Modelo empírico de aceleración aplicable al cálculo de velocidad en intersecciones urbanas con evidencia limitada*

An Empirical Acceleration Model for Speed Calculation at Urban Intersections with Limited Evidence

Modelo empírico de aceleração aplicável ao cálculo de velocidade em interseções urbanas com evidência limitada

Juan Francisco Higuera Cruz[1], Andrea Burbano[2], Eduardo Emilio Campbell[3], Raúl Motta Carrera[4] y Rommy Schnaider Cano[5]

DOI: https://doi.org/10.47741/17943108.861

Cómo citar/How to Cite/Como citar: Higuera, J., Burbano, A., Campbell, E., Motta, R. y Cano, R. (2026). Modelo empírico de aceleración aplicable al cálculo de velocidad en intersecciones urbanas con evidencia limitada. *Revista Criminalidad, 68*(2): 227-244. https://doi.org/10.47741/17943108.861

- Fecha de recepción: 2025/01/22
- Evaluation date: 2026/04/15

Resumen Este artículo presenta los principales resultados de una investigación orientada a estimar valores empíricos estándar de aceleración para vehículos livianos y motocicletas que inician su desplazamiento desde el reposo en intersecciones reales de tránsito urbano, con aplicabilidad directa en el análisis técnico y pericial. La metodología se basó en el registro de trayectorias mediante videograbación aérea con vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) y en el análisis cinemático fotograma a fotograma mediante el software Tracker®, técnica previamente validada en estudios de dinámica vehicular y análisis forense. Se procesaron 58

* El presente artículo es producto de la monografía titulada "*Estimación del valor de aceleración estándar de vehículos livianos y motocicletas en intersecciones aplicable al esclarecimiento de hechos de tránsito*", desarrollada como requisito para optar al título de Magíster en Investigación Criminal en la Escuela de Investigación Criminal de la Dirección de Educación Policial de la Policía Nacional de Colombia.

Open Access | Diamond Open Access | CC BY-NC-ND 4.0© por Policía Nacional de Colombia

1. Magíster en Investigación Criminal. Centro de Investigación Forense y Tecnología del Tránsito. Bogotá, D.C., Colombia. jhiguera@ciftt.com
2. Doctora en Estudios Territoriales. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá, D.C., Colombia. amburbano@universidadmayor.edu.co
3. Especialista en Investigación Forense. Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses. Ciudad de Panamá, Panamá. campbell.204@hotmail.com
4. Licenciado en Ciencias de Policía. Policía Nacional del Perú. Lima, Perú. rmottac@policia.gob.pe
5. Magíster en Ingeniería. Independiente. Palmira, Valle – Colombia. laboratoriolainci@gmail.com

054 datos válidos correspondientes a 320 vehículos registrados en Colombia, Perú y Panamá, bajo un protocolo experimental unificado. Tras la depuración de valores extremos mediante percentiles, se obtuvo una aceleración promedio de 0.8943 m/s² para vehículos livianos y de 1.2509 m/s² para motocicletas. Los resultados evidencian patrones consistentes de aceleración en condiciones reales de tránsito urbano y constituyen una referencia empírica robusta para el modelado cinemático en estudios técnicos y periciales desarrollados en intersecciones. Esto sustenta la importancia de contar con datos empíricos confiables en la física forense aplicada al análisis de hechos de tránsito, especialmente en escenarios en los que la evidencia resulta insuficiente o inexistente para alimentar modelos cinemáticos.

Palabras clave
Aceleración vehicular; Estimación de velocidad; Intersecciones urbanas; Reconstrucción de accidentes de tránsito; Análisis cinemático; Vehículos aéreos no tripulados (UAV).

Abstract

This article presents the main results of a study aimed at estimating standard empirical acceleration values for light vehicles and motorcycles starting from a standstill at real urban traffic intersections, with direct applicability to technical and forensic analysis. The methodology was based on trajectory recording using aerial video footage from unmanned aerial vehicles (UAVs) and frame-by-frame kinematic analysis using Tracker® software, a technique previously validated in vehicle dynamics studies and forensic analysis. A total of 58,054 valid data points from 320 vehicles registered in Colombia, Peru, and Panama were processed under a unified experimental protocol. After removing extreme values using percentiles, an average acceleration of 0.8943 m/s² was obtained for light vehicles and 1.2509 m/s² for motorcycles. The results demonstrate consistent acceleration patterns under real urban traffic conditions and provide a robust empirical reference for kinematic modeling in technical and expert studies conducted at intersections. This underscores the importance of having reliable empirical data in forensic physics applied to traffic accident analysis, especially in scenarios where evidence is insufficient or nonexistent to feed kinematic models.

Keywords
Vehicle acceleration; Speed estimation; Urban intersections; Traffic crash reconstruction; Kinematic analysis; Unmanned aerial vehicles (UAV).

Resumo

Este artigo apresenta os principais resultados de uma investigação destinada a estimar valores empíricos padrão de aceleração para veículos ligeiros e motociclos que iniciam o seu deslocamento a partir do repouso em cruzamentos reais de tráfego urbano, com aplicabilidade direta na análise técnica e pericial. A metodologia baseou-se no registo de trajetórias através de gravação aérea com veículos aéreos não tripulados (UAV, na sigla em inglês) e na análise cinemática fotograma a fotograma utilizando o software Tracker®, técnica previamente validada em estudos de dinâmica veicular e análise forense. Foram processados 58 054 dados válidos correspondentes a 320 veículos registados na Colômbia, no Peru e no Panamá, ao abrigo de um protocolo experimental unificado. Após a eliminação de valores extremos por meio de percentis, obteve-se uma aceleração média de 0,8943 m/s² para veículos ligeiros e de 1,2509 m/s² para motociclos. Os resultados evidenciam padrões consistentes de aceleração em condições reais de tráfego urbano e constituem uma referência empírica robusta para a modelação cinemática em estudos técnicos e periciais realizados em cruzamentos. Isto reforça a importância de dispor de dados empíricos fiáveis na física forense aplicada à análise de acidentes de trânsito, especialmente em cenários em que as provas são insuficientes ou inexistentes para alimentar modelos cinemáticos.

Palavras-Chave
Aceleração dos veículos; Estimativa da velocidade; Cruzamentos urbanos; Reconstituição de acidentes de trânsito; Análise cinemática; Veículos aéreos não tripulados (UAV).

Introducción

En el ámbito de la reconstrucción de accidentes de tránsito, resulta indispensable el planteamiento metodológico de hipótesis sustentadas en los elementos materiales probatorios y en la evidencia física disponible. Su propósito es determinar de manera confiable las causas determinantes y contribuyentes que explican la ocurrencia del evento vial (Fricke y Baker, 2012; Daily et al., 2016). Dentro de este proceso adquiere especial relevancia el cálculo de magnitudes físicas, particularmente la velocidad del móvil o de los móviles involucrados en la colisión. Para ello, se emplean diversos modelos físicos, incluidas formulaciones de la física clásica basadas en los principios de trabajo y energía cinética, así como modelos empíricos desarrollados específicamente para el análisis de accidentes. Entre estos se encuentran los modelos de atropello propuestos por Searle y Happer, o la estimación de velocidad en motocicletas a partir del acortamiento de la distancia entre ejes (Searle, 1983; Happer et al., 2009; Peck et al., 2017; Rose y Neale, 2018).

En el caso particular de las intersecciones, debe considerarse que una de las vías presenta prelación sobre la otra. Esta condición puede estar regulada mediante señalización vertical de pare, señalización horizontal —línea de pare—, control semafórico o jerarquía funcional de las vías objeto de análisis, conforme a la normativa de tránsito vigente (Ministerio de Transporte, 2002; American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO], 2018). En este tipo de accidentes suelen configurarse dos escenarios cinemáticos principales. En el primero, el vehículo que no posee la prelación se aproxima a la intersección a una velocidad constante, que en el contexto colombiano se encuentra limitada a 30 km/h, según lo dispuesto en el artículo 74 del Código Nacional de Tránsito. En el segundo, dicho vehículo se detiene antes de la intersección e inicia su desplazamiento desde el reposo, condición que introduce la aceleración como variable crítica para el análisis posterior (Fricke y Baker, 2012; Daily et al., 2016).

Cuando la evidencia física directa es inexistente, limitada o no confiable, situación frecuente en intersecciones urbanas caracterizadas por alta interacción entre actores viales, la reconstrucción analítica no puede apoyarse en métodos tradicionales basados en desaceleración posterior al impacto. Esto obliga a inferir la velocidad a partir del proceso previo de aceleración (Daily et al., 2016; Rose, 2022). Sin embargo, el uso de valores de aceleración provenientes de fichas técnicas o ensayos de desempeño máximo introduce sesgos significativos, al no representar el comportamiento real de los conductores en condiciones normales de tránsito. La literatura científica recolectada y analizada mediante la metodología de los Elementos de Informe Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis (PRISMA, por sus siglas en inglés), correspondiente a un universo documental final de $n = 25$ publicaciones, evidencia que, pese a la existencia de una amplia bibliografía relacionada con la investigación y reconstrucción de accidentes de tránsito, así como con metodologías alternativas de medición y análisis de la dinámica vehicular, solo un número reducido de estudios aborda de manera directa la aceleración vehicular como variable principal.

Los trabajos identificados se han desarrollado mayoritariamente en entornos controlados o experimentales, por lo que persiste una limitación significativa de investigaciones basadas en observación directa en escenarios reales de tránsito, particularmente en intersecciones y en maniobras de

arranque desde reposo (Happer et al., 2009; Fugger et al., 2005; Scanlon et al., 2018). Adicionalmente, la aplicabilidad de dichos estudios a las ecuaciones cinemáticas empleadas en la reconstrucción de accidentes no resulta clara cuando se pretende su uso generalizado en hechos ocurridos dentro de intersecciones, dado que sus resultados responden a condiciones experimentales específicas o a contextos tecnológicos de acceso limitado. En consecuencia, pese a la existencia de investigaciones previas, el análisis del corpus documental evidencia una brecha metodológica consistente que justifica el desarrollo del presente estudio empírico, orientado a establecer valores estándar de aceleración obtenidos en condiciones reales de tránsito, con aplicabilidad directa en la reconstrucción forense de accidentes, el análisis cinemático y la evaluación objetiva de la evitabilidad del hecho. Por lo anterior, se consideró importante llevar a cabo un estudio en el que se consoliden valores empíricos de aceleración estándar aplicables al análisis cinemático en intersecciones urbanas. Con ello, se aporta un insumo técnico replicable y sustentado estadísticamente, que contribuye al fortalecimiento metodológico de la física forense aplicada al esclarecimiento de hechos de tránsito.

Metodología

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, aplicado, con diseño experimental y alcance descriptivo-comparativo (Hernández Sampieri et al., 2014). La población se definió operativamente como el flujo vehicular urbano que inicia el cruce de intersecciones desde una velocidad inicial de 0.0 km/h, considerando como unidad de análisis el conjunto vehículo-conductor. Se analizaron 320 vehículos en tres países: 201 vehículos livianos —automóviles, camperos y camionetas— y 119 motocicletas, registrados en intersecciones urbanas principalmente semaforizadas en Colombia (Bogotá y Palmira), Perú (Lima) y Panamá (Ciudad de Panamá). La selección fue no probabilística y se basó en vehículos ubicados en primera fila de cruce, con trayectorias continuas, minimizando interferencias externas y garantizando condiciones de arranque comparables. Las observaciones se realizaron en condiciones homogéneas: calzadas rectas, planas, sin pendiente y con tráfico fluido.

La recolección se realizó mediante observación estructurada, no participante y encubierta, empleando videograbación aérea en vuelo estacionario sobre intersecciones preseleccionadas con características similares: seis en Colombia, dos en Perú y dos en Panamá. Se utilizaron vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) de distintos modelos: Autel Nano Plus, Autel EVO Lite Plus, DJI Mavic Pro Zoom 2 y Phantom IV Pro V2. Además, se estandarizó la captura mediante una ficha técnica de vuelo organizada en cinco dimensiones: geometría vial, UAV y carga útil, normatividad y operador, condiciones meteorológicas y condiciones de vuelo. Este procedimiento permitió controlar variables operativas del entorno y asegurar la repetibilidad del método entre ciudades y operadores. Los videos se procesaron con Tracker® mediante seguimiento fotograma a fotograma, con el fin de extraer tiempo, distancia y velocidad, así como calcular la aceleración por tramo. La técnica se sustentó en una validación previa del procedimiento frente a un acelerómetro VC4000, con diferencias promedio inferiores al 5% (Higuera Cruz et al., 2022).

Con el fin de asegurar la validez interna del estudio, se establecieron supuestos operativos y criterios de control orientados a reducir la influencia de variables externas no observables propias

del tránsito urbano real. En particular, se asumió que el comportamiento de aceleración registrado durante el arranque desde reposo refleja una combinación de factores perceptivos, contextuales y mecánicos, más que un desempeño máximo del vehículo. Por esta razón, se descartaron escenarios con pendientes longitudinales, maniobras evasivas, interrupciones del flujo vehicular o interferencias directas de peatones u otros vehículos durante los primeros instantes del cruce. Asimismo, la selección exclusiva de vehículos ubicados en primera fila de detención permitió estandarizar el estímulo de arranque, asociado al cambio de fase semafórica o a la liberación del cruce, reduciendo la variabilidad inducida por tiempos de reacción diferidos. El diseño observacional adoptado reconoce explícitamente sus limitaciones, en tanto no permite el control experimental de variables individuales como la experiencia del conductor, el estado del vehículo o la carga transportada. Sin embargo, esta misma característica constituye una fortaleza del estudio, al capturar el comportamiento real del tránsito urbano bajo condiciones habituales de circulación. En este sentido, el enfoque metodológico privilegia la representatividad empírica sobre la precisión experimental, criterio ampliamente aceptado en investigaciones forenses y estudios de dinámica vehicular basados en observación indirecta (Warner et al., 1983; Fugger et al., 2005).

Para el desarrollo del procedimiento, se realizó el vuelo estacionario del vehículo aéreo no tripulado a una altura comprendida entre 30 y 40 metros sobre el nivel de la calzada. Esta altura fue seleccionada en función del tamaño, la configuración geométrica y la complejidad operativa de cada intersección. Además, permitió garantizar un campo visual suficiente para observar en vista cenital, de manera continua y sin interferencias, la geometría completa del cruce, incluyendo el trazado longitudinal y transversal de la calzada, la totalidad de carriles de circulación que la conforman y las trayectorias seguidas por los vehículos durante su desplazamiento. Asimismo, la posición elevada del UAV facilitó la minimización de distorsiones por perspectiva y redujo la probabilidad de ocultamientos parciales de los vehículos, causados por otros actores viales o elementos del entorno.

Una vez en posición, se activó la grabación de los vehículos detenidos durante la fase de luz roja del semáforo, con el propósito de asegurar la captura íntegra del arranque desde el reposo y del desplazamiento inicial de los vehículos al momento de habilitarse el tráfico. En este proceso se priorizó la observación de, al menos, la primera línea de vehículos detenidos, seleccionando exclusivamente aquellos que no presentaran vehículos delante que pudieran interferir con su libre aceleración. De este modo, el comportamiento dinámico registrado correspondió a un desplazamiento continuo no condicionado por obstrucciones externas. La captura del material audiovisual se realizó durante el cruce completo de la primera línea de vehículos a través de la intersección, lo que permitió registrar de manera continua el movimiento desde el instante inicial de arranque hasta la finalización del cruce. Cada archivo de video obtenido fue procesado de forma independiente mediante el software Tracker®, garantizando la trazabilidad individual de los datos asociados a cada vehículo analizado.

Para el procesamiento de los videos, cada archivo se cargó en el software y se definió una vara de calibración, correspondiente a una medición real efectuada previamente en el terreno, como el ancho de la calzada, la demarcación de carril u otro elemento geométrico claramente identificable. Este procedimiento permitió establecer la relación entre píxeles y unidades métricas reales, asegurando la correcta escala espacial de las imágenes analizadas. Posteriormente, se definió el eje de seguimiento de píxeles, orientado preferentemente de forma horizontal, alineado con el eje longitudinal de la

calzada y con la dirección de desplazamiento de los vehículos. A continuación, se seleccionó el punto de seguimiento utilizado por el software para el rastreo automático, correspondiente a un píxel o a un conjunto reducido de píxeles representativos del vehículo, que permanecieran visibles y consistentes durante todo el desplazamiento. Entre estos puntos se consideraron el casco del motociclista, un espejo retrovisor, una farola o segmentos con alto contraste cromático. Esta selección permitió al programa realizar el seguimiento fotograma a fotograma con adecuada precisión.

A partir del seguimiento realizado, se extrajo la información correspondiente a las variables cinemáticas de interés —tiempo, distancia recorrida y velocidad—, las cuales fueron exportadas y organizadas en una hoja de cálculo para su procesamiento posterior. Con base en estos datos, se calculó la aceleración por tramo mediante ecuaciones fundamentales de la cinemática del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Así, se obtuvieron registros individuales por vehículo, que posteriormente fueron sometidos a los procedimientos de depuración y análisis estadístico descritos en las secciones siguientes. Con el fin de ilustrar el procedimiento de extracción y cálculo de variables cinemáticas, en las Tablas 1 y 2 se presenta un ejemplo representativo de los datos obtenidos mediante seguimiento fotograma a fotograma para una motocicleta y un vehículo liviano, respectivamente. En dichas tablas se observa la información de tiempo, posición y velocidad, así como el cálculo de la aceleración a partir de la relación entre la variación del cuadrado de la velocidad y la distancia recorrida.

Tabla 1. Ejemplo de cálculo de aceleración en motocicleta mediante análisis fotograma a fotograma

Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s²)
0.06	3.20	0.03	0.28
0.13	3.19	0.08	3.28
0.16	3.20	0.09	0.62
0.36	3.20	0.11	0.58
0.40	3.20	0.11	0.00
0.43	3.21	0.16	3.08
0.50	3.21	0.16	2.76
0.53	3.22	0.23	2.15
0.60	3.23	0.28	2.96
0.63	3.25	0.37	2.40

Las variaciones observadas en la Tabla 1 corresponden a la sensibilidad del cálculo en intervalos de desplazamiento muy reducidos, característica propia del análisis fotograma a fotograma en trayectorias con baja velocidad inicial.

Tabla 2. Ejemplo de cálculo de aceleración en vehículo liviano mediante análisis fotograma a fotograma

Tiempo (s)	Posición (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s²)
0.03	0.84	1.70	3.10
0.06	0.90	1.81	2.96
0.10	0.96	1.89	2.95
0.13	1.01	1.98	2.98
0.16	1.08	2.08	3.03
0.20	1.14	2.17	3.00
0.23	1.21	2.27	2.95
0.26	1.29	2.35	2.90
0.30	1.37	2.44	2.85
0.33	1.45	2.52	2.78

La aceleración se calculó a partir de las variables cinemáticas extraídas mediante Tracker® —tiempo, posición y velocidad—, empleando la siguiente relación:

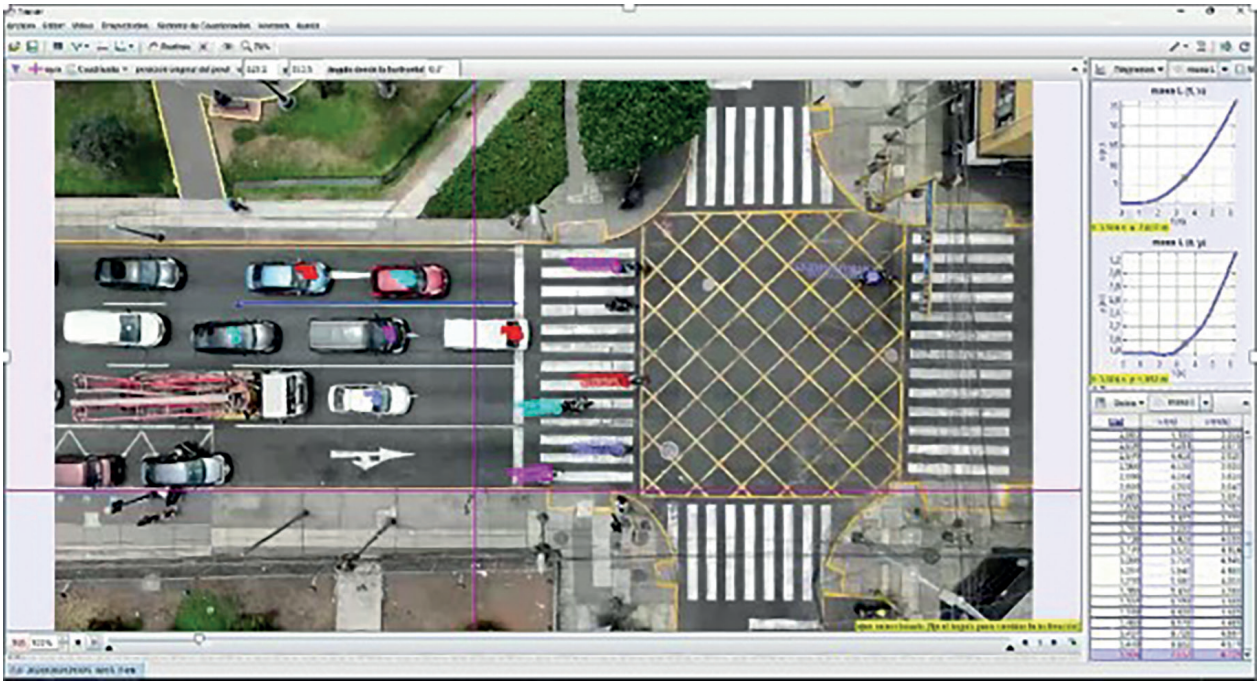
Ecuación 1

Relación cinemática para el cálculo de la aceleración

$$a = \frac{v_f^2 - v_i^2}{2\mathrm{d}}$$

Esta ecuación se deriva de las expresiones del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. El cálculo se aplicó sobre tramos consecutivos de desplazamiento, con lo cual se obtuvieron valores de aceleración representativos del comportamiento dinámico durante el arranque desde reposo.

Figura 1. Captura del software Tracker® de la metodología por medio de la cual se realizó la captura de los datos



El análisis consistió en procesos de depuración de datos y estadística descriptiva, orientados a garantizar la consistencia y estabilidad de los resultados. Se excluyeron aquellos fotogramas en los que los vehículos permanecían estáticos durante la fase de luz roja del semáforo, así como los registros que presentaban valores de aceleración fuera de rangos físicamente plausibles. En este sentido, se consideraron únicamente aceleraciones comprendidas entre 0.09 m/s^2 y 3.00 m/s^2. Adicionalmente, en el conjunto de vehículos livianos de Perú se eliminaron los segmentos correspondientes a fases de desaceleración posteriores al arranque, con el fin de conservar únicamente el comportamiento asociado al inicio progresivo del movimiento.

Estos criterios de depuración permitieron reducir la influencia de errores de seguimiento, variaciones transitorias y comportamientos no representativos del arranque urbano típico. Posteriormente, se calcularon medias individuales para cada uno de los vehículos analizados y, a partir de estas, se obtuvieron los parámetros estadísticos globales del conjunto de datos: media, mediana, desviación estándar y error estándar. Finalmente, se construyeron modelos parciales por país y un modelo unificado por tipo de vehículo mediante el uso de media ponderada, con el propósito de preservar la representatividad empírica del total de observaciones analizadas.

Resultados

Descripción del conjunto de datos

El conjunto final de datos estuvo compuesto por 58.054 registros válidos de aceleración, obtenidos a partir del seguimiento de 320 vehículos en intersecciones urbanas reales de tres países de América Latina. De este total, 201 correspondieron a vehículos livianos, automóviles, camperos y camionetas, y 119 a motocicletas. Todas las observaciones se realizaron bajo condiciones homogéneas: calzadas planas, trayectorias rectilíneas, ausencia de pendiente, flujo vehicular continuo y arranque desde reposo, con velocidad inicial de 0.0 km/h. Este procedimiento se desarrolló de acuerdo con protocolos de observación no intrusiva ampliamente aceptados en estudios de dinámica vehicular urbana (Happer, 2012), lo que permitió asegurar la comparabilidad de los datos y la consistencia estadística del análisis realizado.

Tabla 3. Cantidad de vehículos registrados según país y tipo de vehículo

País	Tipo	No. Vehículos
Colombia	Automóviles	65
Colombia	Motocicletas	89
Perú	Automóviles	89
Perú	Motocicletas	30
Panamá	Automóviles	47

La distribución de vehículos por país fue la siguiente: Colombia aportó 65 vehículos livianos y 89 motocicletas; Perú, 89 vehículos livianos y 30 motocicletas; y Panamá, 47 vehículos livianos. Durante las jornadas de captura en Ciudad de Panamá no se registraron motocicletas, por lo que este grupo no fue incluido en el análisis comparativo para dicho país. El número de registros válidos por vehículo dependió de la duración de cada trayectoria y de la resolución temporal del análisis fotograma a fotograma realizado mediante Tracker®, herramienta validada previamente para mediciones cinemáticas en campo (Bezerra Jr. et al., 2012; Higuera, 2022).

Estadísticos descriptivos de la aceleración

Una vez depurados los datos iniciales, se calcularon medidas descriptivas de tendencia central y dispersión para cada tipo de vehículo y país. En el caso de los vehículos livianos, los valores medios de aceleración se situaron entre 0.94 y 0.97 m/s^2, mientras que las motocicletas presentaron valores medios superiores, coherentes con patrones observados previamente en estudios empíricos de aceleración en intersecciones urbanas (Happer, 2009, 2012). Los modelos unificados iniciales evidenciaron una dispersión considerable, con desviaciones estándar de 0.4232 m/s^2 para vehículos

livianos y 0.5299 m/s² para motocicletas. Esta variabilidad es consistente con la naturaleza no controlada del tránsito urbano real, tal como ha sido reportado en investigaciones previas basadas en análisis de video y observación directa (Fugger et al., 2005).

Figura 2. Cantidad de vehículos livianos y motocicletas captados en video sometidos a análisis de seguimiento de pixeles

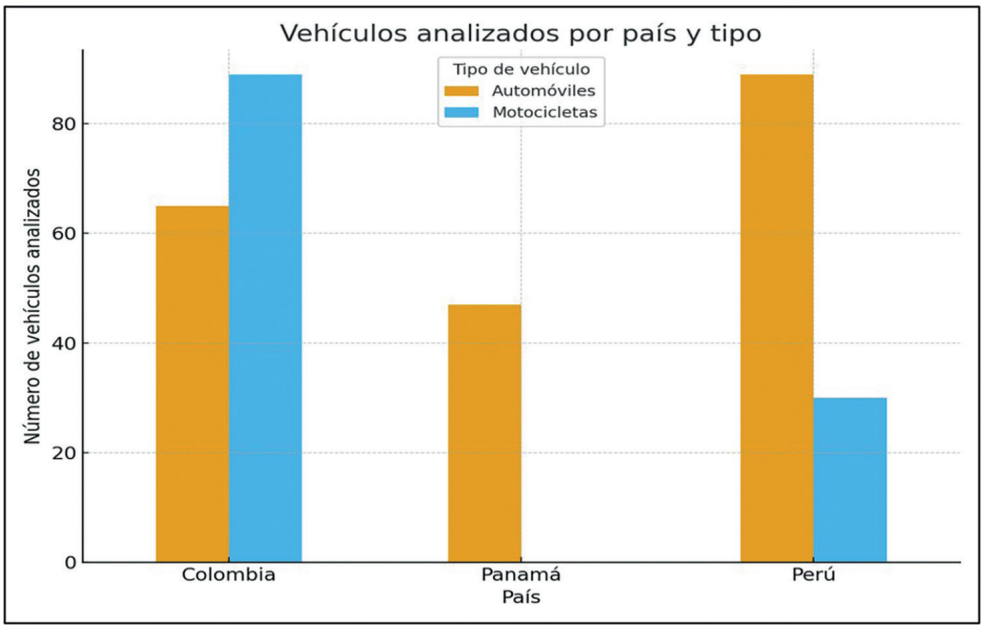
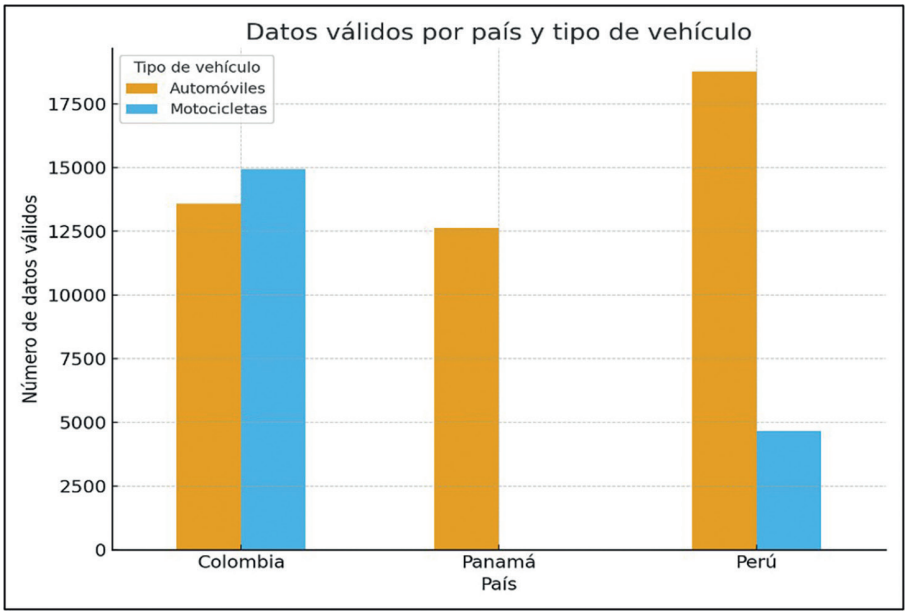


Figura 3. Cantidad de datos recolectados por cada vehículo mediante seguimiento de pixeles por medio de software Tracker® para análisis estadístico



Comparación de resultados por país

El análisis comparativo entre países mostró diferencias absolutas mínimas en los valores promedio de aceleración. Para los vehículos livianos, la diferencia máxima entre medias nacionales fue inferior a 0.033 m/s². En el caso de las motocicletas, la diferencia entre Colombia y Perú fue inferior a 0.06 m/s². Esta consistencia sugiere patrones de aceleración comparables en contextos urbanos latinoamericanos, en concordancia con lo observado por Happer (2012) en escenarios urbanos de Norteamérica.

Modelos unificados de aceleración

Con el objetivo de mejorar la estabilidad numérica y la aplicabilidad de los resultados, se construyeron modelos unificados por tipo de vehículo. Se evaluaron dos aproximaciones: un modelo agregado original y un modelo depurado mediante la exclusión de valores extremos ubicados fuera de los percentiles 5 y 95, técnica comúnmente empleada para reducir la influencia de observaciones atípicas en distribuciones empíricas de tránsito (Warner et al., 1983). Los modelos depurados conservaron el 90 % central de la distribución empírica y permitieron reducir significativamente la dispersión sin alterar la tendencia central de los datos:

- *Motocicletas:* 17 553 registros filtrados

  Media = 1.2509 m/s²

  Desviación estándar = 0.4139 m/s²

  Error estándar = 0.0031 m/s²

  Vehículos livianos: 40 501 registros filtrados

  Media = 0.8943 m/s²

  Desviación estándar = 0.3175 m/s²

  Error estándar = 0.0016 m/s²

Las diferencias entre las medias del modelo original y del modelo depurado fueron inferiores al 2%, lo que confirma que el filtrado por percentiles reduce la dispersión sin modificar el comportamiento promedio observado.

Dispersión y robustez del modelo

Las regresiones lineales aplicadas sobre los promedios individuales de aceleración por vehículo arrojaron coeficientes de determinación bajos. En motocicletas se obtuvieron valores de R^2 de 0.1136 para Colombia y 0.0476 para Perú. En vehículos livianos, los valores de R^2 oscilaron entre 0.0103 y 0.0155, según el país. Estos resultados indican la ausencia de patrones sistemáticos asociados a características individuales de los vehículos, lo cual es consistente con estudios previos en los que la aceleración urbana se comporta como una variable distribuida sin tendencia lineal dominante (Fugger et al., 2005).

Comparación con datos de desempeño de fabricantes

Los valores de aceleración reportados en fichas técnicas de fabricantes, obtenidos bajo condiciones de máximo rendimiento, superan ampliamente los valores empíricos observados en este estudio. En motocicletas, las aceleraciones máximas declaradas se sitúan entre 4.5 m/s² y 7.7 m/s², mientras que el modelo empírico depurado representa aproximadamente entre el 16 % y el 28 % de dichos valores. En vehículos livianos, las aceleraciones de fábrica oscilan entre 2.1 m/s² y 3.0 m/s², frente a las cuales el modelo empírico representa entre el 31% y el 43%.

Esta diferencia ya había sido señalada por Happer (2012) al contrastar pruebas controladas con conducción urbana real, y es consistente con lo reportado por Fugger et al. (2005), quienes advierten que el uso de parámetros máximos conduce a sobreestimaciones significativas en análisis de evitabilidad y reconstrucción pericial de hechos de tránsito. Esto puede afectar el planteamiento de hipótesis, la atribución causal y la valoración objetiva de la conducta de los conductores involucrados.

Modelos finales de referencia

Con base en la consistencia entre países, la reducción de la dispersión y la estabilidad estadística alcanzada, se adoptan como valores empíricos finales de referencia para la aceleración desde el reposo en intersecciones urbanas los siguientes:

- Vehículos livianos: 0.8943 m/s²
- Motocicletas: 1.2509 m/s²

Estos valores representan el comportamiento típico de aceleración observado en condiciones reales de tránsito urbano y constituyen el principal resultado empírico del presente estudio, en línea con la evidencia experimental reportada en literatura especializada (Happer, 2012; Warner et al., 1983).

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio aportan evidencia empírica sólida sobre el comportamiento de aceleración de vehículos livianos y motocicletas durante el arranque desde reposo en intersecciones urbanas. Este escenario es recurrente en el análisis técnico de hechos de tránsito y, a la vez, ha sido escasamente documentado con datos reales. La consistencia observada entre los valores promedio de aceleración registrados en Colombia, Perú y Panamá constituye uno de los hallazgos más relevantes, al evidenciar que, bajo condiciones geométricas y operativas comparables, el comportamiento dinámico de los conductores presenta patrones notablemente similares, independientemente del contexto nacional evaluado.

En el caso de los vehículos livianos, las diferencias absolutas entre medias nacionales, inferiores a 0.033 m/s², refuerzan la hipótesis de que la aceleración durante el arranque urbano responde más a restricciones del entorno vial —intersecciones, semaforización e interacción con otros actores—

que a variables culturales o normativas. Este comportamiento coincide con lo reportado por Happer (2012), quien documentó valores cercanos a 0.96 m/s² en pruebas empíricas realizadas en intersecciones urbanas de Estados Unidos, lo que sugiere que el patrón observado podría extenderse más allá del ámbito latinoamericano.

Para las motocicletas, si bien se observó una mayor dispersión relativa, atribuible a diferencias individuales en la técnica de conducción y en la relación potencia-peso, los valores medios registrados en Colombia y Perú se mantuvieron dentro de un rango estrecho, lo que permitió construir un modelo unificado representativo. Los coeficientes de determinación bajos obtenidos en las regresiones lineales ($R^2 < 0.12$) indican que la aceleración no sigue una tendencia sistemática asociada a características individuales de los vehículos, sino que se distribuye de manera aleatoria dentro de un rango acotado. Este comportamiento es consistente con observaciones previas en estudios de aceleración urbana basados en análisis de video (Fugger et al., 2005).

La aplicación del filtrado por percentiles extremos —5% y 95%— demostró ser una estrategia eficaz para reducir la dispersión sin alterar de manera significativa la tendencia central de los datos. La disminución de la desviación estándar en aproximadamente 22% para motocicletas y 25% para vehículos livianos mejora sustancialmente la estabilidad numérica de los modelos cuando se emplean en ecuaciones cinemáticas, aspecto crítico en escenarios en los que pequeñas variaciones pueden generar diferencias relevantes en la estimación de velocidad. Este enfoque es coherente con prácticas clásicas de depuración de datos experimentales en física aplicada y reconstrucción de accidentes (Warner et al., 1983).

Desde una perspectiva forense, estos resultados fortalecen la validez de los modelos empíricos propuestos como referencias técnicas para la evaluación de evitabilidad, la reconstrucción de trayectorias y la propuesta de causas determinantes o contribuyentes de hechos de tránsito en intersecciones urbanas. Esto resulta especialmente relevante en contextos en los que la evidencia física es limitada o inexistente, tal como lo recomiendan Daily et al. (2016) y Rose (2022) en análisis periciales basados en observación indirecta.

Figura 4. Comparación de aceleraciones máximas y porcentajes de representatividad del modelo ponderado en motocicletas

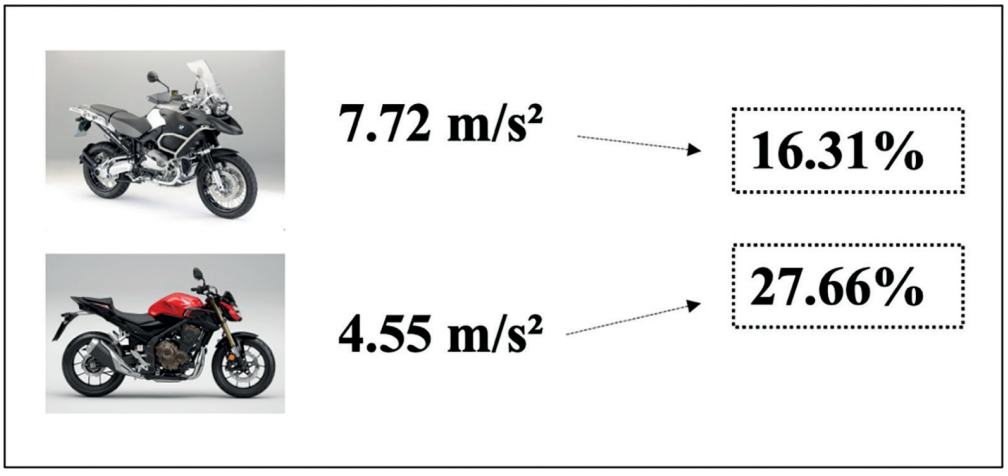
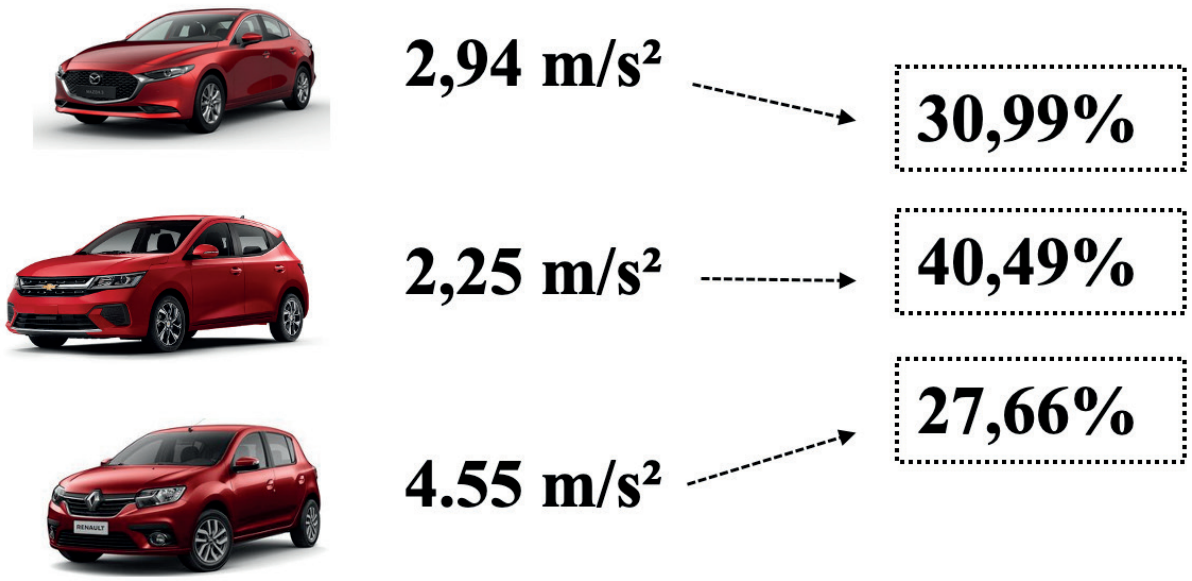


Figura 5. Comparación de aceleraciones máximas y porcentajes de representatividad del modelo ponderado en vehículos livianos



En conjunto, los hallazgos respaldan la validez de los modelos empíricos propuestos como referencias técnicas para estudios de dinámica vehicular en intersecciones, aportando un puente necesario entre los modelos teóricos tradicionales y el comportamiento efectivo observado en condiciones reales de tráfico. Estos resultados contribuyen a fortalecer la base científica disponible para el análisis cinemático en entornos urbanos, donde la evidencia física directa suele ser limitada o inexistente. Adicionalmente, la robustez del modelo empírico desarrollado se ve reforzada por el volumen de datos analizados y por la diversidad geográfica de los escenarios estudiados, lo que reduce la probabilidad de sesgos locales asociados a configuraciones viales específicas o a particularidades normativas de un solo país. En este sentido, la consistencia entre países observada sugiere que los valores de aceleración obtenidos pueden considerarse representativos de un comportamiento urbano generalizado, siempre que se mantengan condiciones operativas comparables, como arranque desde reposo, geometría plana y ausencia de interferencias externas significativas.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de técnicas de análisis de video mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) y software de seguimiento fotograma a fotograma demuestra ser una alternativa viable, reproducible y de bajo impacto para la obtención de variables cinemáticas en campo. Esto se alinea con tendencias recientes en investigación aplicada y reconstrucción forense de accidentes (Bezerra Jr. et al., 2012; Scanlon et al., 2018). Este enfoque permite superar limitaciones tradicionales asociadas a ensayos instrumentados o pruebas controladas, las cuales, si bien ofrecen alta precisión experimental, no siempre reflejan el comportamiento real de los conductores en situaciones cotidianas de tránsito urbano. En consecuencia, los modelos empíricos aquí presentados no solo aportan valores numéricos de referencia, sino que también ofrecen un marco metodológico replicable para futuras investigaciones y aplicaciones periciales.

Con ello, contribuyen a una evaluación más objetiva y técnicamente sustentada de escenarios de tránsito en intersecciones urbanas.

Conclusiones

A partir de la observación directa del tránsito urbano en intersecciones reales y del análisis cinemático fotograma a fotograma mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) y Tracker®, fue posible establecer valores empíricos de aceleración representativos para el arranque desde reposo de vehículos livianos y motocicletas. Los valores promedio obtenidos, correspondientes a 0.8943 m/s^2 para vehículos livianos y 1.2509 m/s^2 para motocicletas, constituyen referencias técnicas basadas en condiciones reales de circulación, y no en escenarios experimentales controlados o de máximo rendimiento mecánico. La consistencia de los resultados entre Colombia, Perú y Panamá, con diferencias absolutas mínimas en los valores medios de aceleración, demuestra que el comportamiento dinámico de los conductores en intersecciones urbanas presenta patrones similares bajo condiciones geométricas y operativas comparables. Este hallazgo respalda la aplicabilidad regional del modelo propuesto y su posible extrapolación a otros contextos urbanos con características análogas.

El análisis estadístico evidenció que, en el caso de los vehículos livianos, las variaciones observadas no presentan una relación significativa con factores externos o individuales, mientras que en las motocicletas se identificó una tendencia débil, pero estructurada. En ambos casos, los bajos coeficientes de determinación confirman que la aceleración urbana se comporta como una variable distribuida dentro de un rango acotado, sin evidenciar una dependencia sistemática respecto de características particulares de los vehículos o de los conductores. La depuración de los datos mediante la exclusión de percentiles extremos —5 y 95— permitió reducir de manera significativa la dispersión de los valores de aceleración, sin alterar la estabilidad de las medias. Esta estrategia fortaleció la robustez numérica de los modelos y mejoró su utilidad práctica para la estimación de trayectorias y velocidades en aplicaciones cinemáticas, al disminuir la incertidumbre inherente al tránsito real.

La comparación entre los valores empíricos obtenidos y las aceleraciones máximas reportadas en fichas técnicas de fabricantes evidenció una diferencia sustancial entre el desempeño teórico y el comportamiento real en entornos urbanos. Este contraste confirma que los valores de aceleración derivados de pruebas de fábrica no representan adecuadamente las condiciones habituales de arranque en intersecciones, y refuerza la necesidad de emplear referencias empíricas cuando se analizan escenarios reales de circulación. En conjunto, los resultados de este estudio consolidan modelos empíricos de aceleración técnicamente confiables, replicables y coherentes con la literatura especializada, los cuales aportan un insumo cuantitativo sólido para el análisis cinemático en intersecciones urbanas. Estos modelos no pretenden sustituir mediciones directas cuando estas existen, sino ofrecer una referencia objetiva basada en evidencia instrumental cuando el análisis debe realizarse en ausencia de datos físicos tradicionales. De este modo, contribuyen al fortalecimiento metodológico de los estudios de dinámica vehicular en contextos reales.

Conflicto de interés

No se presentó conflicto de interés en el desarrollo de la presente investigación académica. Declaro que no mantengo ninguna relación financiera, profesional o personal que pudiera influir en el diseño del estudio, así como en la interpretación y publicación de los resultados obtenidos. Asimismo, manifiesto el cumplimiento de las normas éticas y de integridad científica, de conformidad con las directrices establecidas por la comunidad académica y por la presente revista.

Referencias

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2018). *A policy on geometric design of highways and streets* (7th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.

Bezerra, A. G., Jr., Oliveira, L. P., Lenz, J. A., & Saavedra, N. (2012). Videoanálise com o software livre Tracker no laboratório didático de física: Movimento parabólico e segunda lei de Newton. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 29(1), 469–490. https://doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29nesp1p469

Butilă, E. V., & Boboc, R. G. (2022). Urban traffic monitoring and analysis using unmanned aerial vehicles (UAVs): A systematic literature review. *Remote Sensing*, *14*(3). https://doi.org/10.3390/rs14030620

Campbell, K. L. (1974). Energy basis for collision severity (SAE Technical Paper 740565). SAE International. https://doi.org/10.4271/740565

CarsData. (s. f.). *Acceleration of cars – Chevrolet Aveo, Mazda 3, Renault Sandero*. CarsData. www.cars-data.com/en/

CarsData. (s. f.). *Acceleration of motorcycles*. CarsData. www.cars-data.com/en/motorcycles.html

Daily, J., Shigemura, N., & Daily, J. (2016). *Fundamentals of traffic crash reconstruction*. Institute of Police Technology and Management.

Fricke, L. B., & Baker, J. S. (2012). *Traffic accident reconstruction* (3rd ed.). Northwestern University Center for Public Safety.

Fugger, T. F., Randles, B., Smokovitz, R., & Bedard, R. R. (2005). Acceleration characteristics of vehicles in intersection departure. *Accident Analysis & Prevention, 37*(3), 407–415. doi:10.1016/j.aap.2004.08.001

Garzón, G. P. A., & Moreno Villate, M. A. (2022). Determinación del coeficiente de fricción dinámico con Tracker®. *Latin American Journal of Physics Education*, *16*(1), 1303-1–1303-9.

Happer, A. T. (2012). Measured vehicle accelerations – A useful tool for crash reconstruction. *Journal of the Canadian Society of Forensic Science*, *45*(2), 73–88.

Happer, A. J., Eubanks, J. J., & Casteel, J. (2009). Pedestrian throw distance as a function of vehicle speed. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*, *2*(1), 140–147. doi:10.4271/2009-01-0100

Happer, A. J., Peck, M. D., & Hughes, M. C. (2009). Analysis of left-turning vehicles at a 4-way medium-sized signalized intersection (SAE Technical Paper 2009-01-0107). SAE International. doi:10.4271/2009-01-0107

Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Higuera Cruz, J. F., Barón Rodríguez, D. F., Orduy Rodríguez, J. E., & Araque García, D. M. (2022). Estimación de coeficientes de fricción de vehículos en superficies utilizando drones (UAS). *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, *14*(3), 24–40.

Kampf, R., Kubina, M., Bartuška, L., & Soviar, J. (2022). Use of unmanned aerial vehicles for traffic surveys. *LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics*, *13*(1), 163–172. doi:10.2478/logi-2022-0015

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, Artículo n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Peck, L., Rose, N. A., & Neale, W. T. C. (2017). Motorcycle impact speed estimation based on wheelbase reduction from full-scale crash testing. *SAE Technical Paper Series*. doi:10.4271/2017-01-1546

Rose, N. A., & Neale, W. T. C. (2018). *Motorcycle accident reconstruction* (SAE Accident Reconstruction Series). SAE International. doi:10.4271/R-483

Scanlon, J., Sherony, R., & Gabler, H. (2018). Models of driver acceleration behavior prior to real-world intersection crashes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *19*(3), 774–783. doi:10.1109/TITS.2017.2719022

Searle, J. A. (1983). The trajectories of pedestrians, motorcycles and passenger cars following a road accident (SAE Technical Paper 831622). SAE International. doi:10.4271/831622

Tamayo y Tamayo, M. (2004). *El proceso de la investigación científica* (5.ª ed.). Limusa.

Warner, C., Smith, G., James, M., & Germane, G. (1983). Friction applications in accident reconstruction (SAE Technical Paper 830612). SAE International. doi:10.4271/830612