resultado de los factores de riesgo locales (Elvik, 2007). El propósito de un programa de tratamientos de puntos negros es reducir el número y la gravedad de choques, a través de cambios en la infraestructura de estos lugares peligrosos.

De Pauw et al. (2013) proponen seleccionar los puntos de alto riesgo, considerando estos aquellos que cuenten con al menos tres lesiones por accidentes; posteriormente, se le asigna un nivel de prioridad basado en el número y severidad de los eventos. El tamaño de estos puntos se varió y fue dependiente del grado de ocurrencia de accidentes.

Esta puntuación se basa en el número de usuarios lesionados en esta vía: por cada una de las personas que sufrió lesiones leves se asigna un valor de 1; por cada persona gravemente lesionada, este valor equivale a 3, y por cada persona con heridas mortales, se asigna un valor de 5. Para que un lugar se clasifique como peligroso debe alcanzar una puntuación total mínima de 15 puntos.

$$\text{Puntuación de prioridad} = (1 \cdot X) + (3 \cdot Y) + (5 \cdot Z)$$

Donde:

X = Número de personas con heridas leves (cualquier persona que se lesionó, pero no se puede definir como grave o fatalmente lesionada);

Y = Número de personas con heridas severas (cualquier persona que estuvo involucrada en un accidente de tránsito y requirió hospitalización por más de 24 horas);

Z = Número de personas lesionadas fatalmente (cualquier persona que murió en el lugar del accidente o dentro de los 30 días después del accidente).

Con esa escala de valoración se identificaron los puntos negros a tratar y se integraron en un programa de mejora. Los tratamientos aplicados se categorizan en seis grupos: De semáforos a semáforos libres de conflictos, semáforos a semáforos y cambios en la geometría, semáforos a glorietas, prioridad no controlada a prioridad controlada y cambios en la geometría, prioridad controlada a semáforos y prioridad controlada a glorietas. En ningún caso se contempló implementar pasos a desnivel, sino la instrumentación de mejoras puntuales del sitio a nivel en la mayoría de los casos.

Finalmente, se utiliza el método empírico de *Bayes*, es decir, un estudio de antes y después. El método compara el número observado de accidentes después de la aplicación del tratamiento con los recuentos de choque esperados si no hubiera habido ningún tratamiento.

Esta metodología es útil, pero sólo refleja niveles de peligrosidad en los puntos negros, además de no tener un enfoque preventivo, sino correctivo.

1.2.6 Técnica de análisis de accidentes de tránsito

La técnica de análisis de accidentes de tránsito que sugiere Timaná (2005) se centra principalmente en la identificación de la ubicación y detección de los sitios que son considerados peligrosos, usando diferentes formas de medir los accidentes.

Con esta técnica, la manera en que se miden los accidentes de tránsito es mediante la frecuencia de su ocurrencia, es decir, corresponde al número de accidentes por sitio o ubicación durante un periodo de tiempo específico y la medida de la tasa de accidentes, la cual se define como los accidentes por millón-vehículo-kilómetros (MVK) por sección, y accidentes por millón-vehículo-registrados (MEV) para intersecciones.

Lo anterior se representa mediante las siguientes ecuaciones:

Secciones (tramo carretero):

$$CR = \frac{N * 10^6}{L * AADT * t * 365}$$

Intersecciones:

$$CR = \frac{N * 10^6}{AADT * t * 365}$$

Donde:

N=Número de accidentes observados durante un periodo t

L=Longitud de segmento (km)

AADT=Volumen de tránsito promedio diario anual

t=Periodo de observación (años)

Este método requiere el volumen de tránsito para su análisis. La ventaja de usar las tasas de accidentes es que ésta permite hacer comparaciones entre sitios con características similares pero con diferentes niveles de exposición al tránsito.

Para direccionar los resultados de ambos indicadores de medida, se sugiere utilizar ambas para identificar los sitios. Los sitios con igual frecuencia se seleccionan primero y el resto se van ordenando de acuerdo con la tasa que presenten.

El autor también sugiere la utilización de la tasa de severidad de accidentes, la cual asigna un valor a aquellos accidentes con heridos, daños materiales a propiedades, etc.

1.2.7 Nivel de servicio de intersecciones señalizadas incorporando un riesgo de seguridad

Zhang *et al.* (2007) combinan la demora y la seguridad de obtener un indicador de nivel de servicio integral, el retraso y el índice de seguridad (DS), mediante el desarrollo de un conjunto de modelos para cuantificar el riesgo de colisión en función de la topografía de la carretera, el tráfico, y la señal de variables. El objetivo es establecer un método encaminado a representar el riesgo para la seguridad percibida y la tensión en los conductores para predecir las tasas de accidentes.

1.2.7.1 Conflicto potencial vehículo a vehículo.

La ecuación provee el número de vehículos que se verán afectados por el conflicto potencial:

$$PC_{veh} = \sum_i^n PC_{LT(i)} + PC_{OT(i)}$$

Donde:

PC_{veh} = Número total de vehículos esperados con potencial de conflicto

$PC_{LT(i)}$ = número veh. vuelta a la izquierda con potencial de conflicto,
aproximación a i

$PC_{OT(i)}$ = número de vehículos de tráfico opuesto con potencial de conflicto

proveniente del turno izquierdo con aproximación a i .

Y la subecuación:

$$PC_{LT(i)} = PC_{OT(i)} = \begin{cases} V_{LT(i)} * P_{PC(i)} & \text{si } V_{LT(i)} \leq V_{OT_gu} \\ V_{OT_gu(i)} * P_{PC(i)} & \text{si } V_{LT(i)} \geq V_{OT_gu} \end{cases}$$

Donde:

$V_{LT(i)}$ = número vehículos vuelta a la izquierda con aproximación a i

V_{OT_gu} = número de vehículos de tráfico opuesto con aproximación a i

1.2.7.2 Conflicto potencial vehículo a peatón

Existe la probabilidad de que haya peatones implicados en posibles conflictos con vehículos girando a la izquierda. El potencial de conflicto para los peatones podría expresarse de la siguiente manera:

$$PC_{ped} = \sum_j^n PC_{ped(j)}$$

Donde:

PC_{ped} = Total de conflictos peatonales potenciales esperados

$PC_{ped(j)}$ = Conflictos potenciales esperados con peatones en aproximación a j

con vehículos de vuelta izquierda con aproximación a i en pasajeros por hora.

1.2.7.3 Combinación de retraso y seguridad

La combinación del conflicto potencial entre vehículos (PC_{veh}) y el potencial conflicto entre vehículos y peatones (PC_{ped}) se utiliza para evaluar la seguridad de las intersecciones señalizadas:

$$PC = PC_{veh} + PC_{ped}$$

Donde:

PC = Total de conflictos esperados

PC_{veh} = Total de conflictos potenciales esperados entre vuelta a la izquierda y los vehículos en dirección opuesta

PC_{ped} = Total de conflictos peatonales potenciales esperados

1.2.7.4 Índice de demora y seguridad (DS)

Este índice corresponde a la combinación de la percepción de inconvenientes (retardo) y el riesgo (conflictos). El DS se puede utilizar para determinar el nivel de servicio para cada grupo de carriles y el enfoque, así como para la intersección en su conjunto:

$$DS = \frac{DS_{veh} * V_{veh} + DS_{ped} * V_{ped}}{V_{veh} + V_{ped}}$$

Donde:

DS = Índice de demora y seguridad

DS_{veh} = DS para vehículos

DS_{ped} = DS para peatones

V_{veh} = Volumen total del vehículo

V_{ped} = Volumen total de peatones

Y las subecuaciones:

$$DS_{veh} = d_{veh} + \left(\alpha * \frac{PC_{veh}}{V_{veh}} \right) d_{veh} = \left(1 + \alpha * \frac{PC_{veh}}{V_{veh}} \right) d_{veh}$$

$$DS_{ped} = d_{ped} + \left(\beta * \frac{PC_{ped}}{V_{ped}} \right) d_{ped} = \left(1 + \beta * \frac{PC_{ped}}{V_{ped}} \right) d_{ped}$$

Donde:

d_{veh} = retardo medio de control del vehículo

d_{ped} = retraso peatonal medio

α = factor de ponderación de seguridad para los conflictos de vehículo a vehículo

β = factor de ponderación de seguridad para los conflictos de vehículo a peatones

1.2.8 Auditorías de seguridad en carreteras

Mayoral *et al.* (2001) describen que las auditorías de seguridad en carreteras pretenden asegurar, durante el proceso de proyecto y construcción de una obra, la incorporación de experiencias y principios que permitan la prevención de accidentes, contribuyendo a identificar todas aquellas situaciones desfavorables que se presentan por una determinada combinación de los elementos en el diseño, que el proyectista no haya detectado, así como también asegurar que todos los proyectos de carreteras permitan una explotación lo más segura posible cuando el camino es abierto al tránsito, suponiendo que la seguridad debe ser considerada desde la fase de planeación, elaboración del proyecto, construcción de la obra y funcionamiento de la misma.

1.2.8.1 Fase 1: Factibilidad

Prevé la consideración de la seguridad vial desde la fase de factibilidad de un proyecto y tiene, entonces, una influencia importante sobre la selección de la ruta, las especificaciones del diseño geométrico, el impacto y la continuidad de la red carretera adyacente, el mejoramiento de intersecciones y carriles laterales de convergencia o divergencia en zonas suburbanas; sin embargo, se aclara que no debe incluir una nueva valoración de los criterios de diseño ni una reconsideración de los aspectos estratégicos. La auditoría sólo se centra en el análisis, desde el punto de vista de seguridad vial, de los conceptos de diseño adoptados.

1.2.8.2 Fase 2: Anteproyecto

Los puntos a considerar son el alineamiento horizontal y vertical, el trazo y las características de las intersecciones, las condiciones de visibilidad, el ancho y número de carriles y los requerimientos para peatones y ciclistas. Es importante mencionar que después de esta fase resulta muy complicado realizar modificaciones mayores al trazo de la carretera; por tal motivo, se busca que la auditoría se realice antes de adquirir los terrenos necesarios para obtener el derecho de vía.

1.2.8.3 Fase 3: Proyecto Definitivo

Los puntos a considerar son el diseño geométrico (combinación del alineamiento horizontal y vertical, así como la sección transversal), el señalamiento (horizontal y vertical), la iluminación, detalles de las intersecciones, seguridad en las márgenes y la consideración de la vulnerabilidad de los diversos usuarios del camino. Aquí se pretende reducir costos y perturbaciones asociadas con las modificaciones de último minuto, que tuvieran que efectuarse en la siguiente fase, ya que siempre resultará más fácil y menos costoso modificar un trazo sobre un plano que

reconstruir, modificar o rectificar determinado elemento geométrico, cuando el camino está siendo o ha sido construido.

1.2.8.4 Fase 4: Preapertura

Una auditoría en esta fase se enfoca principalmente en la revisión en campo de todas las características relevantes del proyecto, una vez que la obra se ha ejecutado, pero antes de que el camino se abra al tránsito; en esta revisión se debe considerar la seguridad desde el punto de vista de todos los posibles grupos de usuarios. Su objetivo consiste en asegurar que se hayan atendido las recomendaciones hechas en las etapas anteriores, e identificar condiciones peligrosas que no resultaron aparentes en el papel o se generaron por el proceso de construcción de la obra. En esta fase, la auditoría entra en funciones cuando el auditor (o equipo de auditores) recorre el nuevo camino en los diferentes tipos de vehículos que por él van a circular (y a pie, cuando así se requiera); lo anterior tiene la finalidad de verificarlo en sus tres dimensiones y comprobar que la seguridad de los diferentes usuarios ha sido considerada. Cabe señalar que la inspección nocturna y bajo condiciones climáticas adversas es particularmente importante para revisar la señalización, el trazo, la visibilidad y cualquier otro aspecto que tenga influencia sobre la operación del tránsito.

1.2.8.5 Fase 5: Carretera en operación

Una auditoría a una carretera en operación tiene dos grandes vertientes. La primera se refiere al monitoreo de un camino recién abierto al tránsito, el cual ya se sometió a auditorías en alguna etapa anterior. En este tipo de caminos, las actividades de una auditoría consisten principalmente en analizar y verificar los aspectos de seguridad bajo condiciones reales de operación. La segunda se relaciona con caminos existentes, con una determinada vida en servicio y que no se auditaron en ninguna etapa del proyecto. Aquí, el propósito fundamental de la auditoría consiste en identificar todas aquellas situaciones que representen un riesgo para la seguridad de los usuarios, al igual que conseguir la homogeneidad del camino, y debe tomar en cuenta la información sobre accidentes que en él ocurren, ya que esto permitirá detectar puntos de alto riesgo y conocer la problemática existente en cada uno de ellos, para así poder emitir las observaciones y recomendaciones necesarias a efecto de llevar a cabo parte de las posibles mejoras de seguridad en los mismos.

Las auditorías son útiles para prevenir accidentes, pero los análisis son únicamente de percepción; no se cuenta, sin embargo, con modelos para la toma de decisiones que auxilien como criterios en la selección de soluciones, sobre todo en zonas de conflicto como las intersecciones carreteras.

1.2.9 Indicadores de seguridad vial en la Red Carretera Federal (RCF)

Cuevas *et al.* (2011) permite la obtención de índices de seguridad vial en función de características como: tipo de carretera, número de carriles, longitud, tránsito vehicular y accidentes con víctimas de los tramos de la RCF, mediante un modelo que utiliza tres parámetros: la exposición, el riesgo de que suceda una colisión y las consecuencias de la misma. Para ello, se contemplan las siguientes etapas:

- Recopilación de la información base: Consiste en la revisión y consolidación de las bases de datos de accidentes.
- Marco metodológico: La información de las características físicas y operativas (tipo de camino, número de carriles, longitud, tránsito diario promedio anual [TDPA] y accidentes con víctimas) para cada uno de los diferentes tramos que conforman la RCF en los cuatro niveles de agregación (ruta, carretera, tramo y segmento de 500 m) se integra, de acuerdo con lo establecido en el reglamento correspondiente en materia de peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal.
- Análisis general: Esta actividad contempla la generación de la distribución porcentual de la longitud para cada tipo de carretera según la clasificación del reglamento (carreteras tipo “ET”, “A”, “B”, “C” y “D”) y la clasificación de la Subsecretaría de Infraestructura DGCC (carreteras tipo corredor, básica y secundaria) y, por supuesto, en función del número de carriles. Posteriormente se realiza la distribución de los accidentes con víctimas (muertos y lesionados), así como de los vehículos-kilómetro con los saldos de accidentes y los vehículos-kilómetro, se calculan los índices de peligrosidad (accidentes con víctimas), mortalidad y morbilidad por vehículos-kilómetro, atendiendo el número de carriles y la clasificación de las carreteras.
- Cálculo de indicadores de seguridad vial: Para obtener los indicadores de seguridad vial, se agrupa la información considerando los siguientes aspectos: carreteras de cuota y libres de peaje; carreteras de dos y cuatro o más carriles, y tipo de carretera según el reglamento. Para cada grupo de tramos carreteros se realiza un análisis de la distribución de frecuencias del TDPA (frecuencia acumulada y distribución normal), se definen rangos del TDPA y, —de acuerdo con el desempeño en términos de número de accidentes, muertos y lesionados por kilómetro—, se determinan los valores del promedio y la mediana; finalmente se calcula un índice de seguridad vial ponderando los valores antes determinados en función de los rangos del TDPA.

Sin embargo, esta herramienta no resulta de carácter preventivo, sino correctivo de puntos negros, con base en la estadística disponible.

1.2.10 Norma ISO 39001:2012

Se trata de un sistema de gestión que permite a una organización que interactúa con el sistema de tránsito reducir las muertes y lesiones graves relacionadas con accidentes de tránsito, al establecer especificaciones y requisitos en materia de seguridad vial.

Es, asimismo, una norma de sistemas de gestión para la seguridad vial y un medio práctico mediante el cual gobiernos, operadores de flotas de vehículos y todas las organizaciones pueden reducir muertes y lesiones ocasionadas por accidentes de tránsito. Esta norma establece requisitos armonizados, basados en la experiencia internacional y de aplicación en todos los países. Tiene utilidad para aquellas organizaciones que participan en actividades relacionadas con la seguridad vial, en aspectos tan variados como la auditoría de la eficacia de los programas de seguridad vial, así como para el análisis de “puntos negros”. Facilita una serie de indicadores de desempeño que las organizaciones deberán considerar y priorizar dependiendo del contexto de la organización, tales como indicadores de exposición al riesgo (volumen de tránsito, cantidad de desplazamientos, tipo de usuario, historial del conductor, tipo de vehículo, modo de transporte, etc.), indicadores finales de resultado de seguridad vial (productividad, costos externos, pérdidas económicas por recuperación de las personas, tratamiento y rehabilitación o pérdidas más amplias como el dolor o el sufrimiento), indicadores intermedio de resultados de seguridad vial (diseño vial, uso de vías adecuadas, uso de equipos personales de seguridad vial, velocidad de conducción segura, condiciones en que se encuentran los conductores, planificación de los viajes, seguridad de los vehículos, autorización correspondiente al tipo de vehículo que se conduce, respuesta posterior al accidente y primeros auxilios, formación de emergencias, recuperación posterior al accidente y rehabilitación, etc.).

1.3 Métodos estadísticos aplicados a la ingeniería de tránsito

En este apartado se abordarán los diferentes métodos estadísticos y las distribuciones de probabilidad, y cómo éstos han apoyado la ingeniería de tránsito para las modelaciones de sus diferentes problemáticas o características de comportamiento, a fin de identificar alguno de ellos con el que se puedan realizar proyecciones para definir la probabilidad de ocurrencia de accidentes en las intersecciones, particularmente aquellas que sean puntos negros dentro de la red de carreteras.

1.3.1 Distribución binomial

Se basa en un conjunto de intentos independientes cuyos resultados consisten solamente en dos eventos mutuamente excluyentes y cuyas probabilidades no varían, siendo la suma de sus probabilidades de éxitos “p”, y “q” la probabilidad de fracasos, “n” el número de intentos y “k” el número de éxitos.

Se utiliza entonces la ecuación:

$$B(k; n, p) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{n-k}$$

De esta manera, la probabilidad de un evento se obtiene al dividir el número de éxitos entre el número de intentos.

En la ingeniería de tránsito es común aplicarlas en función de un cierto nivel de confianza, para asegurar que se tengan por ejemplo: el número correcto de estaciones de cobro en una carretera, o el número de plataformas mínimas para una estación de servicio de combustibles, entre otras.

1.3.2 Distribución de Poisson

Esta distribución debe su nombre al matemático francés Simeon Denis Poisson (1781-1840), quien la desarrolló y divulgó en 1837. Esta distribución tiene aplicaciones importantes en la ingeniería de transporte y biociencias. Es útil para explicar la distribución de organismos en poblaciones con baja densidad.

Se basa en procedimientos estadísticos de control de calidad; parece ser la técnica estadística más extensamente usada entre las agencias viales para identificar sitios peligrosos. Es posible usar esta fórmula como una aproximación en la mayoría de las aplicaciones en las que resulta adecuada la distribución binomial, para $n \geq 100$ y $p \leq 0.05$, pudiendo ser conveniente para representar ciertos datos en términos estadísticos, independientemente de sus cualidades como aproximación a la distribución binomial.

La ecuación que la representa es:

$$B(k; n, p) = e^{-m} \frac{m!}{k!} = P(k, m)$$

Además Poisson cuenta con una distribución de conteo, donde se puede definir la probabilidad, midiendo un intervalo de tiempo constante y determinando el número de vehículos que arriban en cada uno de los intervalos de una secuencia. También se puede utilizar la función de espaciamiento en segundos entre vehículos.

De acuerdo con lo expresado por Cal y Mayor, los supuestos que utiliza la probabilidad de Poisson son: primero que cada conductor sitúa su vehículo independientemente de los demás, excepto cuando su espaciamiento es muy pequeño; segundo que para cualquier flujo, el número de vehículos que pasa por un punto en un intervalo de tiempo dado es independiente del número de vehículos que pasan por otro punto durante el mismo intervalo de tiempo, y tercero, el número de vehículos que pasa por un punto dado en un intervalo de tiempo es independiente del número de vehículos que pasa por el mismo punto durante otro intervalo. Estos principios son básicos para seleccionar cualquier función de probabilidad a utilizar.

1.3.3 Distribución normal

La distribución normal trata con variables continuas, distintas al número discreto de ocurrencias considerado en las distribuciones binomial y de Poisson.

Su expresión matemática es la siguiente:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

La función se representa gráficamente como una curva simétrica en forma de campana, en donde la curva alcanza su máximo en el punto $x = 0$; los dos puntos de inflexión ocurren en los puntos $x \pm 1.0$.

La importancia de esta distribución radica en que permite modelar numerosos fenómenos. En el uso del modelo normal se presupone que cada observación se obtiene como la suma de unas cuantas causas que son independientes.

El uso en la ingeniería de tránsito es simple y práctica, sobre todo para fines estadísticos y para definir el tamaño de muestras en función de un nivel de confianza definido, ya que la distribución de la muestra es aproximadamente normal, por lo que es simple modelar la distribución de la población mediante este modelo de probabilidad.

La distribución normal también es importante por su relación con la estimación por mínimos cuadrados, uno de los métodos de estimación más simples.

En probabilidad, la distribución normal aparece como el límite de varias distribuciones de probabilidad continuas y discretas; sin embargo, no permite modelar fenómenos, por lo que no podría aplicarse a la modelación de las probabilidades de accidentes.

La técnica del intervalo de confianza se basa en suponer que la frecuencia de accidentes observados tiene una distribución normal. La técnica involucra el cálculo de un umbral crítico, el cual es igual a la media de la muestra, frecuencia o tasa de población de sitios similares, más un múltiplo de la desviación estándar de la muestra. El coeficiente múltiplo depende del grado de confianza decidido.

Un sitio es considerado peligroso si:

$$C_i = \mu + k \sigma$$

Donde:

C_i es la frecuencia o tasa de accidentes del sitio

μ es la frecuencia media o tasa de la población de sitios similares

σ es la desviación estándar de la población

k se obtiene de una función de distribución normal ($k = 1.645$ para 95% de nivel de confianza).

1.3.4 Distribución binomial negativa

En estadística la distribución binomial negativa es una distribución de probabilidad discreta que incluye la distribución de Pascal.

El número de experimentos de Bernoulli de parámetro Θ independientes realizados hasta la consecución del k -ésimo éxito es una variable aleatoria que tiene una distribución binomial negativa con parámetros k y Θ .

La distribución geométrica es el caso concreto de la binomial negativa cuando $k = 1$.

Ladrón de Guevara *et al.* (2004) sugieren que los datos relacionados con los choques se modelan suponiendo que los accidentes están muy aproximados por un proceso de conteo binomial negativo, mientras que la simultaneidad de los resultados de los choques se modela utilizando técnicas de estimación de modelos simultáneos.

Por un lado, se consideran tres variables dependientes: fatalidad, lesiones y accidentes; por el otro, las variables independientes incluyen económicas, demográficas y aquellas de la red carretera.

La ecuación es la siguiente:

$$\lambda_i = \exp(\beta \times X_i + \epsilon_i)$$

Todos los modelos producen previsiones de choque a nivel de zona de análisis de tráfico estadísticamente significativas (valores de $p < 0,05$) y las variables teóricamente significativas para el modelo accidente fatal incluyen la densidad de población, las personas de 17 años o más jóvenes como porcentaje de la población total, y la densidad de intersección.

El modelo de accidente fatal contiene tres variables independientes: la densidad de población, las personas de 17 años o menos y la densidad de la intersección. El modelo fatal contiene una variable controlada para aumentar el número de los accidentes mortales: la densidad de población. Esta variable relaciona la exposición al riesgo y se cree que refleja el grado de interacción entre las personas: una mayor densidad implica una mayor interacción (y posibles conflictos). La corrección de la imprecisión de la densidad de población como una medida de la exposición, el número de menores probabilidades capta dos efectos, en primer lugar, elimina a aquellos que no son conductores de la población de conductores y representa una corrección y en segundo lugar, representa un contingente de la población con los niños, lo que sugiere que un mayor número de familias que estará en una mayor proporción de responsabilidad que los conductores en promedio.

La densidad de intersección se encuentra relacionada con una disminución de los accidentes fatales. Por lo tanto, como era de esperar, las intersecciones se asocian principalmente con velocidades más lentas, niveles más altos de congestión y una densidad de población urbana o rural más intensa.

Este modelo se puede representar como sigue:

$$\lambda_i = \exp(0.0508 \times popd - 5.1819 \times pmi - 4.8165 \times int d)$$

El modelo de lesiones por accidentes con lesiones fue seleccionado sobre la base de modelo de selección de criterios. Una variable que diferencia estos dos modelos es que un modelo incluye la densidad de población como una medición de la exposición y la segunda incluye millas viajadas por vehículo.

Este modelo se puede representar como sigue:

$$\lambda_i = \exp(0.1047 \times popd + 0.0498 \times emp + 6.4856 \times int d + 4.4338 \times cla3 + 4.9237 \times cla4 + 3.1058 \times cla7)$$

$$\lambda_i = \exp(3.81E - 06 \times vmt + 0.0498 \times emp + 9.9448 \times intd + 3.4508 \times cla3 + 3.8915 \times cla4 + 3.3115 \times cla7)$$

El modelo de accidentes con daños a la propiedad incluye las mismas variables utilizadas en el modelo de accidente con lesión, pero con coeficientes de diferentes valores. La diferencia es que el modelo de daños a la propiedad cuenta con coeficientes más grandes, lo que sugiere que los dos resultados de los choques están asociados con un fenómeno similar. Es difícil relacionarlo con estadísticas de tendencias y, a menudo, se relaciona en forma predominante con el ángulo de colisión, tipos de accidentes, edad y salud de ocupantes, y otras características.

Este modelo se puede representar como sigue:

$$\lambda_i = \exp(0.0709 \times popd + 0.0720 \times emp + 8.4305 \times int\ d + 5.2810 \times cla3 + 7.1494 \times cla4 + 4.1106 \times cla7)$$

La aplicación del modelo concluye cuán útil es su aplicación en actividades futuras para la planeación, pero no resulta útil, dado que no permite ser un elemento preventivo en términos de la seguridad vial en carreteras.

1.3.5 Distribución exponencial

En estadística la distribución exponencial es una distribución de probabilidad continua con un parámetro $\lambda > 0$, cuya función de densidad es:

$$f(x) = \{\lambda e^{-\lambda x}_0$$

La distribución exponencial es un caso particular de distribución gamma con $k = 1$. Además, la suma de variables aleatorias que siguen una misma distribución exponencial es una variable aleatoria expresable en términos de la distribución gamma.

1.4 Comparativa de los métodos utilizados para la seguridad vial y la justificación de mejoras en las intersecciones

Los métodos ya existentes son, en su mayoría, muy generales y aunque hablan de la evaluación de las intersecciones en cuanto a su accidentalidad, los conflictos que en esta se presentan, el diseño geométrico, evaluación del alineamiento vertical y horizontal, etc., carecen de fundamentación técnica para poder brindar una respuesta técnica acerca del cuándo es necesario pasar del entronque a nivel a la construcción del entronque a desnivel o simplemente invertir en mejorar la intersección.

La alta frecuencia de ocurrencia de accidentes en un sitio no necesariamente significa que esta ubicación particular sea realmente propensa a accidentes. Esta alta frecuencia podría ser causada por variables aleatorias relacionadas con la ocurrencia de accidentes. Es por esto que se han desarrollado y usado muchas técnicas estadísticas clásicas para identificar la propensión de sitios para accidentes de tránsito basándose en datos históricos. Es conveniente poder evaluar el resultado de su acción a través del tratamiento estadístico de las situaciones antes y después de un cambio operado, así como poder determinar las tendencias y pronósticos de los parámetros relacionados con la circulación vial.

La tabla 1.1 muestra una comparativa de los diferentes métodos descritos en los apartados 1.2 y 1.3, con base en lo cual se puede tener un panorama de la situación actual sobre cómo se justifican técnicamente las mejoras en intersecciones carreteras.

Tabla 1.1 Comparativa de métodos para la justificación de mejoras en intersecciones viales

	Informes de accidentes	Diagramas de choque	Inventario de dispositivos	Horas de mayor tránsito	Estudio de velocidades	Estudio de conflictos	Visibilidad	Semáforos	Tiempo de evasión	Tiempo hasta la Colisión	Tiempo de Post-invasión	Tiempos de espera en la intersección	Densidad de población	Densidad vehicular	Kilómetros recorridos	Diseño geométrico de la carretera	Vulnerabilidad
Análisis de lugares con historial de accidentes	X	X	X	X	X	X	X	X									
Conflictos de tránsito		X		X		X											
Modelo de clasificación de riesgo en intersecciones		X				X			X	X	X						
Método de mejoras para priorizar intersecciones	X											X					
Evaluación de seguridad del programa de zonas conflictivas	X	X	X	X	X	X	X	X				X					X
Técnica de análisis de accidentes de tránsito	X	X	X		X	X	X										
Método estadístico. Distribución Binomial		X		X		X		X									
Método estadístico. Distribución de Poisson		X		X		X		X									
Método estadístico. Distribución Normal		X		X		X		X									
Método estadístico. Técnica del intervalo de confianza		X		X		X		X									
Método estadístico. Modelo de choque binomial negativo simultaneo						X							X	X	X		
Nivel de servicio de Intersecciones señalizadas incorporando un riesgo de seguridad		X	X			X						X		X		X	X
Auditorias en carreteras			X				X									X	X
Indicadores de seguridad vial en la Red Carretera Federal	X													X	X	X	
Norma ISO 39001:2012				X	X	X		X						X		X	

Fuente: Elaboración propia

Con base en la tabla anterior se identifica la oportunidad de explorar la posibilidad de utilizar un método estadístico apropiado que permita de manera preventiva detectar un sitio con alta probabilidad de incidencia de accidentes o de que dos vehículos se puedan encontrar en el mismo instante.

Una intersección podría identificarse como peligrosa si su medición de accidentes excede algún nivel crítico. La distribución de probabilidades de Poisson permitiría determinar el número de ocurrencias de un evento en específico, por lo que si es posible ligar las características de operación del tránsito y de la vía, entonces se obtendría un modelo que permite justificar la necesidad de intersecciones a desnivel en carreteras, con base en la probabilidad de ocurrencia de accidentes viales.

2 Metodología para justificar la construcción de intersecciones a desnivel

Hasta ahora no se ha establecido un mecanismo técnico mediante el cual se auxilien los especialistas para visualizar cuándo resulta necesario pasar de las intersecciones simples a nivel, a la construcción de un entronque a desnivel, con uno o más carriles de circulación, el cual nos permita conocer con cierto grado de precisión cuando el nivel de servicio y de seguridad se han visto comprometidos, resultando con esto un peligro potencial de accidente para los usuarios.

Dicho mecanismo deberá involucrar variables macroscópicas y microscópicas, tales como la intensidad del tránsito y su composición en un estado actual y a quién servirá en el futuro, la accidentalidad, el nivel de servicio que dicha intersección brinda al usuario, entre otras variables.

A efecto de comprender la problemática y encontrar posibles soluciones a la accidentalidad en los entronques, se busca establecer una herramienta preventiva para la evaluación de los entronques a nivel ya existentes, en los cuales se vea comprometida la seguridad del usuario.

Dicha herramienta será de utilidad a los responsables de la construcción o modernización de carreteras como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en el ámbito federal y sus similares en los estados que integran el país.

La herramienta tiene como base la utilización de la distribución de Poisson, cuyo desarrollo se describe a continuación. Posterior a ello se hablará de los métodos de ingeniería de tránsito, con los cuales recabaremos la información de las variables de tránsito para revisar el modelo desarrollado.

La figura 9 muestra un esquema de cómo se llevó a cabo la metodología del proyecto de investigación mediante el cual se puedan evaluar las intersecciones a nivel en función de la probabilidad de ocurrencia de accidentes, de acuerdo con la distribución de Poisson.

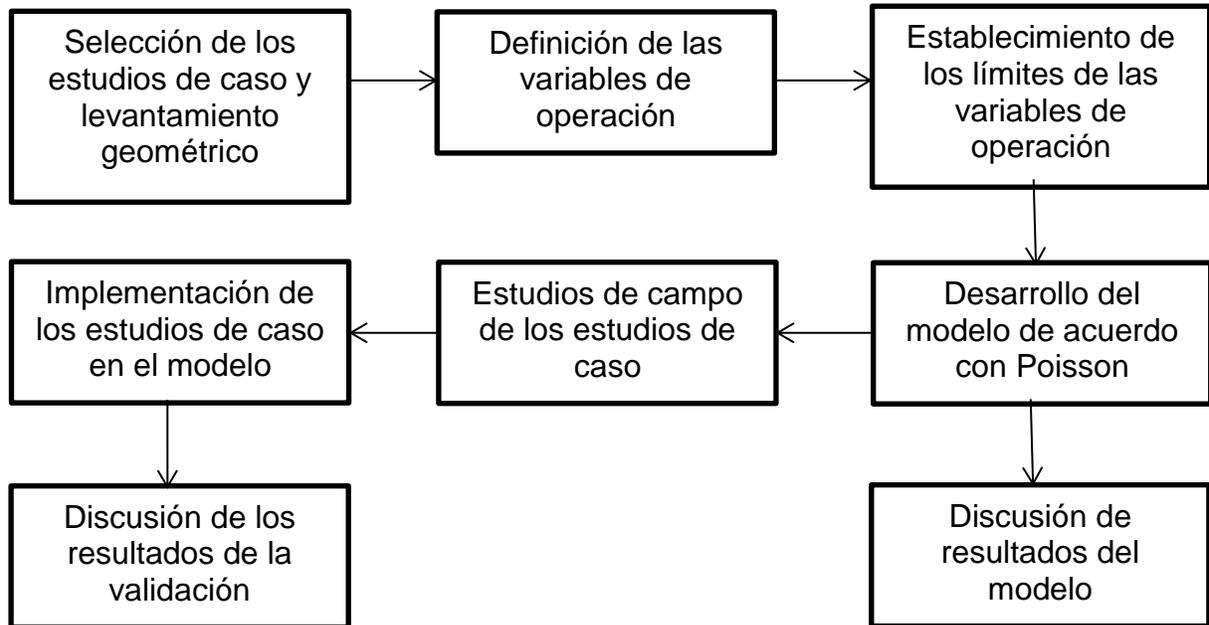


Figura 9. Metodología del proyecto

Fuente: Elaboración propia

2.1 Selección de los casos de estudio

En función de su geometría, se seleccionarán dos tipos de intersecciones para realizar el análisis: una de ellas será del tipo “T” y la otra en cruz “+”.

Para las intersecciones tipo se definirán las variables de operación con base en los casos más comunes que se presentan en las carreteras en México, lo que comprende un análisis de sensibilidad de dichas variables. Las variables del tránsito a utilizar son: volúmenes de tránsito, velocidad de operación y, en su caso, la clasificación vehicular.

Se determinarán las condiciones de diseño geométrico ideales para las intersecciones tipo, tales como ancho de carriles, número de carriles, distancia de visibilidad, etc.

La figura 10 muestra el esquema de cada intersección de estudio, conforme al *Manual de capacidad vial* del *Transportation Research Board*.

Para las intersecciones de los casos de estudio se deberá hacer una serie de estudios a fin de determinar el inventario físico y geométrico:

- Localización
- Levantamiento Topográfico
- Inventario Físico
- Inventario Geométrico
- Inventario de Dispositivos

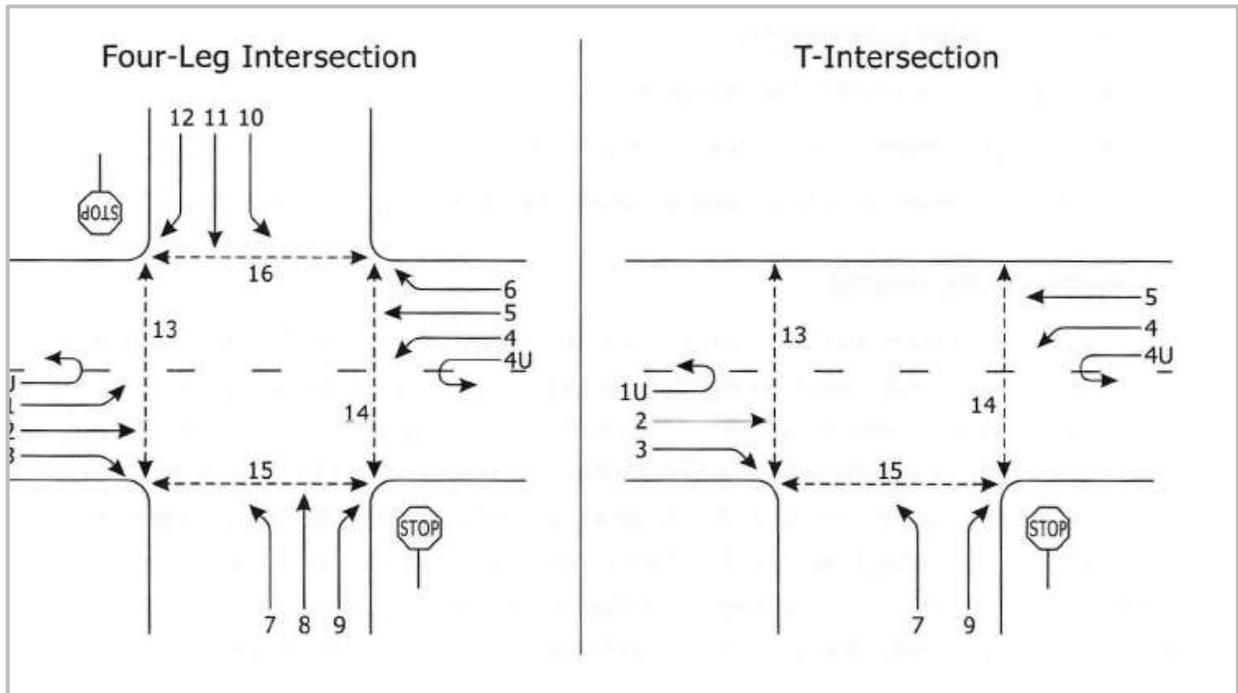


Figura 10. Diagrama de las intersecciones de estudio

Fuente: HCM, 2010.

2.2 Definición de las variables de operación

Las variables de operación del tránsito son aquellas definidas como macroscópicas, tales como los volúmenes de tránsito, la velocidad y la capacidad vial, las cuales se explican a continuación. El tiempo de reacción y de maniobras, que también se incluyen, son consideradas variables microscópicas del tránsito.

2.2.1 Volúmenes de tránsito

El volumen de tránsito es el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado y se expresa como:

$$Q = \frac{N}{T}$$

Donde:

Q = Vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/periodo)

N = Número total de vehículos que pasan (vehículos)

T = Periodo determinado (unidad de tiempo)

Dado el carácter dinámico que presentan los volúmenes de tránsito, es necesario conocer las variaciones periódicas que tiene el mismo en las horas de máxima demanda, en las horas del día, en los días de la semana y en los meses del año. Asimismo, se debe considerar las variaciones de los volúmenes de tránsito en función de su distribución por carriles, su distribución direccional y su composición.

De acuerdo con la unidad de tiempo en que se miden se utilizan para:

- Determinar la longitud y magnitud de los periodos de máxima demanda.
- Evaluar las deficiencias de capacidad.
- Establecer controles en el tránsito, como: colocación de señales, semáforos y marcas viales; jerarquización de calles, sentidos de circulación y rutas de tránsito, y prohibición de estacionamiento, paradas y maniobras de vueltas.
- Proyectar y rediseñar geoméricamente calles e intersecciones.

El valor obtenido de un volumen horario de máxima demanda no necesariamente es constante a lo largo de toda la hora; existen periodos dentro de la hora donde las tasas de flujo son mayores a las de la hora misma.

Para hacer un análisis de las variaciones de volumen de tránsito en la hora de máxima demanda se utiliza el factor horario de máxima demanda que relaciona el volumen horario de máxima demanda con el flujo máximo. Su fórmula matemática es:

$$FHMD = \frac{VHMD}{N(q_{max})}$$

Donde:

FHMD = Factor Horario de Máxima Demanda

VHMD = Volumen Horario de Máxima Demanda

N = Número de periodos durante la hora de máxima demanda

q_{máx} = Flujo máximo

Los periodos de tiempo dentro de la hora de máxima demanda pueden ser 5, 10 o 15 minutos.

Para un periodo de 15 minutos se tiene:

$$FHMD = \frac{VHMD}{4 \times (q_{max})}$$

El máximo valor que puede alcanzar el FHMD es la unidad, que significa que existe una distribución uniforme de flujos máximos dentro de la hora. Cuanto más inferior a la unidad sea el valor de FHMD indica que existen concentraciones de flujos máximos en periodos cortos dentro de la hora.

2.2.2 Velocidad

La velocidad debe ser estudiada, regulada y controlada con el fin de que, a partir de ésta, se origine un perfecto equilibrio entre el usuario, el vehículo y la vía, de tal manera que siempre se garantice la seguridad.

En ingeniería de tránsito se habla de dos velocidades básicamente: velocidad de punto o instantánea y velocidad media temporal.

Velocidad media temporal

Es la media aritmética de las velocidades de punto de todos los vehículos, o parte de ellos, que pasan por un punto específico de una carretera o calle durante un intervalo de tiempo seleccionado.

Se dice entonces, que se tiene una distribución temporal de velocidades de punto. Para datos de velocidades de punto no agrupados, matemáticamente la velocidad media temporal se define como:

$$\bar{V}_t = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

Donde:

V_t = velocidad media temporal

V_i = velocidad del vehículo i

n = número total de vehículos observados o tamaño de la muestra

Velocidad de punto

Es la velocidad de un vehículo cuando pasa por un punto determinado de una calle o vía general. El estudio de velocidad de punto está diseñado para medir las características de la velocidad prevalecientes a la hora de llevar a cabo el estudio. Para tener una evaluación estadística confiable se deben registrar las velocidades de un número adecuado de vehículos.

Las características de la velocidad de punto se emplean en la mayoría de las actividades de la ingeniería de tránsito, incluyendo las siguientes:

- a) Determinación de los dispositivos para el control y reglamentos del tránsito apropiados: i) límites de velocidad, mínimos y máximos; ii) velocidades recomendadas; iii) zonas de rebase prohibido; iv) rutas, zonas y cruces escolares; v) ubicación de señales de tránsito, y vi) ubicación y programación de los semáforos.
- b) Estudios de lugares de alto índice de accidentes, para determinar el tratamiento correctivo apropiado.
- c) Evaluación de la eficacia de las mejoras al tránsito, mediante la aplicación de estudios de “antes y después”.
- d) Análisis de lugares críticos donde los problemas son evidentes o por haberse recibido quejas de residentes o usuarios.
- e) Determinación de lugares específicos para ejercer mayor vigilancia policiaca.
- f) Selección de los elementos para el proyecto geométrico de la vialidad: i) velocidad de proyecto para establecer la relación entre la velocidad, la curvatura y la sobreelevación, así como la relación entre la velocidad, las pendientes y la longitud con el grado de las mismas y ii) velocidad de marcha para permitir el proyecto detallado de aspectos críticos, tales como: intersecciones, retornos y carriles para el cambio de velocidad.
- g) Establecimiento de tendencias de la velocidad para los diferentes tipos de características de los vehículos, mediante muestreos periódicos, en lugares seleccionados, con el flujo del tránsito continuo.
- h) Cálculo de los costos usuario-vía, para el análisis económico y de mejoras al tránsito.
- i) Ejecución de estudios de investigación que involucren flujos del tránsito.

2.2.3 Tiempo de reacción y de maniobras de los vehículos en las intersecciones

2.2.3.1 Tiempo de reacción

Es el tiempo entre ver oír, o sentir, y empezar a actuar en respuesta al estímulo de una situación del tránsito o del camino.

Idealmente esta respuesta del conductor requiere tiempo para percepción, intelección, emoción y volición (voluntad).

Mientras más compleja es la situación, el conductor requiere de más tiempo para hacer una evaluación apropiada de todos los factores que intervienen, con el fin de reaccionar con seguridad.

El tiempo de reacción puede variar desde 0.5 hasta 3 o 4 segundos.

Los tiempos de reacción del conductor se toman en consideración para determinar la distancia de visibilidad de parada, velocidad de seguridad en los accesos a intersecciones y en la programación de semáforos.

2.2.3.2 Maniobras de los vehículos en las intersecciones

En el área de la intersección, un conductor puede cambiar de ruta sobre la cual ha venido manejando, a una trayectoria diferente o cruzar la corriente de tránsito que se interpone entre él y su destino.

Cuando un conductor cambia de ruta, será necesario salir de la corriente de tránsito (divergencia) e incorporarse a una nueva trayectoria (convergencia), o simplemente cruzar. Estas maniobras son las que se presentan en toda área de conflicto en las intersecciones.

Las maniobras de divergencia, convergencia y cruce requieren un tiempo mínimo para realizar la maniobra según las distancias que se presentan en la intersección para evitar cualquier posible conflicto.

La figura 11 muestra cómo se representa la relación tiempo-distancia en una intersección tipo para la maniobra de cruce.

Para las intersecciones de estudio, deberá determinarse el tiempo necesario para realizar las maniobras de acuerdo con las velocidades y la geometría de cada una de ellas.

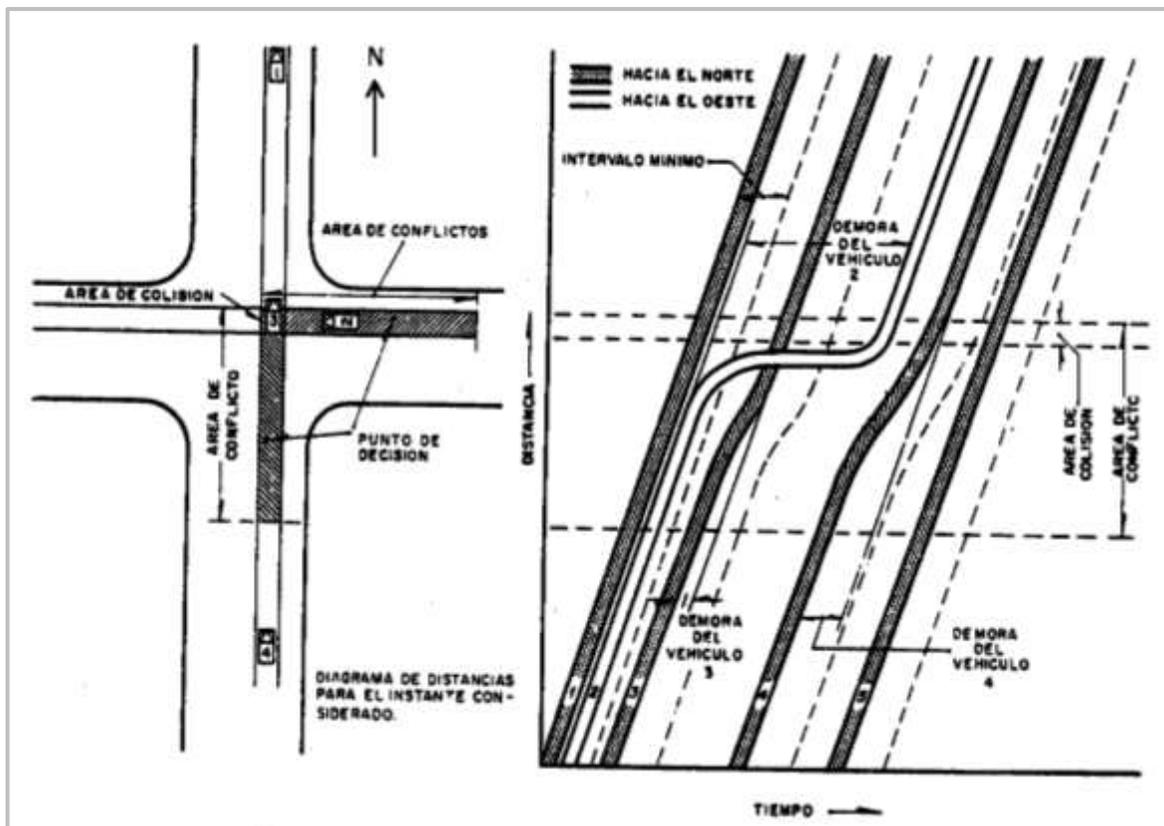


Figura 11. Relación tiempo-distancia en intersecciones

Fuente: *Manual de proyecto geométrico de carreteras* (SCT).

2.3 Estimación de los límites de las variables de operación

Los límites de las variables de tránsito que se utilizarán para el desarrollo del modelo son importantes, dado que establecen los valores máximos y mínimos que se contemplan en la caracterización del tránsito.

Las variables cuyos valores se detallarán son volumen de tránsito, velocidad y tiempo de maniobra.

2.3.1 Volumen de tránsito

De acuerdo con el *Manual de capacidad vial* del *Transportation Research Board*, en su versión 2010, la capacidad en el carril principal será de 1,800 vehículos ligeros por hora.

Por lo que el análisis de probabilidades comenzará desde un 10% de ese valor, hasta incrementarse porcentualmente del 0, 20, 40, 50, 60, 80 y 100 por ciento, para cada uno de los movimientos, hasta alcanzar su máxima capacidad.

Se realizarán dichos incrementos tanto para el camino principal como para el camino secundario y sus posibles combinaciones del tránsito.

2.3.2 Velocidad

La velocidad máxima de operación que se establece en las vialidades es de 70 km/h; sin embargo, para las estimaciones de esta investigación se utilizarán las velocidades determinadas en campo, para contar con datos reales de operación, dado que en ambos casos de estudio son sensiblemente mayores.

Los resultados se mostrarán en el capítulo siguiente.

2.3.3 Tiempo de maniobra

El tiempo estimado para las intersecciones de estudio fue de 4 segundos, incluidos el tiempo de reacción y el tiempo necesario para la maniobra de acuerdo con el movimiento rectilíneo uniformemente variado; sin embargo, este valor no se utilizó, puesto que resultan más conservadores los que establece el HCM.

De acuerdo con el *Manual de capacidad vial* del *Transportation Research Board*, en su versión 2010, la ecuación para calcular el tiempo de cruce en intersecciones con dos señales de alto sería:

$$t_{c,x} = t_{c,base} + t_{c,HV}P_{HV} + t_{c,G}G - t_{3,LT}$$

Donde:

$t_{c,x}$ = intervalo de tiempo crítico para el movimiento X (segundos)

$t_{c,base}$ = intervalo de tiempo base (segundos)

$t_{c,HV}$ = ajuste por la presencia de vehículos pesados (el valor será 1.0 para intersecciones de un solo carril por sentido y 2.0 para dos o tres carriles)

P_{HV} = proporción de vehículos pesados, expresados en decimales (ejemplo: 0.02 para el 2% de vehículos pesados)

$T_{c,G}$ = ajuste por pendiente (0.1 para los movimientos 9 y 12, y 0.02 para los movimientos 7, 8, 10 y 11, ver figura 3) (segundos)

G = pendiente en porcentaje (se expresa como G=-2 para una pendiente descendente del 2%)

T_{3,LT} = factor de ajuste por la geometría de la intersección (0.7 para la vuelta izquierda en calle secundaria, y 0 para las demás)

La tabla 2.1 muestra los valores críticos que se utilizarán para la estimación de los tiempos de maniobra.

Tabla 2.1 Valores críticos para intersecciones con dos altos

Tipo de movimiento		Intervalos críticos de tiempo		
		2 carriles	4 carriles	6 carriles
Vuelta a la izquierda desde el camino principal		4.1	4.1	5.3
Vuelta en "U" desde el camino principal		N/A	6.4 (amplia) 6.9 (estrecha)	5.6
Vuelta a la derecha desde el camino secundario		6.2	6.9	7.1
Cruce de frente sobre la menor	1 movimiento	6.5	6.5	6.5*
	2 movimientos (I)	5.5	5.5	5.5*
	2 movimientos (II)	5.5	5.5	5.5*
Vuelta izquierda desde el camino secundario	1 movimiento	7.1	7.5	6.4
	2 movimientos (I)	6.1	6.5	7.3
	2 movimientos (II)	6.1	6.5	6.7

*Usar con precaución; valores estimados.

Fuente: HCM, 2010.

Con base en lo anterior, tendremos que para la intersección en "T" los tiempos serían:

$$t_{c,x} = 4.1 + (1.0)(0.137) + (0.2)(0) - 0$$

$$t_{c,x} = 4.237 \text{ segundos (movimiento 7)}$$

$$t_{c,x} = 7.1 + (1.0)(0.149) + (0.2)(0) - 0.7$$

$$t_{c,x} = 6.549 \text{ segundos (movimiento 4)}$$

Dado que se tienen dos valores únicamente utilizaremos el crítico, que es el movimiento 4, el cual demanda más tiempo de cruce para la realización de la maniobra, es decir 6.5 segundos.

Para la intersección en “+” tendremos que los tiempos serían:

$$t_{c,x} = 4.1 + (1.0)(0.147) + (0.2)(0) - 0$$

$$t_{c,x} = 4.247 \text{ segundos (movimiento 4)}$$

$$t_{c,x} = 7.1 + (1.0)(0.252) + (0.2)(0) - 0$$

$$t_{c,x} = 7.352 \text{ segundos (movimiento 10)}$$

$$t_{c,x} = 6.5 + (1.0)(0.238) + (0.2)(0) - 0$$

$$t_{c,x} = 6.738 \text{ segundos (movimiento 11)}$$

$$t_{c,x} = 4.1 + (1.0)(0.167) + (0.2)(0) - 0$$

$$t_{c,x} = 4.267 \text{ segundos (movimiento 1)}$$

$$t_{c,x} = 7.1 + (1.0)(0.355) + (0.2)(0) - 0$$

$$t_{c,x} = 7.455 \text{ segundos (movimiento 7)}$$

$$t_{c,x} = 6.5 + (1.0)(0.254) + (0.2)(0) - 0$$

$$t_{c,x} = 6.754 \text{ segundos (movimiento 8)}$$

Dado que se tienen seis valores únicamente utilizaremos el crítico, que corresponde al movimiento 7, el cual demanda más tiempo de cruce para la realización de la maniobra, es decir 7.5 segundos.

El número de movimientos se encuentran enumerados conforme a la figura 10.

2.4 Desarrollo del modelo

El modelo a desarrollar se centra en el uso de distribuciones de probabilidad. El uso de las distribuciones de probabilidad constituye una herramienta básica para predecir el comportamiento futuro de diferentes acontecimientos o fenómenos naturales.

Las distribuciones de probabilidad están integradas por variables que pueden asociarse a las características del tránsito y de la vialidad, si las aplicáramos a la ingeniería de tránsito.

La distribución de probabilidades de Poisson permite conocer la probabilidad del número de ocurrencias por unidad especificada, y se define completamente por su promedio de ocurrencia por unidad especificada como su único parámetro. Dado el promedio de ocurrencias por unidad especificada, de una variable de Poisson, X , la función masa probabilidad se da como:

$$P_t = (x; \lambda) = e^{-\lambda} (\lambda^x / x!)$$

Donde:

P_t representa la notación funcional de una distribución de Poisson y es una constante aproximadamente igual a 2.71828.

La función de distribución acumulativa es una variable de Poisson que, como en cualquier caso discreto, se obtiene sumando el número de la probabilidad de "r" o menos ocurrencias. La expresión matemática es:

$$P_t = (r, \lambda) = \sum P_t(x, \lambda) \quad (1)$$

Las pruebas muestran que es posible usar esta fórmula como una aproximación en la mayoría de las aplicaciones en las que resulta adecuada la distribución binomial, si por otro lado debe conservarse en mente que la distribución de Poisson puede ser conveniente para representar en términos estadísticos ciertos datos, independientemente de sus cualidades, como una aproximación a la distribución binomial.

Aplicar Poisson en ingeniería de tránsito a eventos como la llegada aleatoria de vehículos a un punto sobre una vialidad y su ocurrencia de accidentes nos permite obtener una ecuación del tipo siguiente:

$$P(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad (2)$$

Donde:

$P(x)$ = probabilidad de "x" ocurrencias de un evento en particular durante un periodo de tiempo dado;

x = número de ocurrencias durante un periodo de tiempo dado;

m = número medio de ocurrencias en un periodo de tiempo dado.

Dicho planteamiento se pretende aplicar a la probabilidad de ocurrencia de accidentes entre dos vialidades que conforman una intersección, en función de sus volúmenes de tránsito, velocidades de operación y características geométricas de la vialidad.

2.5 Estudios de campo de ingeniería de tránsito

Como parte de la formulación de la metodología se requiere la realización de dos estudios de campo principalmente respecto de sus volúmenes de tránsito y velocidad de punto.

2.5.1 Volúmenes de tránsito

Existen dos métodos básicos de aforo: el mecánico (registro automático) y el manual. En nuestro caso, se decidió el método manual, ya que al tratarse de intersecciones, se requiere un mayor detalle de la clasificación vehicular y de los movimientos direccionales.

2.5.1.1 Aforo manual

En su forma básica se requiere observar con un lápiz y un formato elaborado de manera particular para cada estudio. Si el lugar es una intersección con bajo movimiento vehicular, un observador podrá realizar los registros, pero si el volumen es alto en la intersección sería necesario contar con dos o más personas.

Los aforadores previamente capacitados podrán registrar la información detallada de:

- Clasificación vehicular (camiones por tamaño, peso, número de ejes, autobuses, automóviles, motocicletas, bicicletas, etc.).
- Movimientos direccionales en una intersección o en una entrada.
- Dirección del recorrido.
- Procedencia de los vehículos por medio de las placas.
- Movimientos peatonales en los pasos de peatones y en las aceras, o clasificación por edad (escolar o adulto).
- Uso del carril o longitud de colas.
- Número de pasajeros por vehículos (ocupación).
- Obediencia a los dispositivos para el control del tránsito.

Los periodos de aforo deben efectuarse en días típicos y en los periodos de mayor movimiento vehicular. Generalmente estos periodos son de 07:00 a 09:00, de 12:00 a 14:00 y de 18:00 a 20:00 horas. Las observaciones deben efectuarse en intervalos de 15 minutos.

Se recomienda que los días de aforo sean los martes, miércoles y jueves de la semana. Estos días suelen ser los de mayor representatividad de acuerdo con el criterio experto en ingeniería de tránsito.

Los resultados de los aforos se muestran en el capítulo siguiente.

2.5.2 Velocidad de punto

Los estudios de velocidad de punto se efectúan en lugares especiales o generales.

Las ubicaciones generales se seleccionan para fines de estudio de tendencias o investigación de datos básicos del tránsito. En carreteras, los estudios de tendencias se hacen en tramos rectos, a nivel y que no estén cerca de intersecciones o accesos. En calles urbanas, las ubicaciones a media cuadra son las más adecuadas, siempre y cuando no existan entradas y salidas de estacionamiento, que influyan en el flujo vehicular.

Las ubicaciones especiales se eligen para establecer límites de velocidad en tramos específicos de calles o carreteras, así como para evaluar mejoras en el tránsito y estudiar lugares de accidentes.

Para obtener una estimación imparcial y precisa de las velocidades de punto en un lugar específico, deben observarse los aspectos siguientes:

- El equipo debe estar oculto a los conductores que se acercan.
- El investigador que tuviera necesidad de observar los vehículos que se aproximan debe ser lo menos llamativo que sea posible.
- Debe evitarse a los curiosos.
- Debe medirse un número adecuado de velocidades de los vehículos.

Un buen estudio de velocidad de punto requiere de un tamaño adecuado de la muestra, para satisfacer consideraciones estadísticas.

La siguiente ecuación puede emplearse para calcular el número de velocidades a medir:

$$N = \left(\frac{SK}{E} \right)^2$$

Donde:

N = tamaño mínimo de muestra

S = desviación normal de la muestra (km/h o mi/h)

K = constante correspondiente al nivel de confiabilidad deseado

E = error permitido en la estimación de la velocidad de punto (km/h o mi/h)

La hora para hacer un estudio de velocidad de punto dependerá del objetivo del mismo. Un estudio general para establecer límites de velocidad, a fin de obtener datos básicos o revisar tendencias, deberá llevarse a cabo durante uno de los tres periodos siguientes, fuera de las horas de máxima demanda:

- 10:00 a 12:00
- 15:30 a 17:30
- 20:00 a 22:00

Los datos de velocidad pueden recopilarse por medio de métodos manuales o automáticos. El método automático emplea dispositivos eléctricos o mecánicos, para medir las velocidades de los vehículos al pasar. El radar es el dispositivo automático empleado para medir velocidades de punto.

3 Casos de estudio

Para contar con una mayor accesibilidad a los puntos de estudio, facilitar los traslados a ellos y obtener la información de campo, se seleccionaron dos intersecciones carreteras cercanas a la ciudad de Querétaro.

La figura 12 muestra la localización espacial de las intersecciones.



Figura 12. Localización de los casos de estudio

Fuente: Elaboración propia con imágenes de la herramienta Google Maps

3.1 Levantamiento geométrico de las intersecciones para los estudios de caso

Para la intersección en “T” se seleccionó el entronque de la carretera estatal 400 y 420, que conforma la red de caminos del estado de Querétaro.

La figura 13 muestra los resultados del levantamiento geométrico mediante el cual se determinaron las variables físicas de la intersección en “T”.

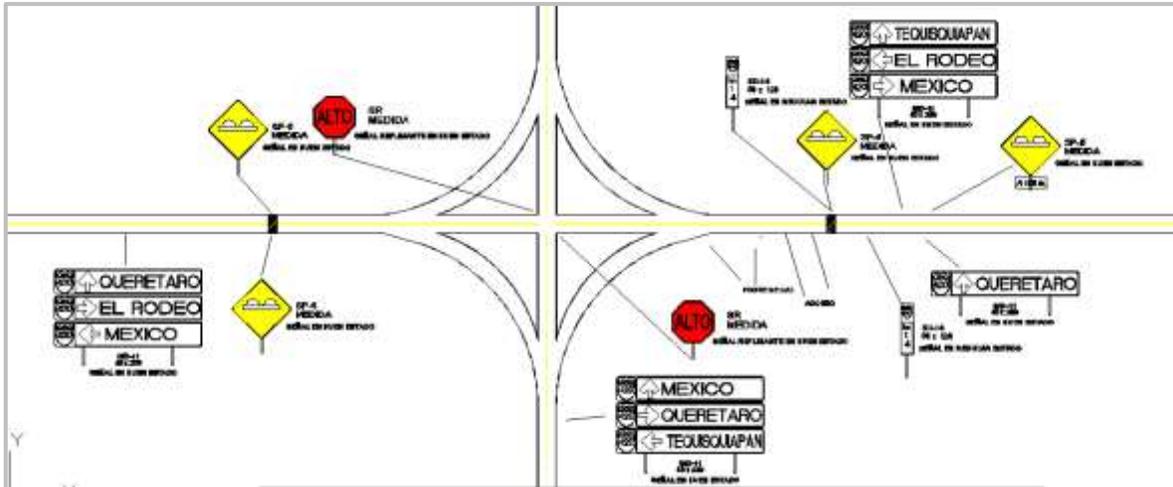


Figura 14. Levantamiento geométrico de la intersección en “T”

3.2 Variables de operación de las intersecciones para los estudios de caso

3.2.1 Caso 1. Entronque en “T”.

Los datos de operación de las intersecciones de estudio son los siguientes:

- Vialidad principal

- Volumen en la hora de máxima demanda = 989 vehículos
- Tasa de flujo equivalente (V_p) = 1544 vehículos ligeros/hora/carril
- Velocidad de punto 85 percentil = 78 km/h o 48.5 mi/h

- Vialidad secundaria

- Volumen en la hora de máxima demanda = 591 vehículos
- Tasa de flujo equivalente (V_s) = 1153 vehículos ligeros/hora/carril
- Velocidad de punto 85 percentil = 80 km/h o 49.7 mi/h

Se obtuvieron los niveles de servicio en los cuales se encuentran las vialidades. Siguiendo la metodología descrita por el *Highway Capacity Manual* (2010) para carreteras de dos carriles, tenemos que la vialidad principal se encuentra en un nivel de servicio “E”, estando ésta en el límite de su capacidad de funcionamiento, en la cual la velocidad se reduce a un valor bajo y uniforme, resultando difícil la libertad de maniobra y poca comodidad.

Para la vialidad secundaria se obtuvo un nivel de servicio “C”, presentándose un flujo estable, pero marcando el comienzo del dominio en que los usuarios se ven afectados por las interacciones con otros usuarios; la velocidad y libertad de maniobra se ven afectadas y desciende el nivel de comodidad.

3.2.2 Caso 2. Entronque en “+”

Los datos de operación de las intersecciones de estudio son los siguientes:

- Vialidad principal

- Volumen en la hora de máxima demanda = 1259 vehículos
- Tasa de flujo equivalente (V_p) = 1242 vehículos ligeros/hora/carril
- Velocidad de punto 85 percentil = 79 km/h o 49 mi/h

- Vialidad secundaria

- Volumen en la hora de máxima demanda = 817 vehículos
- Tasa de flujo equivalente (V_s) = 777 vehículos ligeros/hora/carril
- Velocidad de punto 85 percentil = 65 km/h o 40.4 mi/h

Se obtuvieron los niveles de servicio en los cuales se encuentran las vialidades. Siguiendo la metodología descrita por el *Highway Capacity Manual* (2010) para carreteras de dos carriles, tenemos que tanto la vialidad principal como la vialidad secundaria se encuentran en un nivel de servicio “D”, en la que se tiene una densidad elevada aunque estable; la velocidad y libertad de maniobra quedan seriamente restringidas y el usuario experimenta un nivel de comodidad bajo. Un ligero incremento en el flujo puede ocasionar problemas de funcionamiento.

Nota. La tasa de flujo equivalente se obtiene al convertir todos los vehículos de las vialidades a vehículos ligeros, de acuerdo con el *Highway Capacity Manual*.

3.3 Desarrollo del modelo con base en Poisson

Aplicando la distribución de probabilidades de Poisson para determinar el número de ocurrencias de accidentes en las intersecciones, ligando las características de operación del tránsito y de la vía en ambos casos, tenemos:

Usando la fórmula de distribución de Poisson al evento, como la llegada aleatoria de vehículos a un punto sobre una vialidad y su ocurrencia de accidentes:

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (3)$$

Calculando la probabilidad de que pasen uno o más vehículos por la principal:

$$p(1 \text{ o más}) = 1 - p(0) \quad (4)$$

$$p(0) = \frac{\lambda_p^0 e^{-\lambda_p}}{0!} \quad (5)$$

$$p(1 \text{ o más}) = 1 - e^{-\lambda_p} \quad (6)$$

$$\lambda_p = \frac{VHMD_p}{3600} \quad (7)$$

Donde:

VHMD_p = volumen horario de máxima demanda

Calculando la probabilidad de que pasen uno o más vehículos en la vialidad secundaria es:

$$p(1 \text{ o más}) = 1 - p(0) \quad (4)$$

$$p(0) = \frac{\lambda_s^0 e^{-\lambda_s}}{0!} \quad (8)$$

$$p(1 \text{ o más}) = 1 - e^{-\lambda_s} \quad (9)$$

$$\lambda_s = \frac{VHMD_s}{3600} * (\text{tiempo de maniobra}) \quad (10)$$

En este caso, el valor del número medio de ocurrencias en un periodo de tiempo dado se debe multiplicar por el tiempo necesario para realizar la maniobra, el cual representa el estimado del tiempo en segundos que requiere un vehículo para realizar la maniobra (vuelta izquierda desde el camino principal, vuelta izquierda desde el camino secundario, o cruce).

La probabilidad de ocurrencia de accidentes será entonces:

$$P_{oa} = p(1 \text{ o más})_p * p(1 \text{ o más})_s \quad (11)$$

Donde:

P_{oa} = probabilidad de ocurrencia de accidentes entre vehículos

$p(1 \text{ o más})_p$ = probabilidad de que pase uno o más vehículos en el tiempo de estudio en la vialidad principal

$p(1 \text{ o más})_s$ = probabilidad de que pase uno o más vehículos en el tiempo de estudio en la vialidad secundaria

Entonces:

$$P_{oa} = p(1 - e^{-\lambda_p})_p * p(1 - e^{-\lambda_s})_s \quad (12)$$

Mediante el análisis anterior se graficaron los flujos vehiculares a partir de cada uno de los movimientos existentes en los entronques en “T” y “+”, en donde se trató de representar todas las combinaciones posibles de los flujos vehiculares que se podrían presentar en la intersección. Para el entronque en “T” se usaron los seis movimientos existentes en esta intersección, mientras que para el entronque en “+” se utilizaron los 12 diferentes movimientos que pueden darse en esta intersección. Una vez definidos los movimientos, se comenzaron a introducir distintos volúmenes de tránsito, variándolos a su vez todos estos entre sí en porcentajes del 0, 20, 40, 50, 60, 80 y 100 por ciento, para con ello tratar de abarcar al máximo todos los posibles flujos vehiculares que se podría presentar en la intersección. El detalle de los cálculos por su tamaño se incluyen en el anexo 1.

De lo resultados de las probabilidades y sus interacciones entre la vialidad principal y la secundaria, se procedió a elaborar una serie de gráficas que representan la probabilidad de ocurrencia de un accidente de un automóvil en la carretera principal con un automóvil de la carretera que se incorpora.

Las figuras 15 y 16 muestran los resultados de los cálculos comentados para las intersecciones en “T” y “+”, respectivamente.

Una vez analizadas las gráficas, mediante una curva adicional se delimitaron los flujos para los cuales la probabilidad de que ocurriera un accidente es mayor al 25, 50 y 75 por ciento, en donde se considera que la clasificación de riesgo en intersecciones menor a 25% es baja, entre 25 y 50 por ciento es media, de 50 a 75 por ciento es alta y mayor a 75% es muy alta, considerando que una probabilidad mayor al 50% podría representar el límite sobre el cual se puede asumir la decisión de construir una intersección a desnivel.

Las figuras 17 y 18 muestran las gráficas de probabilidades, en las que se incluye la línea de probabilidades del 25, 50 y 75 por ciento.

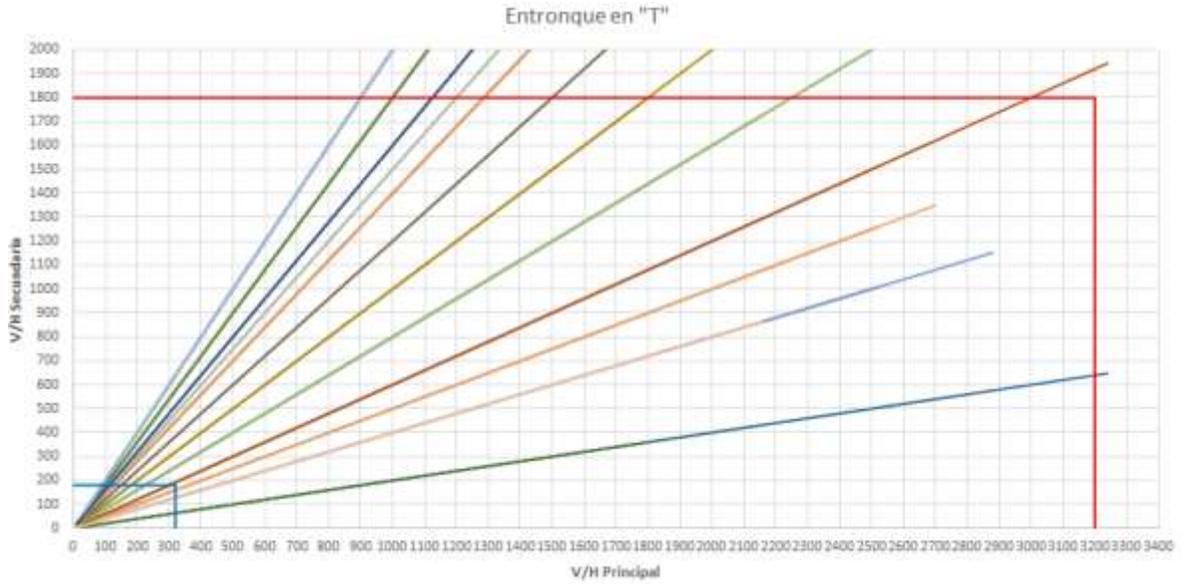


Figura 15. Modelación de la probabilidad de Poisson para el entronque en "T"

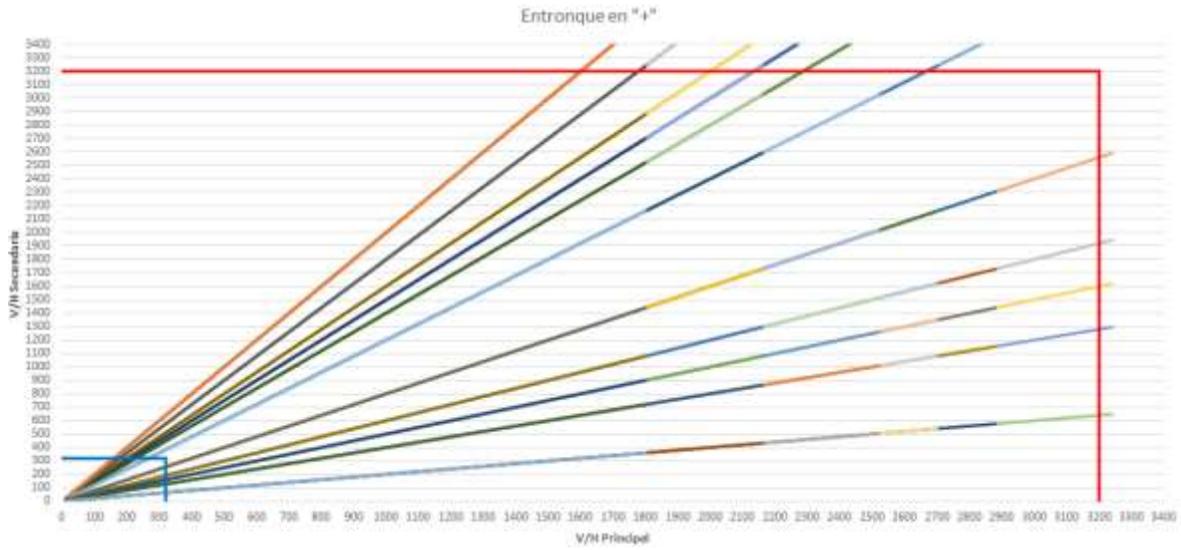


Figura 16. Modelación de la probabilidad de Poisson para el entronque en "+"

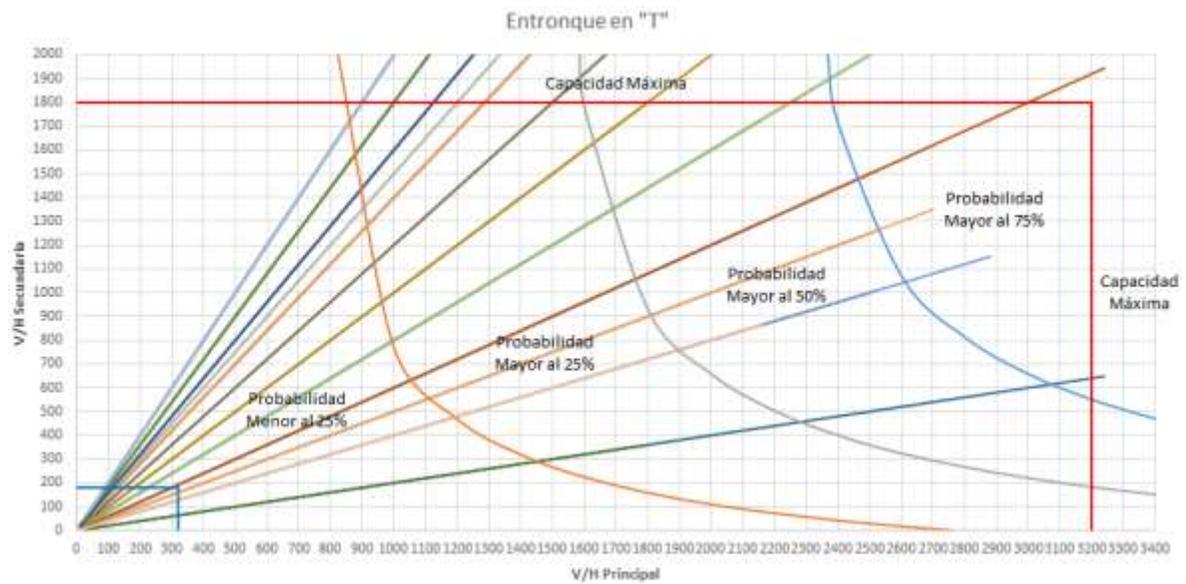


Figura 17. Modelación de la probabilidad de Poisson para el entronque en "T" con sus límites

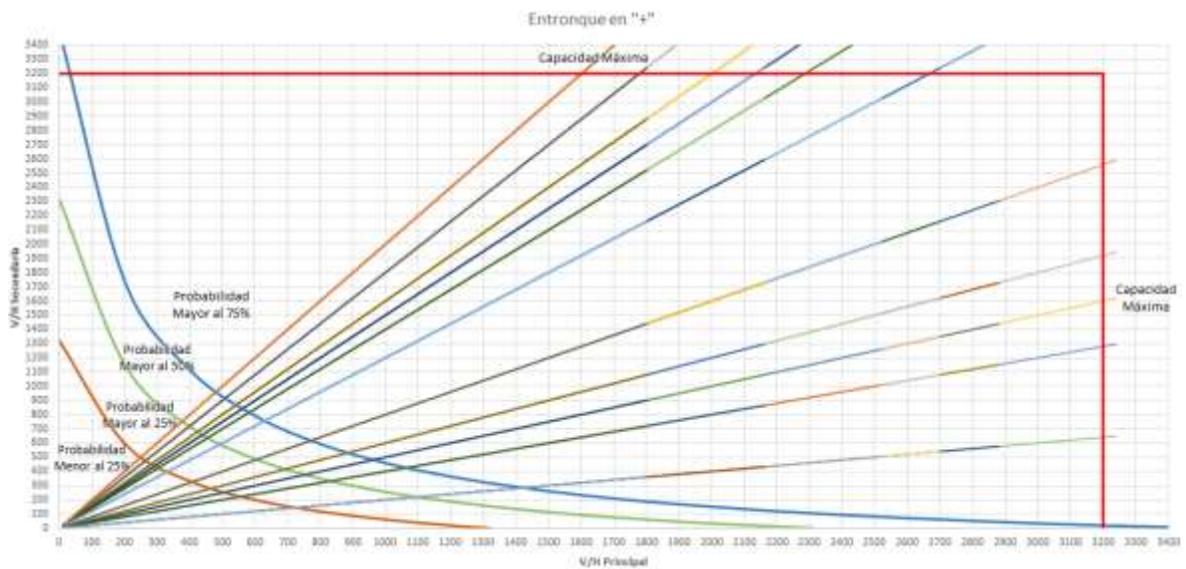


Figura 18. Modelación de la probabilidad de Poisson para el entronque en "+" con sus límites

3.4 Análisis de los estudios de caso

Las figuras 17 y 18 nos permiten delimitar una frontera de probabilidades del 25, 50 y 75 por ciento, mediante la cual es posible visualizar si los estudios de caso analizados se consideran peligrosos de acuerdo con el límite establecido, aunque esta justificación se debe complementar con estudios de accidentes en el lugar y así contar con una validación de la metodología propuesta.

De esta manera, para las intersecciones en “T” y “+”, se convirtieron los volúmenes de tránsito de acuerdo con su clasificación vehicular en vehículos ligeros por carril para poder entrar a las figuras mencionadas.

3.4.1 Caso 1. Entronque en “T”

Vialidad principal

- Tasa de flujo equivalente (V_p) = 1544 vehículos ligeros/hora/carril

Vialidad secundaria

- Tasa de flujo equivalente (V_s) = 1153 vehículos ligeros/hora/carril

3.4.2 Caso 2. Entronque en “+”

Vialidad principal

- Tasa de flujo equivalente (V_p) = 1242 vehículos ligeros/hora/carril

Vialidad secundaria

- Tasa de flujo equivalente (V_s) = 777 vehículos ligeros/hora/carril

Al superponer las líneas de intersección en ambas gráficas, tanto de la vialidad principal como de la secundaria, se obtuvieron las figuras 19 y 20, donde se pueden visualizar, si el caso de estudio puede considerarse como una intersección con alta probabilidad de ocurrencia de accidentes.

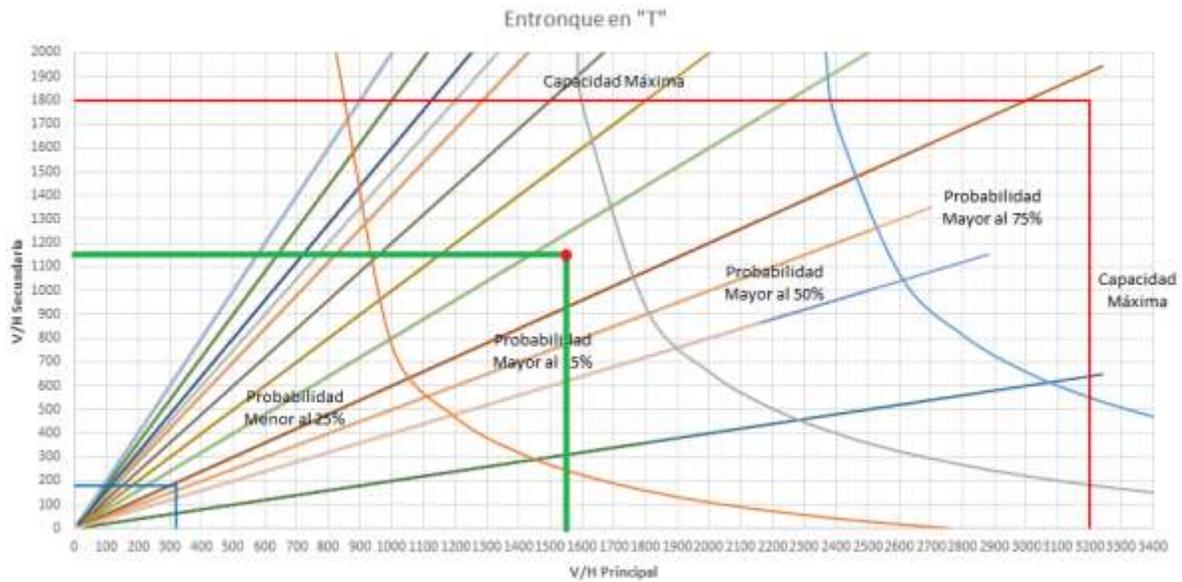


Figura 19. Validación de la modelación de la probabilidad de Poisson para el entronque en “T”

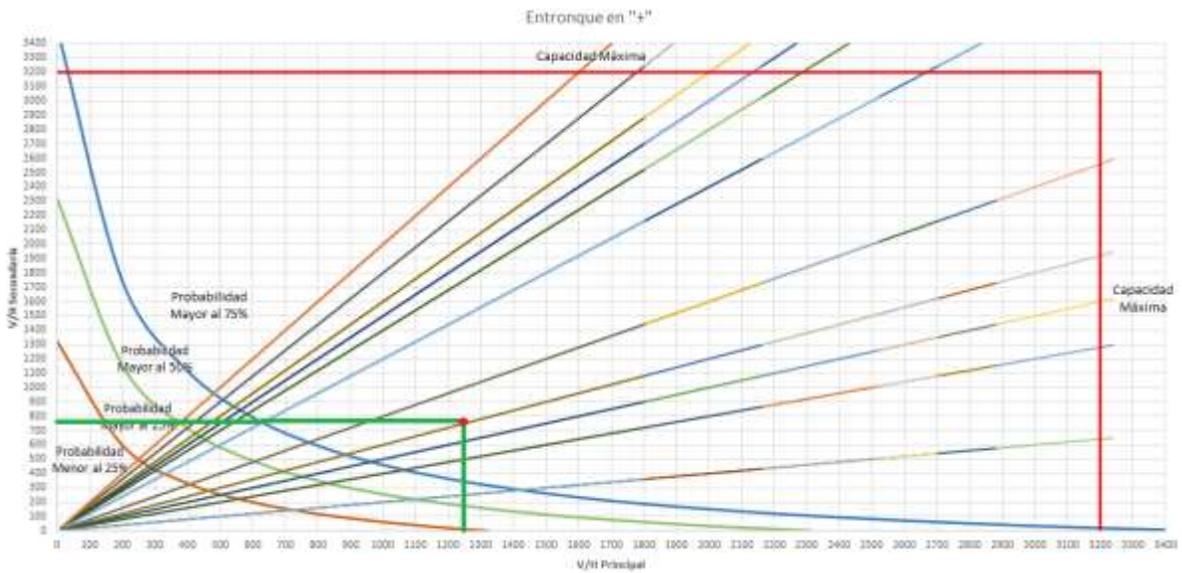


Figura 20. Validación de la modelación de la probabilidad de Poisson para el entronque en “+”

3.4.3 Discusión de resultados

La toma de decisiones debe fundamentarse en un criterio experto, al definir cuál sería el umbral máximo adecuado que debería permitirse en una intersección, en función de la probabilidad de que dos vehículos se encuentren.

Sobre la representación de modelo, los resultados se ajustan adecuadamente a lo esperado, a fin de poder modelar la probabilidad de que dos vehículos se encuentren; de esta manera, los umbrales integrados a la gráfica permiten identificar las zonas críticas.

Con la información de los aforos de las intersecciones de estudio se pudo evaluar en qué nivel de probabilidad se encuentran dichos cruceros, que para el caso en “T”, el nivel de seguridad se encuentra por debajo del 50%, y para la intersección en “+” el nivel está por encima del 75 por ciento.

Los resultados muestran la efectividad de la herramienta para la toma de decisiones; sin embargo, no necesariamente la solución tendrá que ser un entronque a desnivel, el cual es el objetivo del trabajo, ya que de las intersecciones de estudio se pueden evaluar otras opciones para mejorar los entronques, aunque la probabilidad de encontrarse dos vehículos no cambiaría, por lo que para el caso de la intersección en “+” se recomienda que a la brevedad posible se modifique la intersección a fin de evitar accidentes.

Para una mayor efectividad del modelo se quiso validarlos a través de un histórico de la siniestralidad de la zona, y los resultados son los siguientes:

Caso 1. Entronque en “T” (carreteras 400 y 420)

Tabla 3.1. Registro de accidentalidad en el entronque en “T”

Año 2009			
Causa de accidente	Accidentes	Lesionados	Fallecidos
Velocidad excesiva o inmoderada	1	1	0
Imprudencia	1	0	0
Total	2	1	0
Año 2010			
Causa de accidente	Accidentes	Lesionados	Fallecidos
No determinado	2	1	0
Imprudencia	3	0	0
Total	5	1	0
Año 2011			
Causa de accidente	Accidentes	Lesionados	Fallecidos
Velocidad excesiva o inmoderada	2	0	1
Imprudencia	1	0	0
Total	3	0	1
Año 2012			
Causa de accidente	Accidentes	Lesionados	Fallecidos
Imprudencia	2	2	0
Total	2	2	0
Año 2013			

Causa de accidente	Accidentes	Lesionados	Fallecidos
Velocidad excesiva o inmoderada	3	0	0
Falta de distancia de seguridad	1	0	0
Invasión de carril	2	1	0
Viraje indebido	1	0	0
Total	7	1	0

Fuente: Policía estatal del estado de Querétaro

De esta manera un indicador de accidentalidad en cientos para el último año sería:

$$\left(\frac{7}{365}\right) * (100) = 1.92$$

Como podemos ver, el número de accidentes en las intersecciones se ha ido incrementando con el tiempo y con esto el número de lesionados, debido quizás al aumento en el volumen vehicular que pasa por las intersecciones; sumándole a estos, los accidentes de los cuales no se tiene registro por parte de las autoridades.

Se identificó que los registros son insuficientes, comparado el número de accidentes, ya que no en todos los casos se genera el expediente correspondiente, por diversas razones.

Por ello, los resultados del modelo no se validaron. Sin embargo, se puede observar claramente dentro de un límite establecido del 50% cómo se comportan las intersecciones conforme a los volúmenes de tránsito que circulan en ellas, e inferir que se pueden encontrar en un nivel de operación poco segura. Con ello, se puede justificar la mejora de la intersección mediante la construcción de un paso a desnivel para separar los flujos y evitar los conflictos entre los diferentes movimientos que prevalecen en las intersecciones a nivel.

El modelo debe ajustarse para cada intersección en particular, ya que la geometría, las velocidades, el volumen y las características del tránsito varían. A efecto de utilizar este modelo como instrumento preventivo, tendría que aplicarse a todas las intersecciones y monitorearlas por medio de un observatorio vial, con el propósito de evaluar el momento oportuno en que la seguridad se vea comprometida.

4 Conclusiones

De acuerdo con la hipótesis planteada a partir de la distribución de probabilidades de Poisson, se pudo determinar la probabilidad de ocurrencia de que dos vehículos se encuentren en una intersección, ligando las características de operación del tránsito y de la vía. Derivado de esta función de probabilidad, fue posible concebir una metodología que permite justificar la necesidad de intersecciones a desnivel en carreteras con base en la probabilidad de ocurrencia de que dos vehículos se encuentren en el entronque vial.

Siguiendo el objetivo propuesto, esto permitió desarrollar una metodología que nos ayuda a justificar la creación de una intersección a desnivel en carreteras, para lo cual se toman en cuenta las principales características en términos de tránsito y de la vía, al igual que de la probabilidad de ocurrencia de accidentes viales.

La seguridad del conductor depende, en gran parte, de su intuición y habilidad para desplazarse normalmente en las vías, dependiendo de sus características físicas y psicológicas. Sin embargo, es responsabilidad de los organismos operadores de los sistemas viales y de especialistas en esta área realizar investigaciones que tiendan a proporcionar al conductor mejores niveles de seguridad y comodidad, tales como el modelo desarrollado. La propuesta es que este modelo se utilice como herramienta de ayuda para la toma de decisiones.

Se espera que el modelo desarrollado conforme a la distribución de Poisson constituya una herramienta técnica para que los organismos administradores de carreteras puedan —mediante acciones preventivas— justificar la construcción de entronques a desnivel.

Las gráficas presentadas ofrecen una idea del comportamiento del tránsito, así como de la probabilidad de que ocurra un accidente en la intersección a distintos volúmenes de tránsito, permitiendo con esto saber cuándo una vialidad presenta problemas de accidentes o los tendrá en el futuro.

Para la distribución probabilística de Poisson se manejan las siguientes variables: volumen de tránsito vehicular y tiempos de maniobras principalmente. Esto nos da una buena idea de la interacción de los vehículos en un entronque y de la probabilidad de que ocurra un accidente. No obstante, además del método propuesto, es conveniente hacer un minucioso análisis de los accidentes, que permita validar el modelo y coadyuvar en la toma de decisiones.

Al aplicar el modelo en las intersecciones actualmente en operación, se podrá definir la probabilidad de ocurrencia en las intersecciones, lo que permite sugerir una justificación técnica preventiva para que una intersección a nivel puede pasar a una a desnivel, en función de las probabilidades de ocurrencia de accidentes, sin que estos lleguen a materializarse, así como de los ahorros que representan los daños materiales y los costos en términos de vidas humanas o traumatismos derivados de accidentes viales.

Las acciones a favor de la seguridad vial deben incluir en forma destacada la detección sistemática de los sitios con mayor incidencia de accidentes, a fin de estudiarlos y eliminar aquellos de alta peligrosidad.

Con la información operacional y de las variables del tránsito de las intersecciones, se podrán evaluar las tendencias y pronósticos de los parámetros relacionados con la circulación vial, y con estos dar un seguimiento periódico a las intersecciones, principalmente a aquellas que estén a punto de generar una alta siniestralidad.

Esta metodología aplica un precedente como una herramienta técnica preventiva de la accidentalidad en los entronques, pudiéndose con esto seguir investigando el tipo de accidentes que se presentan, así como sus causas. Esta información se aplica al modelo, para pulirlo con mayor detalle, para cada caso de estudio en particular. Ello arroja resultados más precisos y certeros sobre el cuándo en una intersección se van a presentar problemas de accidentes.

Finalmente, esta metodología también permite el estudio de cuándo es que resulta necesaria la canalización de los distintos flujos vehiculares en un entronque a nivel, para así reducir al mínimo los conflictos que se generan cuando los volúmenes de tránsito comienzan a incrementarse en las intersecciones.

Bibliografía

American Association of State Highway and Transportation (2011), *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, Washington, DC, Estados Unidos.

Box, Paul y Oppenlander, Joseph (1976), *Manual de estudios de ingeniería de tránsito*, Asociación Mexicana de Caminos, A.C., Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México cuarta edición.

Cal y Mayor, Rafael (1998), *Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones*, Editorial Alfa & Omega, séptima edición.

Chavarría, J., Mendoza, A. y Mayoral, E. (1996), *Algunas medidas para mejorar la seguridad vial en las carreteras nacionales*, informe técnico, Instituto Mexicano del Transporte, México.

Commission for Global Road Safety (2011), *Make road safe, a new priority for sustainable development*, Reino Unido.

Cuevas, A., Gómez, N., Villegas, N., Mayoral, E. y Mendoza, A. (2013), *Anuario estadístico de accidentes en carreteras federales (2010)*, informe técnico. Instituto Mexicano del Transporte, México.

Cuevas, A., Mayoral, E. y Mendoza, A. (2011), *Definición de indicadores de seguridad vial en la red carretera federal*, informe técnico, Instituto Mexicano del Transporte, México.

De Pauw, E., Daniels, S., Brijs, T., Hermans, E. y Wets, G. (2013), *Safety effects of an extensive black spot treatment programme in Flanders-Belgium*, Transportation Research Institute, Hasselt University, Bélgica.

Elvik, R. (2007), *State-of-the-art approaches to road accident black spot management and safety analysis of road networks (TOI report No. 883/2007)*, Oslo: Institute of Transport Economics, Norwegian Centre for Transport Research.

Florida Department of Transportation (2007), Florida intersection design guide "For New Construction and Major Reconstruction of At-Grade Intersections on the State Highway System.

Gallegos, R. (2010). Diseño geométrico, diplomado en ingeniería, México.

Transportation Research Board (2010), *Highway Capacity Manual*,. Washington, DC.

Institute of Transportation Engineers (1976), *Manual of Traffic Engineering Studies*, Virginia, Estados Unidos.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2012), “Perfil estatal de Querétaro”, reporte técnico, México.

Jiménez, M. (2011), *Problemática en vialidades*, Universidad de Chile, Chile.

Ladrón de Guevara, F., Washington, S. y Oh, J. (2004), *Forecasting crashes at the planning level; Simultaneous Negative Binomial Crash Model Applied in Tucson, Arizona*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1987, TRB, National Research Council, Washington D.C.

Larson, Larry R. y Mannering, Fred L. (2011), *Method for prioritizing intersection improvements*, Federal Highway Administration, Washington DC, Estados Unidos.

Mayoral, E., Contreras, A., Chavarría, J. y Mendoza, A. (2001), *Auditorías en seguridad carretera; procedimientos y prácticas*, informe técnico, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, México.

Mendoza Sánchez, J. F. (2012), “Apuntes de ingeniería de tránsito”; maestría en ingeniería de vías terrestres, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

M.O.P.U. (1987), *Recomendaciones para el proyecto de intersecciones*, Dirección General de Carreteras, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo,

Organización Mundial de la Salud (2009), *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial*, Ginebra, Suiza.

Schwar, Johannes y Puy, Jose (1975), *Métodos estadísticos en ingeniería de tránsito*, Representaciones y servicios de ingeniería, S.A., México.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1991), *Manual de proyecto geométrico de carreteras*, México, D.F.

Services d'études techniques des routes et autoroutes (2002), *The design of interurban intersections on major roads*, Francia.

Timaná, J. (2005), *Técnica de análisis de accidentes de tránsito: Seguridad vial*, Universidad de Piura, Lima.

Torres, A., Torres, F. y Pardillo, J. (2010), “Modelo de clasificación del riesgo en intersecciones rurales en “T” y validación del tiempo de evasión como medición alternativa de la seguridad de tránsito en intersecciones”, *Revista de Ingeniería en Construcción*, Vol. 25, No. 3, Santiago de Chile, Chile.

Transportation Research Board (2010), *Highway Capacity Manual*, quinta edición, Washington, D.C.

Zhang, Lin y Prevedouros, Panos (2007), *Signalized intersection level of service; Incorporating safety risk*, Transportation Research Board of the National Academies, Estados Unidos.

Anexo 1

Escenarios

Se trató de recrear las distintas combinaciones para los diferentes flujos vehiculares que se podrían presentar en la intersección, en donde:

- 1 = vehículos en la vialidad principal carril derecho
- 2 = vehículos en la vialidad principal carril izquierdo
- 3 = vehículos totales en la vialidad principal
- 4 = vehículos en la vialidad secundaria carril derecho
- 5 = vehículos en la vialidad secundaria carril izquierdo
- 6 = vehículos totales en la vialidad secundaria

Para el entronque en “T”, tenemos:

Combinaciones
1=2-3<4
1=2-3>4
1=2-3=4
1<2-3<4
1<2-3>4
1<2-3=4
1>2-3<4
1>2-3>4
1>2-3=4

Porcentajes					
0 - 20	20 - 0	40 - 0	50 - 0	60 - 0	80 - 0
0 - 40	20 - 20	40 - 20	50 - 20	60 - 20	80 - 20
0 - 50	20 - 40	40 - 40	50 - 40	60 - 40	80 - 40
0 - 60	20 - 50	40 - 50	50 - 50	60 - 50	80 - 50
0 - 80	20 - 60	40 - 60	50 - 60	60 - 60	80 - 60
0 - 100	20 - 80	40 - 80	50 - 80	60 - 80	80 - 80
	20 - 100	40 - 100	50 - 100	60 - 100	80 - 100

Para el entronque en “+”, tenemos:

Combinaciones						
1=2 3=6 4=5	1=2 3<6 4=5	1<2 3<6 4=5	1=2 3<6 4<5	1>2 3>6 4<5	1<2 3>6 4>5	1<2 3>6 4=5
1=2 3=6 4>5	1>2 3=6 4=5	1<2 3<6 4>5	1>2 3<6 4<5	1>2 3=6 4>5	1=2 3<6 4>5	1>2 3=6 4<5
1=2 3=6 4<5	1<2 3=6 4=5	1<2 3=6 4<5	1>2 3>6 4>5	1>2 3<6 4>5	1=2 3>6 4<5	1>2 3<6 4=5
1=2 3>6 4=5	1<2 3<6 4<5	1<2 3>6 4<5	1>2 3>6 4=5	1=2 3>6 4>5	1<2 3=6 4>5	

Porcentajes						
0 - 0 - 20	0 - 20 - 20	0 - 40 - 20	0 - 50 - 20	0 - 60 - 20	0 - 80 - 20	0 - 100 - 20
0 - 0 - 40	0 - 20 - 40	0 - 40 - 40	0 - 50 - 40	0 - 60 - 40	0 - 80 - 40	0 - 100 - 40
0 - 0 - 50	0 - 20 - 50	0 - 40 - 50	0 - 50 - 50	0 - 60 - 50	0 - 80 - 50	0 - 100 - 50
0 - 0 - 60	0 - 20 - 60	0 - 40 - 60	0 - 50 - 60	0 - 60 - 60	0 - 80 - 60	0 - 100 - 60
0 - 0 - 80	0 - 20 - 80	0 - 40 - 80	0 - 50 - 80	0 - 60 - 80	0 - 80 - 80	0 - 100 - 80
0 - 0 - 100	0 - 20 - 100	0 - 40 - 100	0 - 50 - 100	0 - 60 - 100	0 - 80 - 100	0 - 100 - 100
20 - 0 - 0	20 - 20 - 0	20 - 40 - 0	20 - 50 - 0	20 - 60 - 0	20 - 80 - 0	20 - 100 - 0
20 - 0 - 20	20 - 20 - 20	20 - 40 - 20	20 - 50 - 20	20 - 60 - 20	20 - 80 - 20	20 - 100 - 20
20 - 0 - 40	20 - 20 - 40	20 - 40 - 40	20 - 50 - 40	20 - 60 - 40	20 - 80 - 40	20 - 100 - 40
20 - 0 - 50	20 - 20 - 50	20 - 40 - 50	20 - 50 - 50	20 - 60 - 50	20 - 80 - 50	20 - 100 - 50
20 - 0 - 60	20 - 20 - 60	20 - 40 - 60	20 - 50 - 60	20 - 60 - 60	20 - 80 - 60	20 - 100 - 60
20 - 0 - 80	20 - 20 - 80	20 - 40 - 80	20 - 50 - 80	20 - 60 - 80	20 - 80 - 80	20 - 100 - 80
20 - 0 - 100	20 - 20 - 100	20 - 40 - 100	20 - 50 - 100	20 - 60 - 100	20 - 80 - 100	20 - 100 - 100
40 - 0 - 0	40 - 20 - 0	40 - 40 - 0	40 - 50 - 0	40 - 60 - 0	40 - 80 - 0	40 - 100 - 0
40 - 0 - 20	40 - 20 - 20	40 - 40 - 20	40 - 50 - 20	40 - 60 - 20	40 - 80 - 20	40 - 100 - 20
40 - 0 - 40	40 - 20 - 40	40 - 40 - 40	40 - 50 - 40	40 - 60 - 40	40 - 80 - 40	40 - 100 - 40
40 - 0 - 50	40 - 20 - 50	40 - 40 - 50	40 - 50 - 50	40 - 60 - 50	40 - 80 - 50	40 - 100 - 50
40 - 0 - 60	40 - 20 - 60	40 - 40 - 60	40 - 50 - 60	40 - 60 - 60	40 - 80 - 60	40 - 100 - 60
40 - 0 - 80	40 - 20 - 80	40 - 40 - 80	40 - 50 - 80	40 - 60 - 80	40 - 80 - 80	40 - 100 - 80
40 - 0 - 100	40 - 20 - 100	40 - 40 - 100	40 - 50 - 100	40 - 60 - 100	40 - 80 - 100	40 - 100 - 100
50 - 0 - 0	50 - 20 - 0	50 - 40 - 0	50 - 50 - 0	50 - 60 - 0	50 - 80 - 0	50 - 100 - 0
50 - 0 - 20	50 - 20 - 20	50 - 40 - 20	50 - 50 - 20	50 - 60 - 20	50 - 80 - 20	50 - 100 - 20
50 - 0 - 40	50 - 20 - 40	50 - 40 - 40	50 - 50 - 40	50 - 60 - 40	50 - 80 - 40	50 - 100 - 40
50 - 0 - 50	50 - 20 - 50	50 - 40 - 50	50 - 50 - 50	50 - 60 - 50	50 - 80 - 50	50 - 100 - 50
50 - 0 - 60	50 - 20 - 60	50 - 40 - 60	50 - 50 - 60	50 - 60 - 60	50 - 80 - 60	50 - 100 - 60
50 - 0 - 80	50 - 20 - 80	50 - 40 - 80	50 - 50 - 80	50 - 60 - 80	50 - 80 - 80	50 - 100 - 80
50 - 0 - 100	50 - 20 - 100	50 - 40 - 100	50 - 50 - 100	50 - 60 - 100	50 - 80 - 100	50 - 100 - 100
60 - 0 - 0	60 - 20 - 0	60 - 40 - 0	60 - 50 - 0	60 - 60 - 0	60 - 80 - 0	60 - 100 - 0
60 - 0 - 20	60 - 20 - 20	60 - 40 - 20	60 - 50 - 20	60 - 60 - 20	60 - 80 - 20	60 - 100 - 20
60 - 0 - 40	60 - 20 - 40	60 - 40 - 40	60 - 50 - 40	60 - 60 - 40	60 - 80 - 40	60 - 100 - 40
60 - 0 - 50	60 - 20 - 50	60 - 40 - 50	60 - 50 - 50	60 - 60 - 50	60 - 80 - 50	60 - 100 - 50
60 - 0 - 60	60 - 20 - 60	60 - 40 - 60	60 - 50 - 60	60 - 60 - 60	60 - 80 - 60	60 - 100 - 60

60 - 0 - 80	60 - 20 - 80	60 - 40 - 80	60 - 50 - 80	60 - 60 - 80	60 - 80 - 80	60 - 100 - 80
60 - 0 - 100	60 - 20 - 100	60 - 40 - 100	60 - 50 - 100	60 - 60 - 100	60 - 80 - 100	60 - 100 - 100
80 - 0 - 0	80 - 20 - 0	80 - 40 - 0	80 - 50 - 0	80 - 60 - 0	80 - 80 - 0	80 - 100 - 0
80 - 0 - 20	80 - 20 - 20	80 - 40 - 20	80 - 50 - 20	80 - 60 - 20	80 - 80 - 20	80 - 100 - 20
80 - 0 - 40	80 - 20 - 40	80 - 40 - 40	80 - 50 - 40	80 - 60 - 40	80 - 80 - 40	80 - 100 - 40
80 - 0 - 50	80 - 20 - 50	80 - 40 - 50	80 - 50 - 50	80 - 60 - 50	80 - 80 - 50	80 - 100 - 50
80 - 0 - 60	80 - 20 - 60	80 - 40 - 60	80 - 50 - 60	80 - 60 - 60	80 - 80 - 60	80 - 100 - 60
80 - 0 - 80	80 - 20 - 80	80 - 40 - 80	80 - 50 - 80	80 - 60 - 80	80 - 80 - 80	80 - 100 - 80
80 - 0 - 100	80 - 20 - 100	80 - 40 - 100	80 - 50 - 100	80 - 60 - 100	80 - 80 - 100	80 - 100 - 100
100 - 0 - 0	100 - 20 - 0	100 - 40 - 0	100 - 50 - 0	100 - 60 - 0	100 - 80 - 0	100 - 100 - 0
100 - 0 - 20	100 - 20 - 20	100 - 40 - 20	100 - 50 - 20	100 - 60 - 20	100 - 80 - 20	100 - 100 - 20
100 - 0 - 40	100 - 20 - 40	100 - 40 - 40	100 - 50 - 40	100 - 60 - 40	100 - 80 - 40	100 - 100 - 40
100 - 0 - 50	100 - 20 - 50	100 - 40 - 50	100 - 50 - 50	100 - 60 - 50	100 - 80 - 50	100 - 100 - 50
100 - 0 - 60	100 - 20 - 60	100 - 40 - 60	100 - 50 - 60	100 - 60 - 60	100 - 80 - 60	100 - 100 - 60
100 - 0 - 80	100 - 20 - 80	100 - 40 - 80	100 - 50 - 80	100 - 60 - 80	100 - 80 - 80	100 - 100 - 80
100 - 0 - 100	100 - 20 - 100	100 - 40 - 100	100 - 50 - 100	100 - 60 - 100	100 - 80 - 100	100 - 100 - 100



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/>