



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

ACTUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE TASAS DE SINIESTRALIDAD VIAL EN CHILE

POR

Fernando Alonso Salamanca Hollander

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Tomás Echaveguren Navarro

Agosto 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Fernando Alonso Salamanca Hollander

© 2025 Fernando Alonso Salamanca Hollander

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a mi familia y a mis amigos, por su apoyo y compañía de cuerpo, mente y espíritu.

Además, este trabajo esta dedicado a cada peatón y conductor, para que sus viajes sean siempre seguros.

AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer a mi profesor, Tomás Echaveguren por su paciencia, diligencia y esfuerzo visible a leguas, y por su apoyo irremplazable durante este proceso.

RESUMEN

La seguridad vial en proyectos interurbanos en Chile enfrenta desafíos debido a tasas de siniestralidad vial (TSV) desactualizadas del Manual de Carreteras Volumen 1 (MC-V1), basadas en datos de 2003-2005, que no reflejan cambios en infraestructura, legislación y tráfico. Este estudio buscó actualizar las TSV mediante un análisis integral de datos de siniestros, tráfico y red vial, considerando escalas territoriales y temporales, para mejorar la planificación de seguridad vial. Los objetivos específicos fueron consolidar datos de Carabineros y Dirección de Vialidad, calcular TSV ajustadas y analizar tendencias geográficas y temporales. Se recopilaron datos de siniestros (2010-2023), tráfico (TMDA) y red vial, estandarizados en R con paquetes como dplyr. Se calcularon TSV por tipo de camino (pavimentados, no pavimentados) y siniestro (atropello, colisión, choque, volcadura), y se desarrolló un modelo predictivo de predicción de siniestros en base a regresión lineal ($R^2=0,56$). Resultados muestran TSV más altas en caminos no pavimentados (máximo 5,43 acc/10⁷ veh-km en colisiones, zona centro) y en la zona sur (promedio 1,59, liderando en colisiones y atropellos por población rural y clima), mientras la zona norte tiene tasas bajas (promedio 0,72, por mejor infraestructura). Comparadas con TSV históricas, atropellos y volcaduras en pavimentados disminuyeron (e.g., atropellos de 0,61 a 0,056 en norte), pero choques y colisiones en no pavimentados aumentaron (e.g., colisión de 2,12 a 4,81 en sur). El modelo predictivo destaca un decaimiento de TSV con mayor TMDA, señalando riesgos en vías de bajo estándar.

ABSTRACT

Road safety in Chile's interurban projects faces challenges due to outdated crash rate (TSV) data in the Manual de Carreteras Volumen 1 (MC-V1), based on 2003-2005 data, which no longer reflect changes in infrastructure, legislation, and traffic. This study aimed to update TSV through a comprehensive analysis of crash, traffic, and road network data, considering territorial and temporal scales to enhance safety planning. Specific objectives included consolidating data from Carabineros de Chile and Dirección de Vialidad, calculating adjusted TSV, and analyzing geographic and temporal trends. Crash data (2010-2023), traffic (TMDA), and road network data were collected and standardized using R with packages like dplyr. TSV were calculated by road type (paved, unpaved) and crash type (pedestrian, collision, rear-end, rollover), and a predictive linear regression model for crashes was developed ($R^2=0.56$). Results show higher TSV on unpaved roads (up to 5,43 crashes/ 10^7 veh-km for collisions in the central zone) and in the southern zone (average 1,59, leading in collisions and pedestrian crashes due to rural populations and adverse weather), while the northern zone has lower rates (average 0,72, due to better infrastructure). Compared to historical TSV, pedestrian crashes and rollovers on paved roads decreased (e.g., pedestrian crashes from 0,61 to 0,056 in the north), but collisions and rear-end crashes on unpaved roads increased (e.g., collisions from 2,12 to 4,81 in the south). The predictive model highlights a TSV decline with higher TMDA, indicating risks on lower-standard roads.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Alcance del estudio	2
1.4. Metodología	3
1.5. Principales resultados y conclusiones	3
1.6. Organización de la memoria	4
CAPÍTULO 2: VALORACIÓN DE LA SEGURIDAD VIAL: MODELOS Y MÉTODOS....	5
2.1. Introducción	5
2.2. Uso de tasas de siniestralidad vial en la evaluación de proyectos de vialidad interurbana..	5
2.3. Metodologías de cálculo de tasas de siniestralidad vial	7
2.4. Conclusiones	8
CAPÍTULO 3: NORMALIZACIÓN Y UNIFICACIÓN DE BASES DE DATOS.....	9
3.1. Introducción	9
3.2. Origen de los datos	9
3.3. Programas usados	13
3.4. Procesamiento de datos	14
3.5. Conclusiones	15
CAPÍTULO 4: CÁLCULO Y ANÁLISIS DE TASAS DE SINIESTRALIDAD VIAL	16
4.1. Introducción	16
4.2. Estadística descriptiva para base de datos	16
4.3. Métodos de cálculo de tasas de siniestralidad vial	20
4.4. Obtención de tasas de siniestralidad vial.....	20
4.5. Análisis de resultados.....	26
4.6. Conclusiones	30
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	31

REFERENCIAS 33

ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.... 35

ANEXO 2.1 CÓDIGO EN LENGUAJE R VERSIÓN 4.5.1 PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS 36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tasas de siniestralidad vial por tipo de camino y tipo de siniestro	6
Tabla 2.2 Desagregación de tipos de vía.....	6
Tabla 3.1 Campos en base de datos de Carabineros de Chile	10
Tabla 3.2 Campos en base de datos de Ministerio de Obras Públicas	11
Tabla 3.3 Campos en base de datos de Dirección de Vialidad para caminos pavimentados	12
Tabla 3.4 Campos en base de datos de Dirección de Vialidad para caminos con superficie tratada.	12
Tabla 3.5 Muestra de datos desagregados listos para el cálculo de tasas de siniestralidad vial	15
Tabla 4.1 Estadística descriptiva a nivel nacional.....	18
Tabla 4.2 Estadística descriptiva según zona geográfica	18
Tabla 4.3 Estadística descriptiva según tipo de camino.....	18
Tabla 4.4 Test Shapiro-Wilk para distribuciones de frecuencia de siniestros y TMDA por tipo de zona geográfica y tipo de camino	19
Tabla 4.5 Test Mann-Whitney U para frecuencia de siniestros por tipo de zona geográfica	19
Tabla 4.6 Test Mann-Whitney U para TMDA por tipo de zona geográfica	19
Tabla 4.7 Test Mann-Whitney U para frecuencia de siniestros por tipo de camino	19
Tabla 4.8 Test Mann-Whitney U para TMDA por tipo de camino.....	20
Tabla 4.9 Cálculo de inferencias según errores estándar robustos.....	22
Tabla 4.10 Tasas de siniestralidad vial propuestas por tipo de siniestro y tipo de camino.....	25
Tabla 4.11 Comparación entre tasas de siniestralidad vial actuales vs propuestas.....	25
Tabla 4.12 Estadística descriptiva por tipo de siniestro	29
Tabla 4.13 Estadística descriptiva por tipo de camino.....	29
Tabla 4.14 Estadística descriptiva por tipo de zona geográfica	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Estructura de procesamiento de datos.....	13
Figura 4.1 Modelo de predicción de siniestros a nivel país	22
Figura 4.2 Comparación de modelo AASHTO con modelo propuesto	23
Figura 4.3 Comparación de modelo de Cafiso et al. con modelo propuesto.....	23
Figura 4.4 Tasas de siniestralidad vial en caminos con cuatro pistas pavimentadas	27
Figura 4.5 Tasas de siniestralidad vial en caminos con dos pistas pavimentadas.....	27
Figura 4.6 Tasas de siniestralidad vial en caminos sin pistas pavimentadas	28

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Los proyectos de infraestructura vial muchas veces llaman a tratar problemas complejos y diversos, especialmente en sus etapas de perfil y prefactibilidad, donde es importante entender cómo afectarán a la seguridad vial, particularmente aumentando o disminuyendo los siniestros.

La evaluación de proyectos viales interurbanos busca garantizar sostenibilidad y seguridad, considerando beneficios económicos y sociales, así como externalidades negativas como los siniestros viales, que generan daños, costos médicos, pérdida de productividad y sufrimiento. Las tasas de siniestralidad vial (TSV) son clave para medir y predecir riesgos, evaluar el desempeño de carreteras y fundamentar decisiones en proyectos viales.

El Manual de Carreteras Volumen 1 (MC-V1) presenta algunas TSV, aunque desactualizadas e inadecuadas de representar con precisión el contexto vial nacional que ha cambiado sobremanera en las últimas décadas. Por lo tanto, se hace necesario obtener nuevas TSV adecuadas para los fenómenos actuales en vialidad.

1.2. Objetivos

El objetivo principal y general en este estudio fue actualizar las tasas de siniestralidad vial del volumen 1 del Manual de Carreteras de Chile mediante análisis integral de los datos de siniestros viales, tráfico y de la red vial pública, considerando distintas escalas territoriales y temporales, para proporcionar información más precisa y útil en la planificación y gestión de la seguridad vial.

Este objetivo se desarrolla a través de tres objetivos específicos:

- i. Consolidar datos de siniestros viales, tráfico y de la red vial disponibles en la Dirección de Vialidad y Carabineros de Chile, para el análisis de la siniestralidad vial en distintas escalas territoriales.
- ii. Calcular las tasas de siniestralidad vial a partir de los datos consolidados, ajustadas a las necesidades del volumen 1 del Manual de Carreteras.

- iii. Realizar un análisis a través del tiempo y de divisiones geográficas de las tasas de siniestralidad vial, comparando la frecuencia de siniestros entre regiones, provincias, comunas, rutas y años, con el fin de identificar patrones y tendencias a lo largo del tiempo y el territorio.

1.3. Alcance del estudio

Este estudio se centra en la actualización de las tasas de siniestralidad vial (TSV) para el Volumen 1 del Manual de Carreteras de Chile (MC-V1), enfocado exclusivamente en carreteras interurbanas del territorio nacional chileno. El análisis abarca datos históricos desde el año 2010 hasta 2023, provenientes de fuentes oficiales como Carabineros de Chile (para siniestros viales) y la Dirección de Vialidad (para información de tráfico, red vial y características de la capa de rodadura). Se consideran escalas territoriales que incluyen divisiones geográficas macroregionales (Norte: regiones 15, 01, 02, 03, 04; Centro: regiones 05, 13; Sur: regiones 06, 07, 16, 08, 09, 14, 10, 11, 12), así como desagregaciones por tipos de camino, tipos de siniestros y rutas específicas. Temporalmente, se evalúan patrones anuales y tendencias a lo largo de los 14 años mencionados, con énfasis en la comparación de frecuencias de siniestros.

El alcance incluye la clasificación de siniestros por tipo (atropello, colisión, volcadura, choque) y por tipo de camino (cuatro pistas pavimentadas con dos pistas por sentido, dos pistas pavimentadas con una pista por sentido, y una o dos pistas no pavimentadas). Se integra el cálculo de TSV mediante modelos de exposición al riesgo, ajustados a variables como el Tránsito Medio Diario Anual (TMDA, limitado a un máximo de 80000 veh/día-año para enfocarse en contextos interurbanos), longitud de segmentos viales y frecuencia de siniestros. Además, se desarrolla un modelo nacional de predicción de siniestros basado en regresión lineal, calibrado con datos agregados y evaluado mediante pruebas estadísticas (R cuadrado, Breusch-Pagan, errores estándar robustos).

No se incluyen carreteras urbanas, ni análisis de factores causales específicos como condiciones climáticas detalladas, geometría vial avanzada, comportamiento humano o variables socioeconómicas individuales, debido a limitaciones en la disponibilidad de datos. Tampoco se abordan proyecciones futuras más allá de la predicción estadística básica, ni comparaciones internacionales exhaustivas. El estudio se limita a datos públicos y procesados con herramientas como R y Microsoft Excel, sin incorporación de tecnologías emergentes como *machine learning* o datos en tiempo real. El propósito es proporcionar una base actualizada para la evaluación de proyectos viales en etapas de perfil y

prefactibilidad, contribuyendo a la planificación de seguridad vial en Chile, pero reconociendo la necesidad de actualizaciones periódicas para capturar cambios en el contexto vial nacional.

1.4. Metodología

Primero, se obtuvieron los datos desde sus fuentes originales: siniestros viales desde Carabineros de Chile (2024) y tráfico y red vial desde la Dirección de Vialidad (2024), estos datos fueron formateados a xlsx para luego ser exportados y procesados con R (R Core Team, 2024).

Los datos fueron depurados y preparados, mediante estandarización del nombre de regiones, adición de provincias, eliminación de registros incompletos o irrelevantes, selección de variables clave asociadas al tráfico y red vial y extracción de características de capa de rodadura. Luego se emparejaron los siniestros por región, ruta y kilometraje, integrando también la información de capa de rodadura. Se clasificaron los siniestros por zona geográfica (Norte, Centro, Sur), tipo de siniestro (atropello, colisión, volcadura, choque) y tipo de camino (cuatro pistas pavimentadas, dos pistas pavimentadas, sin pistas pavimentadas). Esto permitió el cálculo de TSV a través de modelos de exposición al riesgo y la confección de un modelo nacional de predicción de siniestros mediante regresión lineal, que más tarde fue evaluado con herramientas estadísticas como: test-t, R cuadrado y el test Breusch-Pagan (Breusch y Pagan, 1979).

Con las TSV calculadas se compararon regiones, provincias, comunas, TSV existentes, mediante el cálculo de estadígrafos como promedio, mediana, mínimo y máximo. El modelo de predicción de siniestros fue hecho a base de una regresión lineal y se verificaron test estadísticos como Breusch-Pagan. Finalmente, se elaboró una propuesta de Tabla de TSV para el MC-V1.

1.5. Principales resultados y conclusiones

Como resultados se presentaron: una base de datos de siniestralidad, red vial y tráfico, cubriendo un rango de tiempo de 14 años desde 2010 hasta 2023, con la cual se confecciona un modelo estadístico nacional de predicción de siniestros particularmente en base a datos de TMDA, longitud y frecuencia de siniestros en secciones de ruta, las variables independientes del modelo representaron de buena forma el fenómeno y también la varianza de los errores. Además, se fabricó una nueva Tabla de TSV cubriendo categorías como zona geográfica, tipo de camino y tipo de siniestro.

1.6. Organización de la memoria

El estudio se divide en cinco capítulos, el primer capítulo introduce el contexto y la metodología de trabajo alrededor de las TSV. También incluye los objetivos, resultados y conclusiones, estos se centran en la actualización de las tasas de siniestralidad vial del MC-V1 y su análisis. En el segundo capítulo se describe el estado del arte, relacionando metodologías de evaluación de proyectos viales interurbanos con metodologías de cálculo de TSV, con un enfoque más profundo. El tercer capítulo abarca el trabajo de manejo de fuentes datos detallando su unión y preparación para el cálculo. El cuarto capítulo tiene una vista más completa de los datos mediante estadística descriptiva y trata el cálculo íntegro de TSV junto con su posterior análisis. El quinto capítulo finaliza con las conclusiones del trabajo y soluciones que se dieron a cada objetivo, teniendo en cuenta las limitaciones que hubo.

CAPÍTULO 2: VALORACIÓN DE LA SEGURIDAD VIAL: MODELOS Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Este capítulo aborda la valoración de la seguridad vial en proyectos de vialidad interurbana, centrándose en el uso de TSV y los modelos para su cálculo. Se exploran metodologías para estimar TSV, su aplicación en la evaluación de riesgos y la identificación de tramos críticos, así como su integración con modelos predictivos para optimizar el diseño y la planificación de carreteras.

2.2. Uso de tasas de siniestralidad vial en la evaluación de proyectos de vialidad interurbana

Las TSV proporcionan una medida objetiva del riesgo de siniestros en las carreteras. Relacionan el número de siniestro con factores como el volumen de tráfico, la longitud de los tramos o el tiempo de exposición (*e.g.*: siniestros por millón de vehículos-kilómetro), permiten evaluar el desempeño de las vías existentes, identificar tramos críticos de alta siniestralidad y comparar la seguridad entre diferentes lugares o diseños. Además, las TSV son esenciales para predecir el impacto de futuros proyectos o modificaciones en carreteras, lo que facilita la incorporación de medidas preventivas desde la fase de diseño, como mejoras en la geometría de la vía, señalización, iluminación o sistemas de control de velocidad.

Las TSV sirven como una herramienta clave para fundamentar decisiones de planificación e inversión en proyectos viales. Cuantifican los riesgos y los costos asociados a los siniestros viales que incluyen daños materiales, costos médicos, pérdida de productividad y sufrimiento humano. Estas tasas ayudan a justificar la asignación de recursos hacia intervenciones que maximicen la seguridad vial y minimicen las externalidades negativas. El Ministerio de Desarrollo Social evidencia de este modo la importancia de las TSV en su metodología simplificada de estimación de beneficios sociales por disminución de siniestros en proyectos de vialidad interurbana (Ministerio de Desarrollo Social, 2013).

Las Tasas de Siniestralidad Vial (TSV) actuales no cumplen satisfactoriamente su función, debido al tiempo transcurrido desde su última actualización. Los datos presentados en la Tabla 2.1, obtenidos del estudio “Análisis y definición de una metodología para la evaluación social de impactos de proyectos sobre la seguridad vial en rutas interurbanas” de SECTRA-MIDEPLAN, se basan en

información recopilada entre 2003 y 2005. Estos datos están obsoletos, ya que reflejan un contexto donde las características de la red vial, la cultura y la legislación sobre conducción, la tecnología de los vehículos y su nivel de masificación eran significativamente diferentes a los actuales.

Tabla 2.1 Tasas de siniestralidad vial por tipo de camino y tipo de siniestro

Macro Región	Tipo de camino	Tasa de siniestros (acc./10 millones veh-km)			
		Atropello	Choque	Colisión	Volcadura
Norte (regiones: 01, 02, 03, 04)	Una o dos pistas no pavimentadas	0.360	0.450	1.310	4.760
	Dos pistas pavimentadas	0.220	0.190	0.570	1.110
	Cuatro pistas pavimentadas	0.610	0.610	0.000	0.610
	Autopistas	0.110	0.410	0.500	0.550
Centro (05 y 13)	Una o dos pistas no pavimentadas	1.300	2.140	3.060	2.750
	Dos pistas pavimentadas	0.410	0.460	1.070	0.720
	Cuatro pistas pavimentadas	0.580	0.140	1.580	0.180
	Autopistas	0.220	0.400	0.830	0.440
Sur (06, 07, 08, 09, 10, 11, 12)	Una o dos pistas no pavimentadas	1.240	0.800	2.120	2.330
	Dos pistas pavimentadas	0.750	0.360	1.460	0.760
	Cuatro pistas pavimentadas	0.920	0.530	1.680	0.300
	Autopistas	0.430	0.320	0.790	0.530

Fuente: SECTRA – MIDEPLAN (2007)

Tabla 2.2 Desagregación de tipos de vía

Categoría tramo	Descripción
Una ó dos pistas no pavimentadas	Camino con una ó dos pistas cuya carpeta de rodado no es asfalto u hormigón
Dos pistas pavimentadas	Camino con dos pistas cuya carpeta de rodado es asfalto u hormigón
Cuatro pistas pavimentadas	Camino con cuatro pistas cuya carpeta de rodado es asfalto u hormigón
Autopista	Vía interurbana concesionada con cuatro pistas

Fuente: SECTRA – MIDEPLAN (2007)

La Tabla 2.1 muestra las TSV desglosadas por macro regiones, tipo de siniestro (ya sea: atropello, choque, colisión o volcadura) y tipo de camino según Tabla 2.2. Inicialmente, se consideró una macro región extremo sur que incluía las regiones 11 y 12, pero debido a la falta de datos suficientes, se optó por integrarla en la macro región sur. La desagregación de las TSV se ajustó al nivel óptimo posible, limitada por la escasez de información para casos más específicos.

2.3. Metodologías de cálculo de tasas de siniestralidad vial

Para estimar TSV, Lamm *et al.* (1988) propusieron la Ecuación 2.1,

$$TSV = \frac{(10^7 \times n^\circ \text{ de siniestros})}{(365 \times L \times TMDA \times T)} \quad (2.1)$$

Donde **TSV** es la tasa de siniestros viales calculada (acc/10⁷ veh-km), **n° de siniestros** es la cantidad de siniestros en el segmento analizado en un rango de tiempo, **L** es la longitud del tramo en estudio (km), **TMDA** es su tránsito medio diario anual (veh/día-año) y **T** es el rango de tiempo de estudio (años). Esta fórmula se modifica según Ecuación 2.2 para áreas más grandes que un solo segmento de ruta,

$$TSV_{\text{agregada}} = \frac{10^7 \times \sum n^\circ \text{ de siniestros}}{365 \times \sum (L \times TMDA) \times T} \quad (2.2)$$

Por otro lado, para la obtención de modelos de predicción de siniestros se usa la forma funcional descrita por Cafiso *et al.* (2007) en Ecuación 2.3 que también relaciona TMDA, longitud y número de siniestros con al TSV,

$$TSV = TMDA^{0.747} L^{0.601} e^{-5.861} \quad (2.3)$$

AASHTO también proporciona un método de predicción de siniestros, lineal y creciente, se muestra en Ecuación 2.4. Particularmente Ecuación 2.5 presenta la frecuencia de siniestros para caminos rurales bidireccionales,

$$N_{\text{pred}} = N_{\text{spf}} \times (CMF_{1r} \times CMF_{2r} \times \dots \times CMF_{yr}) \times C_x \quad (2.4)$$

$$N_{\text{spf}} = TMDA \times L \times 365 \times 10^{-6} \times e^{-0.312} \quad (2.5)$$

Donde N_{pred} es la frecuencia media predicha de siniestros de un sistema definido, N_{spf} es frecuencia media predicha de siniestros para la condición base de una función de desempeño de seguridad para un sistema definido, CMF son factores modificadores propios de la configuración geométrica y de tráfico del sistema, C_x es un factor de calibración local.

Echaveguren y Reed (2017) calibraron un modelo de predicción de siniestros para la región del Bío-bío basándose en autores similares, Ecuación 2.6 lo muestra,

$$TSV = L^{-0.412} TMDA^{-0.729} e^{5.549} \quad (2.6)$$

García (2024) usa el modelo AASHTO y lo desagrega para distintos tipos de siniestro e intervalos de TMDA, con foco en caminos montañosos en Ecuador.

2.4. Conclusiones

La Tabla 2.1 muestra que las TSV varían según macro región, tipo de camino y siniestro. En Norte, las vías no pavimentadas tienen altas tasas de volcaduras (4.760 siniestros/10 millones veh-km), mientras las autopistas son más seguras (0.550). En Centro y Sur, los caminos no pavimentados también destacan por choques y volcaduras, siendo las autopistas las menos riesgosas. La obsolescencia de los datos (2003-2005) limita su validez actual.

Los modelos se muestran como herramientas para calcular y predecir TSV, integrando datos de tráfico y longitud. La naturaleza de los datos usados en cada uno de los modelos demuestra que su actualización periódica y calibración local mejora su aplicabilidad y capacidad de reflejar condiciones representativas.

CAPÍTULO 3: NORMALIZACIÓN Y UNIFICACIÓN DE BASES DE DATOS

3.1. Introducción

Este capítulo describe el proceso de recolección, estandarización y procesamiento de datos provenientes de Carabineros de Chile y la Dirección de Vialidad. También detalla las fuentes de datos, los softwares empleados y las etapas de procesamiento, sentando las bases para cumplir los objetivos específicos de recolección y consolidación de datos, cálculo de TSV y análisis territorial y temporal.

3.2. Origen de los datos

Las bases de datos utilizadas son públicas, provienen de la página web de Carabineros de Chile (carabineros.cl) y de Dirección de Vialidad (vialidad.mop.gob.cl). Estos vienen en formato de archivos xlsb, xlsx y pdf. Respecto de los datos de siniestros (Carabineros de Chile), estos se componen de tres grupos de datos en archivos xlsb y xlsx: por tipo de siniestro, por tipo de persona y por tipo de vehículo. Para este estudio fueron necesarios solo los desagregados por tipo de siniestro, que a su vez se dividen en 14 archivos xlsb cada uno representando un año desde 2010 hasta 2023, en cada uno de ellos hay información referente a los siniestros, su información se resume en Tabla 3.1.

Los datos de tráfico y red vial se componen de información en formato xlsx para siniestros viales y mediciones de TMDA, y pdf para características de la carpeta. Los datos sobre siniestros se encuentran en Tabla 3.1. Datos sobre mediciones de TMDA se presentan en Tabla 3.2. Datos sobre la carpeta para caminos pavimentados se detallan en Tabla 3.3. Datos sobre la carpeta para caminos con superficie tratada están en Tabla 3.4. Por último, todos los datos, excepto los referentes a siniestros son actualizados el año 2023. Para los datos sobre siniestros se usa el rango de años 2010 a 2023, lo cual es válido para toda la memoria.

Particularmente en los datos de siniestros, desde el año 2021 hasta el 2023 hubo un cambio la organización de la información en cada archivo donde se agrega: código asociado a cada comuna y tribunal encargado del procesamiento, además, las regiones dejan de registrarse por código pasando a nombrarse por su nombre completo.

Tabla 3.1 Campos en base de datos de Carabineros de Chile

Campo	Descripción
Id accidente	Identificador de Carabineros de Chile para el siniestro
Fecha	Fecha del siniestro en formato DD-MM-AAAA
Mes	Mes del siniestro
Hora	Hora del siniestro
Comuna	Comuna del siniestro
Región	Región del siniestro
Accdtes.	Tipo de siniestro (colisión, atropello, choque, volcadura)
Causas	Explicación simple de la causa del siniestro
Muertos	Cantidad de involucrados con resultado mortal
Graves	Cantidad de involucrados con resultado grave
M/Grave	Cantidad de involucrados con resultado medianamente grave
Leves	Cantidad de involucrados con resultado leve
Ilesos	Cantidad de involucrados con resultado ileso
Urbano/Rural	Tipo de zona del siniestro, ya sea urbano o rural
Calle uno	Calle del siniestro
Calle dos	Segunda calle más cercana al siniestro
Frente número	Número de la propiedad frente al siniestro
Ruta	Ruta del siniestro
Ubicación km	Kilometraje de la ruta en el que ocurrió el siniestro

En Figura 3.1 se visualizan las fuentes de datos, sus campos y su manejo a lo largo del proceso. Las cuatro bases de datos iniciales se combinan seleccionando solo los campos importantes para el cálculo, resultando en la base de datos unificada. Esta última se desagrega en base a macro región, tipo de camino y siniestro en el caso del cálculo de TSV, para el modelo de predicción de siniestros se omiten las variables asociadas a la carpeta. Para la base de datos unida y todas las bases desagregadas posteriores cada campo está relacionado con la información asociada cada registro de siniestro.

Tabla 3.2 Campos en base de datos de Ministerio de Obras Públicas

Campo	Descripción
CODIGO	Código MOP del camino
ROL	Rol del camino
NOMBRE	Nombre del camino
SECCION	Identificador de sección de camino
KI	Kilometraje inicial de la sección
KF	Kilometraje final de la sección
LONGI	Longitud de la sección
ROL INI	Rol inicial del camino
ROL FIN	Rol final del camino
TOPOI	Punto toponímico inicial
TOPOF	Punto toponímico final
VALIDA TTO	Validador de información
A O TMDA	Año de medición del TMDA
TMDA	TMDA
P AUTOS	Proporción de autos del TMDA
P CTAS	Proporción de camionetas del TMDA
P CAMSI	Proporción de camiones simples del TMDA
P TRAIL	Proporción de camiones trailer del TMDA
P SEMIR	Proporción de camiones semiremolque del TMDA
P REMOL	Proporción de camiones remolque del TMDA
P CA MAS2E	Proporción de camiones de más de dos ejes del TMDA
P BUSES	Proporción de buses del TMDA
TOTAL	Suma de proporciones del TMDA por tipo de vehículo
UBICA_NEW	Código con formato Región-Provincia-Comuna
REGION	Región
PROVIN	Provincia
COMUNA	Comuna
LONG_PAV	Longitud pavimentada de la sección
LONG_NOPAV	Longitud no pavimentada de la sección
P ASF	Longitud de la sección pavimentada con asfalto
P HOR	Longitud de la sección pavimentada con hormigón
P ASF HOR	Longitud de la sección pavimentada con asfalto u hormigón
P ASF RIP	Longitud de la sección con asfalto o ripio
P HOR RIP	Longitud de la sección con hormigón o ripio
P INT	Longitud de la sección con capa intermedia
P CAPA PRO	Longitud de la sección con capa provisoria
P GRA ESTA	Longitud de la sección con grava estabilizada
P RIP	Longitud de la sección con ripio
P_TIE	Longitud de la sección con tierra
CAM_NAC	Indicador de camino nacional

Tabla 3.3 Campos en base de datos de Dirección de Vialidad para caminos pavimentados

Campo		Descripción
Nombre	Código	Código Dirección de Vialidad del camino
	Rol	Rol del camino
	Nombre	Nombre del camino
K.inicial		Kilometraje inicial de la sección
K.final		Kilometraje final de la sección
Long. (km)		Longitud de la sección
Capa de Rodadura		Capa de rodadura de la sección, A=Asfalto, H=Hormigón, AH=Asfalto y Hormigón

Tabla 3.4 Campos en base de datos de Dirección de Vialidad para caminos con superficie tratada

Campo		Descripción
Nombre	Código	Código Dirección de Vialidad del camino
	Rol	Rol del camino
	Nombre	Nombre del camino
K.inicial		Kilometraje inicial de la sección
K.final		Kilometraje final de la sección
Long. (km)		Longitud de la sección
Capa de Rodadura		Capa de rodadura de la sección, CP=Capa de protección asfáltica, GE=Capa granular estabilizada

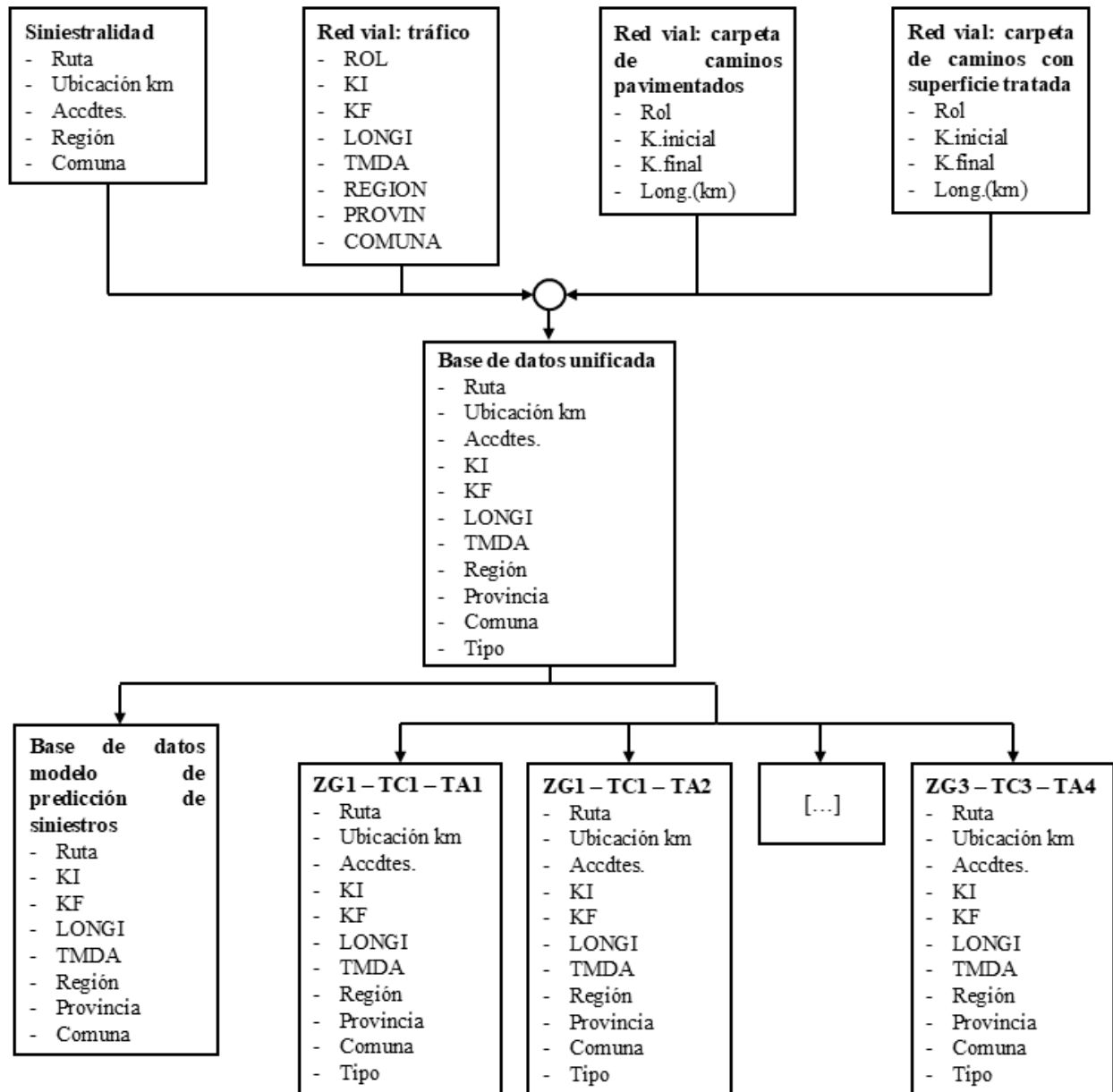


Figura 3.1 Estructura de procesamiento de datos

ZG: Zona Geográfica, TC: Tipo de Camino, TA: Tipo de Siniestro

3.3. Programas usados

En este estudio se utilizaron los programas Microsoft Excel y R. Excel se empleó para la visualización y portabilidad de datos, mientras que R se usó para tareas de procesamiento y cálculo, junto con los paquetes “data.table” para una sintaxis eficiente, rápida y optimizada en el uso de memoria; “dplyr” para la selección, filtrado, creación, resumen y agrupamiento de datos; “ggplot2” para la visualización de datos; “pdftools” para la manipulación de información extraída de archivos PDF; “purrr” para el

trabajo con funciones y vectores en bucles; “readr” para el análisis gramatical; “rio” para la importación y exportación de conjuntos de datos; y “stringr” para la manipulación de cadenas de texto.

Con todas las herramientas mencionadas se logra un código en R que importa, reordena, elimina y crea campos y bases de datos de distintos formatos.

3.4. Procesamiento de datos

Con el procesamiento de datos se trata de preparar los datos para el cálculo de TSV tanto como para la fabricación de un modelo de predicción de siniestros con un gráfico y fórmula matemática asociada.

Una vez que los archivos xlsb y xlsx se encuentran exportados en R, los datos de siniestros son estandarizados geográficamente, siendo nombradas todas las regiones por su código asociado y se le agrega información relacionada a provincias que previamente faltaba, se eliminan los registros sin ruta, sin kilometraje o donde hay más de una ruta mencionada, se elimina información inútil para la fusión con los datos de tráfico y red vial y se combina en un nuevo conjunto de datos.

Previo a la primera fusión, los datos de tráfico y red vial son depurados, quedando solamente: el rol, la sección, kilometraje inicial y final de cada sección, longitud de la sección, TMDA y región. Se cambia la información de las regiones a códigos.

Para la primera fusión se emparejan los datos de región y ruta, con la condición de que el kilometraje en que ocurrió el siniestro debe caer dentro del rango de alguna sección válida. El resultado ahora tiene la información de siniestros en conjunto con la de tráfico y red vial, faltando la información de capa de rodadura. Para esta segunda fusión primero se procesan los archivos pdf sacando la información respecto al tipo de superficie de los caminos y se emparejan según región, ruta y kilometraje.

Con el nuevo conjunto de datos se procede a dividir la información según zona geográfica: norte (regiones 15, 01, 02, 03, 04), centro (05, 13) o sur (06, 07, 16, 08, 09, 14, 10, 11, 12), según tipo de siniestro: atropello, colisión, choque o volcadura, y según tipo de camino: cuatro pistas pavimentadas con dos pistas por sentido (4PP), dos pistas pavimentadas con una pista por sentido (2PP) o una o dos pistas no pavimentadas (NP). Una muestra de este resultado se observa en Tabla 3.5.

Aparte del cálculo directo de TSV con Ecuación 2.2, también se calibra un modelo de predicción de siniestros nacional, usando las variables de longitud y TMDA, donde se usan diferentes formas funcionales para encontrar el mejor ajuste según test-t y R cuadrado.

Tabla 3.5 Muestra de datos desagregados listos para el cálculo de tasas de siniestralidad vial

Ruta	O-250	O-390	O-670	Ruta 7	S-65	T-121
Zona geográfica	Sur	Sur	Sur	Sur	Sur	Sur
Región	VIII	VIII	VIII	X	IX	XIV
Provincia	CONCEPCION	CONCEPCION	CONCEPCION	PALENA	CAUTIN	VALDIVIA
Comuna	TOME	FLORIDA	TALCAHUANO	HUALAIHUE	PITRUFQUEN	LANCO
Sección	1	1	2	6	2	2
Longitud	6.92	7.48	10.6	53.939	14.1	3.6
TMDA	566	1154	69	935	141	234
Tipo acc.	Volcadura	Volcadura	Volcadura	Volcadura	Volcadura	Volcadura
Tipo cam.	2PP	2PP	2PP	2PP	2PP	2PP
Total acc.	4597	4597	4597	4597	4597	4597

Nota: se usan números romanos para la identificación de regiones en la base de datos

3.5. Conclusiones

Con las nuevas bases de datos, es posible recalcular las TSV obsoletas y confeccionar un modelo de predicción de siniestros viales para usar en el caso de que falten datos específicos.

La segmentación de los datos unificados por macroregión (norte, centro, sur), tipo de siniestro (atropello, colisión, choque, volcadura) y tipo de camino (4PP, 2PP, NP) proporciona una base versátil futuros análisis. Además, el nivel de desagregación de los datos logra facilitar el cálculo de TSV y también permite explorar patrones específicos sobre siniestralidad.

CAPÍTULO 4: CÁLULO Y ANÁLISIS DE TASAS DE SINIESTRALIDAD VIAL

4.1. Introducción

Con el objetivo de analizar la siniestralidad vial en contextos interurbanos, se plantean dos acciones principales: desarrollar un modelo de predicción de siniestros viales y actualizar las TSV. Para ello, se utilizó la base de datos de TMDA, la longitud de los segmentos viales y la frecuencia de siniestros. En el caso de la actualización de las TSV, estas se desagregaron por zona geográfica (norte, centro y sur) y tipo de camino (pavimentado y no pavimentado). Mediante un análisis estadístico descriptivo, inferencias y modelos predictivos basados en ecuaciones establecidas, se busca caracterizar los patrones de siniestralidad.

4.2. Estadística descriptiva para base de datos

Se usó un análisis de estadística descriptiva en la base de datos para tener un resumen claro de sus características, como tendencia, dispersión y distribución. Se consideran como variables clave el TMDA y la frecuencia de siniestros, se desagregan en base a zona geográfica y tipo de camino, por otro lado, se deja un caso agregado nacional, en cada caso se calcula la media, mediana, moda y desviación estándar. El total de observaciones para cada caso es “n”. El TMDA se limitó a 80000 entendiendo que rutas con valores mayores se alejan de las características asociadas a fenómenos viales interurbanos, y por lo tanto, del objetivo.

Se obtienen varias conclusiones del análisis de estadística descriptiva. A nivel nacional (Tabla 4.1, n=3342), el número promedio de accidentes es 38.5, con una mediana de 5.0 y una moda de 1.0, lo que indica una distribución altamente sesgada donde la mayoría de las observaciones tienen pocos accidentes, pero algunas presentan valores significativamente mayores (desviación estándar de 139,5). El TMDA (vehículos por día-año) promedio es 2825.1, con una mediana de 266.0 y una moda de 31.0, reflejando una amplia variabilidad (desviación estándar de 7445.4), probablemente debido al límite establecido en 80000, que excluye valores extremos y se alinea con el enfoque en fenómenos viales interurbanos.

Al desglosar por zonas geográficas (Tabla 4.2), se observan diferencias notables. En la zona Norte (n=491), el promedio de accidentes es 44.8, con una mediana de 4.0 y una moda de 1.0 (desviación

estándar de 165.5), mostrando alta variabilidad. El TMDA promedio es 2511.5, con una moda de 10.0, sugiriendo un volumen de tráfico menor que el promedio nacional. En la zona Centro (n=449), el promedio de accidentes sube a 54.6, con una mediana de 6.0 y una moda de 1.0 (desviación estándar de 154.4), indicando una frecuencia ligeramente mayor. El TMDA alcanza 7447.1, con una moda de 516.0, lo que refleja un tráfico más intenso. En la zona Sur (n=2402), el promedio de accidentes es 34.2, con una mediana de 5.0 y una moda de 1.0 (desviación estándar de 130.5), el más bajo entre las zonas, mientras que el TMDA promedio es 2047.3, con una moda de 31.0, indicando niveles de tráfico moderados.

Por tipo de camino (Tabla 4.3), se identifican patrones claros. En los caminos NP (n=1421, sin pistas pavimentadas), el promedio de accidentes es 8.6, con una mediana de 3.0 y una moda de 1.0 (desviación estándar de 30.2), sugiriendo tasas bajas de accidentes. El TMDA promedio es 1066.4, con una moda de 31.0, indicando bajo tráfico. En los caminos 2PP (n=1788, dos pistas pavimentadas), el promedio de accidentes es 31.7, con una mediana de 7.0 y una moda de 1.0 (desviación estándar de 71.2), y el TMDA promedio es 2787.8, con una moda de 31.0, mostrando tráfico moderado y mayor frecuencia de accidentes. En los caminos 4PP (n=133, cuatro pistas pavimentadas), el promedio de accidentes es 449.8, con una mediana de 253.0 y una moda de 19.0 (desviación estándar de 483.2), reflejando una tasa mucho mayor, mientras que el TMDA promedio es 23332.4, con una moda de 12158.0, lo que indica un volumen de tráfico muy alto.

En general, los datos revelan una variabilidad significativa en la frecuencia de accidentes y el TMDA según zonas y tipos de camino, con los caminos 4PP destacando por sus altos promedios en ambos aspectos, probablemente debido a una mayor exposición al tráfico. Las grandes desviaciones estándar en todas las categorías sugieren una dispersión considerable, con valores atípicos que influyen en la media, mientras que las medianas y modas tienden a mostrar tendencias centrales más bajas. La limitación del TMDA en 80000 excluye escenarios de tráfico extremo, centrando el análisis en características de rutas interurbanas, lo que respalda el objetivo del estudio.

En Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se observa que los datos presentan mucha variabilidad en todos los casos, esto debido a sus grandes valores de desviación estándar, modas y medianas cercanas a cero, y naturalmente por el orden de magnitud y rango del estudio. Además, hay una relación clara entre mayor calidad de infraestructura con mayor cantidad absoluta de siniestros, especialmente la zona

centro y en rutas de cuatro pistas pavimentadas por su mayor volumen de tráfico. La mayor proporción de observaciones en la zona sur se debe a la distribución de regiones en zonas geográficas, pues esta zona toma desde la VI región al sur. La mediana cercana al mínimo en cada caso sugiere una distribución diferente a la normal, esta sospecha se confirma o no mediante el test Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk, 1965) que se utiliza para evaluar si una muestra de datos proviene de una distribución normal, el desarrollo se observa en Tablas desde 4.4 a 4.7.

Tabla 4.1 Estadística descriptiva a nivel nacional

Nacional (n=3342)	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
cantidad siniestros	38.5	5.0	1.0	139.5
TMDA (veh/día-año)	2825.1	266.0	31.0	7445.4

Tabla 4.2 Estadística descriptiva según zona geográfica

Zona geográfica		Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
Norte (n=491)	cantidad siniestros	44.8	4.0	1.0	165.5
	TMDA (veh/día-año)	2511.5	296.0	10.0	4988.3
Centro (n=449)	cantidad siniestros	54.6	6.0	1.0	154.4
	TMDA (veh/día-año)	7447.1	1310.0	516.0	13174.4
Sur (n=2402)	cantidad siniestros	34.2	5.0	1.0	130.5
	TMDA (veh/día-año)	2047.3	244.0	31.0	5978.1

Nota: Zona Norte contiene las regiones 15, 01, 02, 03, 04. Centro: 05, 13 y Sur: 06, 07, 16, 08, 09, 14, 10, 11, 12

Tabla 4.3 Estadística descriptiva según tipo de camino

Tipo de camino		Media	Mediana	Moda	Desviación estándar
NP (n=1421)	cantidad siniestros	8.6	3.0	1.0	30.2
	TMDA (veh/día-año)	1066.4	122.0	31.0	5226.7
2PP (n=1788)	cantidad siniestros	31.7	7.0	1.0	71.2
	TMDA (veh/día-año)	2787.8	644.0	31.0	5439.5
4PP (n=133)	cantidad siniestros	449.8	253.0	19.0	483.2
	TMDA (veh/día-año)	23332.4	16972.0	12158.0	16984.2

Nota: NP: sin pistas pavimentadas, 2PP: dos pistas pavimentadas, 4PP: cuatro pistas pavimentadas

En cada caso se obtienen valores p menores a 0.05 con gran diferencia, esto hace que se rechace la hipótesis nula, y todas las distribuciones son no normales. Con esta nueva información se elige un test estadístico apto para esta condición, como lo es Mann-Whitney U (Mann y Whitney, 1947), un test no paramétrico que no asume normalidad y sirve para comparar dos grupos de datos independientes donde los datos estén sesgados. Su desarrollo se visualiza en Tablas desde 4.8 a 4.11.

Los resultados del test Mann-Whitney U indican que la mayoría de las distribuciones de frecuencia de siniestros y TMDA muestran diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$ o $p < 0.00$) entre zonas geográficas (e.g.: Norte vs. Centro, Centro vs. Sur) y tipos de camino (e.g.: NP vs. 2PP, 4PP vs. 2PP), destacando variaciones importantes en el contexto vial y su impacto en la siniestralidad. Sin embargo, las zonas Norte y Sur no presentan diferencias significativas en frecuencia de siniestros ($p = 0.24$) ni en algunos casos de TMDA ($p = 0.42$), sugiriendo que estas distribuciones son estadísticamente similares. Aun así, no se descarta que un análisis más detallado revele diferencias relevantes en contextos específicos.

Tabla 4.4 Test Shapiro-Wilk para distribuciones de frecuencia de siniestros y TMDA por tipo de zona geográfica y tipo de camino

Categoría	Subcategoría	W (FS)	valor p (FS)	W (TMDA)	valor p (TMDA)
Zona geográfica	Norte	0.27	<0.00	0.56	<0.00
	Centro	0.37	<0.00	0.61	<0.00
	Sur	0.24	<0.00	0.35	<0.00
Tipo de camino	NP	0.20	<0.00	0.18	<0.00
	2PP	0.44	<0.00	0.53	<0.00
	4PP	0.82	<0.00	0.89	<0.00

Nota: NP: camino sin pistas pavimentadas, 2PP: caminos con dos pistas pavimentadas, 4PP: camino con cuatro pistas pavimentadas, FS: frecuencia de siniestros, W: valor entre 0 y 1 que mide la normalidad de una distribución

Tabla 4.5 Test Mann-Whitney U para frecuencia de siniestros por tipo de zona geográfica

Distribución 1	Distribución 2	Mediana 1	Mediana 2	Wu	valor p
Norte (n=491)	Centro (n=436)	4	6	96009	0.01
Norte (n=491)	Sur (n=2393)	4	5	567908	0.24
Centro (n=436)	Sur (n=2393)	5	6	560585	0.01

Tabla 4.6 Test Mann-Whitney U para TMDA por tipo de zona geográfica

Distribución 1	Distribución 2	Mediana 1	Mediana 2	Wu	valor p
Norte (n=491)	Centro (n=436)	296	1310	70259	<0.00
Norte (n=491)	Sur (n=2393)	296	244	601166	0.42
Centro (n=436)	Sur (n=2393)	244	1310	741435	<0.00

Tabla 4.7 Test Mann-Whitney U para frecuencia de siniestros por tipo de camino

Distribución 1	Distribución 2	Mediana 1	Mediana 2	Wu	valor p
NP (n=1420)	2PP (n=1775)	3	7	786524	<0.00
NP (n=1420)	4PP (n=125)	3	227	4480	<0.00
4PP (n=125)	2PP (n=1775)	227	7	18297	<0.00

Tabla 4.8 Test Mann-Whitney U para TMDA por tipo de camino

Distribución 1	Distribución 2	Mediana 1	Mediana 2	Wu	valor p
NP (n=1420)	2PP (n=1775)	122	644	679336	<0.00
NP (n=1420)	4PP (n=125)	122	16972	3066	<0.00
4PP (n=125)	2PP (n=1775)	644	16972	10766	<0.00

Nota: n: cantidad de observaciones para cada caso, Wu: valor que mide la diferencia entre dos distribuciones

4.3. Métodos de cálculo de tasas de siniestralidad vial

El método usado para el cálculo de las nuevas TSV se aplica según Ecuaciones 4.1 y 4.2 donde se relacionan variables de TMDA, longitud y número de siniestros.

$$TSV = \frac{(10^7 \times n^\circ \text{de siniestros})}{(365 \times L \times TMDA \times T)} \tag{4.1}$$

$$TSV_{\text{agregada}} = \frac{10^7 \times \sum n^\circ \text{de siniestros}}{365 \times \sum (L \times TMDA) \times T} \tag{4.2}$$

Por otra parte, para la fabricación del modelo de predicción de siniestros se usa la forma funcional descrita por Cafiso *et al.* (2007) en Ecuación 4.3 que también relaciona TMDA, longitud y número de siniestros con al TSV. Este modelo es elegido por su capacidad de mostrar resultados similares en comparación con estudios más profundos ($p < 0.001$ y $t = 9.64$), como los basados en safety index (índice de seguridad; SI según sus iniciales en inglés) (Cafiso *et al.*, 2007), con variables como factores de exposición, frecuencia y severidad de siniestros. Es importante mencionar que esta fórmula se basa en un historial de siniestros referente a un estudio piloto en 100 kilómetros de caminos rurales en la provincia de Catania, Italia. Además, el rango de longitud usado para la calibración fue 0.639-7.636 y el rango de TMDA fue 600-5500.

$$TSV = TMDA^{0.747} L^{0.601} e^{-5.861} \tag{4.3}$$

4.4. Obtención de tasas de siniestralidad vial

Se estimó un modelo de predicción de siniestros basado en Ecuación 4.3 entre TSV, TMDA (ponderado por longitud) y L acotado para TMDA menores a 80000 y TSV menores a 6, el modelo, en Figura 4.1 y su fórmula en Ecuación 4.4, resaltan un decaimiento exponencial al aumentar el TMDA (curva roja en Figura 4.1), lo que es esperable dado el menor estándar de seguridad de caminos sin pavimentar.

El modelo de la Ecuación 4.4 explica el 56% de la varianza en los datos de siniestros, según el valor de R cuadrado. Esto indica que el 56% de la variabilidad en los datos, que abarcan diversos contextos,

puede atribuirse a las variables independientes incluidas en el modelo, este valor de varianza es bueno, teniendo en cuenta la gran escala del estudio y el amplio rango de los datos. Además, variables como la frecuencia de accidentes y variables de tráfico como el TMDA han mostrado ser explicativas en modelos de predicción de siniestros como Cafiso *et al.* (2007) y Echaveguren y Reed (2017). Complementando este resultado, el *Root Mean Square Error* (Raíz del error cuadrado medio; RMSE según sus iniciales en inglés) con un valor de 0.7059, muestra un valor significativo en relación con el orden de magnitud de las TSV, lo que refuerza la capacidad del modelo para ajustarse a los datos. Además, el valor del estadístico F igual a 193.69 y los valores p menores a 0.05 confirman que el modelo es estadísticamente válido y que las variables independientes son relevantes para explicar la variable dependiente.

$$TSV = TMDA^{-0.62} L^{-0.32} e^{5.04} \quad (4.4)$$

Para validar los supuestos de la regresión lineal se utiliza la prueba de Breusch-Pagan (Breusch y Pagan, 1979), la que sirve para detectar heteroscedasticidad en un modelo de regresión lineal. La prueba evalúa si la varianza de los errores depende de las variables independientes. La heteroscedasticidad ocurre cuando la varianza de los errores del modelo no es constante, lo que puede afectar la validez de las inferencias estadísticas, como los valores p y los intervalos de confianza.

La prueba de Breusch-Pagan evalúa si los errores de una regresión lineal presentan homocedasticidad (varianza constante). Para aplicarla, se calculan los residuos de la regresión original y se normalizan sus cuadrados e_i^2/σ^2 . Luego, se realiza una regresión auxiliar de estos valores contra las variables independientes del modelo original. El estadístico BP se obtiene multiplicando el número total de observaciones n por el coeficiente de determinación R^2 de la regresión auxiliar. Este estadístico sigue aproximadamente una distribución chi-cuadrado, con grados de libertad iguales al número de variables independientes evaluadas. Un valor p menor o igual a 0.05 indica que se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad, sugiriendo la presencia de heteroscedasticidad.

Los resultados de la prueba de Breusch-Pagan (BP) obtenidos son BP=6.5194 y valor p=0.04, teniendo en cuenta dos grados de libertad o variables independientes en el modelo, los valores del estadístico BP y p permiten concluir que hay heteroscedasticidad, por lo tanto, la varianza de los errores depende del TMDA y la longitud del segmento de ruta.

Tras confirmar la presencia de heterocedasticidad, se procedió a corregir este problema para garantizar la validez de las inferencias estadísticas del modelo. Se eligió la opción de usar errores estándar robustos (White, 1980), este enfoque permite mantener las estimaciones originales de los coeficientes, y ajusta los errores estándar para reflejar la variabilidad real de los datos mediante el cálculo de una matriz de covarianza que no depende del supuesto de homocedasticidad, además asegura la calidad de las inferencias estadísticas. En ningún caso los coeficientes del modelo de regresión original deberían cambiar, ya que esta metodología solo trabaja los residuos. El desarrollo se visualiza en Tabla 4.13.

Tabla 4.9 Cálculo de inferencias según errores estándar robustos

Variable	Coefficiente	EE original	EE robusto	ΔEE (%)	Valor p original	Valor p robusto
Intercepto	5.04	0.40	0.42	+3.8	<0.00	<0.00
log(longitud)	-0.32	0.05	0.05	+6.2	<0.00	<0.00
log(TMDA)	-0.62	0.03	0.03	+7.9	<0.00	<0.00

Nota: EE: error estándar, ΔEE: diferencia entre errores estándar original y errores estándar robustos

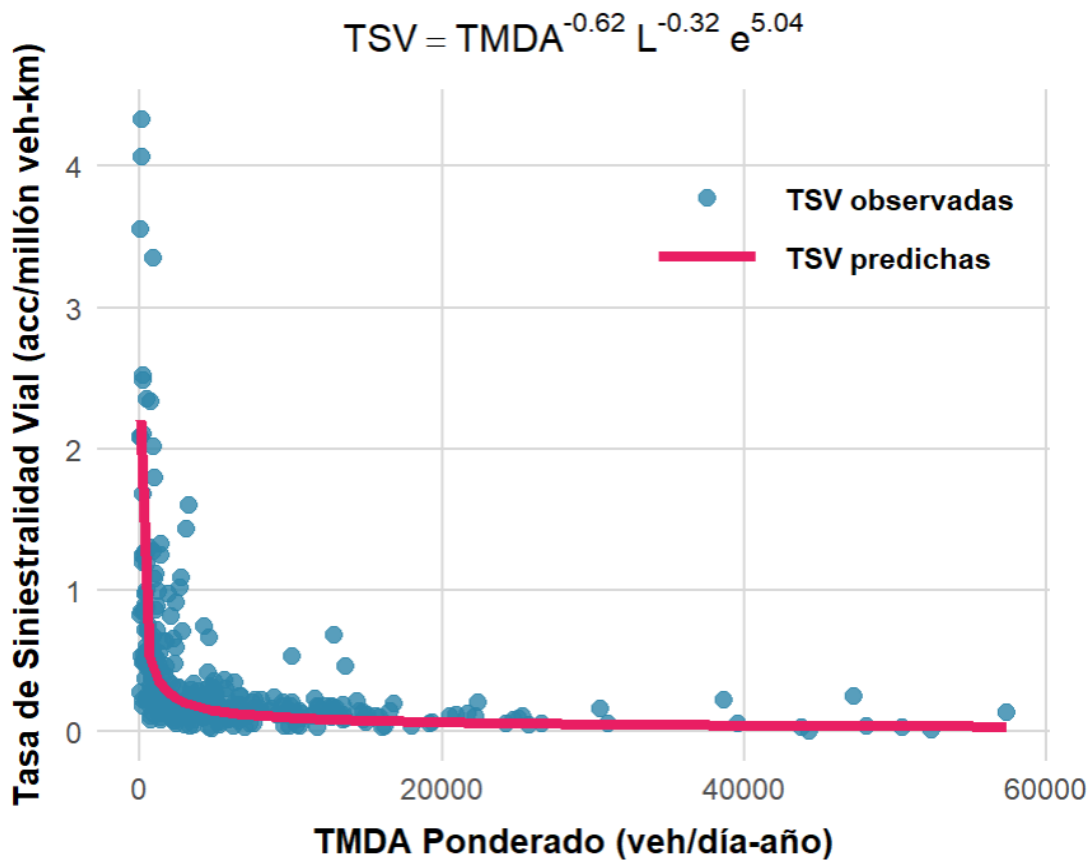


Figura 4.1 Modelo de predicción de siniestros a nivel país

El modelo de predicción de siniestros explica el 56% de la varianza en los datos de siniestros ($R^2 = 0.56$), lo que indica un ajuste razonable a pesar de la alta variabilidad de los datos, confirmada por las pruebas estadísticas. La presencia de heterocedasticidad, detectada mediante la prueba de Breusch-Pagan ($BP = 6.5194$, $p = 0.04$), fue corregida utilizando errores estándar robustos, garantizando la validez de las inferencias estadísticas.

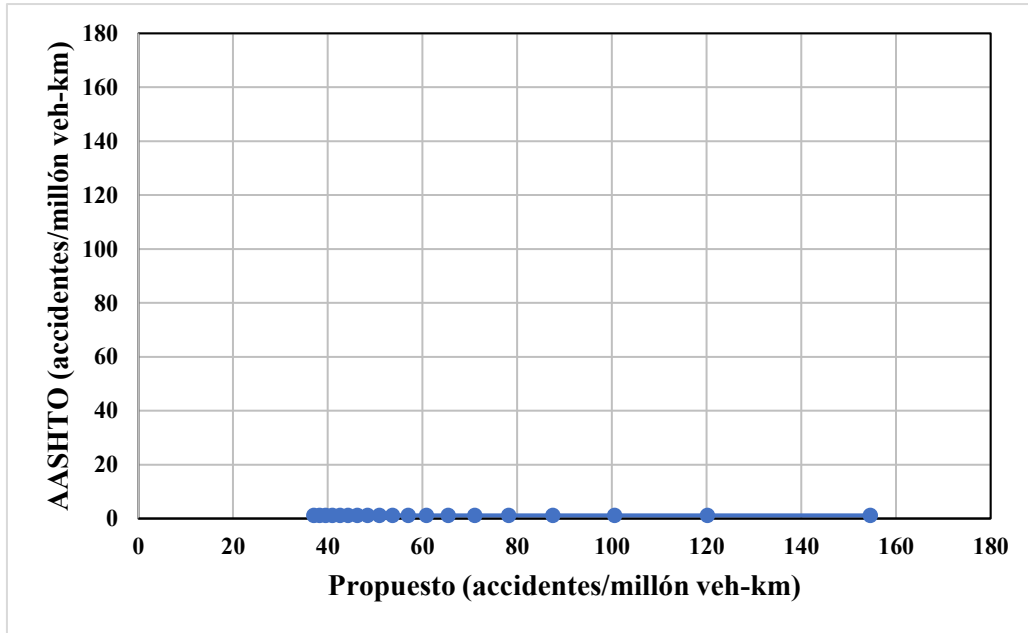


Figura 4.2 Comparación de modelo AASHTO con modelo propuesto

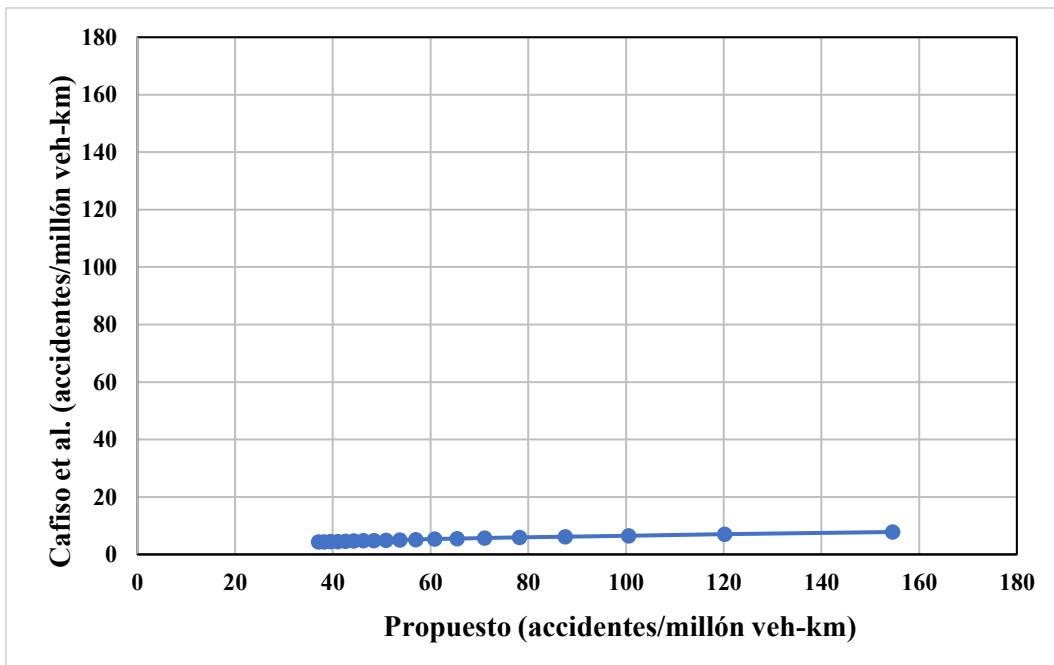


Figura 4.3 Comparación de modelo de Cafiso et al. con modelo propuesto

En Figura 4.2 se compara el modelo propuesto (eje horizontal) con el modelo AASHTO, presentado en Ecuación 2.5, para caminos rurales bidireccionales (eje vertical). Es importante aclarar que el modelo propuesto se basa en tasas normalizadas y el modelo AASHTO se basa en frecuencia absoluta, por esta razón se normaliza este último dividiéndolo por $TMDA \times L \times 365$. El resultado es una relación lineal, esto porque en un principio el modelo AASHTO asume linealidad para el crecimiento del TMDA.

En la Figura 4.3 se compara el modelo propuesto (eje horizontal) con el modelo propuesto por Cafiso *et al.* (2007) (eje vertical), presentado en Ecuación 4.3. En este caso se tiene la misma necesidad de aplicar la normalización del caso anterior, ya que este modelo también se basa en frecuencia absoluta. El resultado es una curva creciente y más cercana a $y=x$, esto muestra la relación similar en torno a TMDA y longitud de que tienen estos dos modelos.

Respecto a la actualización de Tabla 2.1, se usó Ecuación 2.2 con 36 de las 37 bases de datos desagregadas, omitiendo solamente la referente al modelo de predicción de siniestros. Esto resultó en 36 nuevas TSV, el resultado se esquematiza en Tabla 4.10 y las diferencias entre las dos tablas se ven en Tabla 4.11.

En la zona norte las tasas muestran una mezcla de aumentos y disminuciones. Destacan aumentos como choque (de 0.450 a 1.627 en caminos no pavimentados) y colisión (de 0.000 a 0.449 para cuatro pistas pavimentadas), pero disminuciones drásticas como volcadura (de 4.760 a 2.034 en no pavimentados) y atropello (de 0.610 a 0.056 en cuatro pistas pavimentadas).

En la zona centro predominan los aumentos en choque (de 1.140 a 4.426 en caminos no pavimentados) y colisión (de 3.060 a 4.317 en caminos no pavimentados), pero disminuciones en atropello (de 1.300 a 0.363 en pistas no pavimentadas) y volcadura (de 0.720 a 0.347 para dos pistas pavimentadas). La tasa de choque en cuatro pistas pavimentadas sube de 0.140 a 0.442.

La zona sur tiene aumentos consistentes, especialmente en caminos no pavimentados (*e.g.*: choque de 0.800 a 2.628, colisión de 2.120 a 4.815). En caminos pavimentados, atropellos disminuyen (de 0.920 a 0.085 en cuatro pistas pavimentadas), pero choques y colisiones aumentan en vías de dos pistas pavimentadas (de 0.360 a 1.172 y de 1.460 a 1.803).

En caminos no pavimentados hay mayoría de aumentos (e.g.: choque de 1.140 a 4.426 en zona centro, colisión de 2.120 a 4.815 en Sur), con excepciones como atropellos (de 1.300 a 0.363 en zona centro) y volcaduras (de 4.760 a 2.034 en zona norte). Caminos con dos pistas pavimentadas tienen aumentos notables en choques (de 0.190 a 0.507 en norte), pero disminuciones en atropellos (de 0.410 a 0.110 en centro) y volcadura (de 1.110 a 0.514 en norte). Caminos de cuatro pistas pavimentadas tienen disminuciones en atropellos (de 0.610 a 0.056 en norte) y colisiones (de 1.580 a 0.581 en centro), pero aumentos en choques (de 0.140 a 0.442 en centro).

Tabla 4.10 Tasas de siniestralidad vial propuestas por tipo de siniestro y tipo de camino

Macro Región	Tipo de camino	Tasa de siniestros (acc/10 millones veh-km)			
		Atropello	Choque	Colisión	Volcadura
Norte	Una o dos pistas no pavimentadas	0.455	1.627	1.436	2.034
	Dos pistas pavimentadas	0.091	0.507	0.607	0.514
	Cuatro pistas pavimentadas	0.056	0.479	0.449	0.342
Centro	Una o dos pistas no pavimentadas	0.363	5.426	4.317	2.722
	Dos pistas pavimentadas	0.110	0.422	0.596	0.347
	Cuatro pistas pavimentadas	0.050	0.442	0.581	0.180
Sur	Una o dos pistas no pavimentadas	2.362	2.628	4.815	3.389
	Dos pistas pavimentadas	0.302	1.172	1.803	0.829
	Cuatro pistas pavimentadas	0.085	0.696	0.689	0.324

Nota: “acc”: siniestros

Tabla 4.11 Comparación entre tasas de siniestralidad vial actuales vs propuestas

Macro Región	Tipo de camino	Tasa de siniestros (acc/10 millones veh-km)			
		Atropello	Choque	Colisión	Volcadura
Norte	Una o dos pistas no pavimentadas	+0.095	+1.177	+0.126	-2.726
	Dos pistas pavimentadas	-0.129	+0.317	+0.037	-0.596
	Cuatro pistas pavimentadas	-0.554	-0.131	+0.449	-0.268
Centro	Una o Dos pistas no pavimentadas	-0.937	+3.286	+1.257	-0.028
	Dos pistas pavimentadas	-0.300	-0.038	-0.474	-0.373
	Cuatro pistas pavimentadas	-0.530	+0.302	-0.999	0.000
Sur	Una o Dos pistas no pavimentadas	+1.122	+1.828	+2.695	+1.059
	Dos pistas pavimentadas	-0.448	+0.812	+0.343	+0.069
	Cuatro pistas pavimentadas	-0.835	+0.166	-0.991	+0.024

Nota: “acc”: siniestros

Para atropellos hay disminuciones en caminos pavimentados (por ejemplo: de 0.610 a 0.056 en zona norte para cuatro pistas pavimentadas), pero aumento en zona sur y caminos sin pistas pavimentadas

(de 1.240 a 2.362). En choques se ven aumentos en casi todos los casos (ejemplo: de 0.450 a 1.627 en zona norte caminos no pavimentados). Colisiones tienen aumentos en caminos no pavimentados (de 2.120 a 4.815 en zona sur), pero disminuciones en el caso de cuatro pistas pavimentadas (de 1.580 a 0.581 en zona centro). Volcaduras tienen disminuciones en zona norte y centro (de 4.760 a 2.034 en norte para pistas no pavimentadas), pero aumento en zona sur (de 2.330 a 3.389).

4.5. Análisis de resultados

Para la actualización de las TSV, a primera vista se tiene la información proporcionada por la Figura 4.4, La zona sur lidera en mayoría de casos sugiriendo mayor riesgo general en esta zona geográfica pudiendo referirse a la gran cantidad de rutas no pavimentadas junto con la mayor proporción de población rural, el menor estándar general de rutas no pavimentadas y cambiantes condiciones climáticas.

La zona centro sobresale en colisiones en todas las categorías de tipos de camino, en choques y volcaduras para caminos no pavimentados. Esto se puede explicar por la alta densidad de tráfico, la variedad de tipos de vehículos y conductores, la menor calidad de caminos no pavimentados y condiciones climáticas adversas que pueden sorprender a conductores urbanos no experimentados. La zona norte muestra tasas bajas en general, es decir, menor siniestralidad vial, esto puede deberse al menor tráfico y densidad poblacional, la mejor calidad de infraestructura de Antofagasta y Coquimbo en la Ruta 5 para apoyar la minería, condiciones climáticas más estables y menor actividad turística.

Atropellos son los tipos de siniestro menos comunes, naturalmente por la calidad interurbana de los datos. Volcaduras son más comunes en caminos sin pavimentar debido a la mayor frecuencia de vías sinuosas y más peligrosas. Choques y colisiones son más comunes en rutas pavimentadas, que es a lo que más se está expuesto en este tipo de caminos.

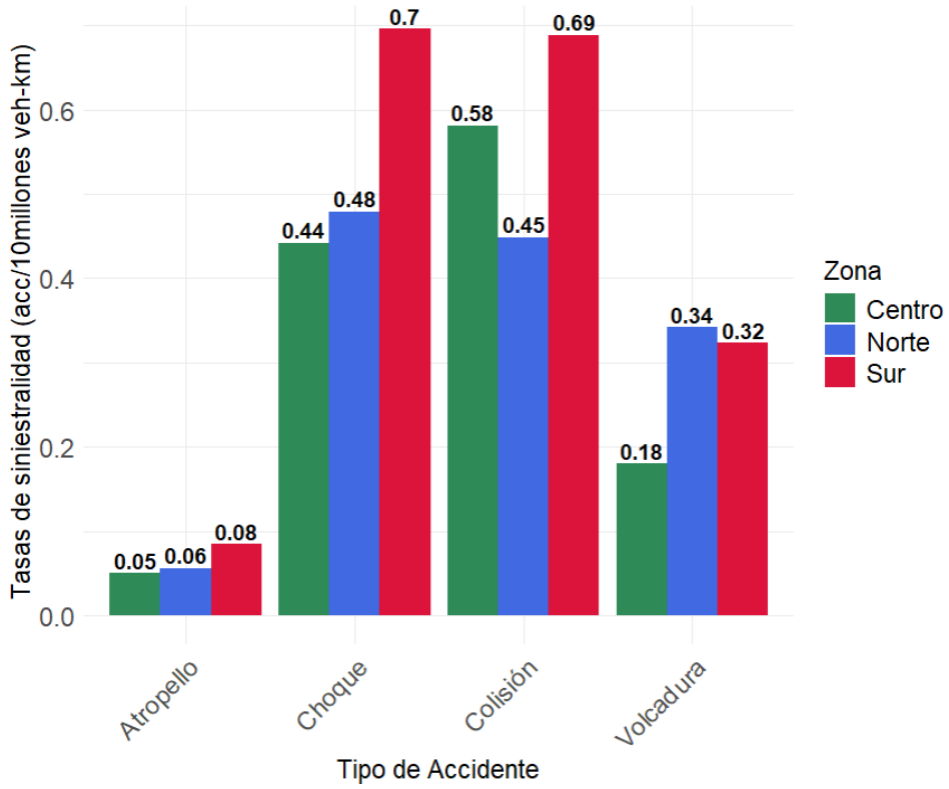


Figura 4.4 Tasas de siniestralidad vial en caminos con cuatro pistas pavimentadas

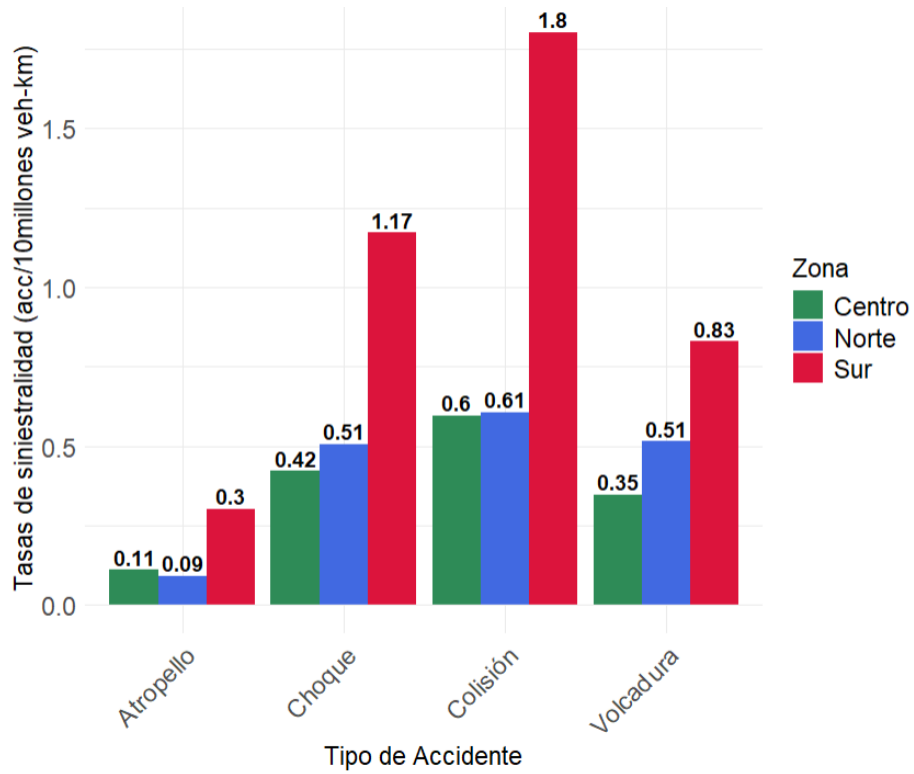


Figura 4.5 Tasas de siniestralidad vial en caminos con dos pistas pavimentadas

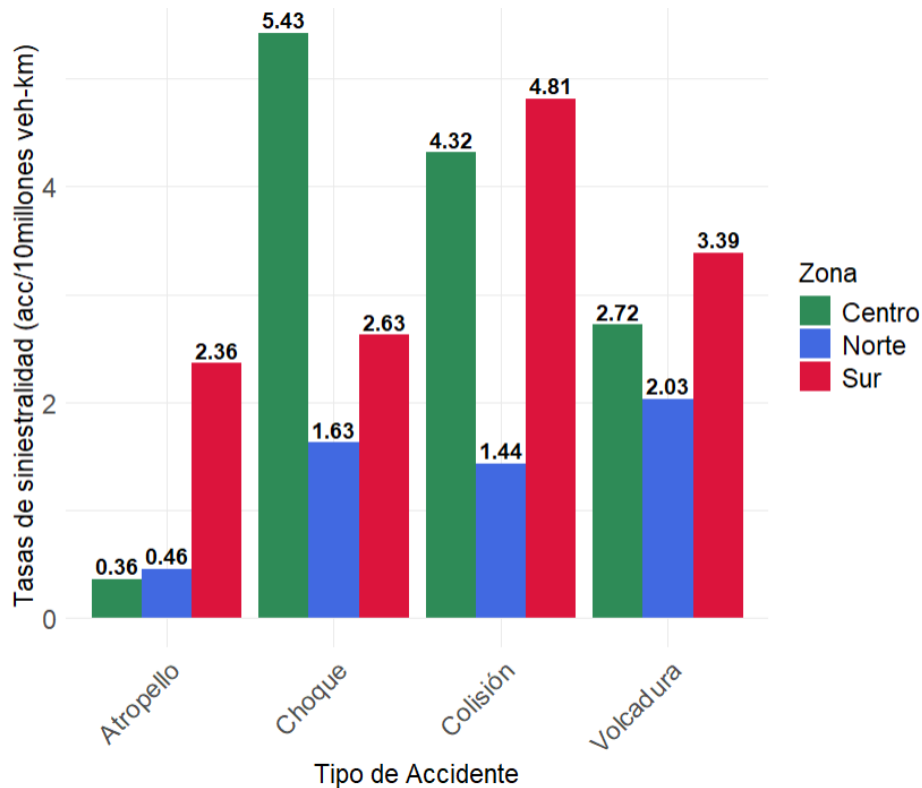


Figura 4.6 Tasas de siniestralidad vial en caminos sin pistas pavimentadas

En Tablas 4.4, 4.5 y 4.6 se ven diferentes distribuciones de siniestros viales, atropello tiene tasas bajas con la zona sur mostrando el valor más alto de 2.36, a 1.90 de distancia del segundo en la categoría de atropello, probablemente por la mayor proporción de población viviendo en zonas rurales cerca de caminos de menor estándar. Siniestros por volcadura aumentan en caminos no pavimentados llegando a dos o incluso más de tres en TSV, esto por la presencia de más pendientes y diferencias de altura. La zona sur destaca en choques y especialmente colisiones con un 4.81. La zona centro destaca en colisiones y lidera en choque en vías no pavimentadas con la mayor de las TSV siendo 5.43, posiblemente por la combinación de mayor tráfico y peores condiciones del camino. La zona norte se no sobresale respecto de las demás zonas en ninguna categoría excepto, y apenas, en volcaduras en caminos con cuatro pistas pavimentadas, su mayor debilidad es las volcaduras en caminos no pavimentados con un 2.03, aun así siendo la menor en esa categoría.

Para describir los datos con mayor detalle se dividen en tres Tablas según cada tipificación. Tabla 4.14 se ve información relacionada con los tipos de siniestro, en general se observan medianas más cercanas al mínimo que indican que la mayoría de las tasas son bajas, pero aun así existen casos extremos. Los choques y colisiones son más comunes, pero las volcaduras tienen tasas relativas más

altas, por otro lado, los atropellos son menos comunes en términos absolutos por la naturaleza del tipo de caminos en este estudio, pero aun así su tasa es comparable con las demás.

En la Tabla 4.15 se ve que los caminos no pavimentados tienen una tasa mucho mayor que los pavimentados, esto indica que la pavimentación es un factor crítico en la siniestralidad vial, además los caminos no pavimentados muestran una mediana sesgada, más cercana al mínimo, lo que por sus condiciones heterogéneas indica mayor variabilidad y más casos extremos. Los caminos pavimentados muestran TSV consistentes y predecibles por su coincidencia entre promedio y mediana.

La Tabla 4.16 muestra que las tres zonas tienen medianas menores a su promedio, esto muestra TSV bajas, pero con más casos extremos. La zona norte tiene tasas más bajas y estables, posiblemente por su mejor calidad de infraestructura (como caminos 4PP) alrededor de núcleos de población. En la zona

Tabla 4.12 Estadística descriptiva por tipo de siniestro

Tipo de Siniestro	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	Total de siniestros
Atropello	0.431	0.110	0.050	2.362	8560
Choque	1.489	0.696	0.422	5.426	56814
Colisión	1.699	0.689	0.449	4.815	73528
Volcadura	1.187	0.514	0.180	3.389	38424

Tabla 4.13 Estadística descriptiva por tipo de camino

Tipo de Camino	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	Total de siniestros
2PP	0.608	0.511	0.091	1.803	56539
4PP	0.364	0.392	0.050	0.696	59780
NP	2.631	2.495	0.363	5.426	61007

Tabla 4.14 Estadística descriptiva por tipo de zona geográfica

Zona geográfica	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	Total de siniestros
Centro	1.296	0.432	0.050	5.426	34587
Norte	0.717	0.493	0.056	2.035	25268
Sur	1.591	1.000	0.085	4.815	117471

centro la tasa promedio y máxima sugieren que caminos no pavimentados suelen tener más siniestros; casos más extremos. La zona sur tiene la media y mediana más elevada, esto sugiere mayor riesgo general.

4.6. Conclusiones

El modelo de predicción de siniestros destaca una relación inversa entre el TMDA y la TSV, con un decaimiento exponencial a medida que aumenta el TMDA, especialmente en caminos no pavimentados, lo que refleja menores estándares de seguridad en este tipo de vías.

Por otro lado, la actualización de las TSV, calculadas mediante la Ecuación 4.1, reveló diferencias significativas entre zonas geográficas y tipos de camino. La zona sur presentó las tasas más altas en colisiones y atropellos en todo tipo de caminos no pavimentados, mayor población rural y condiciones climáticas adversas. La zona central destacó en colisiones y choques en caminos no pavimentados ($TSV = 5.43$), atribuible a una alta densidad de tráfico, variedad de conductores y vehículos, y condiciones viales heterogéneas. La zona norte muestra las tasas más bajas, con una ligera excepción en volcaduras en caminos no pavimentados ($TSV = 2.03$), probablemente debido a una mejor infraestructura vial (como la Ruta 5) y menor densidad poblacional.

Los atropellos son los menos frecuentes debido al contexto interurbano, mientras que las volcaduras predominan en caminos no pavimentados por la presencia de pendientes y vías sinuosas. Los choques y colisiones son más comunes en rutas pavimentadas debido al mayor volumen de tráfico.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

La actualización de las tasas de siniestralidad vial (TSV) se ha logrado mediante un análisis integral de datos de siniestros viales, tráfico y la red vial pública, considerando distintas escalas territoriales y temporales. La recolección y unificación de datos de Carabineros de Chile y la Dirección de Vialidad generó una base robusta y estandarizada, permitiendo calcular TSV que reflejan diferencias significativas entre zonas geográficas, tipos de caminos y tipos de accidentes. Esto proporciona información precisa para identificar tramos críticos y patrones de siniestralidad.

Se llevó a cabo un proceso de normalización y unificación, utilizando Microsoft Excel y R con paquetes como dplyr y pdftools. Se estandarizaron datos de diversos formatos (xlsb, xlsx, pdf), depurándolos para asegurar calidad y compatibilidad. La integración de variables geográficas, TMDA e infraestructura resultó en una base unificada, desagregada por macroregiones (norte, centro, sur), tipos de caminos (4PP, 2PP, NP) y tipos de accidentes (atropello, colisión, choque, volcadura), base para los análisis subsiguientes.

Se calcularon nuevas TSV con las ecuaciones 4.1 y 4.2, relacionando TMDA, longitud y número de accidentes. Las TSV revelaron valores más altos en caminos no pavimentados (especialmente en la zona sur) y una relación inversa con el TMDA, sirviendo como herramienta para evaluar carreteras, identificar riesgos y guiar inversiones en seguridad.

Atropellos son menos frecuentes ($TSV \approx 0.4$ o menor), en contextos interurbanos. La zona sur lidera en colisiones y choques (TSV de 0.7, 1.8 y 4.81 accidentes/ 10^7 veh-km), con promedio de 1.59, atribuible a población rural, rutas no pavimentadas y clima adverso. La zona norte mantiene tasas bajas (máximo 2.03, promedio 0.72), gracias a mejor infraestructura y menor densidad. La zona centro destaca en colisiones y choques en no pavimentados (máximo 5.43), por alta densidad de tráfico y condiciones heterogéneas. Volcaduras predominan en no pavimentados por pendientes sinuosas; choques y colisiones, en pavimentados por mayor tráfico.

Respecto a las TSV históricas (2003-2005), se observan cambios mixtos. Atropellos disminuyeron en pavimentados (*e.g.*, de 0.610 a 0.056 en norte para 4PP; de 0.580 a 0.050 en centro), probablemente debido a mejoras en señalización, límites de velocidad o infraestructura peatonal. Volcaduras bajaron

en pavimentados (*e.g.*, de 1.110 a 0.514 en norte para 2PP), por mejor diseño y adherencia, pero aumentaron en sur no pavimentados (de 2.330 a 3.389), por topografía y clima.

La zona norte muestra avances (*e.g.*, volcadura de 4.760 a 2.034 en no pavimentados) pero desafíos en choques (de 0.450 a 1.627). En centro, disminuciones en atropellos (de 1.300 a 0.363 en no pavimentados) y volcaduras (de 0.720 a 0.347 en 2PP) contrastan con aumentos en choques (de 1.140 a 4.426 en no pavimentados), señalando riesgos en rutas rurales. La zona sur presenta aumentos generalizados en no pavimentados (*e.g.*, colisión de 2.120 a 4.815), por presión en infraestructura rural y densidad vehicular creciente. En macroregiones sur y centro, choques y colisiones subieron en no pavimentados (*e.g.*, choque de 1.140 a 4.426 en centro), reflejando más tráfico, deterioro o falta de mantenimiento.

El modelo predictivo, calibrado con regresión lineal (Ecuación 4.4), explica el 56% de la varianza ($R^2=0.56$), con ajuste razonable pese a variabilidad. Heterocedasticidad (Breusch-Pagan: BP=6.5194, $p=0.04$) se corrigió con errores robustos, validando inferencias. Destaca relación inversa TMDA-TSV, con decaimiento exponencial en no pavimentados, identificando riesgos en vías de bajo estándar y tráfico.

Limitaciones en este trabajo incluyen subregistro posible en datos rurales, falta de variables causales (*e.g.*, clima, geometría) y R^2 moderado, sugiriendo mejoras con validación externa. Se recomienda priorizar pavimentación en zona sur, campañas de concientización en zona centro y monitoreo de vías de mayor riesgo en zona norte.

La base unificada abre líneas futuras: análisis causales con variables adicionales; evaluación de intervenciones viales cuantificando beneficios/costos; integración con modelos avanzados (*e.g.*, *machine learning* o inteligencia artificial) incorporando la base creada a otra apta para datos en tiempo real (meteorológicos, sensores vehiculares) para enfoques locales. Esto potenciará la planificación de seguridad vial interurbana.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). *Highway Safety Manual*. 1ª ed. AASHTO.
- Breusch, T.S. y Pagan, A.R. (1979). *A Simple Test for Heteroscedasticity and Random Coefficient Variation*. *Econometrica*, 47, 1287-1294.
- Cafiso S., La Cava G., Montella A. (2007). *Safety index for evaluation of two-lane rural highways*. *Transportation Research Record* 2019, 136-145.
- Carabineros de Chile. (2024). *Reporte estadístico de siniestros* [Conjunto de datos]. Carabineros. https://www.carabineros.cl/transparencia/tproactiva/rpro_os2.html
- Dirección de Vialidad. (2024). *Red vial: dimensionamiento y características* (<https://vialidad.mop.gob.cl/uploads/sites/9/2024/11/Red-Vial-Nacional-Dimensionamiento-y-Caracteristicas-Ano-2024.pdf>)
- Echaveguren, T., y Reed, C. (2017). *Estimación de umbrales de consistencia para caminos pavimentados bidireccionales chilenos*. XVIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. La Serena. Chile. Octubre.
- García-Ramírez Y. (2024). *Safety performance functions for mountain two-lane rural roads in Ecuador*. *Ing.* vol. 29, no. 1, p. e19828.
- Mann, H. B., y Whitney, D. R. (1947). *On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other*. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>
- Ministerio de Desarrollo Social. (2013). *Metodología simplificada de estimación de beneficios sociales por disminución de siniestros en proyectos de vialidad interurbana*. División de evaluación social de inversores. Santiago.

- Ministerio de Obras Públicas. (2024). *Manual de Carreteras Vol. 1 tomo II Evaluación de proyectos viales interurbanos*. Dirección de Vialidad. Santiago.
- Lamm R., Choueiri E., Hayward J., y Paluri A. (1988). *Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads*. Transportation Research Record 1195, 111-122.
- R Core Team (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Shapiro, S. S., y Wilk, M. B. (1965). *An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)*. *Biometrika*, 52(3/4), 591–611. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- White, H. (1980). *A Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimator and a Direct Test for Heteroskedasticity*. *Econometrica*, 48(4), 817–838. <https://doi.org/10.2307/1912934>

ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
Esta memoria se centra en actualizar las tasas de siniestralidad vial, las cuales son usadas para mejorar la planificación y gestión de la seguridad en proyectos viales, este objetivo se alinea con los ODS 3 y 9 ya que busca proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, construir infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, y reducir la cantidad de muertes y lesiones causadas por siniestros viales, promoviendo el bienestar en base a la seguridad vial.

ANEXO 2.1 CÓDIGO EN LENGUAJE R VERSIÓN 4.5.1 PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS

El código en lenguaje R versión 4.5.1 referente al procesamiento de datos se encuentra en el archivo: “ANEXO 2.1 CÓDIGO EN LENGUAJE R VERSIÓN 4.5.1 PARA EL PROCESAMIENTO DE DATOS”.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista :
Título de la memoria :
Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía :
Profesor(es) Revisor(es) :
Concepto :
Calificación :

Resumen

Las tasas de siniestralidad vial (TSV) del Manual de Carreteras Volumen 1 están desactualizadas, basadas en datos de 2003-2005, no reflejando cambios en infraestructura y tráfico. Este estudio actualizó las TSV analizando datos de siniestros (2010-2023), tráfico (TMDA) y red vial, para mejorar la planificación de seguridad vial. Objetivos: consolidar datos de Carabineros y Dirección de Vialidad, calcular TSV ajustadas y analizar tendencias geográficas y temporales. Se estandarizaron datos en R, calculando TSV por tipo de camino (pavimentados, no pavimentados) y siniestro (atropello, colisión, choque, volcadura). Un modelo predictivo ($R^2=0,56$) relaciona TMDA y TSV. Resultados muestran TSV altas en caminos no pavimentados (máximo 5,43, colisiones, zona centro) y zona sur (promedio 1,59, liderando en colisiones), mientras la zona norte tiene tasas bajas (promedio 0,72). Atropellos y volcaduras en pavimentados disminuyeron (e.g., atropellos de 0,61 a 0,056, norte), pero colisiones en no pavimentados aumentaron (e.g., 2,12 a 4,81, sur). El modelo señala riesgos en vías de bajo estándar.