

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Predicción de ocurrencia de cuasi colisión entre peatón y vehículo. Escenario: giro vehicular en intersección semaforizada.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Danae Alejandra Vilchis Hernández

Dirigido por:

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Presidente

Firma

M. en I. Emilio Abarca Pérez
Secretario

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Vocal

Firma

Dr. José Luis Reyes Araiza
Suplente

Firma

Dr. Juan Carlos Herrera Maldonado
Suplente

Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (diciembre 2023)
México.



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Predicción de ocurrencia de cuasi colisión entre
peatón y vehículo. "Escenario: giro vehicular en
intersección semaforizada."

por

Danae Alejandra Vilchis Hernández

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](#).

Clave RI: IGMAC-246892

Esta tesis está dedicada a la familia Vilchis Hernández.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a mi familia (Papá, Mamá, Millo y Uti) por brindarme la mejor educación en casa, por el amor y apoyo infinito e incondicional, al M. Jehovanny JPC por enseñarme que crecer depende solo de uno mismo, a mis compañeros de generaciones anteriores de la maestría MAV, al Dr. Saúl Obregón Biosca por sus excelentes consejos desde su perspectiva de amplia experiencia, por su paciencia, enseñanza y las oportunidades que me brindó en su momento y que reforzaron mi curiosidad por la Ingeniería de Tránsito; al Dr. Juan Carlos Herrera por su excelente asesoramiento y clases que me dejaron un gran gusto e interés por la docencia, así como por el buen recibimiento que me brindó durante mi corta estancia en Chile, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro con todo su grupo docente que velan por el aprendizaje de sus alumnos, particularmente al M. Abarca por su disposición, amistad y apoyo, y finalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por darme la oportunidad de seguir desarrollándome profesionalmente a partir del financiamiento de mi programa.

ÍNDICE	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Hipótesis.	12
1.2 Objetivo.....	12
2. ANTECEDENTES.....	14
2.1 Usuarios de vía y el nivel de seguridad a partir de su interacción.	14
2.2 Accidentabilidad en intersecciones semaforizadas	22
2.3 Estudio de comportamiento individual	23
3. METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO	27
3.1 Determinación de Las Condiciones Experimentales.....	28
3.2 Recolección y Codificación de la base de datos.....	30
3.3 Estimación, calibración y validación del modelo.....	31
3.4 El Modelo Logit.....	32
3.4.1 Determinación de las Variables Endógenas.....	33
3.4.2 Determinación de la Variable Exógena.	35
3.5 Parámetros de calibración.....	36
3.6 Validación del modelo.	38
3.7 Técnicas y Procedimientos Analíticos	39
3.8 Modelo de Fuerza Social.	41
3.8.1 Propuesta de simplificación de las variables del Modelo de Fuerza Social.	44
3.9 Modelo de conflicto de tráfico (TCT).....	47
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
4.1 Variables continuas y categóricas consideradas.	51
4.1.1 Variables operativas y de infraestructura.....	55
4.2 Estadística descriptiva.	62
4.3 Estimación del modelo	64
4.4 Discusión.....	75
5. CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
5.1 Líneas de investigación futura	¡Error! Marcador no definido.
BIBLIOGRAFÍA.....	75
ANEXOS.....	87

ANEXO 1..... 87
ANEXO 2..... 88
GLOSARIO 89

INDICE DE TABLAS

Pág.

4.1 - Descripción y codificación de las variables consideradas en la base de datos.	51
4.2 - Orientación de las ramificaciones de la intersección, (codificación de movimientos direccionales).	57
4.3 - Condiciones geométricas de la infraestructura por movimiento direccional (giro)....	57
4.4 - Longitud lineal interna entre movimientos direccionales y su ramificación opuesta...58	
4.5 - Longitud de cruce por trayectoria peatonal e intersección.	58
4.6 - Ancho de cruce por trayectoria peatonal e intersección.	59
4.7 - Codificación de la trayectoria de cruce peatonal (entrada o salida) a la intersección...59	
4.8 - Codificación de tipo de peatón en conflicto o (tipo de evento).....	60
4.9 - Estadística descriptiva de las variables registradas durante la ocurrencia de cuasi colisiones C. (Giro a la izquierda n=119; Giro a la derecha n=436)	62
4.10 - Modelos que predicen la ocurrencia de cuasi colisiones "C" a partir de variables de fuerza social (A), condiciones operativas y de infraestructura (B), NLOGIT.	65
4.11 - Modelos que predicen la ocurrencia de cuasi colisiones "C" a partir de variables de fuerza social, condiciones operativas y de infraestructura de la intersección en conjunto con medidas de seguridad sustantiva en conjunto (D), NLOGIT.	66
4.12 - Modelos que predicen la ocurrencia de cuasi colisiones "C" a partir de variables de fuerza social (A), condiciones operativas y de infraestructura (B), MINITAB.....	69
4.13 - Modelos que predicen la ocurrencia de cuasi colisiones "C" a partir de variables de fuerza social, condiciones operativas y de infraestructura de la intersección en conjunto con medidas de seguridad sustantiva en conjunto (D). MINITAB.....	70

INDICE DE FIGURAS

Pág.

3.1 - Diagrama de Metodología..	27
3.2 - Registro de la ubicación de accidentes viales ocurridos entre peatones y vehículos durante el 2019 al 2022, en las intersecciones de estudio.....	29
3.3 - Representación esquemática de la identificación de movimientos de cruce vehicular..	30
3.4 - Representación esquemática de la identificación de movimientos de cruce peatonal, definidos por (ramificación, dirección de cruce y sentido de flujo vehicular).....	377
3.5 - Visualización fotográfica de los eventos considerados como una “cuasi colisión”. ...	40
3.6 - Representación esquemática del proceso que conduce a los cambios de comportamiento.....	42
4.1 - Triángulos de visibilidad por tipo de giro, (ejemplificación gráfica).....	60
4.2 - Triángulos de visibilidad de llegada y salida.....	61
4.3 - Gráfico de residuos del Modelo de regresión logística binaria más representativo considerando variables de fuerza social: Modelo 1 - <i>C vs. CD, DP, TP_3, y BC</i> desarrollado para la predicción de ocurrencia de cuasi colisión.....	69
4.4 - Gráfico de residuos del Modelo de regresión logística binaria más representativo considerando las condiciones operativas y de infraestructura de la intersección: Modelo 2 - <i>C vs. LCC, DG, L y ABS_DIF</i> ; desarrollado para la predicción de ocurrencia de cuasi colisión.	69
3.5 - Gráfico de residuos del Modelo de regresión logística binaria más representativo considerando variables de fuerza social en conjunto con las condiciones operativas y de infraestructura de la intersección: Modelo 3 - <i>C vs. CD, LCC, DG, L y ABS_DIF</i> ; desarrollado para la predicción de ocurrencia de cuasi colisión.....	55
3.6 - Gráfico de residuos del Modelo de regresión logística binaria más representativo considerando variables de fuerza social en conjunto con las condiciones operativas y de infraestructura de la intersección, así como las medidas de seguridad sustantiva: Modelo 4 - <i>C vs CD, TP_3, LCC, DG, L, TZZ y ABS_DIF -</i> , desarrollado para predicción de la ocurrencia de cuasi colisión.	55

ABREVIATURAS Y SIGLAS.

PET – Tiempo Posterior a la Invasión

MSS – Medidas de Seguridad Sustantiva

TZZ – Tiempo de Cebra

ZMQ – Zona Metropolitana de Querétaro

RESUMEN}

Los accidentes de tráfico provocan aproximadamente 1.25 millones de defunciones al año, de las cuales el 26% involucra a peatones. En relación con esta problemática, se ha identificado que las intersecciones a nivel representan los puntos más críticos en cuanto a seguridad vial en una red de tráfico, ya que en estos puntos confluyen diversos tipos de usuarios, lo que genera interacciones y, en ocasiones, accidentes, especialmente durante movimientos direccionales de giro. Por lo tanto, este estudio utiliza un enfoque observacional para desarrollar cuatro modelos que buscan identificar las variables significativas que influyen en la interacción entre peatones y vehículos con maniobras de giro, tanto a la derecha como a la izquierda. El objetivo principal es determinar cuáles de estas variables tienen un mayor impacto en la probabilidad de que ocurran cuasi colisiones entre los usuarios. Las variables analizadas abarcan las condiciones operativas y de infraestructura, una simplificación de los parámetros de fuerza social, así como algunas medidas de seguridad sustantiva recopiladas durante los eventos de cuasi colisión.

Las condiciones operativas y de infraestructura, junto con la simplificación de parámetros de fuerza social, se destacan como las variables más influyentes para determinar la probabilidad de que los usuarios se vean involucrados en conflictos viales. Dentro de la simplificación de la metodología de fuerza social, se consideran factores como el cambio de dirección peatonal, el borde de cruce utilizado, el tipo de peatón en conflicto, la ubicación de inicio del cruce, la velocidad de cruce peatonal, la dirección de entrada y salida de la intersección, y la trayectoria peatonal de cruce. Además, se incluyen factores relacionados con las medidas de seguridad sustantiva de los vehículos en cruce, como el tiempo posterior de invasión y la velocidad de paso del vehículo. Finalmente, se consideran factores de condiciones operativas y de infraestructura, como los movimientos de giro permitidos, la obediencia de señales, la longitud de cruce, la distancia de visibilidad de parada, la distancia de visibilidad de la intersección para automóviles y la longitud circular de la curva. Este estudio representa un primer paso en la estimación de cómo estas metodologías y variables se entrelazan y afectan la probabilidad de cuasi colisiones, a partir de un estudio observacional y una propuesta de simplificación de variables.

ABSTRACT

Traffic accidents cause approximately 1.25 million deaths per year, 26% of which involve pedestrians. In relation to this problem, it has been identified that at-grade intersections represent the most critical points in terms of road safety in a traffic network, since various types of users converge at these points, which generates interactions and, on occasions, accidents, especially during directional turning movements. Therefore, this study uses an observational approach to develop four models that seek to identify the significant variables that influence the interaction between pedestrians and vehicles with turning maneuvers, both to the right and to the left. The main objective is to determine which of these variables have the greatest impact on the likelihood of near-collisions between users. The variables analyzed encompass operational and infrastructure conditions, a simplification of social force parameters, as well as some substantive safety measures collected during near-collision events.

Operational and infrastructure conditions, together with the simplification of social force parameters, stand out as the most influential variables in determining the probability of users being involved in road conflicts. Within the simplified social force methodology, factors such as pedestrian direction change, crossing edge used, type of pedestrian in conflict, crossing area location, crosswalk speed, intersection entry and exit direction, and pedestrian crossing path are considered. In addition, factors related to substantive crossing vehicle safety measures, such as subsequent encroachment time and vehicle crossing speed, are included. Finally, operational and infrastructure condition factors are considered, such as allowable turning movements, signal obedience, crossing length, stopping sight distance, intersection sight distance for automobiles, and circular curve length. This study represents a first step in estimating how these methodologies and variables intertwine and affect the probability of near-collisions, based on an observational study and a proposed simplification of variables.

1. INTRODUCCIÓN

Las intersecciones a nivel son uno de los elementos más críticos en términos de seguridad vial en una red, ya que en ellas convergen varios tipos de usuarios, generando interacciones simultáneas. Estas interacciones espaciales ocasionalmente desencadenan en accidentes de tránsito, que, debido a su alta frecuencia a nivel mundial, son considerados un problema de salud pública (WHO-WBG, 2017). La ONU (2020) señala que los accidentes de tráfico provocan alrededor de 1.25 millones de muertes al año, con el 90% de ellos ocurriendo en países de ingresos medios y bajos. De acuerdo con los indicadores del atlas de desarrollo mundial (WBG, 2021), México se clasifica como una economía de ingresos medios-altos. y la ciudad donde se realiza el presente estudio, la ciudad de Querétaro, registra una tasa de mortalidad en el lugar del accidente superior a la media nacional de decesos (INEGI, 2021), siendo la tercera entidad con un mayor número de fallecidos por cada 100,000 habitantes.

Respecto a la problemática de la accidentabilidad la cual está relacionada con dichas interacciones, Obregón et al. (2018) enfatizan la importancia de desarrollar herramientas metodológicas para evaluar el nivel de seguridad vial, tomando en cuenta estándares de infraestructura, con el propósito de cuantificar dicho nivel mediante la observación de indicadores de comportamiento del tráfico. Cal y Mayor y Cárdenas (1994) establecen que la operación de una red de transporte exige el conocimiento de las habilidades, limitaciones y requisitos de cada usuario para controlarlos y guiarlos de manera adecuada. Podemos asumir que un buen análisis de seguridad vial debe basarse en la comprensión y la capacidad de representar el comportamiento de la interacción entre todos los usuarios. Autores como Rivera et al. (2011) y Feliciani et al. (2020) han recomendado aplicar la calibración de los modelos existentes en las técnicas de análisis de seguridad vial, considerando diversos comportamientos observados en las intersecciones, como los cruces peatonales fuera del área designada en la infraestructura de la intersección. Sin embargo, Archer & Young (2010), Gorrini et al. (2018), Feliciani et al. (2020) y Chen et al. (2019) resaltan la necesidad futura de ampliar el análisis de seguridad al incluir escenarios de movimientos direccionales que pueden ocurrir en una intersección, como los giros a la izquierda de los vehículos que entran

en conflicto con los peatones durante el cruce de la intersección. Esto se puede lograr mediante la combinación de la técnica de variables de fuerza social para la representación de los peatones y la técnica de conflictos de tráfico, que considera medidas de seguridad sustantivas para la representación de los vehículos. En este sentido, es crucial comprender los diferentes factores de riesgo de cada tipo de usuario durante situaciones de cuasi colisión en las condiciones de estudio sugeridas por los autores mencionados, con el fin de predecir la probabilidad de accidentes como un indicador de accidentabilidad. Esta investigación propone una simplificación de las variables de fuerza social basadas en los componentes de validación de Liu et al. (2017) para estimar un modelo de predicción de ocurrencia de cuasi colisión entre peatones y vehículos, lo que aumentaría la factibilidad y practicidad de aplicar el concepto de "fuerza social", teniendo en cuenta las condiciones operativas e infraestructurales de la intersección. Esto se basa en un estudio observacional que abarca dos casos de estudio en intersecciones semaforizadas. Los resultados de predicción han sido satisfactorios, por lo que se sugiere continuar con el estudio de las conductas de riesgo y movimientos ilegales de los usuarios.

1.1 Hipótesis.

La incorporación de las variables de fuerza social mediante una simplificación, en conjunto con las condiciones de operación e infraestructura de las intersecciones de estudio, muestra una mayor influencia en la predicción de eventos de cuasi colisión en comparación con las variables consideradas en la metodología de conflicto de tráfico.

1.2 Objetivo.

Objetivo general: Estimar un modelo que considere la simplificación de las variables de fuerza social junto con las condiciones de operación, condiciones de infraestructura y las variables de la metodología de conflicto de tráfico para predecir la probabilidad de ocurrencia de cuasi colisión.

Objetivos específicos:

- Estimar los parámetros de la metodología de fuerza social de mayor influencia en un entorno urbano de economía media alta, como México.
- Estimar los parámetros de la metodología de conflicto de tráfico, es decir, las medidas de seguridad sustantiva de mayor influencia en un entorno urbano de economía media alta, como México.
- Estimar los parámetros de condicionamiento operativo y de infraestructura de la intersección de estudio de mayor influencia en un entorno urbano de economía media alta, como México.
- Comparar el peso de cada variable según su origen metodológico, (fuerza social, conflicto de tráfico, así como el condicionamiento operativo y de infraestructura) para la estimación de probabilidad de ocurrencia de eventos de cuasi colisión.
- Caracterizar el fenómeno de la cuasi colisión por interacción de usuarios.
- Proponer políticas de operación o consideraciones de infraestructura que mejoren la seguridad vial de las intersecciones analizadas.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo, se exploran los antecedentes de la línea de investigación y la motivación detrás del trabajo. Además, se proporcionan las bases teóricas para comprender el contexto en el que se desarrolla la investigación.

Los planificadores de transporte han empleado modelos matemáticos en su búsqueda por representar las condiciones reales del comportamiento de los flujos vehiculares en las redes viales. La estimación de modelos de comportamiento del tráfico, que consideran al vehículo como su usuario base, es un campo consolidado de investigación que ha tenido un gran impacto en la planificación, diseño y operación del transporte (Gorrini et al. 2018).

Sin embargo, los modelos peatonales están adquiriendo cada vez más importancia en el análisis integral de las vías. En relación a lo expuesto, a continuación, se presentan algunos enfoques de modelación relacionados con la interacción entre distintos tipos de usuarios y su nivel de seguridad vial, describiendo sus principales consideraciones peatonales y los resultados obtenidos.

2.1 Usuarios de vía y el nivel de seguridad a partir de su interacción.

Dentro del enfoque peatonal; se destaca el trabajo inicial de Teknomo (2006) quien se enfocó en analizar la validez de la metodología del modelo de fuerza social de Helbing & Molnar (1995) desarrollada para reproducir el comportamiento de peatones durante una evacuación a partir de una representación de dinámica molecular, posterior a la adaptación de Burstedde *et al.* (2001) quienes simplificaban la formación de carriles y los fenómenos de autoorganización peatonal en tres distintos escenarios, desarrollando un modelo de estadística en simulaciones de evacuación y concluyendo que el modelo de fuerza social podía representar significativamente el comportamiento peatonal de generación de carriles que un flujo de usuarios produce bajo la consideración de que cada individuo cuenta con un espacio esférico durante su tránsito.

El estudio de Teknomo fue uno de los trabajos precursores en el desarrollo y aplicación de los modelos de comportamiento peatonal. Investigaciones previas a nivel macroscópico sugerían que existe una gran influencia entre la asignación del espacio peatonal en la seguridad y la fluidez de su circulación, debido a la concepción de que un nivel de servicio óptimo, requiere de un espacio amplio. Sin embargo, este trabajo demostró que las políticas de cruce tienen mayor peso que las instalaciones de gran tamaño. Teknomo propuso el desarrollo de un modelo microscópico con el fin de considerar a detalle las características y capacidades de cada individuo, midiendo el comportamiento derivado de su interacción y controlándolo mediante la modificación de las instalaciones.

Teknomo asumió que cada peatón tenía una ubicación inicial, velocidad, tiempo y ubicación objetivo (opuesta a la inicial). Propuso que cada individuo estaba sujeto a una fuerza de motivación para avanzar hacia su ubicación objetivo, relacionada con la diferencia entre su velocidad real y la velocidad prevista. Además, designó dos tipos de fuerzas para cada peatón: una de avance o atracción y otra de repulsión que los aleja de su entorno. Las ecuaciones utilizadas se basaron en la idea de que cada peatón tiene una fuerza interna propia que influye en otros, basada únicamente en su posición. Su estudio se basó en la calibración y validación del modelo utilizando datos reales obtenidos a través de vídeos. Los resultados demostraron que durante el cruce de peatones, se formaban carriles automáticamente, destacando la preferencia de seguir a otro peatón líder en lugar de tener su propio camino a una velocidad de flujo libre. Se descubrió que el número total de peatones cruzando y la desviación estándar del espaciamiento entre ellos eran factores principales en la interacción conflictiva, ya que generaban un aumento en el ancho de los carriles. Además, se encontró que la relación velocidad-densidad para el tráfico peatonal unidireccional era lineal, mientras que para el tráfico bidireccional era logarítmica. Es decir, al aumentar el número de peatones, disminuía la velocidad del flujo y la continuidad del mismo. El principal conflicto detectado fue el aumento del tiempo de disipación para realizar el cruce. En respuesta a estos hallazgos, se propuso una política de cruce que respondía con una segregación direccional por carril, con el objetivo de mejorar la seguridad vial basada en el estudio del comportamiento peatonal.

Estos resultados han servido de inspiración para investigaciones futuras que consideran a los peatones como agentes autónomos capaces de realizar acciones recíprocas, como la detección, adelantamiento, evasión y autoorganización en entornos de tráfico. Además, el trabajo de Teknomo ha demostrado que el diseño de las instalaciones peatonales va más allá de la simple asignación de espacio. Al aplicar un conjunto de normas que consideran el efecto de las fuerzas de atracción y repulsión, es posible crear sistemas de control del flujo de peatones de manera efectiva.

Estos avances en la investigación reflejan el creciente interés en comprender y abordar el comportamiento de los peatones en el contexto de la seguridad vial. Peng & Chou (2011) se reporta la incorporación del modelo de la fuerza social y de autómatas celulares, estudiando la conformación de la congestión peatonal a nivel macroscópico a través de una intersección tipo “T”, sin embargo, estos enfoques se realizaron aún sin involucrar los modelos de comportamiento peatonal al área de seguridad vial ni considerar al vehículo como usuario en constante interacción. Investigaciones como la de Alhajyaseen et al. (2012) han avanzado en la evaluación de la seguridad en intersecciones señalizadas al comparar las maniobras de vehículos observadas. Si bien estos enfoques aún no han integrado completamente el comportamiento de los peatones como usuarios con decisión, representan un paso importante hacia una comprensión más holística de las interacciones entre peatones y vehículos en las redes viales.

Por otro lado, el trabajo de Bandini et al. (2014) ha identificado tres fases en el cruce peatonal, lo que proporciona una base sólida para analizar el comportamiento de los peatones en este contexto. Esto es fundamental para diseñar estrategias de seguridad vial que aborden las necesidades y riesgos específicos de los peatones al cruzar las calles.

A medida que han evolucionado los modelos matemáticos, muestran mayor detalle y especial interés en el comportamiento microscópico, reconociendo la necesidad de considerar tanto al vehículo como al peatón en escenarios en el que sus movimientos pueden llegar a generar repercusiones en el trayecto del otro, en este sentido Bandini & Vizzari (2016) propusieron un sistema enfocado en las interacciones de peatones y vehículos en intersecciones no

semaforizadas, mediante un modelo que incorporó las observaciones de una intersección caracterizada por presentar accidentes de peatones y automóviles en años anteriores.

Como resultado, se obtuvo que el comportamiento peatonal de cruce puede analizarse mediante la generación de un conjunto de marcadores espaciales del escenario de modelación que describan los elementos más relevantes como la zona de inicio, área de destino, obstáculos potenciales en los laterales y los bordes del área de cruce con el fin de representar su interacción con los objetos estáticos o con otros peatones, basando su comportamiento en tres principales reglas estocásticas:

1. Consideración del camino desde la zona de inicio a su área de destino.
2. Evaluación de las reglas de interacción.
3. Cruce al área de destino.

Posteriormente, Liu *et al.* (2017) desarrollaron un modelo microscópico de comportamiento peatonal considerando varias interacciones en la dinámica observada en los cruces peatonales, obteniendo un modelo de dos dimensiones para modelar las interacciones entre peatones y vehículos en intersecciones señalizadas bajo la consideración de un comportamiento de evasión con peatones en contracorriente y evasión de colisión con vehículos, a partir de los parámetros de un modelo de fuerza social, validando componentes como la velocidad y aceleración paso a paso, el cambio de dirección, el tiempo de cruce y el fenómeno de formación de carriles comparando los datos reales y salidas de simulación.

Los programas de simulación existentes, por ejemplo, Vissim, Paramics y Aimsun, se desarrollan a partir de modelos con el propósito de evaluar el desempeño operativo Essa & Sayed (2015) dejando de lado las características esenciales del comportamiento, por ejemplo, el camino estocástico y la velocidad relacionada con la geometría de la intersección y las estrategias operativas. Por tal motivo, autores como (Tan *et al.* 2012, Zeng *et al.* 2014, Lu *et al.* 2016; Wu *et al.* 2017 Zeng *et al.* 2017) han realizado estudios donde se intenta reproducir modelos que consideran las características estocásticas e interactivas de vehículos y peatones en programas de simulación existentes.

Los estudios recientes como Menhara *et al.* (2019) se han centrado en funciones de desempeño de seguridad en relación con el registro histórico de accidentes viales y la estadística de ocurrencia de conflictos de interacción. Sin embargo, para obtener resultados estadísticamente significativos, se requiere que las autoridades públicas cuenten con grandes cantidades de datos acumulados, correspondientes a varios años, con amplio detalle de ocurrencia y causalidad según Chen *et al.* (2019) por lo cual lamentablemente este tipo de investigaciones son escasas.

De la misma manera, autores como (Gorrini *et al.* 2018, Feliciani *et al.* 2019, Chen *et al.* 2019 & Archer y Young 2010) al darse cuenta de que la posibilidad de evaluar la seguridad a partir de los simuladores existentes, resultaba en la consideración de condiciones muy ideales, intentaron actualizarlos y reproducir el comportamiento de los usuarios de la vía mediante la calibración de los modelos existentes. Gorrini, *et al.* (2018), se enfocó en conseguir la calibración de un modelo con enfoque en las personas de tercera edad como el usuario más vulnerable en intersecciones no señalizadas, obteniendo como resultado indicadores macroscópicos y microscópicos sobre las interacciones entre peatones y vehículos con referencia a: (i) volúmenes de tráfico; (ii) nivel de servicio; (iii) respeto por parte de los conductores del derecho de paso de los peatones en los pasos de cebra y (iv) comportamiento de los peatones al cruzar en función de su edad, Si bien, su enfoque del comportamiento peatonal se ha centrado en sus habilidades motoras, aportó un nuevo parámetro para futuras investigaciones. Sus resultados mostraron que el comportamiento de cruce se caracteriza por tres principales fases: (la aproximación, la apreciación y el cruce) coincidiendo con Bandini (2014) y demostrando así que el comportamiento peatonal responde a variables de su entorno como una línea de investigación para la definición de teorías y métodos empíricos.

En el trabajo de Gorrini, *et al.* (2018), se presentan los datos obtenidos de una recopilación de video, con un enfoque de análisis integrado del tráfico de vehículos y el comportamiento de los peatones, reconociendo que, si bien estos esfuerzos no son frecuentes o avanzados, si resultan de gran impacto para los responsables de la toma de decisión y los gestores de tráfico urbano para desarrollar estrategias e infraestructuras seguras que contrarresten el costo social

de los accidentes de tráfico. Menciona que la metodología más consolidada para estudiar empíricamente las interacciones entre ambos tipos de usuarios (el vehículo y el peatón) está representada por la ejecución de estudios observacionales.

Dentro de sus resultados, se detectó que el incumplimiento de las normas es una de las principales causas de accidentes en intersecciones, y que además puede ser generada por una violación deliberada, una falta de atención o una escasa visibilidad de la señalización. Se identificó también que los conductores eran más obedientes con los peatones que se acercaban desde la acera contraria, en comparación con la acera más cercana a su carril de circulación al aumentar el volumen de tráfico, probablemente por la formación de filas y la reducción de la velocidad. Se realizó un seguimiento de vídeo con una submuestra de 50 ciclos de cruce, con la cual se demostró el impacto del envejecimiento en el comportamiento peatonal, en términos de la disminución de habilidades motoras. Sin embargo, se sugirió considerar una muestra mayor para verificar dicho comportamiento.

La investigación de Gorrini, *et al.* (2018), también tuvo una gran aportación a la comprensión del fenómeno de comportamiento de cruce, centrándose en las características espaciales de la intersección observada. Demostró que a partir del borde de la acera en que se encontraban los peatones y las consideraciones sobre el escenario, estos caminaban parcialmente fuera del paso, tomando un camino oblicuo cuando las condiciones de infraestructura no les permitía evaluar con seguridad la distancia y velocidad de los vehículos que se aproximaban. Los datos obtenidos demuestran que los conductores no respetan uniformemente el derecho de paso de los peatones, como se considera en el planteamiento base de los sistemas de simulación. Esto apoya a la calibración de algunos sistemas existentes, centrándose en reglas de comportamiento que regulan la toma de decisión de los peatones de cruzar, sin embargo, el 35% de la población observada estaba compuesta por grupos de peatones, por lo que se sugirió que los trabajos futuros se dirigieran a probar el impacto de agrupaciones en el comportamiento de cruce, mediante la utilización de información social según lo descrito por Wagner (1981).

Así mismo, se propuso que las líneas de investigación futura contemplarán una base de datos más amplia, en condiciones de volumen de tráfico crítico, una variación de las condiciones meteorológicas y la disposición espacial de las aceras laterales.

Feliciani *et al.* (2019) logró obtener la calibración de un modelo mediante datos estadísticos de accidentalidad peatonal mediante modelos conocidos, considerando un algoritmo de toma de decisiones desarrollado por el autor, que asume que una parte de conductores y peatones se distrae, calculando la velocidad de colisión y utilizándolo para estimar la probabilidad de muerte. Integrando por primera vez el nivel de gravedad y probabilidad de muerte dentro del modelo.

La frecuencia de la ocurrencia de conflictos entre vehículos y peatones comenzó a atraer la atención de algunos investigadores. Chen *et al.* (2019); en particular abordó el análisis de seguridad vial considerando la interacción entre peatones y vehículos. Su innovación fue la consideración del estudio de los vehículos que giran a la derecha, con base en una compleja integración de modelos de trayectoria de giro, de velocidad de giro, de aceptación de brecha, de comportamiento de cada tipo de usuario y su integración a partir de una simulación como herramienta de análisis de seguridad. Si bien anteriormente se había evaluado la seguridad en ubicaciones con altos índices de colisión previamente identificados, sugieren que estos estudios pueden perder validez con los cambios de geométricos de la intersección y las condiciones operativas del flujo; así como se vuelve muy complejo contar con el número de registros necesarios para determinar una muestra representativa que cuente con información detallada. Por lo cual, propuso utilizar un enfoque preventivo a partir de la técnica de conflicto de tráfico (TCT) que contempla el uso de medidas de seguridad sustantiva como indicadores de cuasi colisión que permiten detectar su gravedad y frecuencia y que hasta su investigación habían tenido un estudio limitado para la evaluación de conflictos.

Esta investigación registró los ángulos de la intersección, los radios de curva y las velocidades de los vehículos; así como incorporó varios modelos para obtener resultados más fiables en las plataformas de simulación. Una de sus principales suposiciones es que los peatones planifican una trayectoria a nivel táctico para posteriormente ajustar de forma dinámica conforme a la velocidad y dirección de los vehículos circundantes a nivel operativo.

Se menciona a continuación una breve descripción de los modelos incorporados por Chen et al. (2019) a fin de que se comprenda la complejidad del análisis que realizaron.

- Modelo de trayectoria: Representa matemáticamente las trayectorias de giro partiendo de las espirales de Euler, a fin de considerar la geometría de la intersección como una variable.
- Modelo de perfil de velocidad: Con base en las observaciones, se determinó que existe un comportamiento de desaceleración al iniciar el giro y otro de aceleración para salir de la curva; por lo cual se requirió elaborar perfiles de velocidad para representar la velocidad de trayectoria de cada vehículo.
- Modelo de aceptación de brechas: Representa la anticipación de un vehículo que gira entrando al paso peatonal con base en su perfil de velocidad, examinando los espacios disponibles entre el flujo peatonal para decidir si les cede el paso o no.
- Modelo de comportamiento de los peatones: Representa el ajuste de las velocidades y direcciones peatonales con base en la suposición del comportamiento táctico y operativo.
- Modelo de dirección deseada: Refiere a la elección de la ruta más corta por parte del peatón para llegar a su destino en función del tiempo y su velocidad.
- Modelo de fuerza social modificado: Representa la elección de ruta de origen a destino a partir de la suposición de la existencia de fuerzas de atracción y repulsión generada por otros peatones o vehículos.

Aunado a ello, su investigación realizó una estimación de riesgo de colisión basándose en datos de trayectoria e identificación de conflictos entre vehículos y peatones en términos de dos medidas de seguridad sustantiva (el tiempo posterior de invasión y las velocidades de paso del vehículo). Posteriormente todo esto se integró a una plataforma de simulación a partir de un lenguaje de programación, en el cual se analizaron nueve escenarios con diferentes radios de esquina y diferentes distancias entre peatones. Estos escenarios indicaron

que, al aumentar los radios de giro a la derecha y las distancias entre peatones, se muestra una tendencia creciente en la velocidad vehicular y por lo tanto, en la gravedad de los conflictos entre usuarios. Su trabajo generó resultados prometedores para la evaluación de seguridad vial en intersecciones. Esto motivó a los autores a incitar a futuras investigaciones a seguir desarrollando modelos que estudien la frecuencia y gravedad de conflictos integrando medidas de seguridad sustantiva, así como estudiar el comportamiento de los vehículos que giran a la izquierda sin flujo libre y el comportamiento de los peatones fuera del área designada para su cruce.

2.2 Accidentabilidad en intersecciones semaforizadas

Las lesiones por accidentes de tráfico han ido en aumento en las últimas décadas, para el 2010 representaban la octava causa de muertes en el mundo, provocando 1.3 millones de muertes de acuerdo con Yan *et al.* (2016). De acuerdo con Anjana & Anjaneyulu (2015) en algunas ciudades, el 24% de los accidentes de tráfico ocurren en intersecciones semaforizadas, en donde un 40% de estos casos están relacionados con lesiones graves o muertes. Algunos factores que influyen en la seguridad de intersecciones semaforizadas son las medidas de control, la geometría, el tráfico, los usuarios, los vehículos y los factores ambientales (Bauer & Harwood; 2000, Chin & Quddus; 2003, Kumara & Chin; 2003, Tay & Rifaat; 2007, Vogt; 1999 y Yan *et al.* 2005), dichos factores se relacionan en el comportamiento vehicular en las intersecciones semaforizadas cuando no se respetan las señales semaforicas provocando que diferentes flujos vehiculares ocupen la intersección al mismo tiempo, estas situaciones se conocen como “Pasarse la luz Amarilla” o Yellow Light Running (YLR) y “Pasarse la luz roja” o Red Light Running (RLR). Es por ello, que el estudio del comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas ha aumentado en las últimas décadas debido al costo humano y financiero que representa los niveles de siniestralidad, tanto para los usuarios como para las administraciones gubernamentales.

2.3 Las condiciones operativas y de infraestructura en el estudio de comportamiento del usuario.

Resulta fundamental estudiar a los peatones como individuos, debido a que son los usuarios de mayor riesgo en la ingeniería de tránsito. Los peatones muertos anualmente en accidentes de tránsito ocupan una cifra muy alta y debido a los cruces realizados en zonas no designadas para ellos, según lo documentado por Gorrini *et al.* (2018). Sin embargo, se requiere de más estudios para poder definir cuales son los factores de infraestructura y operación que derivan estas conductas de riesgo.

A diferencia de los conductores, a quienes se les ha estudiado ampliamente como usuarios de la vía y se reconoce que identifican satisfactoriamente el mecanismo del vehículo, saben lo que es el volante, las velocidades y el freno, pero desconocen las limitaciones, la potencialidad de su vehículo y carecen de destreza para mezclarlo en la corriente de tránsito. Con apoyo en las estadísticas de accidentes se puede asegurar que el vehículo automotor, sin la preparación previa del individuo a través de la educación vial, se ha convertido en un arma homicida. (Cal R. & Cárdenas J, 1994)

Para el análisis en conjunto, la AASHTO (2011) reconoce que existe una velocidad y densidad óptimas bajo las cuales la calzada llevará un mayor volumen peatonal y vehicular. Sin embargo, en el caso de interés particular del peatón como usuario, se ha ignorado en los modelos de rendimiento, el ancho utilizado para el cálculo de los flujos, debe reducirse donde existan obstrucciones que impidan el uso de la “pasarela” completa, para obtener un análisis más detallado del diseño y las capacidades de aceras, escaleras y pasos de peatones. No se abordará a detalle los modelos de rendimiento vehicular debido a la gran aportación de investigación que existe actualmente sobre el tema.

En este sentido, Mehrara *et al.* (2019) sostienen que aumentar la seguridad peatonal y desempeño vehicular se logra a partir del diseño geométrico, ya que proporcionan caminos seguros para los peatones. Esto vuelve fundamental comprender la infraestructura de la red.

Bull (2003), menciona que las intersecciones determinan la capacidad de las vías; debido a que son un punto común que debe permitir la alternancia de flujos conflictivos. En consecuencia, las intersecciones se congestionan, restringiendo la fluidez de operación para todo el sistema. Es por ello que las intervenciones en las intersecciones tienen un gran beneficio. Las condiciones de infraestructura representadas mediante modelos, permiten analizar el conflicto entre vehículos y peatones ante la comparativa de diseños geométricos y condiciones operativas como mencionan Cheng *et al.* (2017), desarrollando modelos de análisis de seguridad confiables.

Un elemento de interacción tan complejo como lo es una intersección semaforizada funciona como un engrane con múltiples variables, este trabajo destaca la integración de los principales factores de impacto para un análisis conjunto. Si bien la literatura sugiere un creciente desarrollo en los estudios de interacción, la consideración del peatón como un usuario de impacto en la ocurrencia de accidentes viales ha sido lenta. A pesar de los avances tecnológicos, su aplicación sigue siendo idealista, compleja y privilegiada para aquellos sistemas de transporte que cuentan con tecnología de monitoreo y detección inmediata.

Varias contribuciones abordan las capacidades de evaluación de distancia y velocidad de aproximación de vehículos como Zhang, *et al.* (2015), las capacidades motrices derivadas de un factor de edad (Gorrini, *et al.* 2018) o volúmenes de tráfico y calidad de infraestructura para la mejora de seguridad en carreteras como FHWA, (1991) y AASHTO (2011).

Parte de esta idealización, ha sido originada por la ausencia del análisis de los comportamientos de riesgo y el alto porcentaje de incidencia de movimientos ilegales que realizan los usuarios bajo un contexto social carente de cultura vial de los países en desarrollo, razón por la cual se ha decidido considerar la ocurrencia de cruces fuera de fase tanto para el usuario vehicular, como el peatonal. Se realiza una comparativa entre la ocurrencia de estos comportamientos de riesgo como origen aparente de las cuasi colisiones detectadas durante los movimientos direccionales de giro izquierda y derecha como los movimientos de interacción más peligrosos, lo anterior a partir del análisis de vueltas izquierda, inexistente hasta el momento en la literatura.

Si bien, los enfoques de modelación mencionados anteriormente han tenido un impacto significativo por separado, las investigaciones que integran la dinámica del peatón y del vehículo no son frecuentes ni tan avanzadas como los modelos de enfoque de tráfico vehicular. La mayoría de los trabajos recientes se han visto limitados al análisis de escenarios simples que requieren de una validación a partir del estudio de una base de datos más amplia.

Algunos de los trabajos anteriores sobre esta línea de investigación han definido modelos muy complejos que responden por ejemplo a las características peatonales, flujo vehicular, una comparativa de las medidas de seguridad sustantiva y condiciones operativas por separado, o bien, responden a la conjunción de solo un par de estas variables. Los resultados del presente trabajo representan una manera de integrar los principales factores de impacto y simplificar en gran medida el análisis de interacción. Partiendo de los esfuerzos preliminares, esta investigación propone una simplificación de variables de fuerza social que permite priorizar la practicidad de la obtención de información y su análisis, de una manera accesible para las ciudades metrópoli en vías de desarrollo urbano que actualmente carecen de la costosa tecnología de monitoreo y detección automática. Se ha logrado una aportación al desarrollo de modelos para el estudio de la frecuencia y gravedad de conflictos, atendiendo las principales necesidades detectadas y con base en algunos de los criterios teóricos de los trabajos referidos anteriormente. Ambos se enlistan a continuación:

Necesidades:

- Contemplar bases de datos más amplias,
- Considerar condiciones de volumen de tráfico crítico,
- Análisis de la disposición de las aceras de la intersección,
- Estudio del impacto de las condiciones de agrupación peatonal,
- Estudio del comportamiento de los vehículos que giran a la izquierda.

Criterios:

- Concepción de los peatones como actores autónomos con acciones recíprocas de detección, evasión y autoorganización, así como la detección de su ubicación inicial, su tiempo de cruce y la localización objetivo de cada peatón, con base en el trabajo de Teknomo, (2006).
- Suposición del ajuste de trayectoria de forma dinámica por parte del peatón conforme a la velocidad y dirección de los vehículos circundantes, y uso del enfoque preventivo de la técnica de conflicto de tráfico utilizada por Chen *et al.* (2019).
- Ejecución de estudios observacionales como metodología de obtención de información, detección del incumplimiento de obediencia del señalamiento e identificación de los bordes de acera, según las consideraciones de Gorrini *et al.* (2018).
- Consideración de fuerzas sociales de atracción y repulsión adoptadas por (Teknomo, 2006, Gorrini *et al.* 2018 y Chen *et al.* 2019)

3. METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO

Este capítulo se centra en la metodología utilizada en el estudio. Describe cómo se realizó el estudio observacional, incluyendo la descripción de los escenarios en los que se llevaron a cabo las observaciones. También se detalla cómo se obtuvo y registró la base de datos que sirvió como base para la investigación. Por último, se explican los fundamentos teóricos de los modelos desarrollados en el estudio. La metodología aplicada en la presente investigación consta de tres principales etapas. En la primera, se determinó la zona de estudio, se realizó el estudio de observación y la recolección de datos; en la segunda etapa, se analizaron los parámetros obtenidos y finalmente en la tercera etapa se estimó, calibró y validó el modelo de predicción de ocurrencia de cuasi colisión durante la interacción de cruce de los usuarios con base en las condiciones de operación y de infraestructura de cruce, es decir (las variables endógenas), como se muestra en la Figura 2.1.

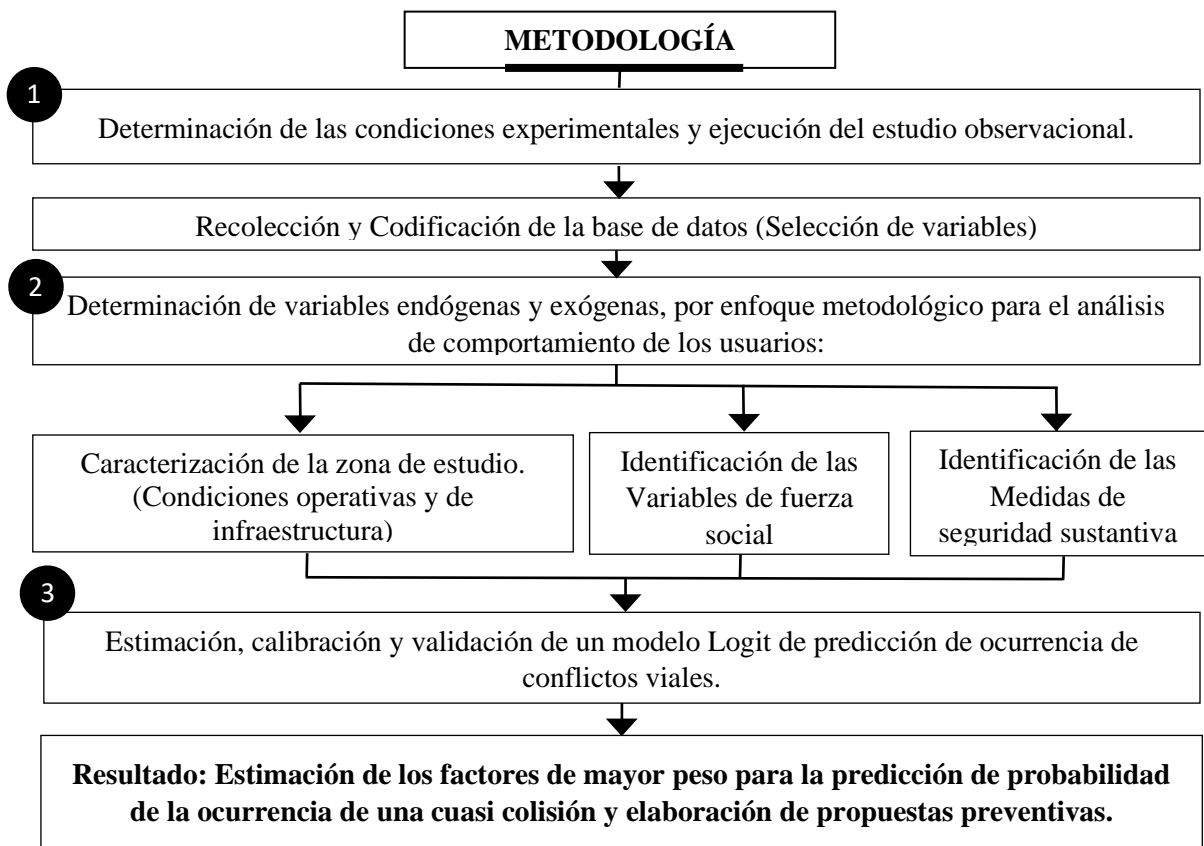


Fig. 3.1 Diagrama de Metodología. Fuente: Elaboración propia con base en Chen *et al.* (2019).

3.1 Determinación de Las Condiciones Experimentales

Para esta investigación se siguen los criterios de Chen et al. (2019) y Gorrini et al. (2018), sin embargo el escenario objeto de estudio (las vueltas izquierdas) no ha sido analizado por dichos investigadores. Por un lado, siguiendo la metodología de Chen et al. (2019), las intersecciones semaforizadas estudiadas deben encontrarse en una arteria principal con conexión hacia el centro de la ciudad, caracterizadas por una alta demanda de peatones y vehículos; en las que sus ramificaciones permitan maniobras de giro y que preferentemente cuenten con un ciclo semaforico cuyas fases incluyan un tiempo amarillo o todo rojo.

Por otro lado, Gorrini et al. (2018) sugieren que la zona de estudio tenga un límite de velocidad de 50km/h y sea seleccionada considerando la afluencia peatonal atraída por puntos de interés, tales como: mercados locales, oficinas públicas, bancos, supermercados, iglesias, centros educativos o culturales. Por lo anterior, esta investigación considera dos intersecciones semaforizadas ubicadas en Av. Constituyentes, una de las arterias colectoras en la delegación centro histórico de la ciudad de Querétaro, y que, además cumple con las condicionantes mencionadas anteriormente por ambos autores.

Según el análisis realizado por el INEGI en el 2021 a partir de la información de accidentes de tránsito ocurridos en vialidades urbanas del país, que proporcionan las fuentes administrativas estatales y municipales en las principales ciudades y áreas metropolitanas, en 2020 se registraron 301,678 accidentes de tránsito en las zonas urbanas de México, durante este año uno de cada 100 eventos de tránsito correspondió a accidentes en los que se registraron pérdidas humanas, mientras que en 18 de cada 100 hubo víctimas heridas; el total de víctimas muertas y heridas en los accidentes de tránsito ocurridos en zonas urbanas durante 2020 fue de 75,761 personas, de las cuales 3,826 fallecieron en el lugar del accidente, decir, el (5.1%) y 71 935 presentaron algún tipo de lesión, correspondiente al (94.9%). Las entidades con mayor número de fallecidos en el lugar del accidente por cada 100 000 habitantes durante 2020 son: Sinaloa (8.8), Chihuahua (7.7), Querétaro (7.0), Sonora (6.5) y Zacatecas (5.9). Razón por la cual la presente investigación se ha enfocado en el caso de estudio de la Zona Metropolitana de Querétaro, seleccionando un par de intersecciones de

mayor ocurrencia de accidentes viales, que cumplieran con las condicionantes geométricas y de operación de interés, en una de las principales avenidas colectoras al centro histórico de la ciudad.

De ambas intersecciones de estudio, la que cuenta con el mayor número de accidentes de tránsito es la intersección B (Av. Constituyentes y Av. Luis Pasteur) con un registro de 52 accidentes entre los años 2019 la 2021, derivando en una persona fallecida y 5 peatones lesionados graves por atropellamiento tal como se muestra en la Figura 2.2; asimismo, en un radio de 1 km a la redonda del cruce, se ubicaron 710 establecimientos económicos, destacando 61 servicios educativos, 62 servicios de salud y asistencia social, 71 servicios de esparcimiento cultural, deportivo y recreativos y 72 servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas como puntos atractores de viaje. (INEGI, 2021).

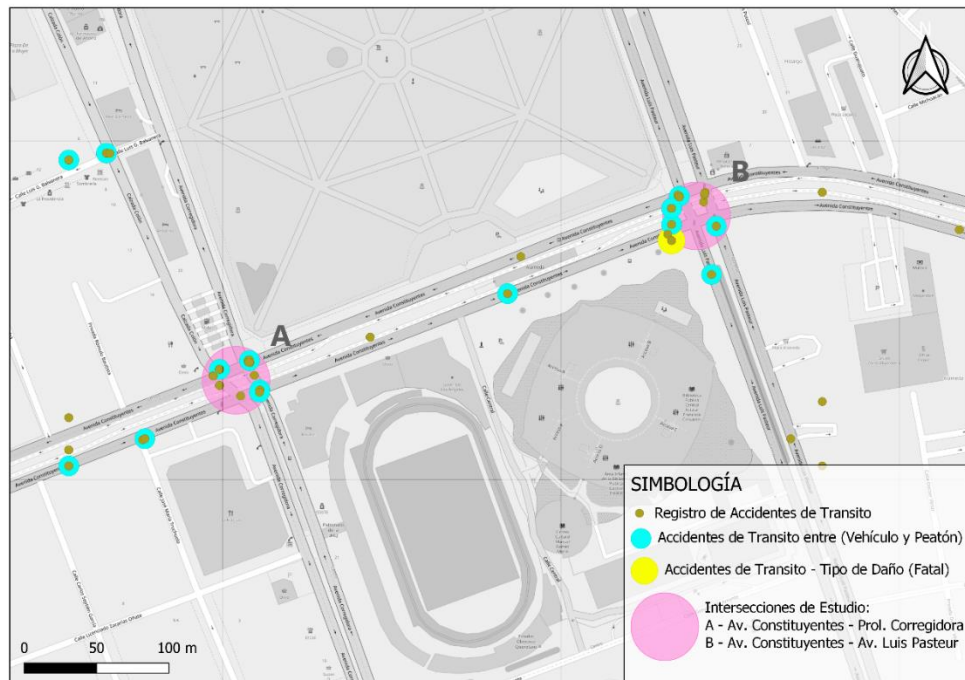


Fig. 3.2 Registro de la ubicación de accidentes viales ocurridos entre peatones y vehículos durante el 2019 al 2022, en las intersecciones de estudio.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, (2021).

3.2 Recolección y Codificación de la base de datos.

La observación directa representa el verdadero fundamento de la investigación conductual Gifford (2016) ya que permite recolectar discretamente datos empíricos sobre el comportamiento humano, sin que estos sean conscientes, ni identificables.

La presente investigación aplica la técnica de Gorrini *et al.* (2018) de observación grabada en video, con la finalidad de recopilar un gran conjunto de datos para caracterizar el comportamiento de los pasos de peatones en intersecciones no semaforizadas a partir de una aeronave pilotada a distancia (RPA), realizado en la hora de máxima demanda (HMD) de las intersecciones seleccionadas para estudio, con una resolución de 1920×1080 a 100 metros de altura por encima de la superficie del terreno, de forma que el vídeo cubra la totalidad de la intersección para posteriormente: i) realizar la extracción de la trayectorias vehiculares y peatonales; ii) un aforo de los movimientos direccionales de giro a la izquierda y derecha; iii) la contabilización de peatones que cruzan fuera del borde del espacio de paso de cruce, así como fuera de su fase semafórica “verde”; iv) las ubicaciones iniciales de llegada y salida peatonal de las intersecciones y v) registro de eventos ocurridos “cuasi colisiones”, así como la determinación de las medidas de seguridad sustantiva (SSM) correspondientes, para su posterior análisis siguiendo las recomendaciones de Chen *et al.* (2019). El diagrama “tipo” utilizado para representar los movimientos direccionales permitidos y registrados en cada una de las intersecciones se muestran en la Figura 3.3.

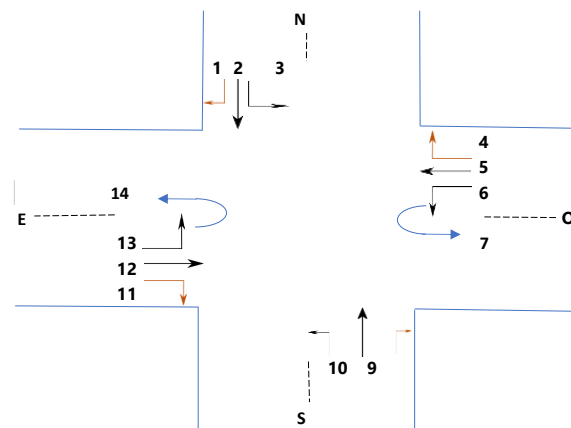


Fig. 3.3 Esquema de los movimientos direccionales en la intersección.

Los datos de entrada requeridos para alimentar un escenario varían de acuerdo al modelo, su aplicación y alcance, sin embargo, la FHWA (1991); reconoce como necesario, considerar cuatro principales categorías de datos generales, i) la geometría de la vialidad o intersección, en la cual se registran longitudes de infraestructura, número de carriles, radios de curvatura, rampas, entre otros; ii) controles de tráfico, como pueden ser señalamientos horizontales, verticales y ciclos semafóricos; iii) condiciones operativas, es decir, volúmenes de entrada y salida, flujos por movimiento direccional, aforos por tipo de vehículo, velocidad máxima y deseada, distancias de brecha, porcentajes de cambio de carril y aceptación de guiado y iv) características vehiculares, por ejemplo, longitud, ancho y alto de vehículo. Siguiendo estas recomendaciones, la información correspondiente a las categorías i), ii) y iii), fueron obtenidas por medio de la recolección de videgrabación, sin embargo, la información correspondiente a la categoría iv) no han sido consideradas dentro de la investigación.

Aunado a lo anterior, se procesaron conteos vehiculares automáticos correspondientes a las 24 horas del día, los 7 días de la semana en las intersecciones de interés, los cuales fueron obtenidos mediante cámaras 360° de video detección de tráfico operadas por la Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro, con el fin de poder realizar una comparativa general del análisis estadístico descriptivo del comportamiento operativo “típico” de las intersecciones, y de la detección de movimientos direccionales vehiculares realizados de forma ilegal, (es decir, fuera de su correspondiente verde).

3.3 Estimación, calibración y validación del modelo.

Ortúzar & Willumsen (2008) mencionan que tanto la estimación como calibración resultan en procesos vitales de la modelización. Por un lado, la estimación implica encontrar los valores de las variables endógenas que hagan que los datos observados sean más probables bajo la operación del modelo; o en el caso contrario, puede resultar que uno o más parámetros no sean significativos para la representación de nuestra variable exógena de interés y deban excluirse del modelo. Por otro lado, la calibración de un modelo requiere la selección de los parámetros que se suponen con valor distinto de cero, con el objetivo de optimizar una o más medidas de bondad de ajuste en función de los datos observados.

3.4 El Modelo Logit

El modelo de regresión logística admite la posibilidad de representar características del individuo y/o elecciones realizadas por el mismo, cuando su comportamiento refleja una frecuencia observada con variables comprendidas entre 0 y 1; lo que permite predecir una alternativa elegida también con un valor entre 0 y 1, según lo descrito en Ortuzar (2008). Así mismo, menciona que la teoría de la utilidad aleatoria de Domencich & McFadden (1975) y Williams, (1977), funge como base para generar estos modelos, ya que afirman que los individuos actúan racionalmente a partir de información, eligiendo la alternativa que maximiza su utilidad neta personal por tipo de población, siguiendo restricciones legales, físicas, presupuestarias o sociales como es el caso de la presente investigación, por lo cual estos modelos no pueden ser calibrados utilizando técnicas de ajuste de curvas como los mínimos cuadrados. Sin embargo, se consideró la teoría de los modelos de regresión logística y su calibración a partir del valor de R McFadden debido a su alineación con las características de las variables descritas en el estudio de observación, así como el cumplimiento de predicción de eventos de cuasi colisión como objetivo general de la investigación.

En esencia, se trata de un modelo de predicción diseñado para evaluar la probabilidad de que ocurra el evento de colisión en función de los factores del entorno presentes. Esto no implica tomar decisiones entre categorías, sino más bien examinar la probabilidad de que el evento ocurra en función de la combinación de las variables más significativas.

En resumen, el modelo ha sido diseñado con la finalidad de analizar y comprender la relación que existe entre las condiciones físicas y operativas en las intersecciones de interés, basado en datos recopilados a partir de una muestra estadísticamente representativa que refleja el comportamiento de los usuarios en dichas intersecciones.

3.4.1 Determinación de las Variables Endógenas.

Un modelo expresa de forma simplificada las características más relevantes de uno o varios escenarios de un fenómeno de interés. Esta investigación adoptó las variables aplicadas en la metodología de fuerza social, basada en el concepto de que estas “fuerzas” no son ejercidas directamente por el entorno de los peatones, sino que son una medida de motivación de los individuos para realizar determinados movimientos, a partir de tres términos esenciales: el primero, un término que describe la velocidad del movimiento deseado; segundo, un término que refleje que el peatón se mantiene a cierta distancia de otros peatones y fronteras; y tercero, un término que modele efectos atractivos. (Helbing & Molnar, 1995).

En este sentido, la elección de variables se realizó considerando una categorización que corresponde a los tres términos esenciales mencionados, con base en los resultados reportados en la literatura. Liu et al., (2017) validó cinco variables principales, de las cuales se consideran para esta investigación: la velocidad de paso, el tiempo de cruce y el cambio de dirección, ya que éstas variables coinciden con lo reportado en Chen et al., (2019), y en donde también integraron el comportamiento del peatón a nivel operativo a partir de la representación de los cambios de dirección y la velocidad motivada por una interacción entre otros usuarios de la vía, como otro peatón o un vehículo durante su trayectoria de cruce. Sin embargo, a diferencia de Liu et al., (2017), añadieron variables como la fuerza de atracción y la fuerza de repulsión representadas por límites de espacio existentes en el cruce, y los generados a partir del movimiento opuesto de otros peatones y la consideración de la ubicación de los flujos de todos los usuarios, obteniendo mejores resultados al integrarlos. Razón por la cual dichas variables han sido consideradas dentro de esta investigación, realizando un cambio a partir de la simplificación de valores vectoriales a variables continuas de obtención por medio de la observación, tal como se mencionó anteriormente en la descripción del modelo de fuerza social y registro de base de datos.

Con respecto a la seguridad vial analizada a partir del comportamiento del vehículo como usuario que interacciona, se consideraron algunas de las variables que han arrojado mejores resultados en el desarrollo de modelos matemáticos de tránsito que contemplan como base teórica las medidas de seguridad sustitutiva (SSM), que fungen como indicadores de cuasi colisión para medir la gravedad y la frecuencia de los eventos de conflicto de tráfico. Un indicador de SSM, debe satisfacer dos condiciones para el análisis y prevención en términos de seguridad según Tarko *et al.* (2009) La primera: que sea un evento observable sin choque que este sustancialmente relacionado de una manera predecible con los choques, y la segunda: que tenga un enfoque práctico para transformar el evento sin choque en una frecuencia de choque correspondiente y / o severidad. Dentro de esta investigación se han adoptado las SSM más comúnmente utilizadas para la evaluación de conflictos entre peatones, según el análisis de Tarko *et al.* (2009) del cual se ha considerado contemplar aquellas con mejores resultados de significancia y que además resultan de una práctica obtención en campo, como son: el tiempo posterior a la invasión (PET) citando a Cooper (1984) y el tiempo de cebra o cruce (TTZ) citando a Varhelyi (1996).

Songchitruksa & Tarko (2006) demostró que a partir de los valores de frecuencia del *PET* y un conjunto de conteo de accidentes, es posible detectar distintos niveles operativos en términos de seguridad vial; Gettman *et al.* (2008), coinciden y consideran al *PET* como el índice más común para examinar el conflicto cruzado considerando su facilidad de medición, la consistencia en el tiempo y su relación con otras medidas (como p. ej. La velocidad peatonal y vehicular, las distancias de frenado y los tiempos de cambio de dirección de ambos usuarios.). Lo anterior, partiendo de la definición del *PET* de Chen *et al.* (2019) como la diferencia de tiempo entre un peatón que invade el punto de colisión potencial y un vehículo en conflicto que llega al punto, o viceversa. De acuerdo a la Ecuación 5 se obtuvo el valor de *PET* para cada conflicto observado. Por dicha razón, en la presente investigación se implementa la conjunción de los tres parámetros expuestos como base del modelo (el cálculo de las fuerzas sociales, el *PET* y la velocidad del vehículo) para estimar la frecuencia de ocurrencia de conflictos bajo diferentes condiciones geométricas y operativas, así como sus posibles repercusiones. (Chen *et al.* 2019, Liu *et al.* 2017 y Tarko *et al.* 2009).

Como parte de las variables operativas se consideró la distancia de visibilidad por medio de triángulos de visibilidad de incorporación dentro de las variables operativas, según lo correspondiente al caso para automóvil en intersección con control con semáforo, establecido en el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018. Con un valor de entrada de 50 km/h como velocidad de proyecto, se obtuvo una distancia de visibilidad de parada en el camino principal (Av. Constituyentes) de 63 metros y una distancia de visibilidad de proyecto en la intersección para automóviles de 80 metros para vueltas izquierda y derecha.

3.4.2 Determinación de la Variable Exógena.

Gettman y Head (2003), desarrollaron el enfoque denominado Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) donde investigaron el potencial de extraer las SSM en modelos para evaluar los posibles conflictos entre el vehículo y el peatón. La “casi colisión o conflicto de tráfico” describe un evento que involucra a dos o más usuarios de la vía, en el que la acción de uno, hace que el otro realice una maniobra evasiva para evitar una colisión, de acuerdo con Parker y Zegger (1989), y citada en Wu et al. (2017). Dichas maniobras evasivas indudablemente involucran a los peatones como usuarios de la vía, lo cual ha denotado un creciente interés por la modelación peatonal como una propuesta de solución al problema de seguridad vial, ante lo cual han surgido dos vertientes recientes, la primera, el análisis estadístico de accidentes viales, y la segunda el análisis preventivo considerando las medidas de seguridad sustantiva.

Feliciani et al. (2019) lograron obtener la calibración de un modelo mediante datos estadísticos de accidentalidad peatonal, considerando un algoritmo de toma de decisiones desarrollado por el autor que asume que una parte de conductores y peatones se distrae, calculando la velocidad de colisión y utilizándolo para estimar la probabilidad de muerte. Integrando por primera vez el nivel de gravedad y probabilidad de muerte dentro del modelo. A diferencia de Chen et al. (2019), quienes analizaron puntualmente los conflictos de giro a la derecha y obtuvieron que las grandes dimensiones y los ángulos de giro de las intersecciones tienden a producir un desempeño de seguridad no deseado, llegando a

conclusiones de la evaluación de comodidad y condiciones del espacio peatonal a partir de la infraestructura.

Lamentablemente, en países de ingresos medios-altos como lo es México, es sumamente difícil contar con registros históricos de accidentabilidad vial que contenga el nivel de detalle de información requerido para asignar niveles de gravedad y probabilidades de muerte; aunado a ello, esta investigación muestra un mayor interés por las condiciones geométricas de la intersección, razones por las cuales se adopta la metodología de Chen et al. (2019), determinando como variable exógena la “ocurrencia de conflicto vial” C , ya que una simplificación en la metodología para la obtención de parámetros significativos que aporten información sobre la frecuencia tal como sugieren Liu et al. (2017), Chen et al. (2019) y Tarko et al. (2009), representa un desarrollo importante a considerar para aumentar la practicidad de los modelos que integran a los peatones y vehículos, en constante interacción para poder comprender y predecir su comportamiento según el entorno geométrico y sus condiciones de cruce en intersecciones.

3.5 Parámetros de calibración.

Para la calibración del modelo de fuerza social, Chen *et al.* (2019) resumieron los escenarios en cinco “típicos”, dependiendo de si el conflicto entre vehículos y peatones ocurre a lo largo de las trayectorias de cruce, propuestos de la siguiente manera: i) un peatón solo durante el cruce; ii) un peatón contra otro en conflicto de dirección opuesta; iii) uno contra varios peatones; iv) el conflicto de un peatón con un vehículo que gira; y v) entre múltiples peatones que cruzan y un vehículo que gira. De estos cinco típicos, la presente investigación considera tres, excluyendo el i) y ii), debido a que presentó una ocurrencia despreciable en el caso de estudio. Sin embargo, se incluye un nuevo escenario entre un peatón que cruza y varios vehículos que giran. De acuerdo con Zeng *et al.* (2017) para cada caso, se debe extraer una trayectoria y el comportamiento del peatón muestreado, manteniendo las trayectorias en bruto. Por lo anterior, el presente artículo considera las trayectorias de cruce peatonal con un identificador de tres elementos, el primero correspondiente a las cuatro ramificaciones de la intersección como (A, B, C y D), siendo A la ramificación norte y siguiendo la identificación en orden alfabético en sentido horario, el segundo elemento definido según la dirección del

cruce, utilizando (I) para el sentido de izquierda a derecha y (D) en el sentido de derecha a izquierda. Por último, el tercer elemento indica la zona del cruce, como (1 ó 2), 1 para el flujo de salida de la rama y 2 para el sentido de flujo de entrada a la rama, ya que se cuenta con banquetas amplias que separan los sentidos de circulación del tráfico vehicular, con un ancho variable de 3 a 10 metros dependiendo de la ramificación, lo cual genera un sesgo significativo en el registro del tiempo de cruce, si no se considera la distinción de dichas zonas, tal como se muestra en la Figura 3.4.

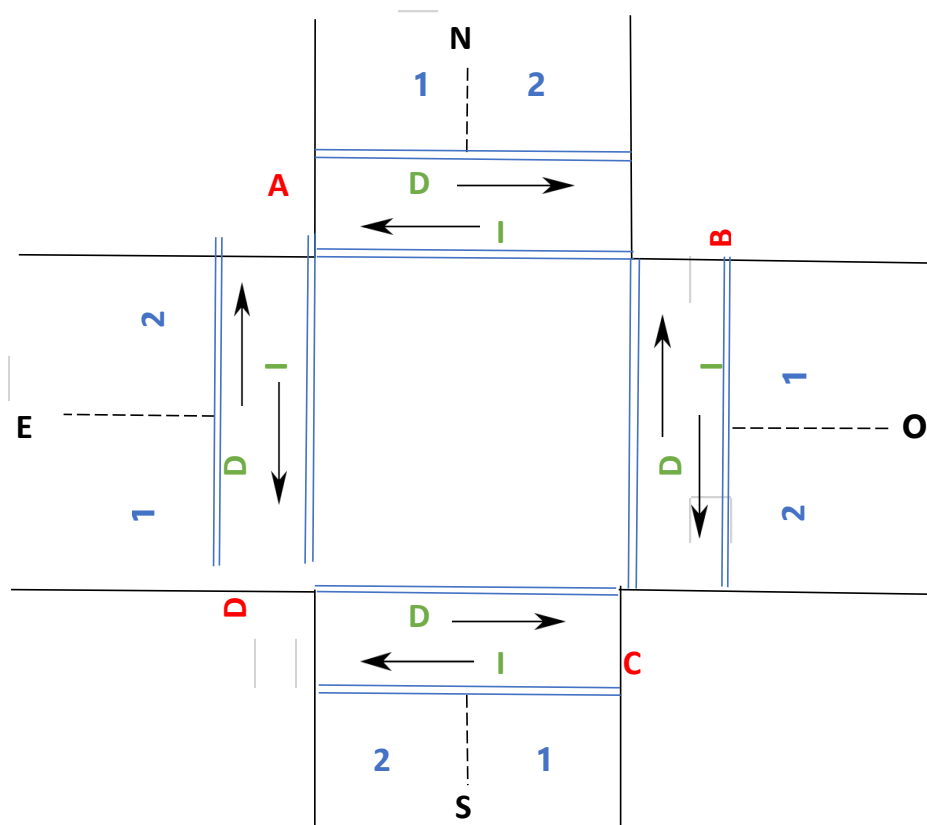


Fig. 3.4. Representación esquemática de la identificación de movimientos de cruce peatonal, definidos por (ramificación, dirección de cruce y sentido de flujo vehicular).

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Validación del modelo.

La validación evalúa si el modelo es capaz de representar razonablemente los conflictos entre vehículos y peatones en las intersecciones semaforizadas. Si bien existen diversas técnicas de validación de modelos, uno de los más comunes y con mejores resultados es la validación cruzada, la cual se divide en dos técnicas i) hold-out, y ii) k-fold. Pérez et al. (2015) reportan una comparativa entre ambas técnicas, de lo cual concluyen que la técnica k-fold ofrece resultados con menor incertidumbre, conforme el valor de k aumenta. Por lo anterior, la presente investigación aplica la técnica k-fold, que consiste en dividir en k subconjuntos la base de datos, de manera Para esta investigación se siguen los criterios de Chen et al. (2019) y Gorrini et al. (2018), sin embargo el escenario objeto de estudio (las vueltas izquierdas) no ha sido analizado por dichos investigadores. Por un lado, siguiendo la metodología de Chen et al. (2019), las intersecciones semaforizadas estudiadas deben encontrarse en una arteria principal con conexión hacia el centro de la ciudad, caracterizadas por una alta demanda de peatones y vehículos; en las que sus ramificaciones permitan maniobras de giro y que preferentemente cuenten con un ciclo semaforico cuyas fases incluyan un tiempo amarillo o todo rojo.

Por otro lado, Gorrini et al. (2018) sugieren que la zona de estudio tenga un límite de velocidad de 50km/h y sea seleccionada considerando la afluencia peatonal atraída por puntos de interés, tales como: mercados locales, oficinas públicas, bancos, supermercados, iglesias, centros educativos o culturales. Por lo anterior, esta investigación considera dos intersecciones semaforizadas ubicadas en Av. Constituyentes, una de las arterias colectoras en la delegación centro histórico de la ciudad de Querétaro, y que, además cumple con las condicionantes mencionadas anteriormente por ambos autores. que se aplica hold-out k veces; es decir, se fragmenta la información en un conjunto de datos disponibles en dos particiones. La primera es utilizada para estimar el modelo y la segunda para realizar el test de validación (Arlot y Celisse, 2010), lo cual se repite k veces utilizando cada vez distintos conjuntos, con el objetivo de obtener el error medio de los k análisis realizados, evaluando así su validez (Pérez et al. 2015). Es necesario considerar el aplicar un porcentaje fijo para cada conjunto de validación, tal que permita contar con la misma escala de valores, que a su

vez sean comparables (García et al., 2018). En este sentido, se realizan cinco particiones sobre la base de datos, cada una corresponde a diez minutos de videograbación, acorde a la duración de cada vuelo RPA, y entre los cuales existen cinco minutos aproximadamente de operación de tráfico de la intersección no registrados, debido al tiempo ocupado por la aeronave para descender por un cambio de batería y reubicación en el punto de interés de grabación, razón por la cual se decidió homologar k con un valor de cinco, cuyos conjuntos de datos fueron seleccionados de forma aleatoria. Es decir, en el modelo uno se emplea el primer 20% de los datos para la evaluación, y el 80% restante para la estimación. El modelo dos, utiliza el segundo subconjunto del 20% (del 20% al 40%) para la evaluación, y los tres subconjuntos restantes para la estimación, y así sucesivamente k veces, sin olvidar que estos han sido seleccionados aleatoriamente.

3.7 Técnicas y Procedimientos Analíticos

Mayor & Cardenas (1994), establecen que, durante el proceso de planeación, estudio, proyecto y operación de un sistema de transporte automotor, se deben conocer las habilidades, limitaciones y requisitos que tiene el usuario, como elemento de la ingeniería de tránsito, con la finalidad de estudiarlos, entenderlos claramente, controlarlos y guiarlos de forma apropiada, este autor considera tanto al peatón, como al conductor como usuarios base.

De acuerdo con Teknomo (2006), existen varias formas de estudiar la dinámica de los peatones; esta investigación hace especial énfasis en la metodología de variables de fuerza social adoptada para la representación del comportamiento de cruce peatonal. Lo anterior, se considera acorde a lo reportado por Peng & Chou (2011) durante su aplicación, ya que se observan resultados más realistas en comparación con los métodos tradicionales de ingeniería de tránsito, debido a que establece al peatón como un conjunto de partículas en su interacción con el vehículo.

Para el análisis de la interacción y del comportamiento vehicular, se parte del concepto de “cuasi colisión o conflicto vial” de Chen *et al.* (2019) definido como un escenario en el que varios vehículos o peatones chocarían si continúan acercándose en el espacio y el tiempo sin cambiar sus velocidades y / o direcciones, tal como se muestra es la Figura 3.5.

En este sentido el desempeño de la seguridad operacional puede medirse por la frecuencia y severidad de los conflictos, empleando medidas de seguridad sustantivas (SSM), incorporando ambas metodologías en un solo modelo que caracterice razonablemente los movimientos vehiculares y peatonales (Zeng *et al.* 2014, Gorrini *et al.* 2018 y Chen *et al.* 2019). Considerando lo anterior, Liu *et al.* (2017) exponen que se puede detectar la causa del conflicto entre peatones y vehículos a través del análisis del fenómeno, proporcionando información sobre posibles problemas de seguridad antes de la implementación de una vía, y dado que el comportamiento de los peatones y el comportamiento del conductor son sumamente diferentes; Wu *et al.* (2018) concluyen que es necesario realizar más investigaciones que permitan detectar los factores que impactan directamente en la representación del comportamiento de interacción en intersecciones viales.

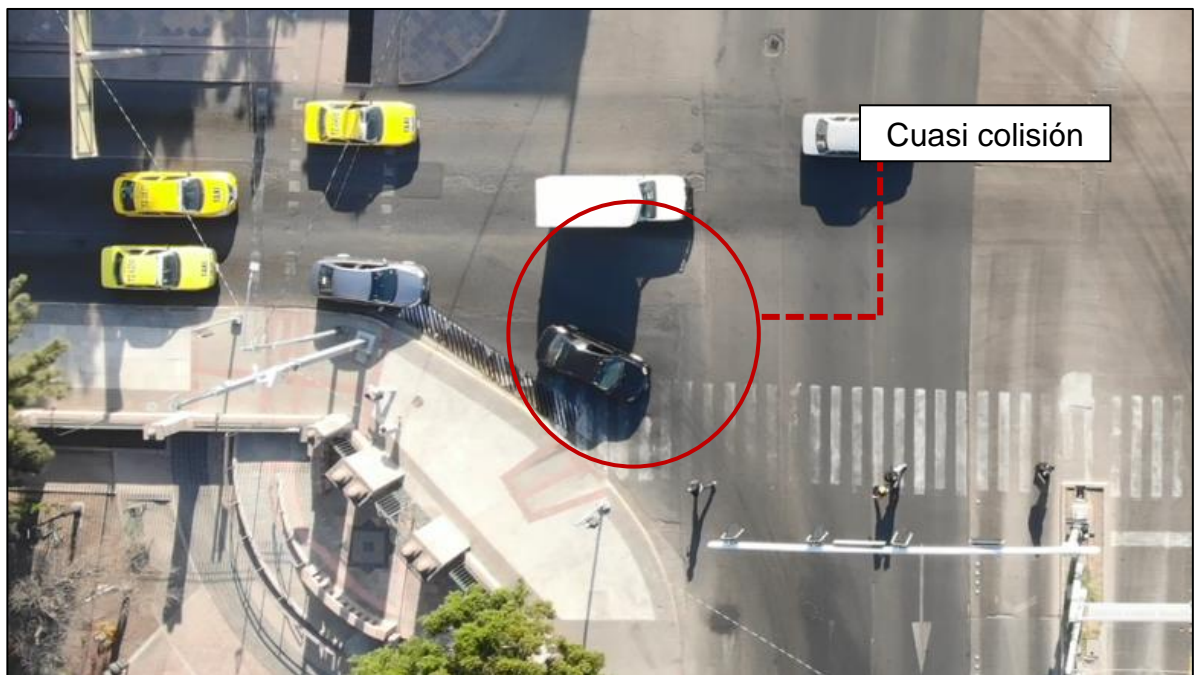


Fig. 3.5 Visualización fotográfica de los eventos considerados como una “cuasi colisión” con base en la definición.

Fuente: Elaboración propia, con base en Chen *et al.* (2019)

Por lo anterior, este trabajo, sigue la metodología de (Chen *et al.* 2019, Gorrini *et al.* 2018 y Zeng *et al.* 2017), ya que estos autores, establecen que, para llevar a cabo una evaluación de seguridad confiable en las intersecciones, se deben incorporar varios modelos de comportamiento en uno solo con el fin de caracterizar razonablemente los movimientos vehiculares y peatonales.

Según Chen *et al.* (2019), la representación del movimiento de giro del vehículo, las características geométricas y los diseños de las intersecciones, se elaboran modelos de trayectoria y velocidad, es decir, durante el proceso de girar a la derecha, los vehículos pueden decidir si girar o ceder el paso cuando se encuentran con peatones en los cruces peatonales. Por lo tanto, se integra como un modelo de aceptación de brechas.

A diferencia del comportamiento de los peatones, Zeng *et al.* (2014), asumen que los peatones planean una ruta inicialmente a nivel táctico y luego ajustan las velocidades y direcciones dinámicamente de acuerdo con conflictos instantáneos con los peatones y vehículos circundantes a nivel operativo. La interacción vehículo-peatón se debe actualizar en cada intervalo mediante el modelo de simulación integrado.

3.8 Modelo de Fuerza Social.

La técnica principal de la presente investigación considera el empleo de variables de fuerza social, la cual fue propuesta por Helbing & Molnar (1995) y adecuada posteriormente por Chen *et al.* (2019) en un modelo de comportamiento peatonal en una red vial. Ya que, de acuerdo con Gorrini *et al.* (2018) es fundamental para evaluar el nivel de comodidad y de seguridad de una intersección, un conjunto de reglas de comportamiento y metas o preferencias individuales.

Esta técnica sugiere que el movimiento peatonal tiene una gran similitud con el comportamiento dinámico de los fluidos, ya que, si bien se ha considerado hasta el momento como un comportamiento “caótico y estocástico” bajo situaciones simples, a las que se responde por reacción automática y experiencia. Este comportamiento puede describirse

como “sujeto a fuerzas sociales”. En la Figura 3.6 se muestra de forma esquemática el proceso que representa el cambio en el comportamiento.

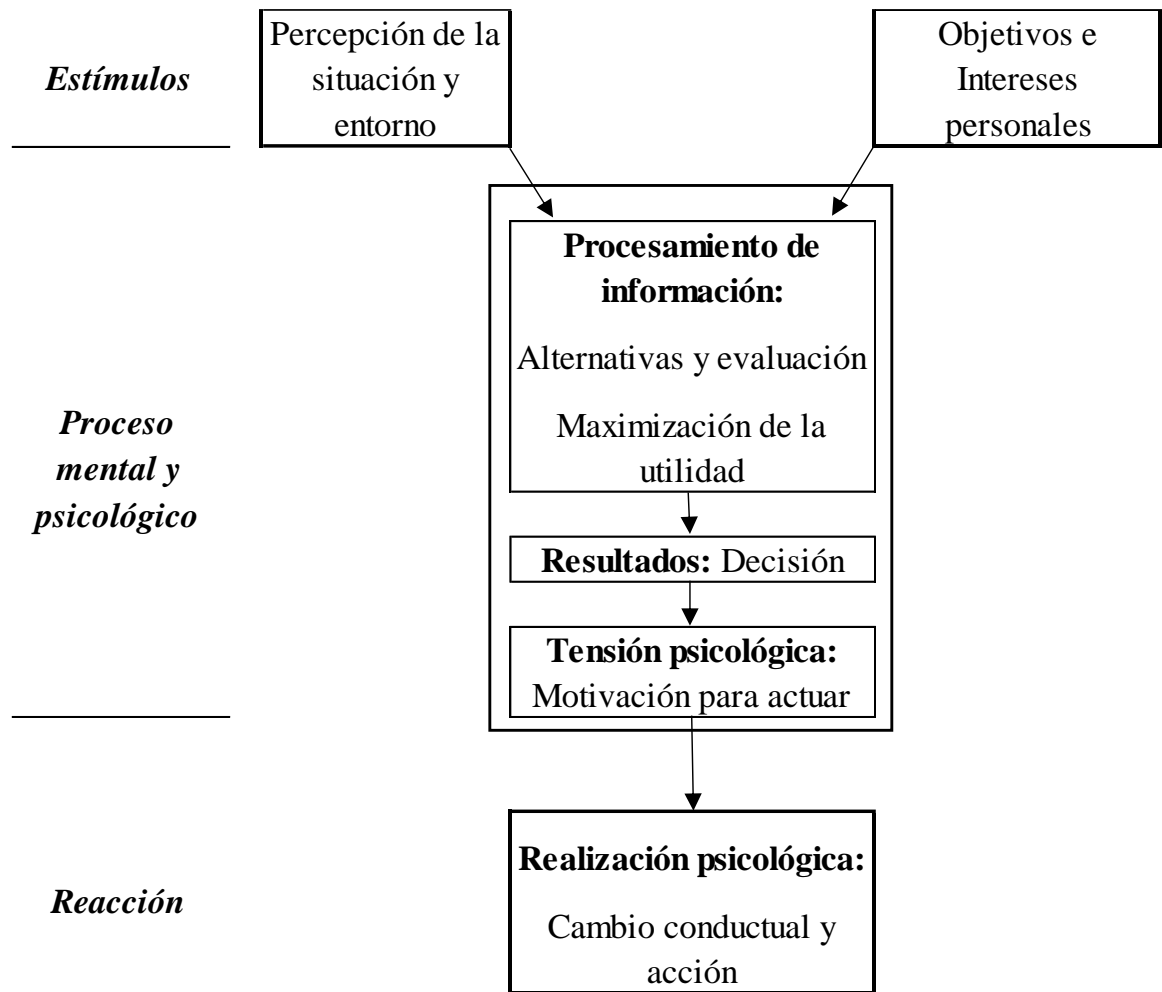


Fig. 3.6 Representación esquemática del proceso que conduce a los cambios de comportamiento.

Fuente: Elaboración propia, con base en Helbing & Molnar (1995).

En el proceso de la Figura 3.6, se considera que el estímulo sensorial provoca una reacción conductual basada en objetivos personales, y la toma de decisión entre alternativas que

maximizan la utilidad considerando las condiciones del entorno (es decir, otros peatones, obstáculos o fronteras del área de cruce peatonal). El concepto de la “fuerza social” es definido por Helbing & Molnar (1995) como un valor que representa la motivación de actuar, es decir: (acelerar o desacelerar) como respuesta a la información percibida sobre su entorno; ya que el peatón tiene como objetivo principal llegar a su destino lo más cómodo posible y toma caminos sin desvíos que sugieren el recorrido más corto; es así que el modelo considera a la vía como un polígono de múltiples aristas, de las cuales, el peatón se dirigirá hacia la que represente la menor longitud hacia su dirección deseada $e^{\rightarrow\alpha}(t)$, gobernada por un tiempo t , donde “ $r^{\rightarrow\alpha}(t)$ ” denota la posición real del peatón α en el tiempo t , como se muestra en la Eq. 1.

$$e^{\rightarrow\alpha}(t) = \frac{r^{\rightarrow k} - r^{\rightarrow\alpha}(t)}{\|r^{\rightarrow k} - r^{\rightarrow\alpha}(t)\|} \quad (1)$$

Otra consideración fundamental, defiende la idea de que un peatón α , está influenciado por otros peatones, manteniendo una cierta distancia entre ellos dependiendo de la densidad y la velocidad deseada. Se basa en una “esfera privada”, interpretada de forma territorial por el peatón y que representa la fuerza de repulsión “ $f^{\rightarrow\alpha\beta}(r^{\rightarrow\alpha\beta})$ ” hacia el acercamiento con otros peatones β (Eq. 2).

$$f^{\rightarrow\alpha\beta}(r^{\rightarrow\alpha\beta}) = - (r^{\rightarrow\alpha\beta}) V_{\alpha\beta} [b(r^{\rightarrow\alpha\beta})] \quad (2)$$

De la misma manera, el peatón mantiene una distancia con respecto a los bordes de paredes, mobiliario, árboles, obstáculos, calles, entre otros. Por lo tanto, un borde B evoca otro efecto repulsivo representado por la Eq. 3.

$$f^{\rightarrow\alpha B}(r^{\rightarrow\alpha B}) = - (r^{\rightarrow\alpha B}) U_{\alpha B} [b(r^{\rightarrow\alpha B})] \quad (3)$$

El último componente son los efectos atractivos $f^{\rightarrow\alpha i}$, responsables de la formación de grupos de peatones como lo son otras personas o bordes, que, a diferencia de la repulsión, esta atracción disminuye con el tiempo t en la dirección deseada, como se muestra en la Eq. 4. Por el contrario, si no coincide con el ángulo de visión del peatón, tendrán una influencia igual a una constante c más débil, de un valor aproximado de 0.5.

$$f^{\rightarrow \alpha i} (||r^{\rightarrow \alpha i}||, t) = - r^{\rightarrow \alpha i} W_{\alpha i} (||r^{\rightarrow \alpha i}||, t) \quad (4)$$

La ecuación final para la motivación total $F(t)$ del peatón, está dada por la suma de los componentes mencionados más un término de fluctuación por variaciones aleatorias de comportamiento, el cual surge para representar las situaciones en las que las alternativas son equivalentes. Sin embargo, dependiendo de la aplicación que se asigne, es posible despreciar los efectos de atracción o de fluctuación, como por ejemplo un punto de destino de cruce sin objetos de atracción, (como p. ej. los escaparates).

La adaptación de Chen *et al.* (2019) que se considera en la presente investigación, considera que los peatones pueden moverse fuera de su área de cruce debido a posibles conflictos. En esta metodología se calcula una fuerza resultante $\rightarrow_{v_{\alpha}} (t_k)$ para construir un perfil de velocidad $\rightarrow_F (t_k)$ y calcular las posiciones variables $\rightarrow_{P_{\alpha}} (t_k)$.

3.8.1 Propuesta de simplificación de las variables del Modelo de Fuerza Social.

Para obtener cada una de estas variables vectoriales se requiere de un algoritmo de detección y seguimiento de trayectoria vehicular y peatonal que registre cambios de dirección y velocidad por milésimas de segundo; esta investigación propone la obtención de variables por medio de registro observacional a fin de presentar una opción de simplificación del método. La sustitución de valores vectoriales se propone a partir de los siguientes términos:

i) Fuerza de repulsión “ $f^{\rightarrow \alpha \beta}$ ”

Representada por una variable categórica CD que define el “cambio de dirección peatonal” del usuario a partir de la detección de un vehículo en acercamiento, Chen *et al.* (2019) demostró que la dirección de marcha cambia dinámicamente en función de la densidad variable en el tiempo de los peatones circundantes y de los vehículos que giran en el paso de peatones. Esta variable también ha demostrado buenos resultados en la investigación de Liu *et al.* (2017).

ii) Fuerza de repulsión por borde $f \rightarrow \alpha B$

Representada por una variable categórica BC que define el “Borde de cruce utilizado” por el usuario durante el cruce peatonal. De la misma manera, Chen *et al.* (2019) formulan una fuerza repulsiva o a tractiva generada por el límite del paso de peatones para representar el desplazamiento de los peatones fuera del paso para evitar posibles conflictos, obteniendo buenos resultados. Los peatones al borde “cercano” del paso peatonal, es decir ($BC=0$), son aquellos que comienzan su cruce de salida, cerca de los vehículos que giran, a diferencia de los peatones del borde “lejano” ($BC=1$), quienes cruzan del otro lado del paso.

iii) Efectos atractivos $f \rightarrow ai$ con otras personas y bordes

Representada por una variable categórica TP que define el “tipo de escenario” del evento, en cuyas condicionantes se ve reflejado el seguimiento de un peatón líder o vehículo líder según sea el caso, así como la variable categórica AC “área de cruce” que define si el cruce peatonal se realizó dentro o fuera de la infraestructura peatonal designada. Lo anterior, basado en Teknomo (2006) que menciona que los peatones interactúan entre sí al caminar, adaptándose para evitar obstáculos y cambiar de dirección cuando es necesario. En situaciones congestionadas, se esfuerzan por mantener distancia respecto a otros peatones y los bordes del cruce para minimizar el contacto físico, lo que puede entenderse como una interacción repulsiva y atractiva entre los peatones y su entorno.

iv) Velocidad a partir de la fuerza resultante $\rightarrow_F (t_k)$

Representada por la variable continua VP “velocidad de cruce peatonal”, la relación entre el proxy y la variable original es directa.

v) Posiciones variables $\rightarrow_{P_\alpha} (t_k)$

Representada por la variable categórica DP de “dirección peatonal”, define si la el cruce peatonal se realizó en dirección de salida o entrada a la intersección, lo

que considera la variación de posición con respecto al tiempo de cruce, la relación entre el proxy y la variable original es directa.

vi) Posición real del peatón α en el tiempo t , $r^{\rightarrow \alpha}(t)$

Representada por la variable categórica *TPC* “trayectoria peatonal de cruce” que permite detectar el sentido de circulación peatonal y la ramificación de origen del usuario. La relación entre el proxy y la variable original es directa.

La propuesta de simplificación de variables se presenta como una opción de "proxies" para cada variable de fuerza social. Estos "proxies" se utilizan para reemplazar las variables originales del modelo, ya que su obtención precisa resulta difícil y costosa en el contexto de esta investigación. Aunque algunas de estas variables de sustitución tienen una relación directa y fácil de comprender, se ha validado su idoneidad a través de la revisión de la literatura y la consulta con expertos en el campo relacionado con las variables de interés, basándonos en estudios previos en contextos similares.

Es importante destacar que los proxies pueden no siempre reflejar con perfección la variable de interés y pueden presentar limitaciones en términos de precisión y validez. La elección de las variables de simplificación propuestas se basó en una comprensión sólida de la relación entre el proxy y la variable de interés. Sin embargo, debido a la disponibilidad limitada de información, no fue posible llevar a cabo un análisis estadístico exhaustivo para evaluar el error y el sesgo entre los proxies y las variables originales.

A pesar de estas limitaciones, la evaluación realizada en cada variable sugiere que los proxies cumplen de manera razonable y válida con los objetivos de esta investigación en relación con las variables de fuerza social. Las codificación y descripción de las variables utilizadas se muestran en la Tabla 4.1

3.9 Modelo de conflicto de tráfico (TCT).

Para el análisis de seguridad vial desde un enfoque preventivo, el modelo de conflicto de tráfico es actualmente uno de los enfoques más utilizados, que a diferencia con otros métodos como el del Manual de Seguridad Vial de Estados Unidos de America (HSM, 2010), no se ve limitado a la consideración del registro histórico de hechos de tránsito. (Chen *et al.* 2019).

Esta técnica se basa en las medidas de seguridad sustantiva (SSM) como indicadores de proximidad, tanto espacial como temporal de los usuarios de la vía para medir la gravedad y frecuencia de eventos en conflicto, tal como mencionan Allen & Shin (1978) y Zeng *et al.* (2017). En este sentido, Cunto & Saccomanno (2008) definen que el objetivo del enfoque es analizar el índice potencial de colisión, el número de vehículos en conflicto y la duración total del conflicto, haciendo una comparativa entre los datos obtenidos por el modelo y los observados, desarrollados para la evaluación del desempeño operativo de la red vial.

En el presente artículo se abordan las medidas de seguridad sustantiva, que han presentado mejores resultados en la evaluación de conflictos entre peatones y vehículos, y que de acuerdo con Chen *et al.* (2019) son fáciles de obtener mediante la observación y la relación con otras medias, estas son: i) el tiempo posterior de invasión *PET*, ii) el tiempo de cebra *TTZ*, iii) *VV* la velocidad de paso del vehículo.

El *PET* se define como la diferencia de tiempo entre un peatón que abandona el punto de colisión potencial, y un vehículo en conflicto que llega al punto; se calcula como se muestra en la Ecuación 5, donde t_1 es el tiempo de finalización de la invasión (cuando el peatón abandona el punto), y t_2 se refiere al tiempo real de llegada del vehículo al punto mencionado anteriormente. Este parámetro en conjunto con las velocidades de paso de los vehículos, arroja una correlación representativa con la probabilidad de ocurrencia de cuasi colisión. Por su parte, el tiempo de cebra se define como el tiempo en que el peatón realiza el cruce de la intersección, desde su punto origen hasta el punto de destino.

$$PET = t_2 - t_1 \quad (5)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En esta sección se reporta la codificación de las variables consideradas para la elaboración de los modelos como son: las condiciones operativas, las condiciones de infraestructura, las variables de fuerza social y las medidas de seguridad sustantiva observadas, así como la estadística descriptiva de dichos factores durante los eventos observados de cuasi colisión a partir del comportamiento de interacción peatón-vehículo. Se utilizó una muestra de 555 registros de eventos de cuasi colisión que se presentaron en las dos intersecciones de estudio; así como otros 3,403 registros de variables de comportamiento correspondientes a los eventos C=0, que representan numerosas condiciones de cruce de peatón y vehículo en los que no se presentaron cuasi colisiones. Estos registros corresponden a un flujo estudiado durante la hora de máxima demanda (de 8:15 a 9:15 am) en los días representativos (martes, miércoles y jueves) de una semana típica laboral en cada una de las intersecciones. Se obtuvieron cuatro modelos significativos que consideran las diferentes combinaciones de las variables de análisis, éstos son: 1. Fuerzas sociales, 2. Condiciones operativas y de infraestructura en conjunto con fuerzas sociales, el modelo 3 y 4 corresponden a variaciones del conjunto de variables de condición operativa y de infraestructura, variables de fuerza social y medidas de seguridad sustantiva.

Cabe mencionar que para la elaboración de los modelos de predicción se evaluó cada una de las categorías de variables de manera individual para identificar las más representativas, así como en diversas combinaciones para conocer su comportamiento conjunto con otros tipos de variable. Es decir, se evaluaron las variables de fuerza social de manera independiente, posterior se realizó un análisis de las variables de fuerza social + medidas de seguridad sustantiva, fuerza social + condiciones operativas , fuerza social + condiciones de infraestructura, fuerza social + medidas de seguridad sustantiva + condiciones operativas, fuerza social + medidas de seguridad sustantiva + condiciones de infraestructura y fuerza social + medidas de seguridad sustantiva + condiciones operativas + condiciones de

infraestructura, hasta realizar un análisis de todas las combinaciones posibles según las cuatro categorías disponibles.

Lo anterior evitando la utilización de variables correlacionadas dentro de las opciones de combinación, por ejemplo: los ciclos semafóricos vehiculares de las ramificaciones de las intersecciones no se encuentran sincronizados en su totalidad con el semáforo peatonal, lo cual induce a la generación de conflictos viales; si bien es algo importante a considerar. Por lo menos el 85% de ellas se encuentra sincronizado, razón por la cual se decidió considerar que tenían una correlación directa y no emplear ambas al mismo tiempo en ningún análisis, sin embargo, si se analizaron por separado para determinar si tenían mayor o menor significancia una en comparación con la otra al hacer la misma combinación con otras variables. Se tuvo la misma consideración al utilizar las variables de “tiempo de cruce” y “longitud de cruce” y su correlación con la “velocidad de cruce” tanto para peatones como vehículos y así evitar problemas de endogeneidad dentro de las variables de los modelos desarrollados. Si bien todas las variables cuentan con su análisis estadístico descriptivo a fin de contar con un registro de las condiciones generales de cruce de intersección, no todas las variables se utilizaron en el desarrollo de los modelos, ya sea por no resultar significativos o por representar un problema de correlación directa con otras variables.

En el modelo de regresión logística binaria, la variable dependiente debe tomar exactamente dos valores (Sí-No, 0-1, Verdadero-Falso, etc.). Las variables independientes pueden estar a nivel de intervalo o ser categóricas; si son categóricas, deben ser variables ficticias o estar codificadas como indicadores. (Berlanga & Vilà-Baños, 2014).

Si la covariable cualitativa tuviera más de dos categorías, para su inclusión en el modelo debería transformarse en varias covariables cualitativas dicotómicas ficticias o de diseño, conocidas como variables dummy, de modo que una de las categorías se tome como referencia. En general, si la covariable cualitativa posee n categorías, habrá que realizar $n-1$ covariables ficticias.

En el caso particular de esta investigación, para la variable cualitativa *TP* (Tipo de peatón), se utilizan variables dummy. Estas variables son mutuamente excluyentes y exhaustivas, es

decir que ningún usuario puede ser clasificado en más de una categoría, y que el total de la población bajo el estudio es clasificable en alguna de las categorías. Las variables dummy se nombraron de la siguiente manera:

- *TP_0*: Evento entre varios peatones vs varios vehículos.
- *TP_1*: Evento entre varios peatones vs un vehículo.
- *TP_2*: Evento entre un peatón y un vehículo.
- *TP_3*: Evento entre varios vehículos y un peatón.

Lo anterior se realiza con la finalidad de que estas covariables ficticias se utilicen para que el algoritmo del modelo analice de forma correcta el escenario que representa cada una. Dado que se cuenta con el interés de evaluar y comparar todas las categorías de la variable categórica *TP*, no se ha establecido una variable categórica de referencia, considerando todas igual de importantes y ajustando el modelo sin omitir ninguna variable dummy. Esta elección también atiende la necesidad de explorar estas variables dummy en conjunto con las otras variables predictoras que se están analizando en la presente investigación. Para poder realizar un ajuste del modelo adecuado, se requiere no contar con la restricción de una categoría de referencia, lo cual está en línea con los objetivos del análisis.

De la misma manera, las variables *TPC* “Trayectoria del cruce peatonal” y *MV* “Movimiento vehicular” se caracterizan por su naturaleza categórica de varios niveles, y en consecuencia, se generaron variables dummy correspondientes. No obstante, tras un análisis exhaustivo, estas variables fueron excluidas por completo de los modelos finales debido a su falta de significancia estadística. En el caso de *MV*, se restringieron los registros para considerar únicamente los movimientos de giro, centrándose en la variable *DG* de dirección de giro que abarca los movimientos de "izquierda y derecha".

Es importante mencionar que, aunque estas variables *TPC* y *MV* se describen en los registros de observación en la base de datos, su inclusión se limitó al propósito del análisis estadístico de la ocurrencia de los eventos. Sin embargo, no desempeñaron un papel en la determinación

de los modelos finales. Por esta razón, no se detallarán las variables dummy correspondientes a la clasificación del tipo de cruce peatonal y de movimientos direccionales vehiculares.

4.1 Variables continuas y categóricas consideradas.

Se analizaron veinticuatro variables que representan la ocurrencia del evento (cuasi colisión) bajo cuatro categorías principales: i) la simplificación propuesta de fuerzas sociales y ii) las medidas de seguridad sustantiva, iii) condiciones operativas y iv) condiciones geométricas de la infraestructura de la intersección. La descripción y codificación de cada una se expone en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Descripción y codificación de las variables consideradas en la base de datos.

Variable	Nombre	Tipo	Descripción
<i>C</i>	Ocurrencia de evento (casi colisión)	Categórica Endógena	- 0=No se presentó el evento, 1=Se presentó el evento
<i>U</i>	Tipo de usuario	Categórica Exógena	- 0=Vehículo, 1=Peatón
<i>TP</i>	Tipo de peatón en conflicto	Categórica Exógena	- Valores de 0 a 3; 0=No existe evento, 1= evento entre varios peatones vs un vehículo, 2 = evento entre un peatón y un vehículo, 3 = evento entre varios vehículos y un peatón

<i>TPC</i>	Trayectoria de cruce peatonal	Catagórica Exógena	- 16 trayectorias peatonales, definidas por dirección de caminata, ramificación y sección de cruce (según el sentido vehicular).
<i>MV</i>	Movimiento de giro vehicular	Catagórica Exógena	- 10 trayectorias vehiculares, definidas por dirección de giro izquierda, giro derecha o movimiento de cruce de la intersección a cualquier otra de las ramas, considerando la ramificación de origen y destino del movimiento.
<i>LP</i>	Longitud de cruce peatonal	Continua Exógena	- Valores desde 9 a 20.5 metros
<i>DRG</i>	Distancia Efectiva por Radio de giro	Continua Exógena	- Valores desde 8.56 a 30.21 metros
<i>TZZ</i>	Tiempo de cebra (cruce peatonal)	Continua Exógena	- Valores desde 5.45 a 9.15 segundos
<i>VP</i>	Velocidad de paso peatonal	Continua Exógena	- Valores desde 0.29 hasta 2.41 m/s

<i>AC</i>	Cruce fuera de área designada	Catagórica Exógena	Define si el peatón utilizó el área de infraestructura designada para el cruce de la ramificación, (0 = El cruce peatonal se realizó dentro del área y 1 = El cruce peatonal se realizó fuera del área)
<i>CD</i>	Cambio de dirección peatonal	Catagórica Exógena	Define si el peatón realizó un cambio de dirección durante su cruce, (0 = No hubo un cambio de dirección, 1=Se llevo a cabo un cambio de dirección durante el cruce peatonal)
<i>BC</i>	Borde utilizado	Catagórica Exógena	Define si el peatón realizó el cruce utilizando el borde de la cebra más cercano a la maniobra de giro o el más alejado (0= El peatón cruzo en el borde más cercano, 1 = El peatón cruzó en el borde más lejano)
<i>FC</i>	Fase semafórica de cruce peatonal	Catagórica Exógena	Define si el peatón cruzó la ramificación dentro o fuera de su ciclo semafórico correspondiente (0=Cruce

			fuera de ciclo, 1=Cruce dentro de ciclo)
<i>FV</i>	Fase semaforica de giro vehicular	Catagórica Exógena	Define si el vehículo realizó el movimiento de giro dentro o fuera de su ciclo semafórico correspondiente (0=Cruce fuera de ciclo, 1=Cruce dentro de ciclo)
<i>VV</i>	Velocidad de cruce vehicular	Continua Exógena	- Valores desde 0.44 hasta 33.18 (m/s)
<i>DG</i>	Tipo de Giro	Catagórica Exógena	Define si el movimiento de giro vehicular se realizó a la izquierda o a la derecha (0=Giro a la izquierda y 1=Giro a la derecha)
<i>DP</i>	Dirección Cruce Peatonal	Catagórica Exógena	Categoriza las trayectorias peatonales en movimientos de entrada o salida de la intersección (0= Entrada y 1=Salida)
<i>PET</i>	Tiempo posterior de invasión	Continua Exógena	Define la diferencia de tiempo entre un peatón que abandona el punto de colisión potencial, y un vehículo en conflicto que llega al punto, valores desde 1 a 8 segundos

Fuente: Elaboración propia.

Para brindar al lector una mejor comprensión de cómo está estructurada la base de datos y cómo se registran las variables, se presenta un extracto en el Anexo 2.

4.1.1 Variables operativas y de infraestructura

Dentro de la presente investigación se ha considerado la integración de las condiciones operativas y de infraestructura para la elaboración del modelo de predicción, tal como sugieren Rivera *et al.* (2011), Feliciani *et al.* (2020) y Obregón *et al.* (2018), a continuación, se mencionan las variables que conforman la base de datos.

Condiciones operativas:

- Movimientos direccionales permitidos,
- Aforo vehicular correspondiente a movimientos de giro,
- Aforo peatonal de cruce,
- Obediencia de señales por parte del peatón FP,
- Obediencia de señales por parte del vehículo FV,
- Velocidad de cruce,
- Distancia de visibilidad de proyecto,

Condiciones de infraestructura:

- Ramificaciones y su orientación,
- Ancho de camellón,
- Longitud entre ramificaciones,
- Ancho de vía,
- Ancho de cruce peatonal,

- Longitud de cruce peatonal,
- Radio de giro,
- Distancia de visibilidad real basada en triángulos de visibilidad,
- Longitud circular de curva.

Se consideró la distancia de visibilidad por medio de triángulos de visibilidad de incorporación como una de las condiciones de infraestructura, según lo correspondiente al caso para automóvil en intersecciones con control de semáforo, determinado en el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Con un valor de entrada de 50 km/h como velocidad de proyecto, se obtuvo una distancia de visibilidad de parada en el camino principal (Av. Constituyentes) de 63 metros y una distancia de visibilidad de proyecto en la intersección para automóviles de 80 metros para vueltas izquierda y derecha. El resto de las dimensiones de la intersección de obtuvieron mediante la planimetría y fotogrametría de la zona de estudio. En la tabla 4.2 a la 4.8 se muestran los valores obtenidos; así mismo, las Fig. 4.1 y 4.2 muestran un apoyo gráfico para la comprensión de la orientación y codificación variables.

Codificación del Giro Vehicular		Pasteur (P)			Corregidora (CR)		
Dirección de Giro	Movimiento Direccional	Radio de giro <i>RG</i>	Longitud Circular de Curva <i>LCC</i>	Distancia de Visibilidad Real <i>DV_RE</i>	Radio de giro <i>RG</i>	Longitud Circular de Curva <i>LCC</i>	Distancia de Visibilidad Real <i>DV_RE</i>
D	1	15.62	24.53	14.20	7.22	11.33	7.12
D	4	12.37	19.43	55.37	14.85	23.33	19.85
I	7	5.84	9.17	-	7.55	11.85	-
D	8	6.35	9.97	29.17	12.14	19.07	23.06
D	11	9.65	15.15	16.60	12.84	20.17	15.55
I	14	5.45	8.56	-	7.63	11.99	-
I	3	18.47	29.01	57.21	17.89	28.10	81.63
I	6	19.23	30.21	51.90	18.57	29.17	28.63
I	10	18.97	29.80	54.34	17.36	27.27	59.6
I	13	19.15	30.08	50.33	18.93	29.74	24.01

Tabla 4.2 Orientación de las ramificaciones de la intersección, (codificación de movimientos direccionales).

Movimiento direccional	Orientación de la Ramificación
1	N
2	N
3	N
4	O
5	O
6	O
7	O
8	S
9	S
10	S
11	E
12	E
13	E
14	E

Fuente: Elaboración propia.

Tabla. 4.3 Condiciones geométricas de la infraestructura por movimiento direccional (giro).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4 Longitud lineal interna entre movimientos direccionales y su ramificación opuesta.

Movimiento de cruce	P Longitud L_v	CR
2	52.46	45.29
5	33.18	58.52
9	52.06	42.65
12	31.12	58.59

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.5 Longitud de cruce por trayectoria peatonal por intersección.

Trayectoria de cruce <i>C</i>	Pasteur (P)	Corregidora (CR)
	Longitud de cruce <i>L_c</i>	
AD1	9	12
AD2	9.75	15.2
AI1	9	12
AI2	9.75	15.2
BD1	19.25	18
BD2	14.5	14.1
BI1	19.25	18
BI2	14.5	14.1
CD1	9	11.1
CD2	9	9.9
CI1	9	11.1
CI2	9	9.9
DD1	20.25	17
DD2	16.7	13.9
DI1	20.25	17
DI2	16.7	13.9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6 Ancho de cruce por trayectoria peatonal por intersección.

Ancho de cruce <i>C</i>	P	CR
	Ancho de cruce <i>a</i>	
AD1	4	12
AD2	4	15.2
AI1	4	12
AI2	4	15.2
BD1	4	18
BD2	4	14.1
BI1	4	18
BI2	4	14.1
CD1	4	11.1
CD2	4	9.9
CI1	4	11.1
CI2	4	9.9
DD1	4	17

DD2	4	13.9
DI1	4	17
DI2	4	13.9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7 Codificación de la trayectoria de cruce peatonal (entrada o salida) a la intersección.

Trayectoria de cruce C	Entrada o Salida a la intersección (0=Entrada, 1, Salida)
AD1	0
AD2	1
AI1	1
AI2	0
BD1	1
BD2	0
BI1	1
BI2	0
CD1	1
CD2	0
CI1	0
CI2	1
DD1	0
DD2	1
DI1	0
DI2	1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8 Codificación de tipo de peatón en conflicto o (tipo de evento).

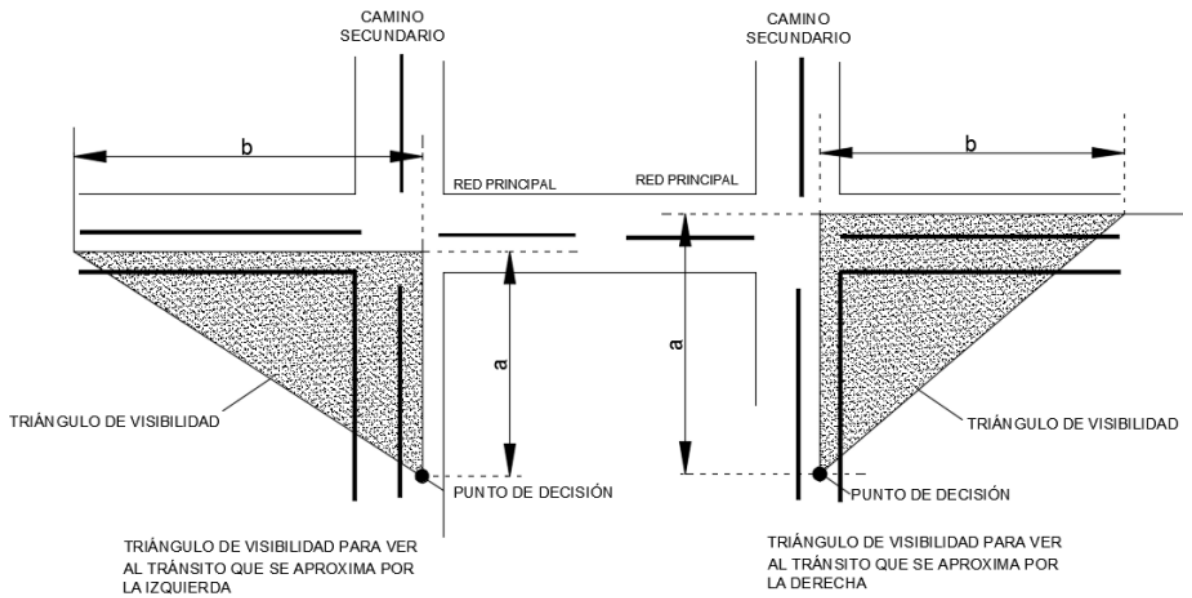
Codificación	Tipo de evento <i>TP</i>
0	Registro de evento entre varios peatones y varios vehículos
1	Registro de evento entre varios peatones y un vehículo
2	Registro de evento entre un peatón y un vehículo
3	Registro de evento entre varios vehículos y un peatón

Fuente: Elaboración propia.



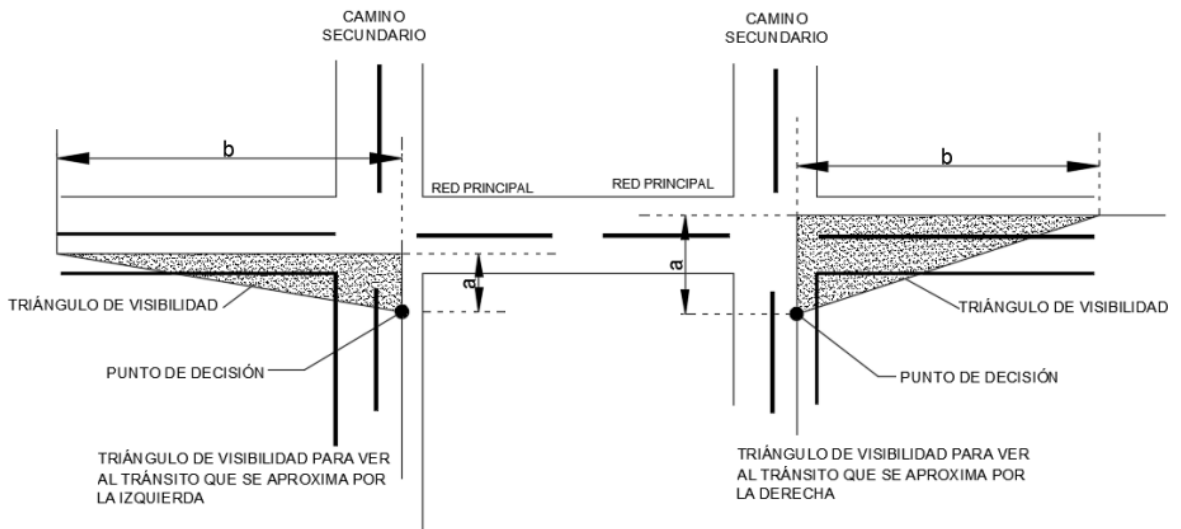
Fig. 4.1 Triángulos de visibilidad por tipo de giro, (ejemplificación gráfica).

Fuente: Elaboración propia.



- A -

Triángulos de visibilidad de llegada



- B -

Triángulos de visibilidad de salida

Fig. 4.2 Triángulos de Visibilidad de llegada y salida.

Fuente: Manual de Diseño geométrico, SCT (2018).

4.2 Estadística descriptiva.

La estadística descriptiva de cada variable se muestra en la Tabla 2 del total de los 3,984 registros de condición de cruce peatonal y vehicular de la muestra. Este análisis estadístico corresponde a las variables continuas del subconjunto de datos que considera la interacción entre los usuarios que generaron un evento C, del que se obtuvieron 555 registros, es decir, el 13.93% del total de la base de datos.

Tabla 2. Estadística descriptiva de las variables durante la ocurrencia de cuasi colisiones C, por tipo de giro.(Giro a la izquierda n=119 eventos; Giro a la derecha n=436 eventos).

Variable	Media	Error estándar	de la media	Desv. Est.	Mín.	Q1	Q3	Máx.
Giro izquierdo (DG=0)								
LCC	21.475	0.972	10.004	8.561	9.173	29.17	29.17	30.206
DV_RE	22.03	1.93	19.83	0		28.63		51.9
ABS_DIF	35.33	2.56	26.41	0		51.37		80
DG	0	0	0	0	0	0	0	0
FV	1	0	0	1	1	1	1	1
VV	5.099	0.269	2.77	0.917	2.398	5.834	7.292	9.723
TZZ	15.6	1.35	13.92	4	9	11	16	54
L	14.44	0.517	5.321	0	11.1	14.5	20.25	20.25
PET	2.443	0.122	1.258	1	1	3	3	5
VP	0.009	0.0003	0.004	0	0.007	0.009	0.013	0.017
TP	1.83	0.0998	1.0279	0	1	1	3	3
AC	0.085	0.0272	0.2801	0	0	0	0	1
CD	0.226	0.0408	0.4205	0	0	0	0	1
BC	0.283	0.044	0.4526	0	0	0	1	1
FC	0	0	0	0	0	0	0	0
DP	0.321	0.0456	0.469	0	0	0	1	1

Giro derecho (DG=1)

LCC	17.57	0.203	4.243	9.975	15.15	19.075	20.17	24.531
DV_RE		18.814	0.366	7.648	7.12		16.6	55.37
ABS_DIF		61.186	0.366	7.648	24.63		63.4	72.88
DG	1	0	0	1	1	1	1	1
FV	0.938	0.0116	0.2421	0	1	1	1	1
VV	5.631	0.209	4.366	0.381	2.242	4.858	6.725	23.32
TZZ	9.397	0.222	4.641	2	7	8	11	49
L	12.08	0.204	4.261	0	9	11.1	14.5	20.25
PET	2.018	0.0675	1.4092	1	1	2	2	10
VP	0.008	0.0002	0.0033	0	0.006	0.0076	0.009	0.017
TP	1.6789	0.0472	0.9862	0	1	1	3	3
AC	0.3073	0.0221	0.4619	0	0	0	1	1
CD	0.2683	0.0212	0.4436	0	0	0	1	1
BC	0.555	0.0238	0.4975	0	0	1	1	1
FC	0.0619	0.0116	0.2413	0	0	0	0	1
DP	0.4174	0.0236	0.4937	0	0	0	1	1

La estadística descriptiva de la base de datos correspondiente al subconjunto de registros de ocurrencia de eventos C, muestra que el 95 por ciento del total de las cuasi colisiones fue ocasionada por un peatón infractor al realizar su maniobra de giro fuera de su fase “verde” semafórica.

Además, se observó que el 21.05 por ciento de los movimientos de giro, se realizan fuera de su fase semafórica “verde”, aumentando la incidencia en un 37% al contar con radios de giro mayores a los 9 metros; siendo condicionante en el comportamiento, por lo que se debe de considerar dicha variable durante el diseño de proyectos geométricos a fin de disminuir la probabilidad de incidencia de usuarios infractores y por lo tanto la frecuencia de ocurrencia de eventos C.

4.3 Estimación del modelo

Se estimaron modelos logit para obtener la probabilidad de ocurrencia del evento (cuasi colisión) con los predictores mencionados anteriormente, y considerando un nivel de confianza del noventa y cinco por ciento. Los modelos estimados se muestran en la Tabla 3 y 4 obtenidos mediante la herramienta computacional NLOGIT (versión 5). Se realizó la estandarización de los coeficientes en cada uno de los modelos logit, con el fin de poder comparar de las variables predictoras. La estandarización no cambia la relación relativa entre las variables predictoras y la variable dependiente, solo clarifica la escala en la que se expresan los coeficientes, lo que hace que la interpretación sea más intuitiva y sea posible comparar la influencia de cada variable en el modelo (García et al., 2018). Los valores de error estándar obtenidos de los coeficientes sugieren una estimación precisa de los mismos; siendo que el coeficiente de una variable continua denota el cambio estimado de las probabilidades para el evento de referencia, por unidad de predictor.

Tabla 4.10 Modelos que predicen la ocurrencia de cuasi colisiones "C" considerando las variables de fuerza social (Modelo 1), y de condiciones operativas (Modelo 2).

Variable	Modelo 1	Modelo 2		Variable
	β		β	
Constante	-2.855	***	-	Constante
			11.2805	
		(-37.75)	(-23.42)	
CD	-1.7729	***	-	CD
		(-7.95)		
DP	2.3794	***	-	DP
		(-12.23)		
TP_3	4.5077	***	-	TP_3

BC	3.00555	(-14.8) ***	-		BC
LCC	-	(-15.73)	0.1421	***	LCC
DG	-		2.3677	***	DG
L	-		0.5289	***	L
ABS_DIF	-		0.4049		ABS_DIF
McFadden- ρ^2	0.3837	0.6881			McFadden- ρ^2

Nota: ***, **, *; - significancia al 1, 5% y 10% de nivel; valor de Z entre paréntesis.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11 Modelos que predicen la ocurrencia de cuasi colisiones "C" considerando las variables de fuerza social, condiciones operativas y de infraestructura de la intersección y medidas de seguridad sustantiva en conjunto (Modelo 3 y 4)

Variable	Modelo 3	Modelo 4
β	β	
Constante	-9.971 *** (-18.72)	-11.9042 *** (-17.94)
CD	-1.897 *** (-6.32)	-2.4332 *** (-7.48)
TP_3 -		0.6809 ** (2.07)
LCC	0.1139 *** (-6.84)	0.156 *** (-7.07)
DG	2.4148 *** (-7.92)	2.5402 *** (-7.00)
L	0.5805 *** (-24.02)	0.2605 *** (6.93)
TZZ -		0.6001 *** (-10.89)

ABS_DIF	0.3765 ***	0.0345 ***
	(5.4)	(-4.04)

McFadden-ρ2 0.7017 0.7784

Nota: ***, **, *; - significancia al 1, 5% y 10% de nivel; valor de Z entre paréntesis.

Fuente: Elaboración propia.

El Modelo 1 predice la probabilidad de cuasi colisión a partir de variables de fuerza social, sin embargo, al contar solo con este tipo de variables no resultó con un alto nivel de predicción. En el Modelo 2 se consideran variables de condición operativa e infraestructura, mientras para los modelos 3 y 4 se integran las variables de fuerza social, las variables de condición operativa e infraestructura y las variables de medidas de seguridad sustantiva. Si bien en el Modelo 2 se ha logrado obtener un buen resultado; se describirá con mayor detalle el ajuste de los modelos 3 y 4 debido a que integran todos los grupos de variables para predecir la ocurrencia del evento. Las variables con significación que en los diversos modelos estimados, son: la longitud circular de curva LCC, el tipo de giro DG, la longitud del cruce L, cambio de dirección peatonal CD y el valor absoluto del diferencial entre la distancia de velocidad de proyecto y la real ABS_DIF. Ahora bien, al integrar en el modelo el valor del tiempo de cebra TZZ y el tipo de peatón en conflicto: “evento entre varios vehículos y un peatón”. TP_3, se obtiene un mejor ajuste de las variables y en su nivel de predicción. En el Modelo 4 se presenta el mejor ajuste, a partir de la integración de la variable dummy de fuerza social (TP) y una variable que funge como medida de seguridad sustantiva (TZZ). Los coeficientes del Modelo 4 sugieren que por cada segundo que se aumente en el valor del tiempo de cebra TZZ, incrementa la probabilidad de ocurrencia en 0.6, lo cual se debe al tiempo en que el peatón está expuesto a las maniobras vehiculares con potencial de colisión. En una trayectoria constante sin eventos se tiene una velocidad de cruce peatonal promedio de 1.52 metros por segundo, según la muestra obtenida.

Por un lado, se recomienda tomar en consideración dentro del diseño geométrico de la intersección lo siguiente: por carril adicional de 3.5 metros se tendrá un aumento aproximado del 140% en la probabilidad de ocurrencia de cuasi colisión. Aunado a lo anterior, el incremento por metro de longitud en el ancho de la ramificación aumenta la probabilidad de ocurrencia del conflicto en un 58%.

Al aumentar en un metro, al valor absoluto del diferencial que existe entre la distancia de visibilidad de proyecto y la distancia de visibilidad real, se incrementa la probabilidad del evento en un 37%, así como un incremento del 11% por cada aumento de un metro en las longitudes circulares de curva.

Por otro lado, respecto a las condiciones operativas, el tipo de peatón en conflicto tiene gran influencia en el evento. Por otro lado, respecto a las condiciones operativas, el tipo de peatón en conflicto tiene gran influencia en el evento. Se observa que, si el peatón cruza bajo una condición en la que el flujo del vehículo en giro, con el que se genera el conflicto, es precedido por más vehículos, la probabilidad de verse involucrado en una cuasi colisión se incrementa en un 68% aproximadamente. Lo anterior sugiere que el cambio de velocidad y/o en frenado total del vehículo en conflicto con el peatón, se complica al evadir al peatón por contener la circulación de los vehículos precedentes. Es decir, para el conductor del vehículo en conflicto incrementa el nivel de complicación en la decisión de evitar la colisión trasera con el vehículo precedente o si evita la colisión con el peatón frente a él, incrementando el tiempo de reacción y generando mayor ocurrencia de conflictos. En los movimientos de giro con dirección a la derecha ($DG = 1$) incrementan la probabilidad del evento hasta en un 254%, resultando en otra condición operativa de influencia en la ocurrencia de una cuasi colisión.

Si analizamos la propuesta de simplificación de fuerzas sociales bajo la cual se registraron todas las variables de fuerza social, el factor con mayor peso es el cambio de dirección CD, que representa la fuerza de repulsión entre los usuarios.

Los resultados del coeficiente de esta variable sugieren que, a partir de una oportuna identificación del usuario en conflicto, se influye en generar el cambio de dirección por los usuarios disminuyendo hasta en un 243% la probabilidad de ocurrencia de la cuasi colisión.

Se obtuvieron valores Z que denotan que la estimación de los coeficientes es precisa como para asegurar que los términos tienen efectos significativos sobre la respuesta C ; así como valores del factor de inflación de varianza FIV de cada término en un rango de 1 a 6, correspondientes a un nivel de multicolinealidad “moderado”. (García Herrero *et al.* 2018). A continuación, se muestra la gráfica de residuos de cada uno de los modelos, en las Figuras 4.3 a la 4.7.

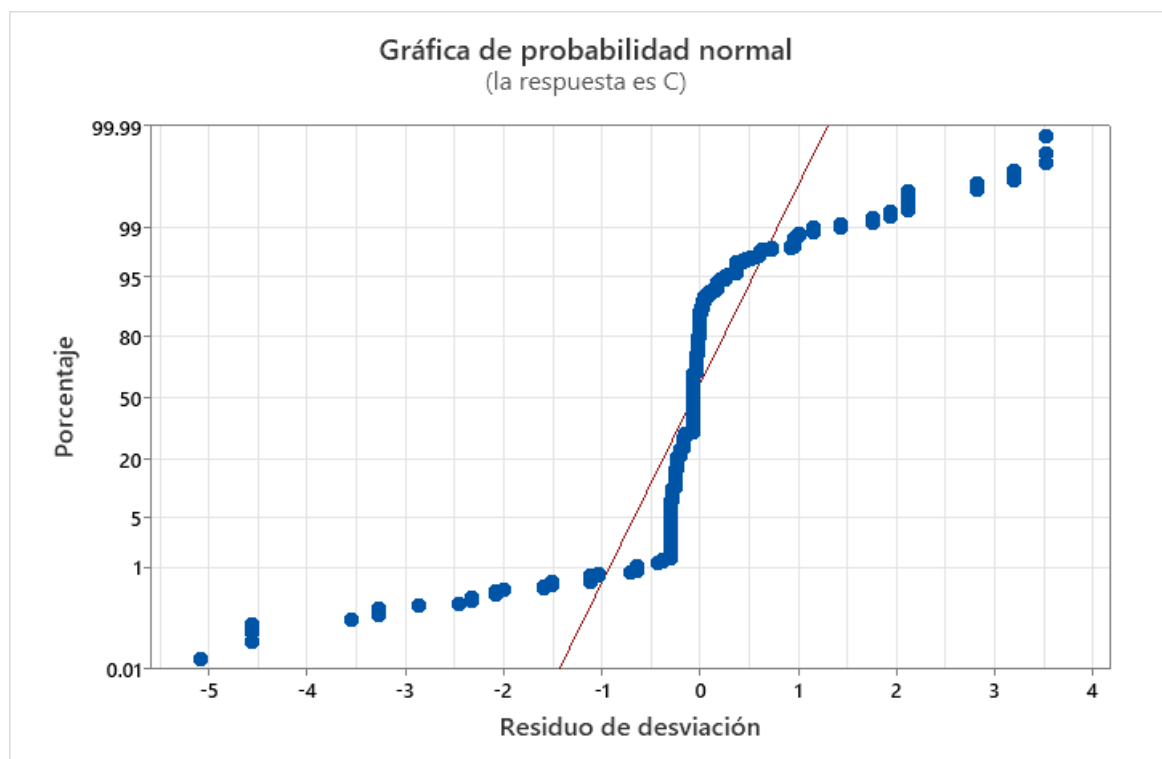


Fig. 4.3 Gráfico de residuos del Modelo de regresión logística binaria más representativo considerando variables de fuerza social: Modelo 1 - C vs. CD , DP , TP_3 y BC desarrollado para la predicción de ocurrencia de cuasi colisión.

Fuente: elaboración propia, MINITAB.

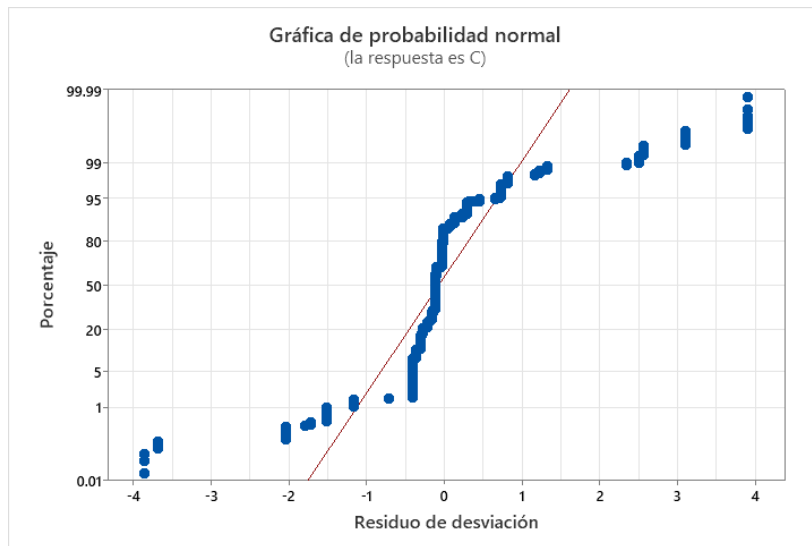


Fig. 4.4 Gráfico de residuos del Modelo de regresión logística binaria más representativo considerando las condiciones operativas y de infraestructura de la intersección: Modelo 2 - *C* vs. *LCC*, *DG*, *L* y *ABS_DIF* desarrollado para la predicción de ocurrencia de cuasi colisión. Fuente: elaboración propia, MINITAB.

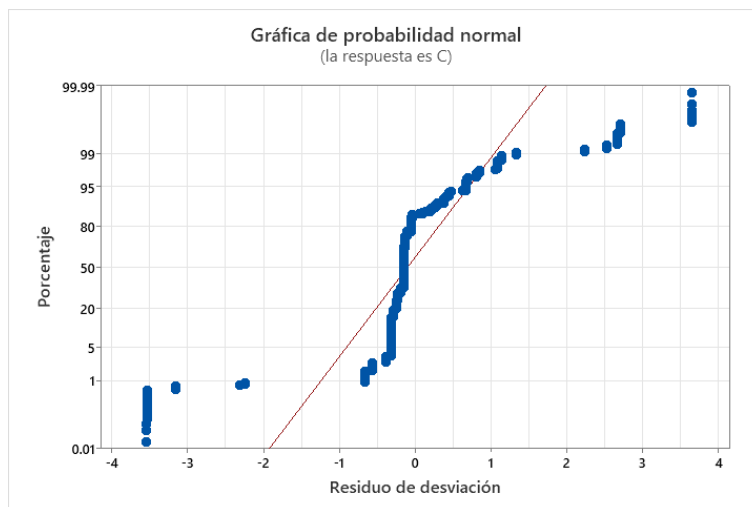


Fig. 4.5 Gráfico de residuos del Modelo de regresión logística binaria más representativo considerando variables de fuerza social en conjunto con las condiciones operativas y de infraestructura de la intersección: Modelo 3 - *C* vs. *CD*, *LCC*, *DG*, *L* y *ABS_DIF*; desarrollado para la predicción de ocurrencia de cuasi colisión. Fuente: elaboración propia, MINITAB.

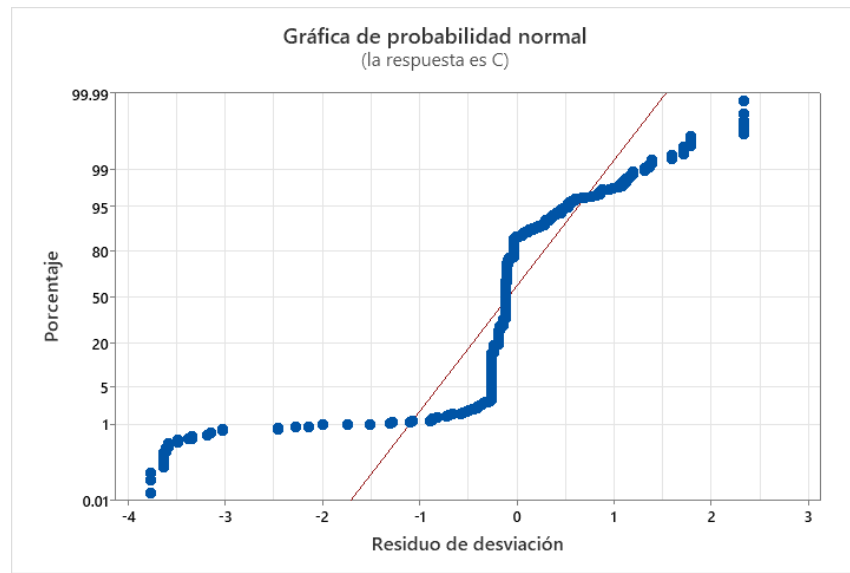


Fig. 4.6 Gráfico de residuos del Modelo de regresión logística binaria más representativo considerando variables de fuerza social en conjunto con las condiciones operativas y de infraestructura de la intersección, así como las medidas de seguridad sustantiva: Modelo 4 - C vs *CD, TP_3, LCC, DG, L, TZZ* y *ABS_DIF* ; desarrollado para la predicción de ocurrencia de cuasi colisión. Fuente: elaboración propia, MINITAB.

Tabla 4.12 Modelos que predicen la ocurrencia de cuasi colisiones "C" a partir de variables de fuerza social (A), y condiciones operativas (B), solo considerando las más representativas.

Variable	Modelo 1	(A)	Modelo 2	(B)
	β		β	
Constante	-2.8551	*** (-37.75)	-8.913	(-18.29)
(CD)	-1.773	*** (-7.95)	-	
(DP)	2.379	*** (12.23)	-	
(TP_3)	4.508	*** (14.8)	-	
(BC)	3.006	*** (15.73)	-	
(LCC)	-		0.1421	*** (8.62)
(DG)	-		-2.368	*** (-7.87)
(L)	-		0.529	*** (25.4)
ABS_DIF	-		-0.4049	(5.65)
R2	0.382		0.6881	

Tabla 4.13 Modelos que predicen la ocurrencia de cuasi colisiones "C" a partir de variables de fuerza social, condiciones operativas y de infraestructura de la intersección y medidas de seguridad sustantiva en conjunto (D).

Variable	Modelo 3	(D)	Modelo 4	(D)
	β		β	
Constante	-9.971	*** (-18.72)	-11.749	*** (-13.66)
(CD)	-1.897	*** -6.32	-2.433	*** (7.48)
(TP_3)	-		0.681	** 2.07
(LCC)	0.1139	*** (6.84)	0.1560	*** (7.07)
(DG)	2.4148	*** (7.92)	-2.54	*** -7.00
(L)	0.5805	*** (24.02)	0.2605	*** (6.93)
(TZZ)	-		0.6002	*** (10.89)
(ABS_DIF)	0.0345	*** 5.4	0.0345	*** 4.04
R2	0.702		0.7759	

Nota: ***, **, *, - significancia al 1, 5% y 10% de nivel; valor de Z entre paréntesis; coeficientes estandarizados (división entre desviación estándar).

Fuente: Elaboración propia a partir de MINITAB.

El presente ajuste del modelo logit, se verifico a partir de la llamada R2 de McFadden o Pseudo R2, acotada entre 0 y 1, si bien representa un mejor ajuste conforme se acerca a 1; Ortúzar & Willumsen, (2008) mencionan que para determinar si un modelo es aceptable, los valores mayores a 0.4 se pueden considerar como un ajuste satisfactorio. En este sentido, el índice ρ^2 de MacFadden, resultó con valores mayores a 0.6881 para cada uno de los modelos 2 al 4, razón por la cual, estos se aceptan como predictivos. Por su parte el modelo 2 que considera solo variables de fuerza social, no resulta representativo.

4.4 Discusión

Se ha reportado en Allen y Shin (1978) y Zeng et al. (2017) resultados significativos en la predicción de la ocurrencia de cuasi colisiones, como un índice del potencial de accidentabilidad. La metodología abordada dentro de la presente investigación sugiere una representación más efectiva a partir de la incorporación del modelo de fuerza social reportado en Helbing y Molnar (1995), y adecuado posteriormente en Chen et al. (2019). Lo anterior con el objetivo de considerar al peatón como un individuo que interactúa y toma decisiones, lo cual genera mejores resultados al representar un comportamiento estocástico más real. Sin embargo, este tipo de análisis requiere mayor inversión en la obtención de la información y resulta de difícil ejecución sin las herramientas computacionales adecuadas para la detección automática de las condiciones de análisis durante los eventos. En este sentido, la presente investigación proporciona una simplificación de variables con asociaciones significativas para la predicción de la ocurrencia de cuasi colisiones. Estas variables continuas y categóricas han respondido significativamente para representar el comportamiento descrito por las fuerzas sociales, junto con medidas de seguridad sustantivas.

Al estimar modelos separando las teorías y metodologías consideradas, obtenemos resultados que sugieren que la construcción de la base de datos requiere de una muestra mucho mayor para predecir el comportamiento de forma más exacta, especialmente al considerar solo las variables de SSM. Si bien, la inclusión de términos como las fuerzas atractivas y repulsivas dentro de esta investigación, arrojaron mejores resultados, concordando con el reporte de Chen et al. (2019); a diferencia de su análisis, en la presente investigación una de las simplificaciones de variables más significativas resultó el TP “tipo de peatón” que realiza el cruce, así como la condición operativa DG “dirección de giro vehicular”.

La presente investigación obtuvo resultados que no concuerdan con lo reportado en Gorrini et al. (2018) y Chen et al. (2019), quienes describen al PET como la medida de seguridad sustantiva de mayor peso en términos de predicción de ocurrencia de conflictos de tránsito. Sin embargo, se detectó que al contar con muestras pequeñas como lo es el caso particular de esta investigación, las variables de la metodología de tráfico (TCT) no son suficientes para la estimación del modelo, ya que no mostraron resultados significativos sin una conjunción con las variables de fuerza social. A diferencia de los autores mencionados anteriormente, al trasladar el enfoque metodológico a un entorno urbano de economía emergente como lo es México, se detectaron que las variables de condición operativa y las variables que definen las características geométricas de la infraestructura de la intersección, como los determinantes de mayor peso para la predicción de eventos de cuasi colisión, tal como sugiere Rivera et al. (2011) y Feliciani et al. (2020).

Se concuerda con Chen et al. (2019) respecto a que los grandes ángulos de giro en las intersecciones tienden a producir un desempeño de seguridad no deseado, ya que se ha observado que los radios de giro mayores a nueve metros incrementan la probabilidad de generar movimientos de giro vehiculares ilegales en un 37%, así como se detectó una longitud circular de curva promedio de 18.33 metros en la segmentación de la muestra correspondiente a la ocurrencia de eventos en la base de datos, lo cual sugiere que la condición de una longitud de giro amplia con cruce peatonal, influye directamente en las condiciones de comodidad del peatón y en la seguridad vial de la intersección, sin embargo, se detecta en menor escala, que la distancia de visibilidad del conductor también influye de manera directa en la ocurrencia del evento en estudio.

La presente investigación aborda una comparativa entre las observaciones de movimientos de giro izquierda y derecha que anteriormente no se había realizado por los autores referidos, así como la inclusión de variables de condición operativa e infraestructura, lo cual, ha arrojado excelentes resultados en conjunción con la simplificación propuesta de variables de fuerza social. Con la simplificación ha sido posible contrastar los resultados con la literatura reportada y confirmar las hipótesis de algunos autores, como por ejemplo en Chen et al. (2019), sugieren que la gravedad de los conflictos tiende a aumentar con el aumento de las distancias y radios, especialmente en cruces con ángulos de giro mayores.

Por un lado, los resultados resaltan la importancia de considerar factores geométricos y operativos para mejorar la seguridad en cruces peatonales. Por otro lado, Gorrini et al. (2018) destaca la importancia de analizar los factores que influyen en las decisiones de los conductores con respecto al respeto del derecho de paso de peatones. En general, se subraya la complejidad de las decisiones en cruces peatonales y la necesidad de abordarlas de manera integral. En este sentido, a partir de los resultados obtenidos, recomendamos prestar especial atención a las condiciones que fomentan los cruces fuera de la fase peatonal, ya que se identificó que los peatones son el principal usuario causante de las cuasi colisiones en comparación con el vehículo.

CONCLUSIONES

Se acepta la hipótesis planteada, debido a que hay asociación estadísticamente significativa con respecto a la respuesta C “ocurrencia de cuasi colisión” y las variables: TP_3, CD, TZZ, así como las condiciones de infraestructura (LCC, L y ABS_DIF). La integración de las metodologías en la estimación del modelo presenta un enfoque prometedor para la evaluación de la seguridad en intersecciones a partir de la detección de factores de riesgo de cuasi colisión, lo que permite realizar una evaluación de cambios de diseño geométrico que contemplen algunas condicionantes detectadas que afectan el nivel de seguridad en la intersección.

El análisis de las variables determinó aquellas más representativas para la predicción del fenómeno estudiado, siendo estas: las condiciones operativas y las características de infraestructura en conjunto a la simplificación de las fuerzas sociales. Se observó que los movimientos de giro a la derecha incrementan más de un 254% la ocurrencia de una cuasi colisión respecto a los giros vuelta izquierda, debido a la amplitud del valor del radio de giro y su influencia sobre el comportamiento del peatón en su percepción de seguridad y comodidad. Los radios de giro amplios en la derecha de la ramificación en las intersecciones inducen un efecto negativo en la percepción de seguridad y comodidad del peatón, generando cambios en su dirección durante su cruce, así como una disminución de su velocidad y un aumento en la longitud (por el cambio de dirección), lo que resulta en un mayor tiempo siendo vulnerable.

Los resultados obtenidos sugieren que los mayores factores de peso en la predicción de la cuasi colisión son las condiciones operativas y de infraestructura. En este sentido, se sugiere radios de giro cortos con distancias de visibilidad amplias para disminuir la probabilidad de colisiones. Se confirma la importancia que tiene no obstaculizar el campo de visión del conductor, los triángulos de visibilidad y los ángulos de las esquinas de cruce de una intersección, resultan ser uno de los factores más importantes a considerar dentro de los criterios de diseño geométrico como medidas preventivas ante situaciones de riesgo en intersecciones.

El análisis estadístico indicó que el 95% de los eventos se presentó durante cruces peatonales fuera de su fase semafórica verde; lo cual, aunado a la conducta de riesgo de seguimiento de un peatón “líder” durante estos cruces ilegales, incrementa la probabilidad de ocurrencia de la cuasi colisión. Los eventos ocurridos entre un peatón y varios vehículos que seguían a un peatón líder, representa un 42% de los eventos registrados, seguido del 27% de eventos ocurridos entre varios peatones y un vehículo. Lo anterior refleja una situación de extremo peligro que disminuye la probabilidad de un peatón de encontrar un cambio de dirección de cruce que involucre llegar a un espacio seguro que no represente una ubicación de colisión vehicular, además de la formación de filas de espera vehicular que disminuyen el nivel de servicio de la intersección. A partir de estas observaciones se considera necesario enfocar campañas de cultura vial peatonal basada en el respeto de señalamiento, así como desarrollar infraestructura acorde a las necesidades geométricas mencionadas anteriormente, dando especial atención a la longitud circular de curva, la distancia de visibilidad y al diseño de semáforos peatonales dentro del contexto social.

Las variables seleccionadas representan una simplificación significativa que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de una cuasi colisión como un indicador de seguridad de manera práctica y sencilla, bajo diferentes condiciones geométricas y operativas, considerando las recomendaciones reportadas en Chen et al. (2019), Liu et al. (2017) y Tarko et al. (2009). Lo anterior aporta al estado del conocimiento considerando que los principales factores que influyen en la probabilidad de una cuasi colisión son las condiciones operativas y de infraestructura, haciendo especial énfasis en que las condiciones de infraestructura, como lo es el diseño geométrico de las esquinas en los cruceos son un elemento clave para incrementar la seguridad vial en las intersecciones. Por lo anterior, se propone considerar la implementación de radios de giro cortos con distancias de visibilidad amplias que respeten el diseño de proyecto en intersecciones para influir en la disminución de la ocurrencia de colisiones.

Si bien esta simplificación propuesta ha resultado significativa, para proporcionar resultados con una aplicabilidad más amplia, se recomienda como líneas de investigación futura el generar una tipificación de la “esfera privada” del peatón que permita integrar la distancia de alejamiento de los usuarios que responden a una fuerza de repulsión motivada por una aproximación vehicular, como una variable fija, considerando un estudio observacional y si es posible de detección y seguimiento de trayectoria, con la finalidad de generar una predicción del comportamiento peatonal que permita expresarse en términos de un modelo dinámico para su posterior simulación, permitiendo predecir cómo evolucionan las velocidades y direcciones, así como el considerar un mayor número y diversidad de escenarios de cruce ilegal peatonal bajo distintas características geométricas y de señalamiento. Con ello, determinar si estas fuerzas de repulsión se modifican conforme al entorno o si solo responden a una estimación de velocidad de aproximación del usuario en conflicto.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). *A policy on geometric design of highways and streets, 2011*. Washington, D.C. ISBN: 1560515082, 9781560515081
2. Alhajyaseen, K; Asano, M; & Nakamura, H. (2012). Estimation of left-turning vehicle maneuvers for the assessment of pedestrian safety at intersections. *International Association of Traffic and Safety Sciences Research*, 36(1), 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2012.03.002>
3. Alhajyaseen, K; Asano, M; Nakamura, H & Tan, M. (2013). Stochastic approach for modeling the effects of intersection geometry on turning vehicle paths. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 32, 179–192. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.09.006>.
4. Alhajyaseen, K; Asano, M & Nakamura, H. (2013). Left-turn gap acceptance models considering pedestrian movement characteristics. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.04.006>
5. Aimsun (2013). *Aimsun 7 Microsimulator API Manual 2006- 2013*. TSS-Transport Simulation Systems.
6. Archer, J; & Young, W. (2010). Signal Treatments to Reduce the Likelihood of Heavy Vehicle Crashes at Intersections: Microsimulation Modeling Approach. *Journal of Transportation Engineering*, 136 (7), 632–639. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.000012](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.000012)
7. Arlot, Sylvain; Celisse, Alain (2010). A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics Surveys*, Institute of Mathematical Statistics. 4(0). <https://doi.org/10.48550/arXiv.0907.4728>
8. Asher, L; Aresu, M; Falaschetti, E; & Mindell, J. (2012). Most older pedestrians are unable to cross the road in time: a cross-sectional study. *Age and Ageing*, 41(5), 690–694. <https://doi.org/10.1093/ageing/afs076>

9. Bandini, S; & Vizzari, G. (2016). Heterogeneous Dynamics Through Coupling Cellular Automata Models. *Cellular Automata*, Springer, Cham. (9863), 387–395. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44365-2_38.
10. Bandini, S; & Vizzari, G. (2016). Heterogeneous Dynamics Through Coupling Cellular Automata Models. *Cellular Automata*, 387–395. doi:10.1007/978-3-319-44365-2_38
11. Barceló J. (2010) *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>
12. Bargi, A; & Daniel, D. (2020). Modelling Pedestrians' Utilization of Crossing Facilities along Urban Streets. *Case Studies on Transport Policy*, (2), 593-598. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.12.004>
13. Berlanga-Silvente, V., & Vilà-Baños, R. (2014). Cómo obtener un Modelo de Regresión Logística Binaria con SPSS. *REIRE, Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 7(2), 105-118. <https://doi.org/10.1344/reire2014.7.2727>
14. Burstedde, C; Klauck, K; Schadschneider, A; & Zittartz, J. (2001). Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, (295), 507–525. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(01\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(01)00141-8)
15. Cal y Mayor, R. y Cárdenas J. (1994). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones*. Alfaomega. México.
16. Chen, P; Zeng, W; & Yu, G. (2019). Assessing right-turning vehicle-pedestrian conflicts at intersections using an integrated microscopic simulation model. *Accident Analysis & Prevention*, (129), 211–224.
17. Daamen W, Buisson C, Hoogendoorn S. (2014). *Traffic Simulation and Data. Validation Methods and Applications: Validation methods and applications*. CRC Press.
18. Dommes, A; Cavallo, V; & Oxley, J. (2013). Functional declines as predictors of risky street-crossing decisions in older pedestrians. *Accident Analysis & Prevention*, (59), 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.017>
19. Dorado, M. (2014). *Simulación de un agente enrutador de vehículos a través de un sistema basado en tiempos de viaje*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro.

20. Essa, M; Sayed, T; (2015). Transferability of calibrated microsimulation model parameters for safety assessment using simulated conflicts. *Accident Analysis & Prevention*. (84), 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.08.005>
21. Feliciani, C; Gorrini, L; Vizzari, G; Nishinari, K. & Bandini S. (2020). Calibration and validation of a simulation model for predicting pedestrian fatalities at unsignalized crosswalks by means of statistical traffic data, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, (7), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.01.004>
22. Fellendorf, M; & Vortisch, P. (2010). Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. *International Series in Operations Research & Management Science*, (145). 63–93. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6_2
23. Fernandes, P; & Coelho, C. (2017). Pedestrian and Cyclists Impacts on vehicular Capacity and Emissions at different Turbo-roundabouts layouts. *Transportation Research Procedia*, (27), 452–459. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.003>
24. García Herrero, J., Berlanga de Jesús, A., Molina López, J., Patricio Guisado, M., Luis Bustamante, Á., & Padilla, W. (2018). *Ciencia de datos: técnicas analíticas y aprendizaje estadístico*. ISBN 9788494731969
25. Gehl, J., Svarre, B. (2013). *Public Life Studies in Practice. In: How To Study Public Life*. Island Press, Washington, DC. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-525-0_6
26. Gettman, D., & Head, L. (2003). Surrogate safety measures from traffic simulation models. *Transportation Research Record*, (1), 104-115. <https://doi.org/10.3141/1840-1219>
27. Gifford, R. (2016). *Research methods for environmental psychology*. John Wiley & Sons.
28. Gorrini, A., Crociani, L., Vizzari, G., & Bandini, S. (2018). Observation results on pedestrian-vehicle interactions at non-signalized intersections towards simulation. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, (59), 269-285. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.09.016>
29. Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, (5), 4282. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>
30. Herce, M., & Vallejo, M. H. (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad: propuestas para recuperar un derecho ciudadano (Vol. 18)*. Reverté. ISBN: 978-84-291-2118-6

31. Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2019). Estadísticas a propósito del día de muertos. Datos nacionales”. Comunicado de prensa Núm. 540/19. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2019/muertos2019_Nal.pdf
32. Jesus, G. (2018). CIENCIA DE DATOS. TECNICAS ANALITICAS Y APRENDIZAJES ESTADISTICOS (1.a ed.). Alfaomega grupo editor.ATOS.
33. Liu, M; Zeng, W; Chen, P; & Wu, X; (2017). A microscopic simulation model for pedestrian and pedestrian-vehicle interactions at crosswalks. *PLoS ONE*, (7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180992>
34. Lo, R. H. (2009). Walkability: what is it?. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, (2), 145–166. doi:10.1080/17549170903092867
35. Lobjois, R; & Cavallo, V. (2007). Age-related differences in street-crossing decisions: The effects of vehicle speed and time constraints on gap selection in an estimation task. *Accident Analysis & Prevention*, (5), 934–943. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.12.013>
36. Lu, L; Ren, G; Wang, W; Chan, C; & Wang, J. (2016). A cellular automaton simulation model for pedestrian and vehicle interaction behaviors at unsignalized mid-block crosswalks. *Accident Analysis & Prevention*, (95), 425–437. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.014>
37. Matos, N; Adellán, V; Aguilar, M; González, P; & Perén, J. (2021). *Estudio de la movilidad peatonal en dos intersecciones de la avenida Manuel E. Batista–Calle José de Fábrega-Vía España*. SusBCity, (1), 7-14. ISSN L 2710-7426
38. Molan, A. M., Hummer, J. E., & Ksaibati, K. (2019). Modeling safety performance of the new super DDI design in terms of vehicular traffic and pedestrian. *Accident Analysis & Prevention*, (127), 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.03.008>
39. Organización Mundial de la Salud [OMS] y Banco Mundial [BM] (2004). Informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito. Publicación científica y técnica No.599.

<https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/726/92%2075%2031599%20X.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

40. Ortúzar, J; & Willumsen, L. (2008). *Modelos de transporte*. Ediciones de la Universidad de Cantabria, (1). Santander. ISBN: 978-84-8102-512-5
41. Peng, C; & Chou, I. (2011). Simulation of pedestrian flow through a “T” intersection: A multi-floor field cellular automata approach. *Computer Physics Communications*, (1), 205–208. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2010.07.035>
42. Pérez, L; Delegido, J; Rivera, J; Verrelst, J. (2015). Análisis de métodos de validación cruzada para la obtención robusta de parámetros biofísicos. *Revista de Teledetección, España*.
43. Rivera, J; Botasso, G; Villanueva, M & Brizuela, L. (2011). Aplicación de un caso en argentina de análisis de la seguridad vial mediante microsimulación de una travesía urbana saber. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, (1), 43-50. ISSN: 1315-0162
44. Secretaría de Comunicación y Transportes. (2018) *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018*, 3ra Edición. México.
45. Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT. (2019). NOM-107-SCT3-2019
46. Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT. (2018). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras 2018*. 3ra Edición.
47. Tan, M; Alhajyaseen, K; Asano, M; & Nakamura, H. (2012). Development of Microscopic Traffic Simulation Model for Safety Assessment at Signalized Intersections. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1), 122–131. <https://doi.org/10.3141/2316-14>
48. Tarko, A; Davis, G; Saunier, N; Sayed, T; & Washington, S. (2009). Surrogate measures of safety white paper. Subcommittee on Surrogate Measures of Safety and Committee on Safety Data Evaluation and Analysis. *Transportation Research Board*, Washington D.C.
49. Teknomo, K. (2006). Application of microscopic pedestrian simulation model. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, (1), 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2005.08.006>

50. Vidal, R. (2007), Aplicación de modelos de microsimulación en la ingeniería de tránsito, *Revista Vial*, (46), 82-85. ISSN 0329-1146
51. Webb, D; & Weber, J. (2003). Influence of Sensory Abilities on the Interpersonal Distance of the Elderly. *Environment and Behavior*, (5), 695–711. <https://doi.org/10.1177/0013916503251473>
52. Wu, J; Radwan, E; & Abou-Senna, H. (2017). Determination if VISSIM and SSAM could estimate pedestrian-vehicle conflicts at signalized intersections. *Journal of Transportation Safety & Security*, (6), 572–585. doi:10.1080/19439962.2017.1333181
53. Zeng, W; Chen, P; Nakamura, H; Iryo-Asano, M; (2014). Application of social force model to pedestrian behavior analysis at signalized crosswalk. *Transport Research part C: Emerging technologies*, (40), 143–159. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.007>
54. Zeng, W; Chen, P; Yu, G; Wang, Y; 2017. Specification and calibration of a microscopic model for pedestrian dynamic simulation at signalized intersections: a hybrid approach. *Transport Research part C: Emerging technologies*, (80), 37–70. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.04.009>

ANEXOS

ANEXO 1.



QUERÉTARO, QRO
30 SEPTIEMBRE 2021

M. EN I. GERARDO RIOS QUEZADA
DIRECTOR DE GESTIÓN PARA LA MOVILIDAD
PRESENTE

Por medio del presente le envío un cordial saludo y derivado de las funciones y facultades con las que cuenta la Dirección que dignamente dirige y el mutuo apoyo que se ha brindado entre la Secretaría de Movilidad y la Universidad Autónoma de Querétaro, solicito de su valioso apoyo, para proporcionar la obtención de las grabaciones recabas por las cámaras 360° ubicadas en las intersecciones de semaforización mencionadas a continuación:



- Calle. Tecnológico y Av. Constituyentes
- Calle. Ezequiel Montes y Av. Constituyentes
- Prol. Corregidora y Av. Constituyentes
- Calle Luis Pasteur y Av. Constituyentes

No omito mencionar que de ser necesario asistir a las instalaciones de la Secretaría de Movilidad para el trabajo y obtención de dichas grabaciones que constarán de una semana como mínimo por intersección en horarios de flujo de máxima demanda, se cuenta con la disponibilidad de acudir a las instalaciones, así como proporcionar los recursos materiales necesarios, a fin de no consumir del tiempo del personal adscrito a su Dirección destinado a sus actividades diarias.

Lo anterior con el objetivo de llevar a cabo la investigación correspondiente a la tesis de maestría en Vías Terrestres y Movilidad titulada "Estimación y simulación de un modelo de comportamiento peatón-vehículo en intersecciones semaforizadas", como parte fundamental para la obtención de grado y finalización de mi beca CONACYT, asegurando que la información y grabaciones

ANEXO 2.

U	INT	R	MV	DV	PR	DV	RE	ABS	DIF	DV	DIF	DV	DRG	DG	FV	TV	VV	TZZ	TPC	L	PET	VP	TP	TP_1	TP_2	TP_3	AC	CD	BC	FC	DP	C	
0	1	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	D2	16.7	0	1.39	0	0	0	0	0	1	1	0	0		
0	1	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	D2	16.7	0	1.39	0	0	0	0	0	1	1	0	0		
0	1	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	D2	16.7	0	1.158333333	0	0	0	0	0	1	1	0	0		
0	1	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	D2	16.7	0	1.158333333	0	0	0	0	0	1	1	0	0		
0	1	P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	D2	16.7	0	1.544444444	0	0	0	0	0	1	1	0	0		
0	0	P	E	14	0	0	0	0	0	0	0	0	1.570796327	0	1	1	1.570796327	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	C	N	1	80	7.12	72.88	-72.88	11.3332955	1	1	2	5.66647749	7	B1	18	0.011912641	3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1		
0	0	C	N	1	80	7.12	72.88	-72.88	11.3332955	1	1	2	5.66647749	7	B1	18	0.011904762	3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1		
0	0	C	N	1	80	7.12	72.88	-72.88	11.3332955	1	1	3	3.777765166	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	C	N	1	80	7.12	72.88	-72.88	11.3332955	1	1	2	5.66647749	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	C	N	1	80	7.12	72.88	-72.88	11.3332955	1	1	1	11.3332955	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	0	25	0.981224105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	0	14	1.752185903	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	0	5	4.906120527	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	0	5	4.906120527	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	0	3	8.176867546	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	0	55	0.446010957	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	0	13	1.886969434	7	DD2	16.7	0.014950761	3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	1	5	4.906120527	10	D2	16.7	0.014910714	2	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
0	0	P	N	1	80	14.2	65.8	-65.8	24.53060264	1	1	2	12.26530132	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	P	S	8	80	29.17	50.83	-50.83	9.974556675	1	1	3	3.324852225	10	BD2	14.5	0.012521589	2	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
0	0	P	S	8	80	29.17	50.83	-50.83	9.974556675	1	1	2	4.987278338	6	BD2	14.5	0.012510785	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
0	0	P	E	11	80	16.6	63.4	-63.4	15.15294857	1	1	4	3.788237141	6	CD1	9	0.007751938	3	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	
0	0	P	E	11	80	16.6	63.4	-63.4	15.15294857	1	1	4	3.788237141	6	CD1	9	0.007745267	3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
0	0	C	S	8	80	23.06	56.94	-56.94	19.0747034	1	1	2	9.537351698	10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	C	S	8	80	23.06	56.94	-56.94	19.0747034	1	1	2	9.537351698	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	C	S	8	80	23.06	56.94	-56.94	19.0747034	1	0	4	4.768675849	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	8	CD1	11.1	0.005996759	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	8	CD1	11.1	0.005993521	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	6	3.362376804	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	7	C1	11.1	0.005980603	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	5	4.034852165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	64.45	-64.45	20.17426082	1	1	4	5.043565206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	C	E	11	80	15.55	6																										

GLOSARIO

Con el objeto de comprender el análisis del control de intersecciones con semáforo y en los requisitos para la distribución de sus tiempos, Reyes, M. y Cárdenas, J. (1994) recomiendan precisar algunos términos básicos o parámetros de tiempo, para prevenir posibles confusiones:

1. Indicación de señal: Es el encendido de una de las luces del semáforo o una combinación de varias luces al mismo tiempo.
 2. Ciclo o longitud de ciclo: Tiempo necesario para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.
 3. Movimiento: Maniobra o conjunto de maniobras de un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila.
 4. Intervalo: Cualquiera de las diversas divisiones del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones de señal del semáforo.
 5. Fase: Parte del ciclo asignada a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos. Es la selección y ordenamiento de movimientos simultáneos. Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que ganan. Un movimiento pierde el derecho de paso al aparecer la indicación amarilla.
 6. Secuencia de fases: Orden predeterminado en que ocurren las fases del ciclo.
 7. Reparto: Porcentaje de la longitud del ciclo asignado a cada una de las diversas fases.
 8. Intervalo todo rojo: Tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito que se prepara a circular. Es utilizado en la fase que recibe el derecho de paso después del amarillo de la fase que lo pierde, con el fin de dar un tiempo adicional que permita a los vehículos, que pierden el derecho de paso, despejar la intersección antes de que los vehículos, que lo ganan, reciban el verde. Se aplica sobre todo en aquellas intersecciones que sean excesivamente anchas. También puede ser utilizado para crear una fase exclusiva para peatones.
- Longitud circular de curva: Distancia efectiva circular correspondiente a la trayectoria de giro vehicular.