



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

Efectos del Tráfico Pesado Real en Puente Juan Pablo II, Concepción

POR

Nicolás Esteban Cisternas Sepúlveda

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

Profesor Guía
Dr. Víctor Hugo Aguilar Vidal

Profesor Revisor
Dr. Rodrigo Silva Muñoz

Marzo 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Nicolás Esteban Cisternas Sepúlveda

© 2025 Nicolás Esteban Cisternas Sepúlveda

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

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a mi madre, padre y hermano.

Todo lo que soy es gracias a ellos, con su constante apoyo y amor.

A Gabriela, mi compañera de vida, por ser mi pilar de amor en todo momento.

A mis amigos y amigas, con quienes compartí valiosos momentos de la vida universitaria.

*Finalmente, a mi Tata quien siempre se ha preocupado y cuidado junto a mi Lela, que me
acompaña desde el cielo.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) mediante el proyecto, Fondecyt de Iniciación No. 11230092. Agradecer también a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco profundamente al Dr. Víctor Aguilar Vidal, mi profesor guía, que desde el día uno mostro su buena disposición y compromiso con esta memoria. Sus conocimientos, paciencia y apoyo fueron fundamentales en el desarrollo del trabajo.

Agradezco a José Luis Seguel (JLS Ingeniería) por facilitar los planos del puente Juan Pablo II.

Agradezco a Carlos Salazar López, Matías Valenzuela López y Sebastián Aguayo Hernández quienes junto al profesor Víctor me ayudaron en la visita a terreno y conteo de vehículos.

RESUMEN

El puente Juan Pablo II ha sido un componente esencial para la conectividad entre Concepción y San Pedro de la Paz desde su inauguración en 1974. No obstante, el paso del tiempo, los eventos sísmicos significativos y el tránsito no autorizado de camiones de alto tonelaje han comprometido su integridad estructural. Esta investigación analiza los efectos del tráfico pesado real sobre la estructura del puente, utilizando datos recopilados mediante un sistema de pesaje en movimiento (*Weigh-In-Motion*, WIM) instalado en la salida sur del puente entre agosto de 2022 y febrero de 2023. El estudio incluye la consolidación de una base de datos de tráfico, la identificación de configuraciones vehiculares más frecuentes y de mayor tonelaje, la comparación de momentos flectores y fuerzas cortantes inducidas por el tráfico real con las de diseño, así como la cuantificación del daño por fatiga y la estimación de la vida útil remanente del puente.

Los resultados indican que, si bien la mayoría de los vehículos cumplen con las restricciones legales, una proporción significativa de camiones supera los límites de peso bruto vehicular y velocidad. El análisis estructural muestra que algunos camiones generan momentos flectores y fuerzas cortantes mayores a las demandas de diseño definidas por el patrón HS20-44+20%. La evaluación de fatiga revela una acumulación de daños que podría comprometer la seguridad estructural si no se implementan medidas de mitigación en el corto a mediano plazo. Este estudio ofrece información crucial para la gestión de infraestructura crítica y el desarrollo de estrategias de conservación.

ABSTRACT

The Juan Pablo II Bridge has been an essential component for connectivity between Concepción and San Pedro de la Paz since its inauguration in 1974. However, the passage of time, significant seismic events, and the unauthorized transit of heavy trucks have compromised their structural integrity. This research analyzes the effects of actual heavy traffic on the bridge structure using data collected through a Weigh-In-Motion (WIM) system installed at the southern exit of the bridge between August 2022 and February 2023. The study includes the consolidation of a traffic database, the identification of the most frequent and heaviest vehicle configurations, the comparison of bending moments and shear forces induced by actual traffic with those from the design, as well as the quantification of fatigue damage and the estimation of the remaining service life of the bridge.

The results indicate that, although most vehicles comply with legal restrictions, a significant proportion of trucks exceed the gross vehicle weight and speed limits. The structural analysis shows that some trucks generate bending moments and shear forces greater than the design demands defined by the HS20-44+20% pattern. The fatigue assessment reveals an accumulation of damage that could compromise structural safety if mitigation measures are not implemented in the short to medium term. This study provides crucial information for the management of critical infrastructure and the development of conservation strategies.

Índice

| | |
|--|----|
| CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 Motivación | 1 |
| 1.2 Objetivo general | 2 |
| 1.3 Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.4 Alcances | 2 |
| 1.5 Plan de trabajo..... | 3 |
| 1.6 Principales resultados y conclusiones | 3 |
| 1.7 Organización de la memoria | 4 |
| CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE | 5 |
| 2.1 Introducción | 5 |
| 2.2 Marco teórico | 5 |
| 2.2.1 Cargas en puentes..... | 5 |
| 2.2.2 Cargas vivas | 6 |
| 2.2.3 Análisis estructural..... | 6 |
| 2.3 Base de datos..... | 7 |
| 2.3.1 Análisis de una base de datos..... | 7 |
| 2.4 Normas | 7 |
| 2.4.1 Normativa en la época de construcción del puente Juan Pablo II..... | 8 |
| 2.4.2 Normativa vigente en Chile..... | 8 |
| 2.4.3 Diseño según MC Vol. 3..... | 9 |
| 2.5 Fatiga..... | 13 |
| 2.5.1 Evolución del diseño a fatiga en AASHTO | 13 |
| 2.5.2 Método propuesto para cuantificar deterioro | 17 |
| 2.6 Herramientas utilizadas | 21 |

| | | |
|---|--|----|
| 2.6.1 | Estadígrafos de interés | 21 |
| 2.7 | Conclusión..... | 23 |
| CAPITULO 3 METODOLOGÍA..... | | 24 |
| 3.1 | Introducción | 24 |
| 3.2 | Descripción del caso en estudio | 24 |
| 3.3 | Estado actual del puente Juan Pablo II..... | 28 |
| 3.4 | Consolidación de la base de datos..... | 29 |
| 3.5 | Identificación de la configuración de vehículos más frecuentes y los de mayor tonelaje.. | 31 |
| 3.6 | Modelación del comportamiento estructural del puente Juan Pablo II. | 32 |
| 3.7 | Cuantificación del daño generado y vida útil restante. | 34 |
| 3.8 | Conclusión..... | 36 |
| CAPITULO 4 RESULTADOS | | 38 |
| 4.1 | Introducción | 38 |
| 4.2 | Inspección puente Juan Pablo II..... | 38 |
| 4.3 | Base de datos consolidada..... | 44 |
| 4.4 | Vehículos más frecuentes y los de mayor tonelaje | 47 |
| 4.5 | Efectos de la carga viva inducida por el tráfico real | 52 |
| 4.6 | Vida útil y comportamiento a fatiga..... | 61 |
| 4.6 | Conclusión..... | 64 |
| CAPITULO 5 CONCLUSIONES..... | | 66 |
| Bibliografía..... | | 68 |
| ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible | | 63 |
| ANEXO 3.4..... | | 64 |
| ANEXO 3.5..... | | 66 |
| ANEXO 3.6..... | | 70 |
| Anexo 3.6.1 | | 70 |

| | |
|-------------------|----|
| Anexo 3.6.2 | 71 |
| Anexo 3.6.3 | 72 |
| Anexo 3.6.3 | 73 |
| ANEXO 3.7 | 77 |
| ANEXO 4.3 | 79 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1. Precisión del sistema WIM. | 29 |
| Tabla 4.1. Ejemplo de camión de 6 ejes con PBV erróneo. | 44 |
| Tabla 4.2. Cantidad de datos antes y después de aplicar filtros. | 44 |
| Tabla 4.3. Cantidad de datos promedio por día en ambas direcciones de análisis. | 45 |
| Tabla 4.4. Momento y corte de diseño. | 52 |
| Tabla 4.5. Parámetros iniciales | 62 |
| Tabla 4.6. Resultados de daño generado por vehículos WIM y por el camión de diseño a fatiga. | 63 |
| Tabla 4.7. Índice de acumulación de daño | 63 |
| Tabla 4.8. Contribución por eje a la sumatoria de momento efectivo. | 63 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Patrón de carga viva vehicular AASHTO STD. | 10 |
| Figura 2.2. Camión HS20-44 (Unidades en sistema imperial). | 11 |
| Figura 2.3. Camión HS20-44 con factor MOP aplicado. | 12 |
| Figura 2.4. Línea de tiempo de la evolución del diseño a fatiga según AASHTO. | 14 |
| Figura 2.5. Curva S-N para fatiga. | 15 |
| Figura 2.6. Patrón de carga para diseño a fatiga. | 16 |
| Figura 2.7. Curvas S-N según el detallamiento. | 17 |
| Figura 2.8 Factores de impacto según componente en estudio. | 19 |
| Figura 2.9. ADTT según detallamiento en estudio. | 20 |
| Figura 2.10. Gráfico de la distribución normal estándar. | 22 |
| Figura 3.1. Fotografía aérea puente Juan Pablo II. | 25 |
| Figura 3.2. Detalles constructivos de elementos del puente. | 26 |
| Figura 3.3. Fotografía del refuerzo en las cepas del puente. | 27 |
| Figura 3.4. Evidencia fotográfica de la última reparación del puente. | 28 |
| Figura 3.5. Emplazamiento del sistema WIM (recuadro color rojo). | 29 |
| Figura 3.6. Ejemplo de gráfico de la razón WIM/HS20-44+20% versus INE. | 33 |
| Figura 3.7. Valores de m según el material y sección. | 34 |
| Figura 4.1. Patologías observadas. | 39 |
| Figura 4.2. Detalle del refuerzo de las cepas. | 41 |
| Figura 4.3. Refuerzo de cepas. | 42 |
| Figura 4.4. Evidencia fotográfica del paso de camiones en el puente. | 43 |
| Figura 4.5. Datos por día en octubre de 2022. | 46 |
| Figura 4.6. Gráfico de dispersión de todos los registros del WIM en octubre de 2022. | 47 |
| Figura 4.7. Gráfico de dispersión de vehículos de 2 ejes. | 48 |
| Figura 4.8. Gráfico de dispersión de vehículos de 3 ejes. | 49 |
| Figura 4.9. Gráfico de dispersión de vehículos de 4 ejes. | 50 |
| Figura 4.10. Gráfico de dispersión de vehículos de cinco ejes. | 51 |
| Figura 4.11. Gráfico de dispersión de vehículos de seis ejes. | 52 |
| Figura 4.12. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para dos ejes. | 54 |
| Figura 4.13. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para tres ejes. | 55 |
| Figura 4.14. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para cuatro ejes. | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.15. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para cinco ejes..... | 58 |
| Figura 4.16. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para seis ejes. | 60 |
| Figura 4.17. Datos por día con PBV mayor a 9 ton en octubre de 2022..... | 62 |
| Figura A.4.1. Datos por día en agosto de 2022. | 79 |
| Figura A.4.2. Datos por día en septiembre de 2022..... | 80 |
| Figura A.4.3. Datos por día en noviembre de 2022. | 81 |
| Figura A.4.4. Datos por día en diciembre de 2022. | 82 |
| Figura A.4.5. Datos por día en enero de 2023..... | 83 |
| Figura A.4.6. Datos por día en febrero de 2023..... | 84 |

CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El puente Juan Pablo II es un puente vehicular urbano emplazado sobre el río Biobío que conecta las comunas de Concepción y San Pedro de la Paz. Es un puente emblemático, ya que es el más largo de Chile (2310 metros) y fue inaugurado el año 1974, es decir, lleva 50 años en operación. Las estadísticas disponibles (Cook, 2014) indican que un porcentaje importante de los colapsos de puentes (parciales y totales) se dan en este rango de edad. Además, con el terremoto 8.8 M_w ocurrido el 27 de febrero del 2010 en Concepción (United State Department Geological Survey (USGS), 2024) el puente sufrió graves daños estructurales que llevaron a la clausura temporal de este.

Luego de una reparación, de siete meses, el puente tuvo su reapertura en octubre del 2010 con una restricción de tránsito de cualquier tipo de camión y vehículos que superen las 10 toneladas de peso bruto vehicular (Ministerio de transporte y telecomunicaciones (MTT), 2010)

A pesar de esta prohibición, la seremi de Transporte y Telecomunicaciones del año 2022, Claudia García-Lima, afirmó que “el Programa Nacional de Fiscalización desarrolla de forma aleatoria inspecciones a los camiones en el Puente de Juan Pablo II, las cuales siempre terminan en multas debido a la resolución que prohíbe en cualquier horario el paso de este tipo de vehículos por esta vía...las 333 infracciones durante el 2022 se cursaron en ambos ingresos al puente”(Diario Concepción, 2023). Como respuesta a estas infracciones el ministerio de obras públicas (MOP) instaló, el mismo año, un sistema de pesaje en movimiento (WIM según sus iniciales en inglés) en la salida sur del puente que recopiló datos entre agosto de 2022 y febrero de 2023. El actual seremi de Transporte y Telecomunicaciones, Héctor Cautivo, afirmó que “lo que resta es realizar una conservación menor del puente... Es decir, reparar la calzada, las barandas o la señalética, entre otras. Con esos trabajos podría extender su uso, en por lo menos, unos diez años más”(biobiochile.cl, 2024).

El año 2025 el laboratorio del profesor Víctor Aguilar (Universidad de Concepción) realizó un conteo de camiones en la salida sur del puente. Este conteo evidenció que siguen circulando camiones ilegalmente.

Esta investigación tiene como objetivo analizar los efectos estructurales del tráfico pesado real sobre el puente Juan Pablo II, utilizando los datos proporcionados por el sistema WIM. Además, busca determinar si la vida útil remanente del puente corresponde a los diez años proyectados, considerando las condiciones actuales de carga y los posibles deterioros acumulados en su estructura.

1.2 Objetivo general

Evaluar los efectos estructurales inducidos por el tráfico pesado real que solicita el Puente Juan Pablo II, Concepción.

1.3 Objetivos específicos

- 1.- Describir la condición estructural actual del puente Juan Pablo II.
- 2.- Consolidar una base de datos de tráfico real sobre el puente en base a datos de pesaje en movimiento.
- 3.- Caracterizar la configuración de los vehículos más frecuentes en el puente y los de mayor tonelaje.
- 4.- Calcular los efectos estructurales, momentos flectores y fuerzas cortantes, inducidos por el tráfico real.
- 5.- Cuantificar el deterioro por fatiga generado en el puente con el paso de vehículos pesados.

1.4 Alcances

El alcance de esta investigación se limita a los datos recopilados por el sistema WIM durante el periodo comprendido entre agosto de 2022 y febrero de 2023. Con el fin de optimizar los recursos y reducir el costo computacional, se seleccionó solo un mes de registros para el análisis. El estudio estructural se enfocó en un único vano del puente, considerado como una viga simplemente apoyada con una sola vía cargada. Los cálculos del momento flector y la fuerza cortante de diseño se realizaron siguiendo el patrón de carga HS20-44+20%, conforme a las especificaciones del Manual de Carreteras, Volumen 3 (MOP, 2023). Para la evaluación de la fatiga, se asumió que cada paso de un camión equivale a un ciclo de carga.

1.5 Plan de trabajo

La metodología de este trabajo se desarrolló en cinco etapas principalmente.

La primera etapa consistió en describir el puente Juan Pablo II mediante la obtención y análisis de planos pre y post reparación del año 2010. Además, se realizó una visita a terreno con el fin de inspeccionar el estado actual del puente.

La segunda etapa consistió en trabajar con los datos obtenidos del WIM, se escogió el mes con la mayor cantidad de datos por día y con la menor cantidad de errores mediante una rutina de Python que analizara estadísticamente los datos mensuales.

La tercera etapa consistió en filtrar información errónea, segmentar los datos según el peso bruto vehicular (PBV) y la cantidad de ejes mediante restricciones aplicadas en una rutina de Python.

La cuarta etapa consistió en realizar un análisis estructural con los datos anteriormente filtrados. Se busco obtener el mayor corte y momento flector que generaba cada vehículo sobre el vano del puente Juan Pablo II, para ello se realizó el análisis como una viga simplemente apoyada con una vía cargada. Luego, cada corte y momento flector obtenido, se comparó con el corte y momento flector que genera el camión de diseño para obtener así una comparación de los efectos del tráfico real versus las demandas de diseño usualmente consideradas.

Finalmente, en la quinta etapa, se cuantificó el daño que se genera en el puente con el paso de estos vehículos pesados. Para ello se analizó la fatiga generada en los cables y barras de acero de las vigas pretensadas que componen el puente. Se calculó el daño generado por los vehículos pesados registrados en el WIM y se comparó con el daño esperado del camión de diseño durante la vida útil remanente proyectada.

1.6 Principales resultados y conclusiones

La inspección del puente reveló patologías que requieren mantenimiento urgente para prolongar su vida útil y mitigar riesgos. Se detectó un error en el sistema WIM que afecta el cálculo del PBV de vehículos de cuatro o más ejes, lo que requirió corrección. En octubre de 2022, el mes escogido para el análisis, el 31% de los vehículos excedieron los límites de velocidad y PBV, destacándose los de seis ejes que generan un mayor impacto. Los análisis mostraron que algunos vehículos sobrecargan la estructura, con una probabilidad del 76% de generar esfuerzos superiores a los valores de diseño. Además, la cuantificación del deterioro por fatiga en las vigas pretensadas indicó que la vida útil del

puente se reduce de diez a cinco años, lo que subraya la necesidad de restringir la circulación y actualizar los criterios de diseño.

1.7 Organización de la memoria

La estructura de esta memoria se organiza en cuatro capítulos principales. El Capítulo 2 presenta el marco teórico y la revisión bibliográfica relacionada con el diseño de puentes en Chile, la normativa vigente, los métodos utilizados para cuantificar el daño por fatiga en base a los datos del sistema de pesaje en movimiento (WIM), y las herramientas empleadas para el análisis. En el Capítulo 3, se detalla la metodología aplicada para cumplir con los cinco objetivos específicos planteados en el Capítulo 1. El Capítulo 4 expone los principales resultados obtenidos a partir del análisis, junto con su interpretación. Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos, así como recomendaciones y posibles mejoras para futuras investigaciones.

CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En el último tiempo se ha discutido la necesidad de actualizar la normativa vigente respecto al diseño de puente en Chile. Actualmente la influencia de Estados Unidos sigue presente, pues se adoptan los lineamientos de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte; AASHTO según sus iniciales en inglés) junto con prácticas nacionales comunes en el diseño de puentes. Todo lo anterior se expone en el Manual de Carreteras, Volumen 3 (MOP, 2023).

En este capítulo se explican los principales conceptos teóricos utilizados en esta investigación, incluyendo el análisis de cargas vivas, análisis estructural y la normativa aplicable para el diseño de puentes. Además, se describe los tipos de control para la base de datos recopilada mediante el sistema WIM y metodología propuesta para cuantificar el deterioro por fatiga en puentes.

2.2 Marco teórico

El marco teórico aborda los principales conceptos que sostienen la investigación. Se establecen las bases teóricas para el análisis y el alcance de ellas en este trabajo.

2.2.1 Cargas en puentes

Para el análisis estructural de puentes es necesario conocer las cargas a las que se somete la estructura durante su vida útil. Estas cargas se clasifican como cargas permanentes, cargas ambientales y cargas vivas. Esta investigación se centra en las cargas vivas.

2.2.2 Cargas vivas

Las cargas vivas son aquellas que actúan de manera temporal y pueden variar su magnitud y ubicación a lo largo del tiempo en la estructura. Se pueden subclasificar en cargas de nieve, carga de viento, carga de presión de agua, carga viva vehicular, carga viva peatonal o carga dinámica de impacto.

Esta investigación se utiliza principalmente la carga viva vehicular (LL según sus iniciales en inglés).

2.2.3 Análisis estructural

El análisis estructural se centra en estudiar la resistencia, estabilidad y rigidez de las estructuras sometidas a diversas cargas y condiciones. El propósito del análisis estructural es asegurar que una estructura pueda soportar las cargas y fuerzas a las que estará expuesta durante su vida útil sin sufrir fallos o daños significativos.

Las fuerzas internas son las fuerzas que actúan dentro de un cuerpo o estructura en respuesta a las cargas externas que se aplican sobre ella, como las cargas vivas. Estas fuerzas son necesarias para mantener el equilibrio de la estructura y asegurar que las tensiones y deformaciones sean manejadas de manera segura y eficiente.

En particular se consideran dos fuerzas internas:

- **Fuerzas de corte:** Son fuerzas internas que actúan en el plano transversal de un elemento (por ejemplo, una viga) y tienden a desgarrar o cortar el material a lo largo de ese plano. La fuerza de corte se genera, por ejemplo, cuando una viga es sometida a cargas concentradas en un punto.
- **Momentos flectores:** Aunque no son estrictamente "fuerzas" en el sentido clásico, los momentos flectores son un tipo de fuerza interna que genera flexión en los elementos estructurales, como vigas o losas. Estos momentos son causados por cargas aplicadas que generan un momento de rotación, causando que el elemento se doble.

El análisis estructural de esta investigación será realizado en dos dimensiones, en donde el puente en análisis se considera una viga simplemente apoyada con una vía cargada.

2.3 Base de datos

Una base de datos es una colección organizada de datos que se almacena y gestiona de manera que permita su acceso, recuperación y manipulación eficientes. Su propósito es facilitar el almacenamiento estructurado de información y proporcionar mecanismos para realizar operaciones como búsquedas, actualizaciones y eliminaciones de datos de manera rápida y confiable. La base de datos recopilada por el sistema WIM se encuentra en formato .xlsx.

2.3.1 Análisis de una base de datos

Se producen dos tipos de errores en la recopilación de datos de WIM a largo plazo: errores aleatorios (que ocurren individualmente) y errores sistemáticos (que ocurren con frecuencia y afectan a algunos registros) (Ghosn et al., 2011). Para poder garantizar la confiabilidad de los datos se proponen tres tipos de controles: integridad, lógicos y estadísticos (Babu, 2019).

1. Control de integridad: Consiste en identificar y eliminar filas donde haya datos faltantes o filas duplicadas.
2. Control lógico: Consiste en eliminar errores evidentes como por ejemplo velocidades excesivas, pesos por ejes mayores al peso bruto o distancias entre ejes muy pequeñas.
3. Control estadístico: Consiste en analizar el comportamiento mensual de los datos, es decir, que los registros diarios del mes no tengan una gran desviación estándar o que algún día del mes esté incompleto.

2.4 Normas

En la ingeniería civil, las normas son una serie de recomendaciones y lineamientos con respecto a un proceso de diseño o constructivo. Muchas normas poseen un carácter jurídico de ley y el hecho de no respetarlas puede significar sanciones penales. A continuación, se expone la evolución de las normativas respecto a puentes en Chile y se detalla la norma vigente.

2.4.1 Normativa en la época de construcción del puente Juan Pablo II

En la década de los años 70, no existía una norma oficial para el diseño y construcción de puentes en Chile. En la práctica se seguían las normas estadounidenses con especial cuidado del aspecto sísmico, ya que el terremoto de Valdivia del año 1960 cambió por completo el enfoque de diseño de estructuras en Chile. La norma americana vigente en los años de construcción del puente Juan Pablo II era la *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* en su novena edición (AASHTO, 1965). El principal método recomendado para el diseño era el *Allowable Stress Design* (Diseño por Esfuerzo Admisible; ASD según sus iniciales en inglés), que consiste en diseñar la estructura para esfuerzos en que las tensiones en los elementos, calculadas bajo cargas de servicio, no deben superar los esfuerzos permisibles. Estos últimos se calculan dividiendo la resistencia última del material multiplicada un factor de seguridad para cubrir incertidumbres relacionadas con las propiedades del material, las cargas y condiciones de construcción (AISC, 2022). El *American Concrete Institute* (Instituto Americano del Concreto; ACI según sus iniciales en inglés) también tenía recomendaciones para el hormigón a utilizar en puentes, en su norma *ACI-318 Building Code Requirements for Structural Concrete* en su quinta edición (ACI, 1963).

2.4.2 Normativa vigente en Chile

En la actualidad, la norma vigente en Chile es el Manual de Carreteras Volumen 3 (MC Vol. 3), en específico, en el capítulo 3.100 se hace alusión a los criterios para el diseño de puentes (MOP, 2023). Las recomendaciones de este manual continúan referenciando a las normas americanas, esta vez a la decimoséptima edición de la *Standard Specifications for Highway Bridges* (AASHTO, 2002).

Por su parte, la dirección de vialidad del ministerio de obras públicas (DV-MOP) permite, para obras concesionadas, el uso de la versión actualizada de la norma americana, la *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* en su sexta edición (AASHTO, 2012). En esta se recomienda un nuevo enfoque de diseño, el método *Load and Resistance Factor Design* (Diseño por Factores de Carga y Resistencia; LRFD según sus iniciales en inglés) que tiene por objetivo proporcionar un diseño que considere las incertidumbres tanto para las cargas como para las resistencias. LRFD se basa en la teoría de la probabilidad para evaluar el riesgo de falla de una estructura y se diseña en base a un estado límite de servicio y un estado límite último (AISC, 2022).

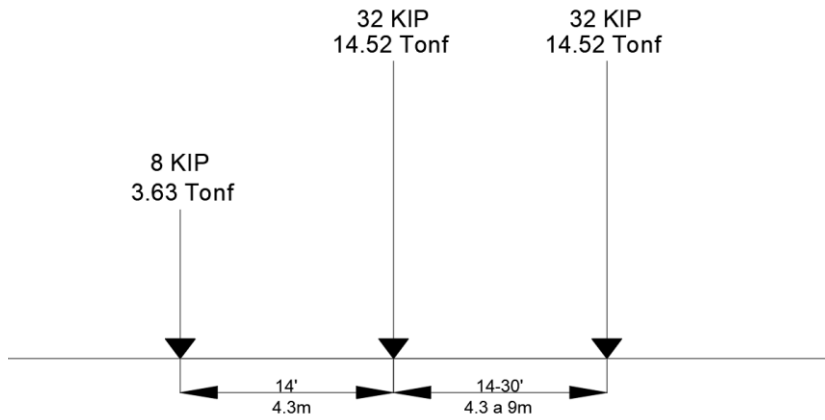
2.4.3 Diseño según MC Vol. 3

Esta investigación se centra en el análisis de las cargas vivas vehiculares (LL), por lo tanto, se detallarán las recomendaciones normativas pertinentes relacionadas con estos tipos de cargas para garantizar un diseño seguro y eficiente.

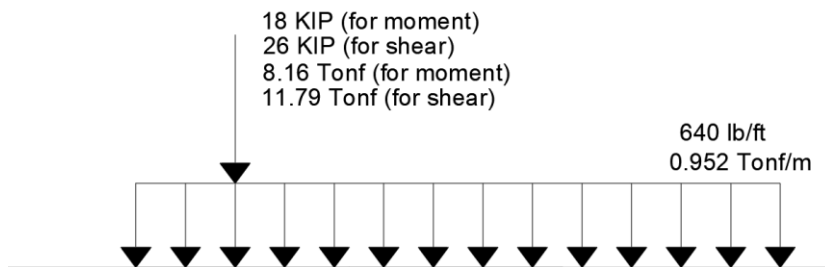
Cuando se aplican cargas vivas vehiculares sobre un puente, se generan momentos flectores y esfuerzos cortantes en los elementos estructurales. El momento flector representa la tendencia de una fuerza a provocar la rotación o flexión de un elemento, mientras que el corte es la fuerza interna que causa deslizamiento entre las secciones de la estructura. Estas solicitaciones determinan la capacidad del puente para soportar las fuerzas dinámicas y estáticas impuestas por el tráfico.

Según lo recomendado en el MC Vol. 3 se deben aplicar los patrones de carga especificados en las *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (AASHTO, 2002). Esta norma proporciona las configuraciones de carga vehicular estándar para el diseño de puentes, permitiendo establecer los valores de momento flector de diseño y corte de diseño. Estos últimos funcionan como límites críticos que las estructuras deben soportar sin comprometer su seguridad o desempeño a largo plazo. En la Figura 2.1 se muestran los patrones de carga recomendados.

(A) STANDART HS20-44 TRUCK



(B) HS20-44 LANE LOADING



(C) MILITARY LOADING

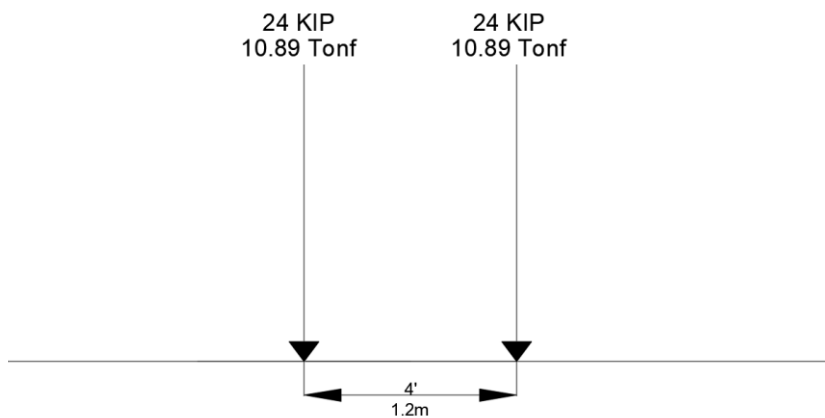


Figura 2.1 Patrón de carga viva vehicular AASHTO STD.
 Fuente: *Standard Specifications for Highway Bridges* (p.22), AASHTO, 2002.

Como se observa en la Figura 2.1 se aplican tres casos de carga distintos. El primer caso corresponde a la aplicación del camión de diseño de la AASHTO HS20-44, el cual representa el tráfico común en Estados Unidos en la época de los 90, el camión se muestra en la Figura 2.2.

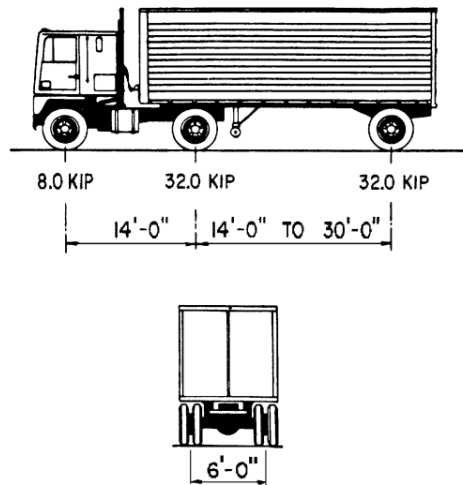


Figura 2.2. Camión HS20-44 (Unidades en sistema imperial).

Fuente: *Standard Specifications for Highway Bridges* (p.22), AASHTO, 2002.

Como se aprecia en la Figura 2.2 el camión de diseño tiene un peso bruto vehicular (PBV) de 32.66 ton (72 kip) con una distancia entre ejes de 4.3 metros (14') entre ejes delanteros y de 4.3 a 9 metros (14' a 30') entre ejes traseros. El segundo patrón de carga mostrado en la Figura 2.1 corresponde a una carga de faja que representa al puente completamente cargado por vehículos (congestión). Además, se agrega una carga puntual que varía para la obtención de momento y corte. El último patrón de carga es un camión militar con dos ejes y un PBV de 21.77 ton (72 kip).

La norma establece que se deben calcular por separado los 3 casos y utilizar para el diseño el máximo valor de momento y máximo valor de corte.

El Manual de Carreteras Vol. 3 establece una consideración adicional al primer patrón de carga, se debe mayorar el camión de diseño HS20-44 por un factor de 1.2, conocido como el factor MOP. Este patrón busca adecuar el camión representativo estadounidense a uno representativo de Chile. En la Figura 2.3 se muestra como quedan las cargas con este factor.

(A) STANDARD HS20-44 TRUCK+20%

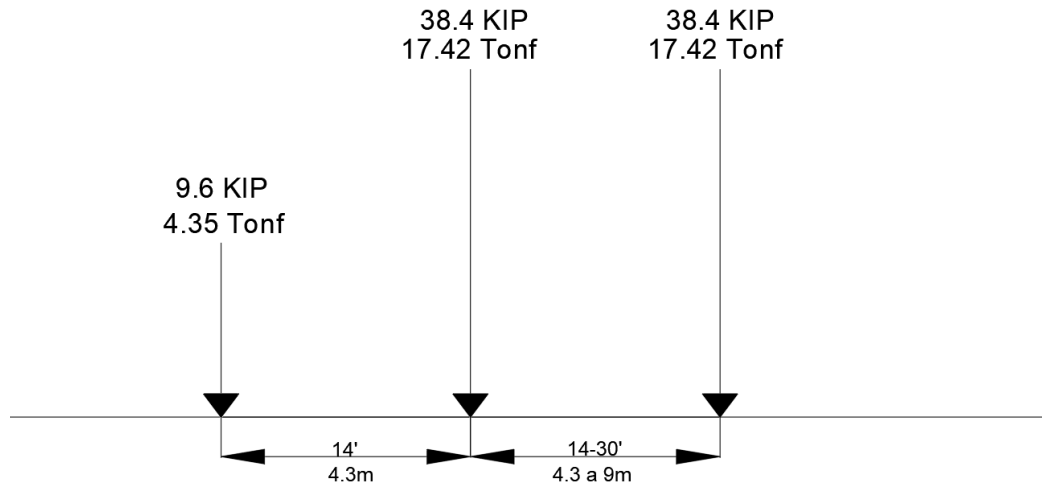


Figura 2.3. Camión HS20-44 con factor MOP aplicado.
 Fuente: Manual de carreteras, Vol. 3, 2023.

Como se observa en la Figura 2.3 el incremento del 20% solo aplica para el camión de diseño, ni la carga de faja ni el tándem militar consideran el incremento.

Adicionalmente, en la norma de AASHTO establece la consideración del impacto, para ello se multiplica el máximo momento flector y corte por un factor según la Ecuación 2.1.

$$I = \text{mín} \left(\frac{50}{L + 125}, 0.3 \right) \quad (2.1)$$

Donde,

I: Factor de impacto.

L: Longitud del vano en pulgadas.

El corte y el momento de diseño varían según las distintas combinaciones de carga establecidas en la norma AASHTO. Las más relevantes para el diseño estructural son las combinaciones de servicio, que representan el funcionamiento normal del puente, y las de resistencia, que consideran condiciones de carga extrema (*Load Factor Design*). En particular, la Ecuación 2.2 presenta la combinación *Service I*, mientras que la Ecuación 2.3 muestra la combinación *Load Factor Design I*, las cuales suelen ser las más determinantes en el diseño.

$$R_n = 1.0D + 1.0LL \quad (2.2)$$

$$R_n = 1.3D + 2.2LL \quad (2.3)$$

Donde,

R_n : Resistencia nominal

D : Carga muerta

LL : Carga viva vehicular

En versiones posteriores de la norma AASHTO (AASHTO, 2012), estas combinaciones fueron modificadas debido al método LRFD. La combinación RESISTENCIA I representa el uso vehicular normal del puente sin considerar la acción del viento, mientras que la combinación SERVICIO I corresponde a la operación normal del puente bajo la influencia de un viento de 90 km/h, tomando en cuenta todas las cargas con sus valores nominales. La Ecuación 2.4 presenta la combinación SERVICIO I, mientras que la Ecuación 2.5 muestra la combinación RESISTENCIA I.

$$\phi R_n = 1.0D + 1.0D_w + 1.0LL \quad (2.4)$$

$$\phi R_n = 1.25D + 1.5D_w + 1.75LL \quad (2.5)$$

Donde,

ϕ : Factor de reducción (varía según material y efecto)

R_n : Resistencia nominal

D : Carga muerta

D_w : Carga de pavimento

LL : Carga viva vehicular

2.5 Fatiga

La fatiga es un estado límite de iniciación y crecimiento de grietas resultantes de la aplicación cíclica de cargas vivas (AISC, 2022). Es un factor crítico para considerar en el diseño y evaluación de puentes de acero y puentes compuestos (Casas & Crespo-Minguillon, 1998).

2.5.1 Evolución del diseño a fatiga en AASHTO

En los años 30, en Norteamérica, se realizaron los primeros estudios para el diseño a fatiga de puentes de acero (Wilson & Coombe, 1939). Posteriormente, en la década de los 60, la AASHTO introdujo las primeras recomendaciones para el diseño a fatiga. En la Figura 2.4 se muestra una línea de tiempo con las principales actualizaciones de la norma AASHTO con respecto al diseño a fatiga.

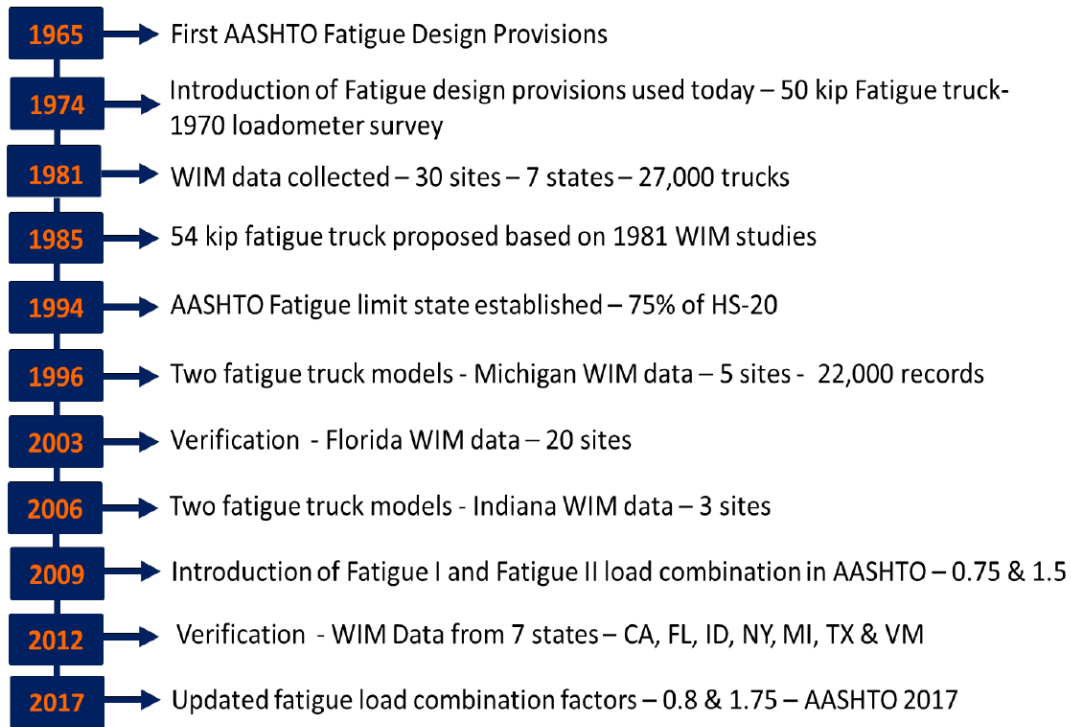


Figura 2.4. Línea de tiempo de la evolución del diseño a fatiga según AASHTO.

Fuente: *Quantifying the Fatigue Damage Accumulation in Bridges* (p. 109), Babu, 2019.

En la Figura 2.4 se aprecia evolución y calibración de los modelos para calcular la fatiga. Un hito importante se trata del uso de las curvas *Stress-Number of cycles* (Esfuerzo-Número de ciclos, S-N según sus iniciales en inglés). El ingeniero alemán August Wöhler fue el pionero en la construcción de estas curvas mediante ensayos experimentales donde el material en estudio es sometido a tensiones cíclicas máximas y se registra el número de ciclos hasta la rotura del material (Wöhler, 1870). En la Figura 2.5 se muestra una curva típica S-N para estudiar fatiga.

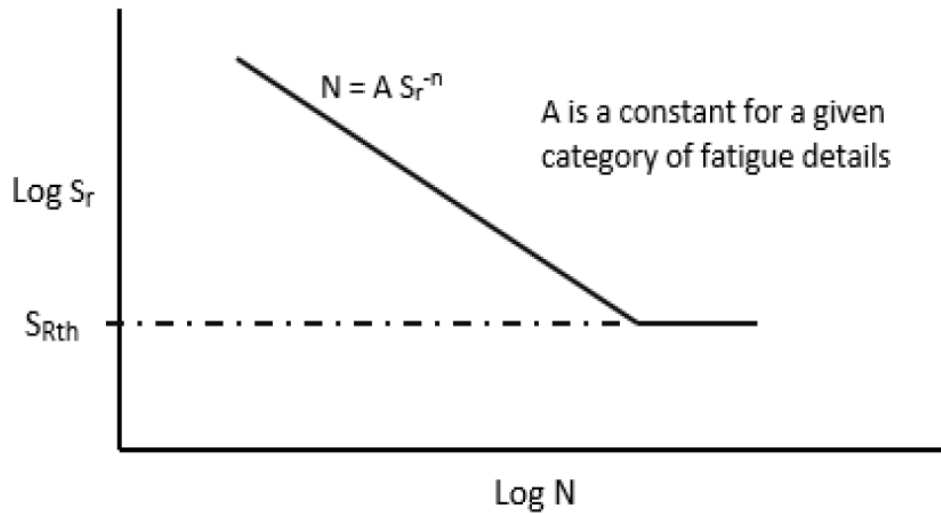


Figura 2.5. Curva S-N para fatiga.

Fuente: *Quantifying the Fatigue Damage Accumulation in Bridges* (p. 110), A. Babu, 2019.

Se puede notar que la curva de la Figura 2.5 sigue la Ecuación 2.6.

$$N = \frac{A}{S_r^3} \tag{2.6}$$

Donde,

N : Número de ciclos hasta la falla

A : Constante que depende del detallamiento en estudio

S_r : Rango de esfuerzo aplicado

Se observa un límite de esfuerzo llamado *threshold stress range* (Rango de tensión umbral; S_{Rth}) que es donde el material no falla al aplicar infinitas cargas cíclicas. Este límite es clave a la hora de diseñar puentes ya que entrega un límite donde teóricamente la vida útil para fatiga es infinita (Fisher, 1984a). En la duodécima edición de las *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (AASHTO, 1974) se introdujo un patrón de carga para el diseño a fatiga. Este patrón utiliza el camión de diseño HS20-44, con una reducción del PBV del 30%, resultando en un PBV de 22.68 toneladas (50 kip). La distribución del peso en los tres ejes del camión es de 0.122, 0.444 y 0.444 del PBV, respectivamente. Posteriormente, este PBV se actualizó a 26.13 toneladas (57.6 kip), que es el valor utilizado actualmente. La Figura 2.6 ilustra el patrón de carga actual para el diseño a fatiga.

FATIGUE TRUCK GVW 57.6 KIP

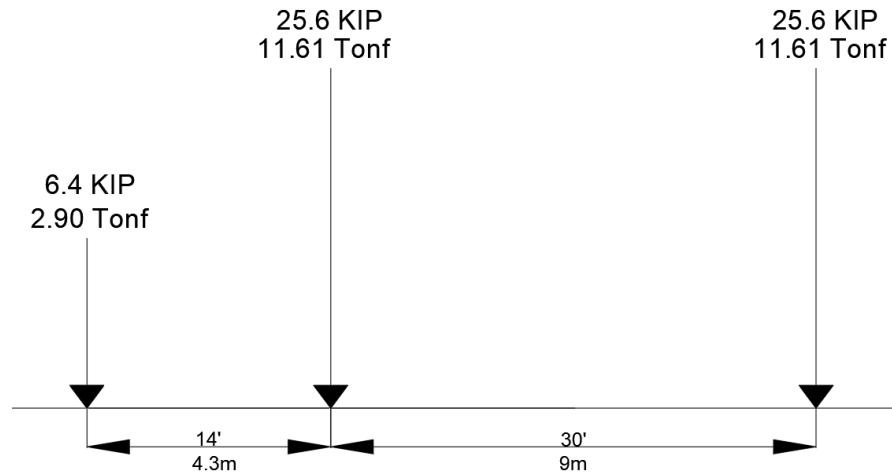


Figura 2.6. Patrón de carga para diseño a fatiga.

Fuente: *LRFD Bridge Design Specifications*, AASHTO, 2017.

El camión mostrado en la Figura 2.6 fue validado en diferentes estudios realizados entre 1994 y 2009. En Michigan, Estados Unidos, se analizaron cinco diferentes bases de datos provenientes de un WIM para validar el uso del camión de diseño (Laman & Nowak, 1996). Posteriormente, en 2006, se proponen dos nuevos modelos de camiones para fatiga como alternativa al camión AASHTO (Chotickai & Bowman, 2006). Finalmente, en 2012, se usaron bases de datos de WIM provenientes de siete estados en Norteamérica (California, Florida, Idaho, New York, Michigan, Texas y Vermont), los cuales confirmaron la validez del camión de diseño de AASHTO para condiciones de fatiga.

Actualmente, la octava edición de la *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2017) incluye una sección específica dedicada al diseño a fatiga para puentes de acero y compuestos.

En la sección 3.4 de esta norma se establecen los estados límite para fatiga, el primer estado “*Fatigue I*” es una combinación que representa una vida útil infinita para fatiga y fractura, por otro lado, el segundo estado “*Fatigue II*” es una combinación que representa una vida útil finita para fatiga y fractura.

En la sección 6.6.1.2.2 de la AASHTO LRFD se establece el criterio de diseño para las cargas que inducen fatiga en la estructura. En particular se considera la Ecuación 2.7

$$\gamma(\Delta f) \leq (\Delta F)_n \quad (2.7)$$

Donde,

γ : Factor para la combinación de carga para fatiga (AASHTO 2017, Tabla 3.4.1-1)

(Δf): Efecto de la carga, rango de carga generado por la carga viva de fatiga (AASHTO 2017, Artículo 3.6.1.4)

(ΔF)_n: Resistencia nominal a fatiga (AASHTO 2017, Artículo 6.6.1.2.5)

2.5.2 Método propuesto para cuantificar deterioro

Babu (2019) propone un método para cuantificar el daño generado por fatiga en puentes de acero de Estados Unidos con datos que provienen de un sistema WIM.

La metodología utilizada se basa en las curvas S-N, en particular, se siguen las curvas establecidas en la *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2017) a partir de la Ecuación 2.8.

$$N = AS^{-m} \tag{2.8}$$

Donde,

m : Constante de la pendiente en la curva S-N

S : Rango de esfuerzo nominal

N : Número de ciclos hasta la falla

A : Constante según el detallamiento en estudio

En la Figura 2.7 se muestra las distintas curvas S-N que contiene la norma.

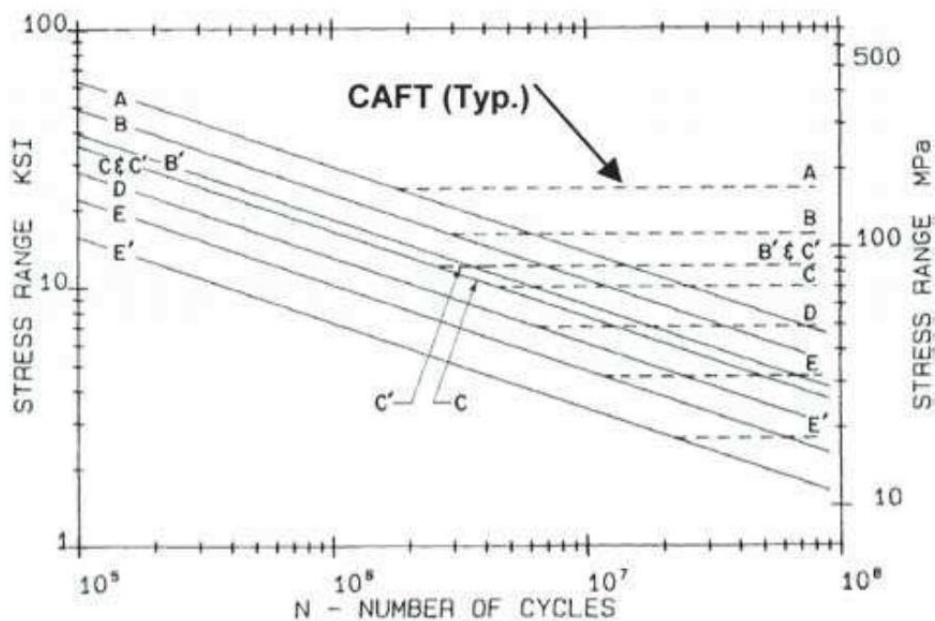


Figura 2.7. Curvas S-N según el detallamiento.

Fuente: *LRFD Bridge Design Specifications* (p. 745), AASHTO, 2017.

En la Figura 2.7 se puede notar que las curvas están separadas según la categoría del detallamiento en estudio y para cada categoría existe un umbral de amplitud de fatiga constante (CAFT según sus iniciales en inglés).

Con esta información y usando la regla “*Palmgren-Miner*” (Miner, 1945) se puede tener un método racional para cuantificar el daño acumulado por fatiga en puentes de acero. Esto se resume en la Ecuación 2.9.

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.9)$$

Donde,

n_i : Número de veces que ocurre una magnitud de esfuerzo S_i

N_i : Número de ciclos hasta la falla con un esfuerzo constante S_i

El paso de un camión o vehículo pesado sobre un puente genera múltiples ciclos de carga (Babu, 2019). La *American Society for Testing and Materials* (Sociedad Americana para pruebas y Materiales; ASTM según sus iniciales en inglés) tiene documentados diversos métodos para poder calcular el número de ciclos (ASTM, 2017), sin embargo, poder determinar la cantidad de ciclo generados es complejo computacionalmente. Por esta razón, se establece que se genera un ciclo por vehículo.

Para representar el esfuerzo acumulado por la pasada de múltiples vehículos pesados se utiliza el concepto de esfuerzo efectivo (S_{eff}), y se calcula según la Ecuación 2.10.

$$S_{eff} = \left[\sum \frac{n_i}{N} S_i^m \right]^{1/m} \quad (2.10)$$

Donde,

m : Constante de la pendiente en la curva S-N

n_i : Número de ciclos generado por el i -ésimo rango de esfuerzo S_i

N : Total de ciclos de esfuerzo

El daño por fatiga es resultado de rangos de tensión generados por el momento flector que genera el vehículo. Podemos extender la Ecuación 2.10 como:

$$M_{eff} = \left[\sum \frac{n_i}{N} M_i^m \right]^{1/m} \quad (2.11)$$

Donde,

M_{eff} : Momento efectivo

m : Constante de la pendiente en la curva S-N

n_i : Número de ciclos generado por el i -ésimo momento flector M_i

N : Total de ciclos de esfuerzo

Para cuantificar el deterioro generado por el paso de vehículos pesados se utiliza la Ecuación 2.12, que es una derivación de la Ecuación 2.8.

$$D = NM_{eff}^m \tag{ 2.12 }$$

Donde,

D : Daño acumulado

m : Constante de la pendiente en la curva S-N

M_{eff} : Momento efectivo

N : Total de ciclos de esfuerzo

Para comparar el daño causado de los camiones registrados por el WIM, se calcula el momento flector generado por el camión de fatiga (Figura 2.6) en el vano en estudio. Además, se debe considerar un factor de impacto según la Figura 2.8, este factor se utiliza en la Ecuación 2.13.

| Component | IM |
|------------------------------------|-----|
| Deck Joints—All Limit States | 75% |
| All Other Components: | |
| • Fatigue and Fracture Limit State | 15% |
| • All Other Limit States | 33% |

Figura 2.8 Factores de impacto según componente en estudio.
Fuente: *LRFD Bridge Design Specifications* (p. 88), AASHTO, 2017.

$$M_{FTIM} = (1 + IM) * M_{FT} \tag{ 2.13 }$$

Donde,

M_{FTIM} : Momento de diseño considerando impacto

IM : Factor de impacto

M_{FT} : Momento generado por el camión de diseño a fatiga

Para obtener el daño causado por el camión de diseño (D_{FT}) se utiliza la Ecuación 2.14

$$D_{FT} = T * M_{FTIM} * N_{FT} \tag{ 2.14 }$$

Donde,

T : Cantidad de pasadas proyectadas durante la vida útil

M_{FTIM} : Momento generado por el camión de diseño a fatiga considerando impacto

N_{FT} : Cantidad de ciclos generados por una pasada del camión de fatiga en el puente

La cantidad de pasadas proyectada (T) depende de la vida útil proyectada y el *Average Daily Truck Traffic* (Promedio Diario de Tráfico de Camiones, ADTT según sus iniciales en inglés). La Ecuación 2.15 indica cómo se relacionan estas variables.

$$T = t * ADTT \tag{ 2.15 }$$

Donde,

t : Vida útil proyectada en días

$ADTT$: Promedio diario de tráfico de camiones en una vía del puente

Para calcular el ADTT se establece una vida útil de 75 años y según la categoría del detallamiento en estudio se le asigna un valor en camiones/día como se observa en la Figura 2.9.

| Detail Category | 75-year ($ADTT$) _{SL} Equivalent to Infinite Life (Trucks/Day) |
|-----------------|---|
| A | 20,410 |
| B | 5,085 |
| C | 2,310 |
| D | 2,465 |
| E | 2,115 |
| F | 2,005 |

Figura 2.9. ADTT según detallamiento en estudio.

Fuente: *LRFD Bridge Design Specifications* (p. 1077), AASHTO, 2017.

Finalmente se establece un índice de acumulación de daño con la Ecuación 2.16, donde el numerador de la ecuación indica el daño generado por los vehículos registrados por el WIM y el denominador el daño generado por el camión de diseño para fatiga.

$$\alpha = \frac{N_{WIM} * M_{eff}^m}{T * N_{FT} * M_{FT}^m} \tag{ 2.16 }$$

Donde,

α : Índice de acumulación de daño

N_{WIM} : Número de ciclos generado por los vehículos registrados del WIM

M_{eff} : Momento efectivo generado por los vehículos registrados del WIM

m : Constante de la pendiente en la curva S-N

T : Número de pasadas del camión de fatiga durante la vida útil proyectada

N_{FT} : Número de ciclos que genera una pasada del camión de fatiga

M_{FT} : Momento generado por el camión de fatiga

2.6 Herramientas utilizadas

En esta sección se describirán las herramientas que fueron de utilidad para el desarrollo de esta investigación.

2.6.1 Estadígrafos de interés

Una herramienta estadística es un conjunto de métodos, técnicas o software utilizados para recolectar, organizar, analizar, interpretar y presentar datos. Estas herramientas ayudan a identificar patrones, realizar predicciones, y tomar decisiones basadas en datos.

En nuestra investigación se utilizaron métodos estadísticos de medida de tendencia central y medidas de dispersión, estos fueron:

- **Media:** representa el valor promedio de un conjunto de datos. Se calcula sumando todos los valores del conjunto y dividiendo el resultado por la cantidad total de valores.
- **Mediana:** representa el valor que divide un conjunto de datos ordenado en dos partes iguales. Es decir, la mitad de los datos está por debajo de la mediana y la otra mitad por encima.
- **Moda:** indica el valor o los valores que aparecen con mayor frecuencia en un conjunto de datos.
- **Desviación Estándar:** indica cuánto se desvían, en promedio, los valores de un conjunto de datos con respecto a su media. Es decir, mide la variabilidad o dispersión de los datos.

También se usaron herramientas probabilísticas que aplican los principios de la probabilidad para predecir la ocurrencia de eventos o estimar el comportamiento de variables aleatorias bajo condiciones desconocidas.

Para la confección de gráficos se utilizó la inversa normal estándar, esta se refiere al valor de z de la distribución normal estándar correspondiente a una probabilidad acumulada p .

La distribución normal estándar es una campana simétrica centrada en $\mu = 0$ y con una desviación estándar $\sigma = 1$. En un gráfico, la curva representa la densidad de probabilidad de la distribución normal.

- Área bajo la curva: La probabilidad acumulada corresponde al área bajo la curva hasta el valor z .
- Inversa: Si conocemos una probabilidad acumulada p , podemos encontrar el valor de z en la distribución normal estándar que corresponda a ese p . Este valor es el percentil de la distribución.

En la Figura 2.10 se muestra la campana de la distribución normal estándar.

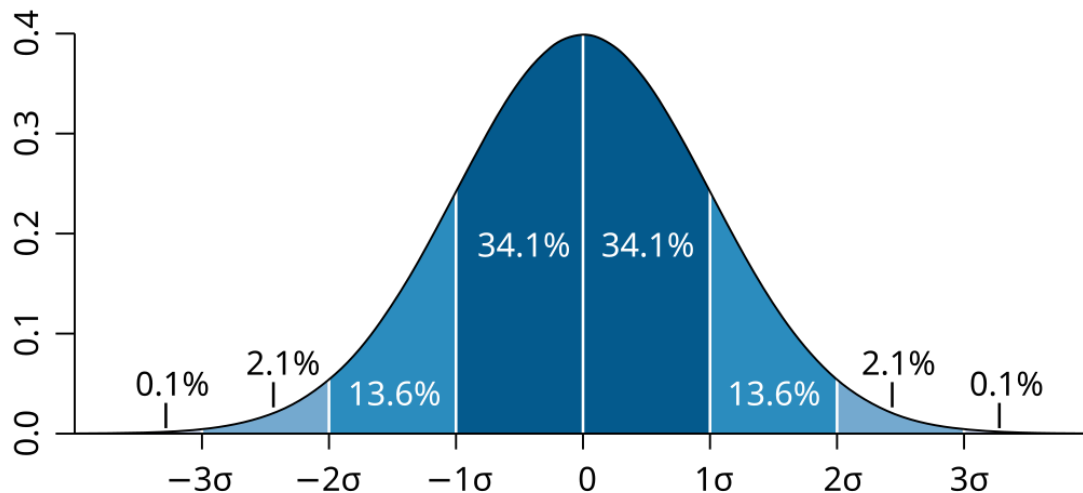


Figura 2.10. Gráfico de la distribución normal estándar.

Fuente: (*Estadística Básica - Google Libros*, n.d.)

Como se observa en la Figura 2.10 los valores de z corresponden al eje X y a medida que aumenta z disminuye la probabilidad de excedencia.

2.7 Conclusión

Esta investigación se analiza la carga vehicular real que circula sobre el puente Juan Pablo II, utilizando las disposiciones actuales de diseño en Chile establecidas en el Manual de Carreteras, Volumen 3 (MC Vol. 3). Esto es relevante debido a que, en la época de construcción del puente, no era claro el método empleado para el diseño estructural. El análisis se realiza comparando el momento flector y el esfuerzo cortante registrados con tecnología WIM con los valores de diseño normativos.

Adicionalmente, se adapta una metodología existente para la cuantificación del deterioro estructural, originalmente ejemplificada para puentes de acero, al caso particular del puente Juan Pablo II, compuesto de hormigón armado con vigas pretensadas. Esta adaptación permite evaluar las condiciones actuales del puente considerando las características específicas de sus materiales y diseño

CAPITULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En el capítulo anterior se exponen la teoría y normativa para el diseño de puentes en Chile y Norteamérica. Se exponen las últimas investigaciones sobre fatiga en puentes y las normas que lo rigen.

Tomando lo anterior en cuenta, en este capítulo se plantea la metodología que rigió la investigación, para así poder cumplir con los objetivos específicos propuestos en el Capítulo 1.

3.2 Descripción del caso en estudio

Se realizó un análisis de los planos del puente Juan Pablo II anteriores a la reparación efectuada tras el terremoto de 2010.

La estructuración es de un puente tipo viga con una longitud total de 2130 metros, compuesto por 70 vanos de 33 metros de largo y 22 metros de ancho, apoyados sobre siete vigas de hormigón pretensado. Cada apoyo se sostiene mediante dos cepas de 4.4 metros de altura, las cuales están conectadas a dos pilotes de 2.5 metros de diámetro y 16 metros de longitud, conformando el sistema de fundación principal. En la Figura 3.1 se muestra una fotografía aérea de la condición actual del puente.

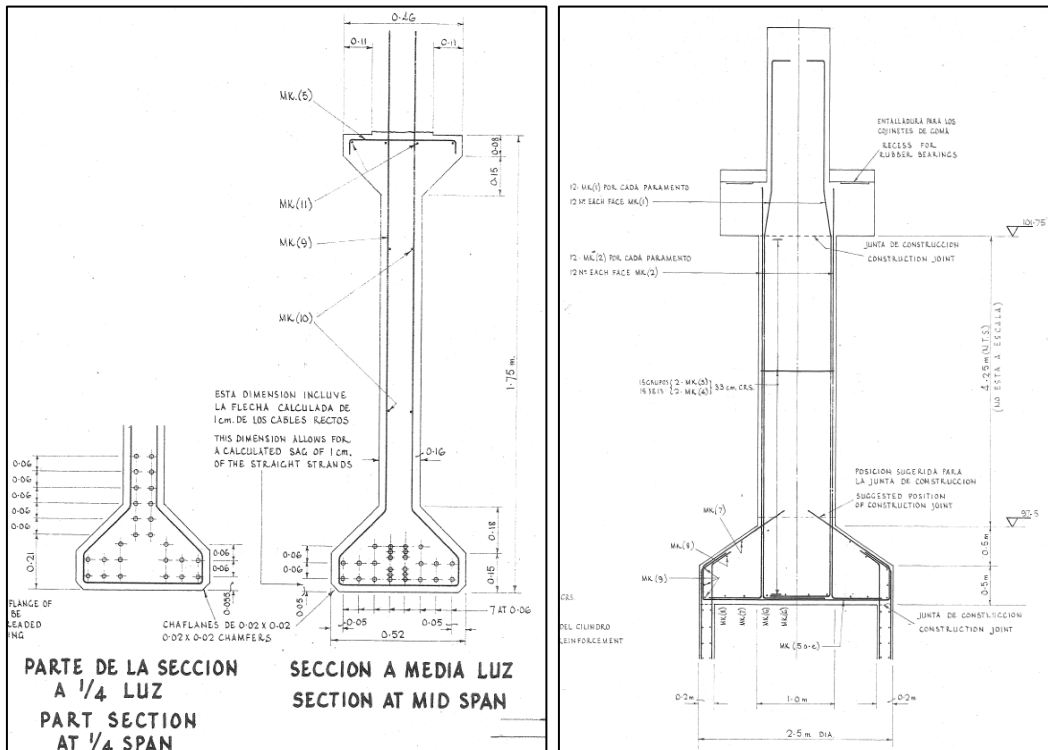


Figura 3.1. Fotografía aérea puente Juan Pablo II.
 Fuente: Fotos de B. Catalán (2025), Fondecyt Ini. No. 11230092.

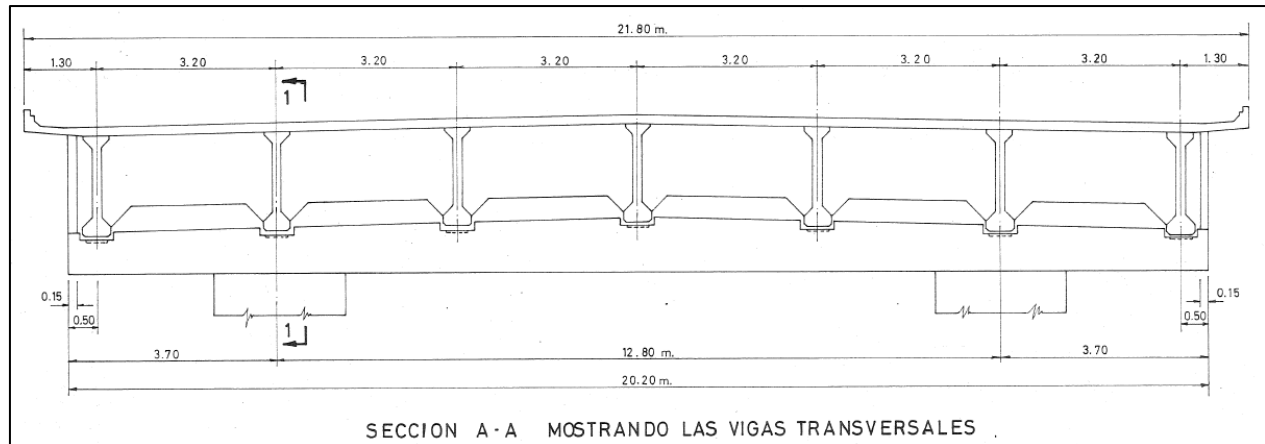
En la Figura 3.2 se muestran secciones transversales de las vigas, cepas y tablero obtenidas de los planos de la época de construcción del puente.

(a) Sección transversal viga pretensada

(b) Sección transversal cepa



(c) Vista transversal del tablero

**Figura 3.2. Detalles constructivos de elementos del puente.**

Fuente: Constructora MARIO MILLÁN LTDA y E.W.H. GIFFORD&PARTNERS (n.d).

El terremoto de 2010 causó graves daños estructurales en el puente Juan Pablo II, incluyendo asentamientos diferenciales, fisuración en las cepas, deterioro del pavimento y pérdida de sección en elementos de hormigón. Debido a la importancia estratégica del puente para la conectividad y al estado de catástrofe nacional, se llevó a cabo una reparación urgente que se completó en un plazo de ocho meses. El costo total de la intervención ascendió a 5200 millones de pesos, y como medida preventiva, se estableció un límite de 10 toneladas de PBV para su uso posterior. En la Figura 3.3 se muestra el refuerzo construido en las cepas que sufrieron asentamientos diferenciales severos.



Figura 3.3. Fotografía del refuerzo en las cepas del puente.

Fuente: Fotos de B. Catalán (2025), Fondecyt Ini. No. 11230092.

En 2017, la empresa ICAFAL ejecutó la última reparación importante del puente Juan Pablo II. La obra consistió principalmente en el refuerzo de nueve cepas mediante la instalación de una estructura metálica tipo marco adosada a las cepas existentes. Además, se realizaron trabajos de inyección de fisuras y grietas, reposición de juntas de dilatación, bacheo del pavimento, y reparación de elementos de hormigón en vigas y losas, entre otras intervenciones destinadas a mejorar la seguridad y durabilidad del puente. La Figura 3.4 presenta evidencia de las reparaciones realizadas.



Figura 3.4. Evidencia fotográfica de la última reparación del puente.

Fuente: ICAFAL, 2018.

3.3 Estado actual del puente Juan Pablo II

Para determinar la condición estructural actual del puente se realizó una inspección visual en terreno. Durante la visita, se examinaron cuidadosamente los elementos estructurales principales, incluyendo los apoyos, las vigas y el tablero, tanto en la parte inferior como en la superior del puente. El objetivo fue identificar posibles patologías estructurales o errores constructivos que pudieran comprometer su desempeño o seguridad. Además, se fiscalizó el paso de camiones sobre el puente, el cual está prohibido por ley.

3.4 Consolidación de la base de datos

El año 2022 se instaló un sistema WIM en la salida sur del puente (dirección hacia San Pedro). El dispositivo usado fue el XL-1000-W de la compañía *Excel Technology Co.* En la Figura 3.5 se ilustra el emplazamiento del sistema a la salida sur del puente.



Figura 3.5. Emplazamiento del sistema WIM (recuadro color rojo).

Cabe destacar que el sistema no abarca las cuatro pistas del puente Juan Pablo II, sino que solo dos pistas, una de la dirección Concepción hacia San Pedro (CCP-SP) y la otra en la dirección San Pedro hacia Concepción (SP-CCP). En ambos casos se instaló en la pista derecha.

Según el manual del fabricante, este dispositivo utiliza sensores piezoeléctricos que funcionan mediante elementos de cuarzo especialmente diseñados para contar ruedas y determinar los pesos por eje de los vehículos que circulan sobre el puente. Cuando una fuerza es aplicada sobre la superficie del sensor, los elementos de cuarzo generan una carga eléctrica proporcional al peso aplicado.

A continuación, en la Tabla 3.1 se informa la precisión del sistema de pesaje en movimiento.

Tabla 3.1. Precisión del sistema WIM.

| | |
|--------------------|----------|
| Espacio entre ejes | +/- 2 cm |
|--------------------|----------|

| | |
|---|-----------|
| Error en la velocidad | +/- 1% |
| Error en el largo del vehículo | +/- 20 cm |
| Error en pesaje por ejes/peso total vehicular | < 5% |

Como se observa en la Tabla 3.1 la precisión del dispositivo es alta, por lo tanto, para esta investigación no se consideró ningún tipo de corrección por precisión a los valores obtenidos en la base de datos.

Los datos fueron medidos desde agosto de 2022 hasta febrero de 2023, en particular, se especifica la siguiente información:

- Fecha y hora: En formato **dd/mm/YYY hh:mm:ss**.
- Pista: San Pedro – Concepción o Concepción – San Pedro.
- Categoría: Autos, Station Wagon, Camionetas, Furgones y Jeeps; Autos, Station Wagon, Camionetas, Furgones y Jeeps con remolque o caravana; Bus o camión de dos ejes; Camión con remolque; Camión de cuatro ejes; Camión de tres ejes o Camión semi remolque.
- Velocidad: Se informa en kilómetros/hora.
- Peso por eje: Se informa el peso en kilogramos de hasta siete ejes distintos.
- Distancia entre ejes: Se informa la distancia en milímetros, se informan hasta seis distancias entre ejes.
- Peso total: Se informa en kilogramos.

El principal software utilizado para el procesamiento de datos fue *Jupyter Notebook*, que es una herramienta de código abierto para crear y compartir documentos que contienen código ejecutable, texto explicativo, visualizaciones de datos y ecuaciones matemáticas. En nuestro caso se usó con el lenguaje de programación de *Python*, dado que posee una sintaxis sencilla y legible. Con este programa se consolidó la base de datos.

Inicialmente se realizó un control de calidad de los datos mediante una rutina donde las principales restricciones impuestas fueron:

- Eliminar filas donde todos los pesos por ejes sean 0 kg o solo se informe un eje (control de integridad).
- Eliminar filas duplicadas (control de integridad).
- Eliminar filas donde el peso de un eje aporte más del 80% del PBV (control lógico).

- Eliminar filas donde la distancia entre ejes no sea mayor a 1 metro y menor a 30 metros (control lógico).
- Eliminar filas donde la velocidad sea mayor a 150 km/h (control lógico).
- Eliminar filas donde la sumatoria de los pesos por ejes no sea igual al PBV (control lógico).

Los objetivos lógicos definidos para el procesamiento de datos del sistema WIM se enfocan en mejorar la calidad y consistencia de la información. El primer objetivo elimina registros de vehículos donde el peso de un eje representa el 80% o más del PBV, descartando configuraciones atípicas en vehículos de dos ejes con distribución desproporcionada de peso. El segundo objetivo excluye registros con distancias entre ejes no comunes en la práctica, mientras que el tercero filtra velocidades superiores a 150 km/h, límite máximo registrado por el sistema. Finalmente, el cuarto objetivo verifica la coherencia entre el PBV y la suma de los pesos por eje, garantizando datos consistentes para el análisis estructural y de fatiga del puente.

Para consolidar y validar la base de datos entregada se hizo un análisis individual de cada mes donde se segregó por día los registros y se calculó la media de datos diarios (control estadístico). Todo lo anterior se resumió en un gráfico de barras para escoger el mes con mayor cantidad y regularidad de datos (ver Anexo 3.4).

3.5 Identificación de la configuración de vehículos más frecuentes y los de mayor tonelaje.

Se escribió una rutina que agrupara los datos según el número de ejes. Se observó que el sistema entrega el peso de hasta siete ejes, sin embargo, no se registraron vehículos con siete ejes en el mes en estudio, por lo tanto, el número de ejes (N) fue desde dos a seis ejes.

El puente Juan Pablo II cuenta con una restricción de máximo 10 toneladas de PBV y otra restricción de máximo 70 km/h de velocidad. Es por esto por lo que se realizó un gráfico de velocidad versus PBV de todos los vehículos registrados en el WIM para visualizar que tipo de vehículos no cumplen con la ley vigente. Posteriormente se separó el mismo gráfico según el número de ejes, para visualizar la tendencia de vehículos según su número de ejes (ver Anexo 3.5).

Con esto se pudo identificar los vehículos más frecuentes y los de mayor tonelaje.

3.6 Modelación del comportamiento estructural del puente Juan Pablo II.

Para estudiar el comportamiento estructural del puente se usó como parámetros el momento flector y corte generado en el vano por los vehículos registrados con el WIM. No se consideran vehículos livianos (PBV < 9 ton) por el mismo motivo que se explica en la sección 3.7.

Se escribió una rutina que agrupaba los registros según el número de ejes y que elimine vehículos con PBV menor a 9 ton (ver Anexo 3.6.1). Para calcular el momento flector y corte se escribió otra rutina (ver Anexo 3.6.2) la cual recorre los siguientes pasos:

1. Tomar una de las bases agrupadas por número de ejes (N=2,3,4,5 o 6).
2. Aplicar el filtro para no usar vehículos livianos, es decir, PBV mayor a nueve toneladas.
3. Extraer y asignar a una matriz (M) las columnas de peso por eje y distancia entre ejes.
4. Se ingresan las condiciones de borde, el largo del vano (L) y el incremento de discretización de las posiciones del camión a lo largo del puente (DL). Además, se crea una matriz de resultados (M_R) con una cantidad de filas igual al largo de la matriz M y dos columnas.
5. Se toma la primera fila de M y se posicionan las cargas al inicio del vano. Estas cargas se mueven una distancia DL hasta llegar al otro extremo del vano.
6. Para cada posición calculada en el paso anterior, se determinan el momento flector y el corte. Cada eje se considera como una fuerza puntual independiente, y sus efectos se suman aplicando el principio de superposición. Posteriormente, se identifica el máximo momento flector y el máximo corte, almacenándolos en la matriz M_R, donde el momento flector se registra en la primera columna y el corte en la segunda.
7. Este proceso se repite iterativamente para todas las filas de la matriz M.

Para comparar lo obtenido se calcularon, mediante una rutina, el momento flector y corte generado por el camión HS20-44 (ver Anexo 3.6.3), según lo establecido en la *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (AASHTO, 2002). A este camión se le aplicó el factor MOP de 1.2 y no se consideró el factor impacto ya que los momentos y cortes calculados para los vehículos del registro tampoco lo consideran.

Para visualizar los resultados se calcularán razones de utilización con la Ecuación 3.1 y Ecuación 3.2.

$$R_M = \frac{M_{WIM}}{M_{HS20-44+20\%}} \quad (3.1)$$

Donde,

R_M : Razón de utilización de momento

M_{WIM} : Momento flector máximo obtenido por el vehículo registrado en el WIM

$M_{HS20-44+20\%}$: Momento de diseño.

$$R_V = \frac{V_{WIM}}{V_{HS20-44+20\%}} \tag{3.2}$$

Donde,

R_V : Razón de utilización de corte

V_{WIM} : Corte máximo obtenido por el vehículo registrado en el WIM.

$V_{HS20-44+20\%}$: Corte de diseño.

Estos factores se calcularon de forma separada para las bases agrupadas según el número de ejes.

Finalmente se generaron gráficos (ver Anexo 3.6.4) Inversa Normal Estándar versus la razón R_M e Inversa Normal Estándar versus la razón R_V para cada configuración de ejes. En la Figura 3.6 se muestra un ejemplo de este gráfico.

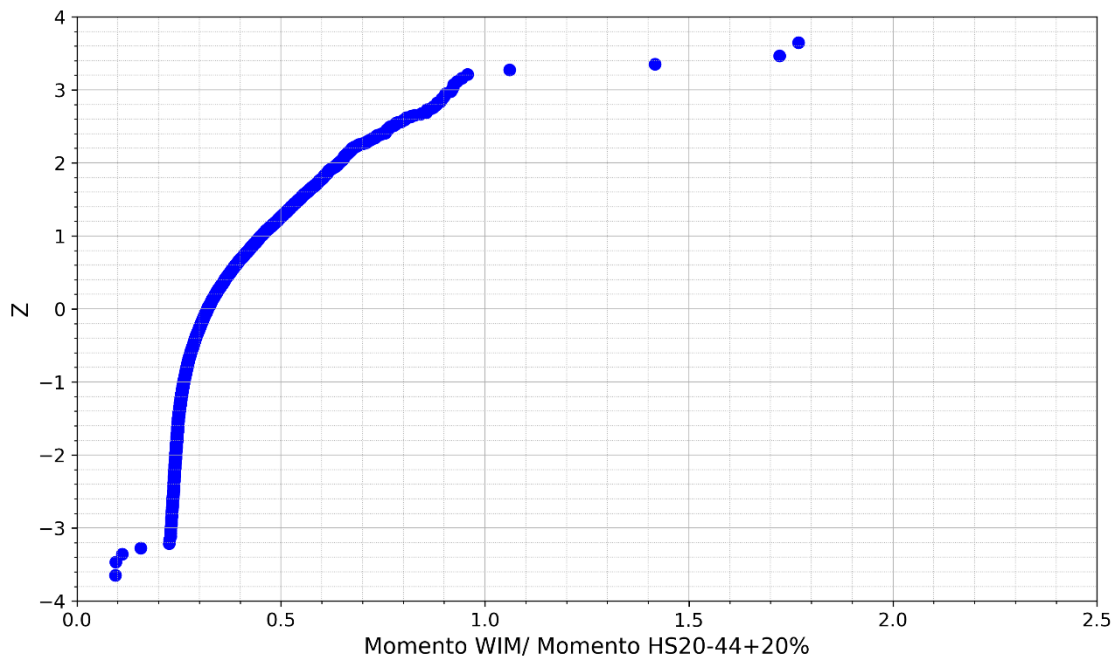


Figura 3.6. Ejemplo de gráfico de la razón WIM/HS20-44+20% versus INE.

Se observa en la Figura 3.6 que el eje X representa la razón WIM/HS20-44+20% de momento flector y en el eje Y se encuentra las probabilidades acumuladas de los factores de utilización ordenados de menor a mayor. Esto permite visualizar la relación probabilística entre la carga aplicada y la capacidad

de diseño. Se debe notar que este eje varía entre 4 y -4, lo que se explica por la distribución utilizada en la construcción del gráfico (ver Figura 2.10).

3.7 Cuantificación del daño generado y vida útil restante.

Se empleó la metodología propuesta por Babu (2019), descrita en la sección 2.5.2, ajustando los parámetros para adaptarlos al caso específico de estudio. Aunque Babu (2019) desarrolló su enfoque utilizando ejemplos de puentes construidos íntegramente en acero, el modelo se puede adaptar adecuadamente para su aplicación en puentes de hormigón armado con vigas pretensadas (Prozzi, 2012).

La constante m utilizada en las Ecuaciones 2.6, 2.7, 2.8 y 2.12 depende el material en estudio. Prozzi (2012) presenta valores de m para distintos materiales, estos se muestran en la Figura 3.7.

| Structure Type | m |
|-------------------------------------|-----|
| Concrete Slab 101 | 4.1 |
| Concrete Girders 102 | 3.5 |
| Concrete T Beam 104 | 4.1 |
| Concrete Box Beam 105 | 4.1 |
| Concrete Continuous Slab 201 | 4.1 |
| Concrete Continuous T Beam 204 | 4.1 |
| Steel Girder 302 | 3.0 |
| Steel Continuous Girders 402 | 3.0 |
| Steel Continuous Girder 403 | 3.2 |
| Steel Continuous Box Beam 405 | 3.2 |
| Steel Continuous Box Beam 406 | 3.2 |
| Prestressed Concrete 500 | 3.5 |
| Prestressed Concrete Slab 501 | 3.5 |
| Prestressed Concrete Girder 502 | 3.5 |
| Prestressed Concrete Box Beam 505 | 3.5 |
| Prestressed Concrete Continuous 601 | 3.5 |
| Prestressed Concrete Continuous 602 | 3.5 |

Figura 3.7. Valores de m según el material y sección.

Fuente: *Oversize/Overweight Vehicle Permit Fee Study* (p. 145), Prozzi *et al*, 2012.

El puente Juan Pablo II está constituido de vigas de hormigón pretensadas, por lo tanto, se definió que m será 3.5.

Otra interrogante es si todos los vehículos reportados por el WIM generan un daño significativo para considerarlo en el análisis de fatiga. En la práctica internacional se consideran todos los ciclos de carga, aunque solo un pequeño porcentaje del tráfico genere esfuerzos sobre el límite de amplitud constante de fatiga (Fisher, 1984b), sin embargo, es aceptado omitir vehículos livianos para el análisis de datos WIM (Babu, 2019). Para efectos de esta investigación se usaron vehículos pesados, es decir, aquellos con un PBV sobre 9 ton (20 kip), ya que bajo este peso se considera insignificante el daño que genera el vehículo. Se aplicó este filtro a la base de datos ya consolidada mediante una rutina de Python y se calculó el momento flector generado por cada vehículo pesado utilizando la rutina mencionada en la sección 3.6. El momento efectivo generado por los vehículos pesados se obtuvo mediante la Ecuación 2.11, donde el número de ciclos asociado al i -ésimo momento flector (M_i) se definió como uno, y el total de ciclos de esfuerzo se asumió igual al número total de registros de vehículos pesados. Con esta información, se calculó el daño causado por los vehículos pesados utilizando la Ecuación 2.12. El momento flector del camión de diseño a fatiga se determinó con el patrón presentado en la Figura 2.6 (ver Anexo 3.7). No se aplicó el factor de impacto de la Ecuación 2.13, ya que los momentos generados por los vehículos pesados tampoco lo incluyen.

El daño correspondiente al camión de diseño se calculó mediante la Ecuación 2.14, en ella se consideró que la vida útil remanente del puente Juan Pablo II es de diez años y se estimó el ADTT calculando el mayor promedio diario de vehículos pesados en una sola vía del puente, representando el flujo real de camiones sobre la estructura. Finalmente, el índice de acumulación de daño se determinó utilizando la Ecuación 2.16. Además, se calculó el aporte correspondiente según la cantidad de ejes utilizando la ecuación previamente mencionada. Sin embargo, dado que no se trata de una ecuación lineal, se consideró el interior de la fórmula desglosado por cada eje, como se muestra en la Ecuación 3.3.

$$S_{eje} = \sum \frac{n_i}{N} M_i^m \quad (3.3)$$

S_{eje} : Sumatoria por eje

m : Constante de la pendiente en la curva S-N (3.5)

n_i : Número de ciclos generado por el i -ésimo momento flector M_i (igual a 1)

N : Total de ciclos de esfuerzo (igual a la cantidad de registros de vehículos pesados)

3.8 Conclusión

En este capítulo se presentó el proceso para consolidar una base de datos obtenida mediante tecnología WIM. Se detalló el procedimiento para calcular el momento flector y el esfuerzo cortante, así como las ecuaciones que mejor representan el deterioro por fatiga debido a la carga viva vehicular. Además, se utilizó el entorno de programación *Jupyter Notebook*, lo que permitió realizar un análisis más preciso y expedito de una base de datos con más de 600000 elementos. Estos elementos metodológicos, respaldado por normas e investigaciones publicadas, establecen una base sólida para la interpretación de los resultados y la formulación de conclusiones en los capítulos siguientes.

CAPITULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada objetivo específico propuesto en el Capítulo 1. Junto a estos se presenta un análisis con el objetivo de brindar una visión detallada y comprensible de los resultados, destacando las principales tendencias, patrones y diferencias observadas.

4.2 Inspección puente Juan Pablo II

En la Figura 4.1 se muestran distintas patologías observadas durante la visita a terreno el día 11 de diciembre de 2024.





Figura 4.1. Patologías observadas.

A continuación, se describen todas las patologías observadas.

Eflorescencia del hormigón (a): sucede cuando la humedad disuelve las sales de calcio del hormigón y llega a la superficie que, al reaccionar con el CO₂ del aire, se evaporan y dejan un depósito mineral, que es de carbonato de calcio. Indica la intrusión de humedad.

Fisuración (b): se observa una grieta localizada en la parte superior de la cepa, la cual soporta una viga de hormigón pretensada con un cojinete de goma intermedio. Este tipo de daño sugiere que la grieta se originó debido a una sobrecarga.

Tope sísmico destruido (c): se observa que el tope sísmico presenta una significativa pérdida de sección, con armaduras expuestas y afectadas por corrosión. Este deterioro sugiere que la protección superficial del concreto se ha visto comprometida, permitiendo la penetración de agentes agresivos que han causado el deterioro de las barras de acero. Por el estado actual de la estructura, es posible que el daño se haya originado o agravado desde el terremoto de 2010, permaneciendo sin las reparaciones adecuadas durante un periodo prolongado.

Barbacana incompleta (d): se observa que la barbacana no se extiende hasta el extremo del tope sísmico, lo que impide la correcta evacuación del agua. Como resultado, se produce una acumulación excesiva de humedad en la zona, favoreciendo la formación de eflorescencias.

Mantención de juntas de dilatación (e): se observa que la junta de dilatación está completamente destruida, con acumulación de tierra y otros residuos en su interior, lo que impide que desempeñe su función principal de permitir los movimientos térmicos y estructurales sin transmitir tensiones excesivas a los elementos adyacentes. Además, se evidencia un deterioro significativo del pavimento en la zona, posiblemente como resultado de las restricciones de movimiento y el ingreso de agua, que agravan el desgaste.

Vereda destruida (f): se observan hoyos y secciones completamente destruidas de la vereda, lo que dificulta la circulación segura de los peatones y pone de manifiesto la falta de un mantenimiento adecuado. Este deterioro puede representar un riesgo significativo de accidentes por tropezones o caídas, además de contribuir a una percepción negativa de la infraestructura urbana.

Una de las reparaciones más recientes fue ejecutada en el año 2017, específicamente en las cepas ubicadas en la entrada sur del puente. Esta intervención incluyó la instalación de un refuerzo estructural mediante la incorporación de una estructura metálica diseñada para mejorar la capacidad portante y la estabilidad de la cepa. En la Figura 4.2 se observa el detalle del refuerzo.

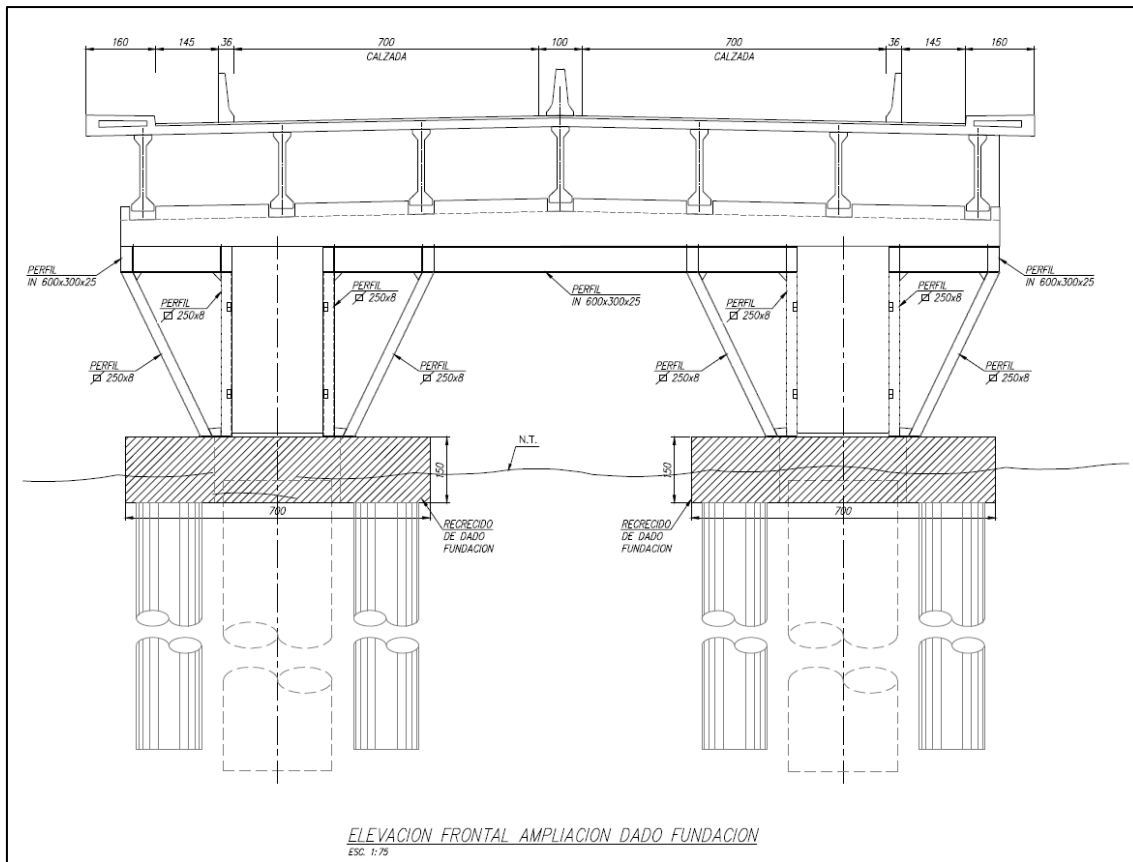


Figura 4.2. Detalle del refuerzo de las cepas.

Fuente: JLS Ingeniería, 2017.

En la Figura 4.3 (a) se muestra que se reforzaron un total de ocho cepas, según lo contemplado en la intervención realizada en 2018. Sin embargo, se evidencia un error constructivo destacado en (b), donde se observa la ausencia de una cama de apoyo para la placa base derecha. Esta deficiencia constructiva genera una distribución desigual de las cargas, afectando el soporte adecuado de la estructura metálica de refuerzo.

La diferencia se aprecia con mayor claridad en las figuras (c) y (d), donde la placa base sin cama de apoyo queda suspendida parcialmente, comprometiendo la continuidad del contacto con la fundación y limitando su capacidad para transmitir los esfuerzos de manera eficiente. Esta deficiencia no solo afecta la distribución uniforme de las cargas, sino que también puede provocar el levantamiento de la placa base, lo que comprometería la integridad y efectividad de todo el sistema de refuerzo estructural.

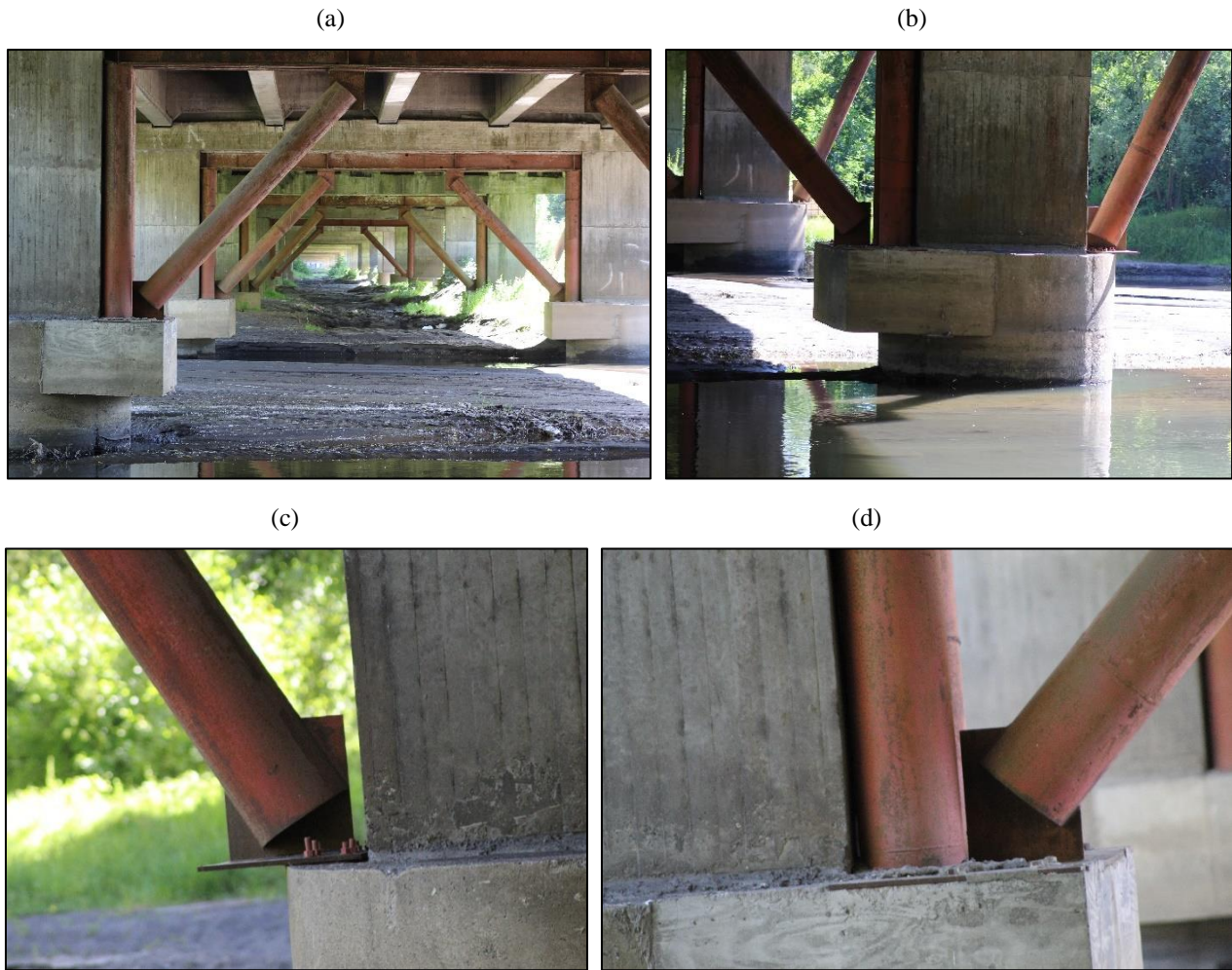


Figura 4.3. Refuerzo de cepas.

En la Figura 4.4 se presenta evidencia del tránsito de camiones sobre el puente Juan Pablo II durante el mes de enero de 2025, específicamente en la pista que conecta Concepción (CCP) con San Pedro (SP). La figura se subdivide en los cinco días en que se llevó a cabo la inspección, proporcionando un registro detallado del flujo vehicular pesado durante ese periodo.

(a) 06/01/2025



(b) 07/01/2025



(c) 08/01/2025



(d) 09/01/2025



(e) 10/01/2025



(f) 10/01/2025



Figura 4.4. Evidencia fotográfica del paso de camiones en el puente.

En los cinco días analizados, se evidencia el tránsito de vehículos con cinco o seis ejes, los cuales, en general, presentan un PBV superior a 45 toneladas cuando están cargados. Este tipo de carga representa un desafío significativo para la estructura del puente debido que está limitado a 10 ton. Particularmente, en los casos (e) y (f) se observa una situación destacable, ya que dos camiones de seis ejes transitan de manera consecutiva, lo que provoca un incremento temporal de las cargas

concentradas sobre la infraestructura. Este fenómeno puede intensificar los efectos dinámicos y el desgaste acumulado.

4.3 Base de datos consolidada

Se aplicaron los filtros mencionados en la sección 3.4, donde se detectó un error sistemático en la base de datos recopilada mediante la tecnología WIM. Este error consistía en que, para calcular el PBV, el sistema WIM sumaba únicamente los primeros tres pesos por eje registrados, lo que resultaba en un PBV incorrecto para vehículos con cuatro ejes o más. En la Tabla 4.1 se ejemplifica el error.

Tabla 4.1. Ejemplo de camión de 6 ejes con PBV erróneo.

| Fecha | Pista | Categoría | Velocidad | Peso Eje 1 [Kg] | Peso Eje 2 [Kg] | Peso Eje 3 [Kg] | Peso Eje 4 [Kg] | Peso Eje 5 [Kg] | Peso Eje 6 [Kg] | Peso Eje 7 [Kg] | Peso total [Kg] |
|------------------------|---------------------------|------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 26-10-2022 16:49:42 | San Pedro - Concepción | Camión con remolque | 62 | 9936 | 22812 | 24757 | 9936 | 14249 | 8563 | 0 | 57505 |

Para corregir este error, se asumió que los pesos por eje eran correctos. Por lo tanto, se eliminó el filtro que descartaba las filas donde la suma de los pesos por eje no coincidía con el PBV, y se recalculó el PBV sumando los pesos por eje directamente, actualizando así la columna correspondiente.

La Tabla 4.2 presenta una comparación de la cantidad total de datos recopilados durante los meses de estudio, antes y después de aplicar los filtros.

Tabla 4.2. Cantidad de datos antes y después de aplicar filtros.

| Mes | Cantidad de datos sin aplicar filtros | Cantidad de datos con filtros | Cantidad de datos eliminados | % |
|-----------------|--|----------------------------------|---------------------------------|------|
| Agosto 2022 | 265336 | 264416 | 920 | 0.35 |
| Septiembre 2022 | 413387 | 412337 | 1050 | 0.25 |
| Octubre 2022 | 686119 | 669922 | 16197 | 2.36 |
| Noviembre 2022 | 195735 | 194772 | 963 | 0.49 |
| Diciembre 2022 | 651298 | 647475 | 3823 | 0.59 |

| | | | | |
|--------------|--------|--------|--------|-------|
| Enero 2023 | 727150 | 626298 | 100852 | 13.87 |
| Febrero 2023 | 242812 | 202199 | 40613 | 16.73 |

Se observa que los meses con la mayor cantidad de datos antes de aplicar los filtros son octubre de 2022, diciembre de 2022 y enero de 2023. Tras la aplicación de los filtros, octubre de 2022 presenta la mayor cantidad de datos restantes; sin embargo, no es el mes con el menor porcentaje de datos eliminados, registrando un 2.36%.

Debido a la baja cantidad y la falta de regularidad en los datos de agosto de 2022, septiembre de 2022, noviembre de 2022 y febrero de 2023, estos meses fueron descartados para el análisis estructural y de fatiga del puente Juan Pablo II.

En la Tabla 4.3 se comparan los meses de octubre de 2022, diciembre de 2022 y enero de 2023 con el fin de escoger el mes para el análisis. La tabla muestra el promedio de datos diario para cada mes en ambos casos en estudio (a) y (b).

Tabla 4.3. Cantidad de datos promedio por día en ambas direcciones de análisis.

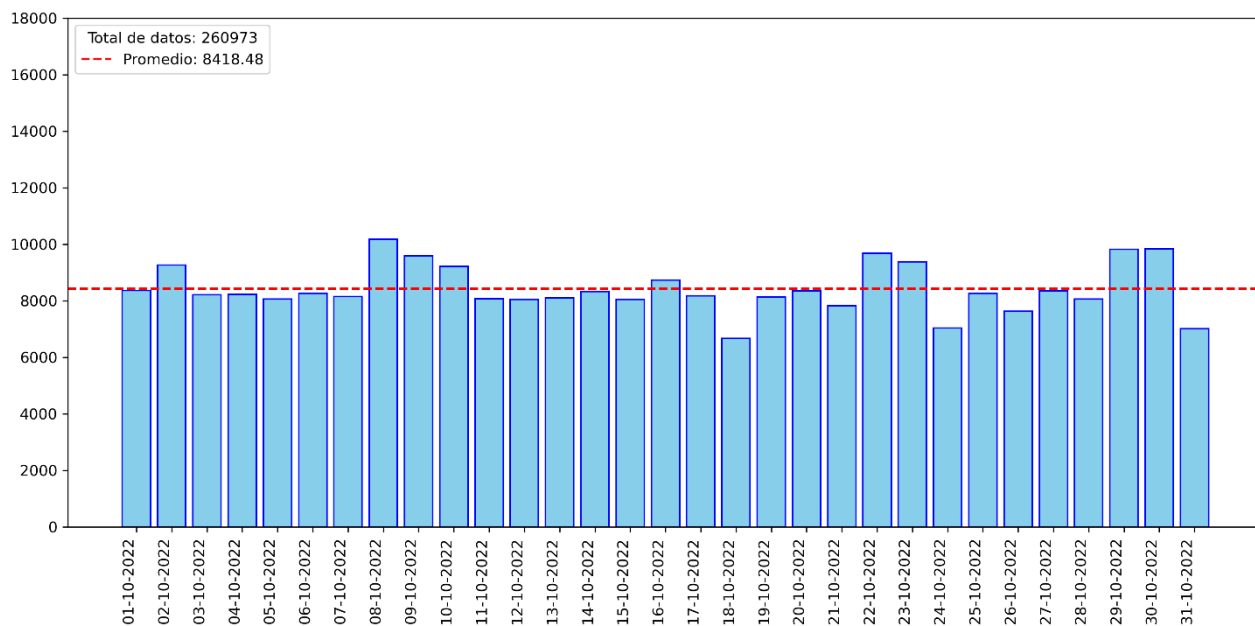
| Mes | Promedio de datos diario (CCP-SP) | Promedio de datos diario (SP-CCP) |
|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Octubre 2022 | 8418.48 | 13191.90 |
| Diciembre 2022 | 6965.77 | 13920.52 |
| Enero 2023 | 6759.87 | 13443.29 |

La Tabla 4.3 muestra que octubre de 2022 es el mes más apropiado para el análisis, al presentar el mayor promedio de datos diarios en la dirección CCP a SP, superando a diciembre de 2022 por aproximadamente 1500 registros diarios. Aunque no lidera en la dirección opuesta, las diferencias con diciembre de 2022 y enero de 2023 no son significativas, ya que los tres meses presentan promedios del orden de 13000 registros diarios.

Este mes también destaca por tener la mayor cantidad de datos después de aplicar los filtros, con un total de 669922 registros.

En la Figura 4.5 se exponen dos gráficos de barras con la cantidad de vehículos por día, tanto para la dirección (a) CCP-SP como para la dirección (b) SP-CCP. En el eje Y de cada gráfico está la cantidad de diaria de datos registrados y en el eje X la fecha del día que se registraron los datos.

(a) Dirección CCP-SP.



(b) Dirección SP-CCP.

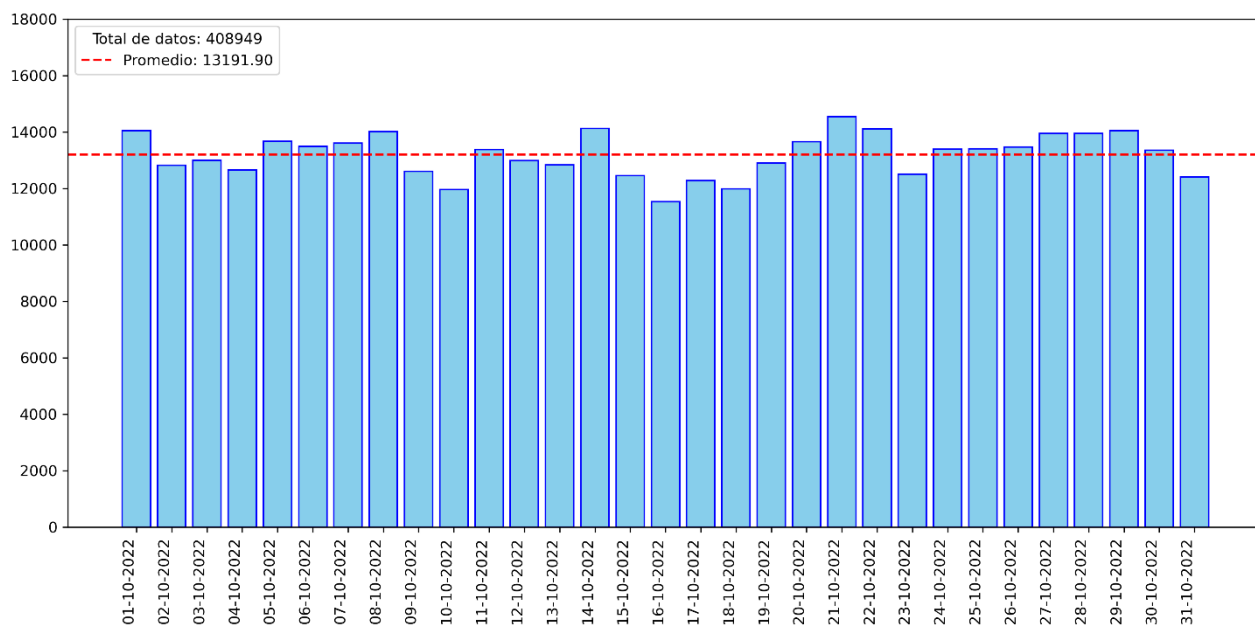


Figura 4.5. Datos por día en octubre de 2022.

En la Figura 4.5 se observa que el mes de octubre de 2022 cuenta con datos todos los días para ambos casos (a) y (b). Estos grafico se comparan con los mostrados en el Anexo 4.3.

4.4 Vehículos más frecuentes y los de mayor tonelaje

En la Figura 4.6 se presenta un gráfico de dispersión donde el eje X se muestra el PBV en toneladas y en el eje Y la velocidad en kilómetros por hora. Además, en el gráfico se incluyeron límites con líneas punteadas. La línea color amarillo representa el límite de 10 toneladas de PBV y la línea color rojo el límite de 70 km/h de velocidad, ambos impuestos por la ley chilena (Ministerio de transporte y telecomunicaciones, 2010).

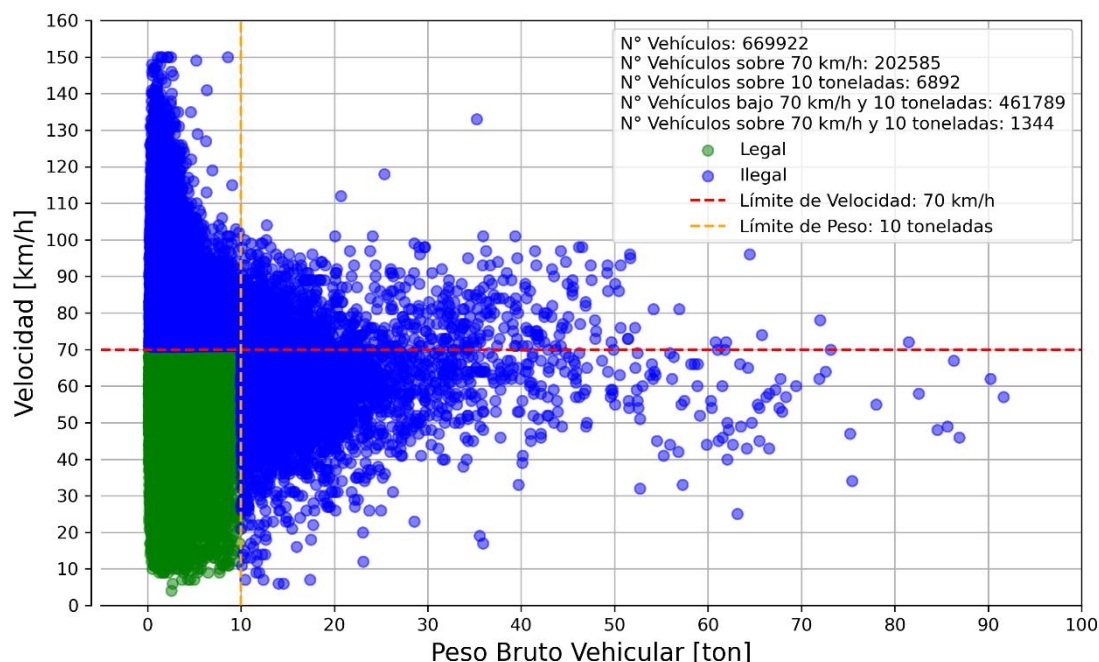


Figura 4.6. Gráfico de dispersión de todos los registros del WIM en octubre de 2022.

Una primera interpretación del gráfico es que mientras menor sea el PBV, los vehículos tienden a alcanzar mayores velocidades y viceversa. 461789 vehículos (68.93% del total) circulan con una velocidad y PBV legales, por el contrario, 208133 vehículos (31.07% del total) violan los límites establecidos. De estos últimos, existen 202585 vehículos superan el límite de velocidad, es decir, un 30.24% del total de vehículos registrados por el WIM. 6892 vehículos superan el límite de PBV, es decir, un 1.03% del total de vehículos registrados. Analizando la intersección de estos límites, 1344 vehículos superan la velocidad y el PBV al mismo tiempo, aproximadamente un 0.20% del total.

Para facilitar la visualización de los vehículos más frecuentes y aquellos con mayor tonelaje, el gráfico de la Figura 4.6 se desglosó en seis gráficos, agrupando los datos según el número de ejes. Estos gráficos se presentan desde la Figura 4.7 hasta la Figura 4.11.

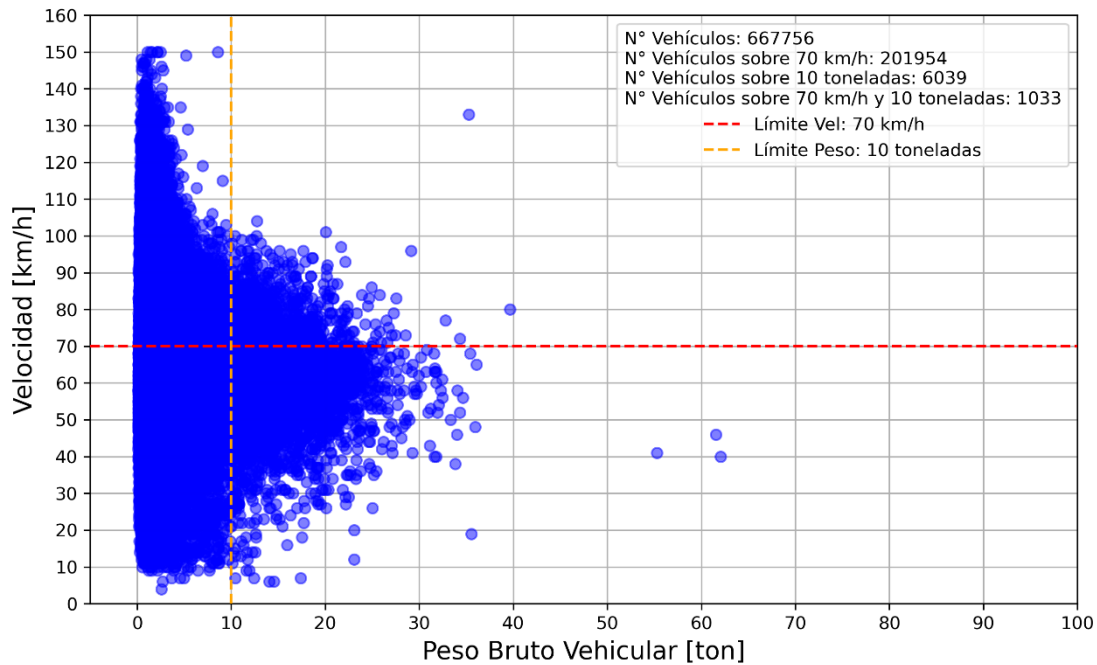


Figura 4.7. Gráfico de dispersión de vehículos de 2 ejes.

La Figura 4.7 incluye 667756 vehículos de dos ejes, esto es, el 99.66% del total de datos registrado. De estos vehículos, hay 201954 que exceden el límite de velocidad (99.68% del total de vehículos que superan el límite de velocidad) y 6093 que superan el límite de PBV (87.62% del total de vehículos que superan el límite de PBV). Analizando los límites en dualidad, 1033 vehículos superan la velocidad y el PBV al mismo tiempo (76.86% del total de vehículos que superan ambos límites). Otra tendencia visible es que los puntos se concentran a la izquierda del gráfico y con mayor densidad bajo la línea punteada roja. Esto se interpreta como que los vehículos de dos ejes tienden a tener PBV bajo las 10 toneladas y que la mayoría no supera el límite de velocidad de 70 km/h.

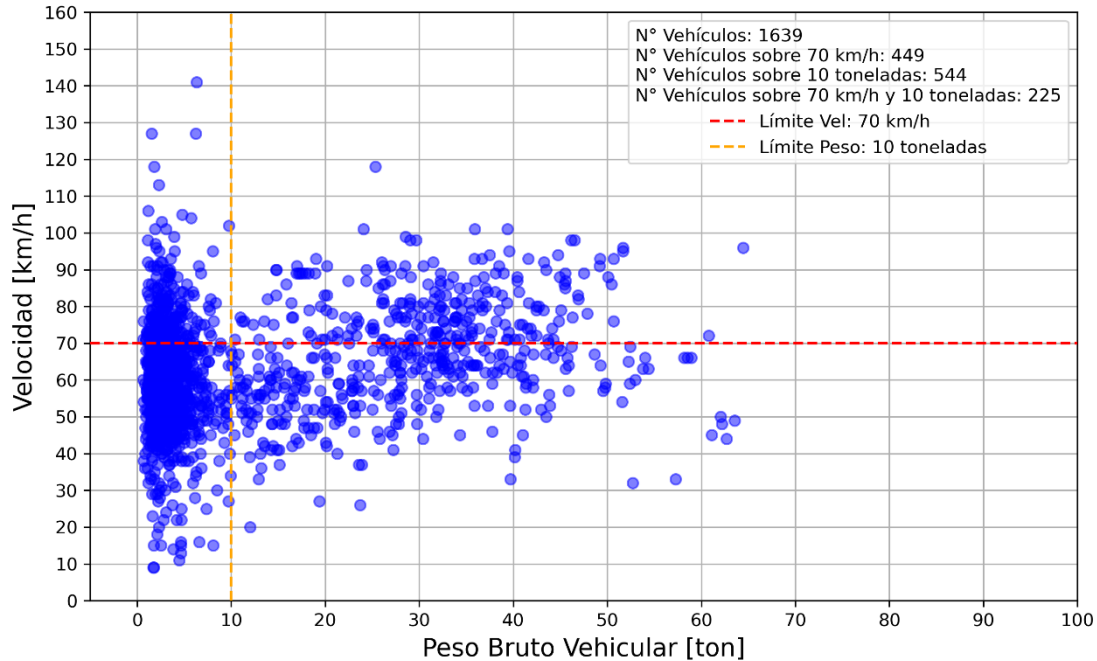


Figura 4.8. Gráfico de dispersión de vehículos de 3 ejes.

La Figura 4.8 muestra que hay 1639 vehículos de tres ejes (el 0.245% del total de datos registrados). De estos, 449 exceden el límite de velocidad (0.222% del total de vehículos que superan el límite de velocidad), y 544 superan el PBV permitido (7.893% del total de vehículos que superan el límite de PBV). Además, 225 vehículos sobrepasan ambos límites simultáneamente (16.741% del total de vehículos que superan ambos límites). La mayoría de los puntos permanecen por debajo de la línea amarilla, es decir, bajo las 10 toneladas, aunque algunos alcanzan hasta 60 toneladas, seis veces el límite permitido.

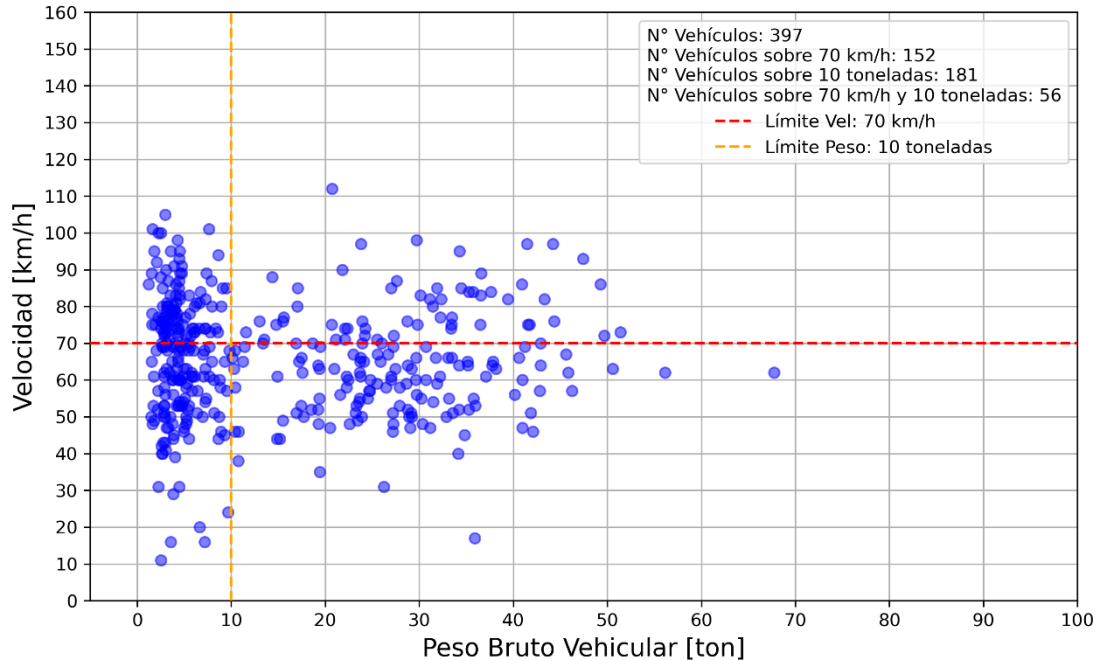


Figura 4.9. Gráfico de dispersión de vehículos de 4 ejes.

La Figura 4.9 muestra que hay 397 vehículos de cuatro ejes (el 0.059% del total de datos registrados). De estos, 152 exceden el límite de velocidad (0.075% del total de vehículos que superan el límite de velocidad), y 181 superan el PBV permitido (2.626% del total de vehículos que superan el límite de PBV). Además, 56 vehículos sobrepasan ambos límites simultáneamente (4.167% del total de vehículos que superan ambos límites). La mayoría de los puntos permanecen a la izquierda de la línea amarilla, bajo las 10 toneladas; sin embargo, la diferencia entre los vehículos que superan el peso permitido y los que no lo hacen es menor. Casi el 46% de los puntos están por encima de las 10 toneladas, con algunos alcanzando más de 60 toneladas, seis veces el límite permitido.

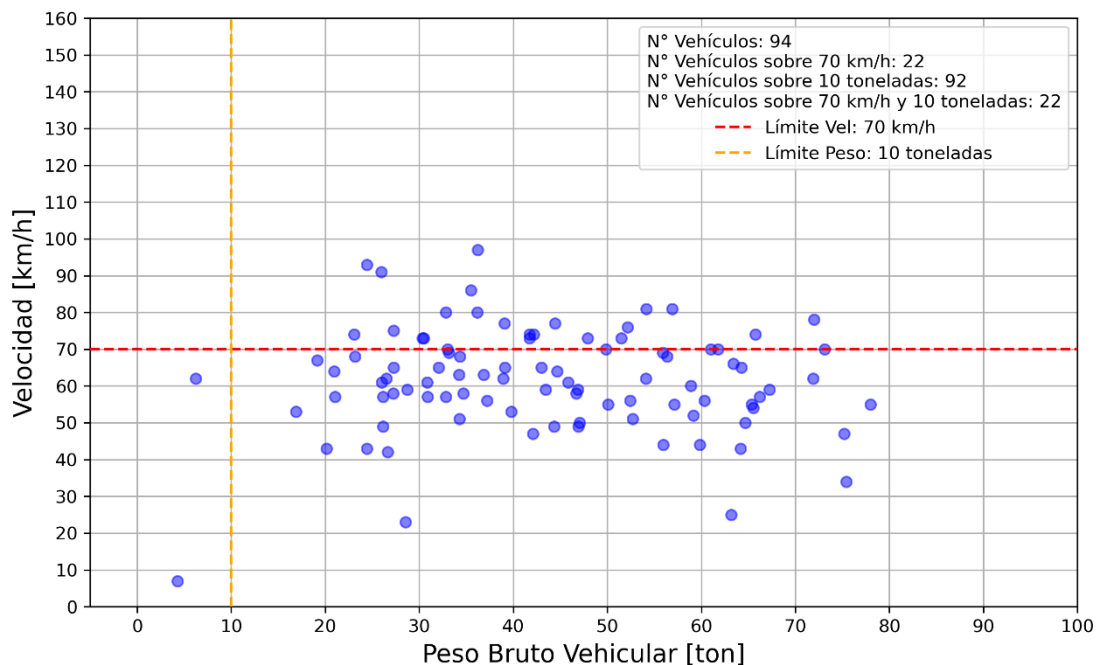


Figura 4.10. Gráfico de dispersión de vehículos de cinco ejes.

La Figura 4.10 muestra que hay 94 vehículos de cinco ejes (el 0.014% del total de datos registrados). De estos, 22 exceden el límite de velocidad (0.011% del total de vehículos que superan el límite de velocidad), y 92 superan el PBV permitido (1.335% del total de vehículos que superan el límite de PBV). Además, 22 vehículos sobrepasan ambos límites simultáneamente (1.637% del total de vehículos que superan ambos límites). A diferencia de las figuras anteriores, esta vez la mayoría de los puntos están a la derecha de la línea amarilla, superando las 10 toneladas. Algunos vehículos alcanzan más de 70 toneladas, siete veces el límite permitido.

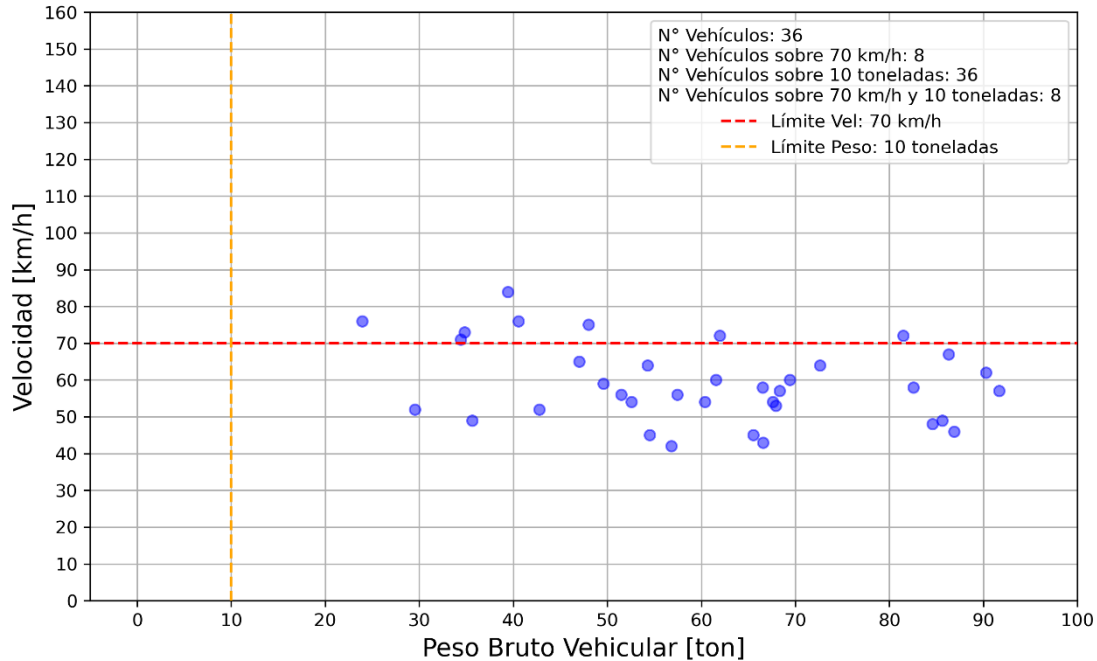


Figura 4.11. Gráfico de dispersión de vehículos de seis ejes.

La Figura 4.11 muestra que hay 36 vehículos de seis ejes (el 0.005% del total de datos registrados). De estos, ocho exceden el límite de velocidad (0.004% del total de vehículos que superan el límite de velocidad), y 36 superan el PBV permitido (0.522% del total de vehículos que superan el límite de PBV). Además, ocho vehículos sobrepasan ambos límites simultáneamente (0.595% del total de vehículos que superan ambos límites). En este caso, todos los puntos se encuentran a la derecha de la línea amarilla, es decir, sobre las 10 toneladas, con algunos superando las 90 toneladas, nueve veces el peso permitido.

4.5 Efectos de la carga viva inducida por el tráfico real

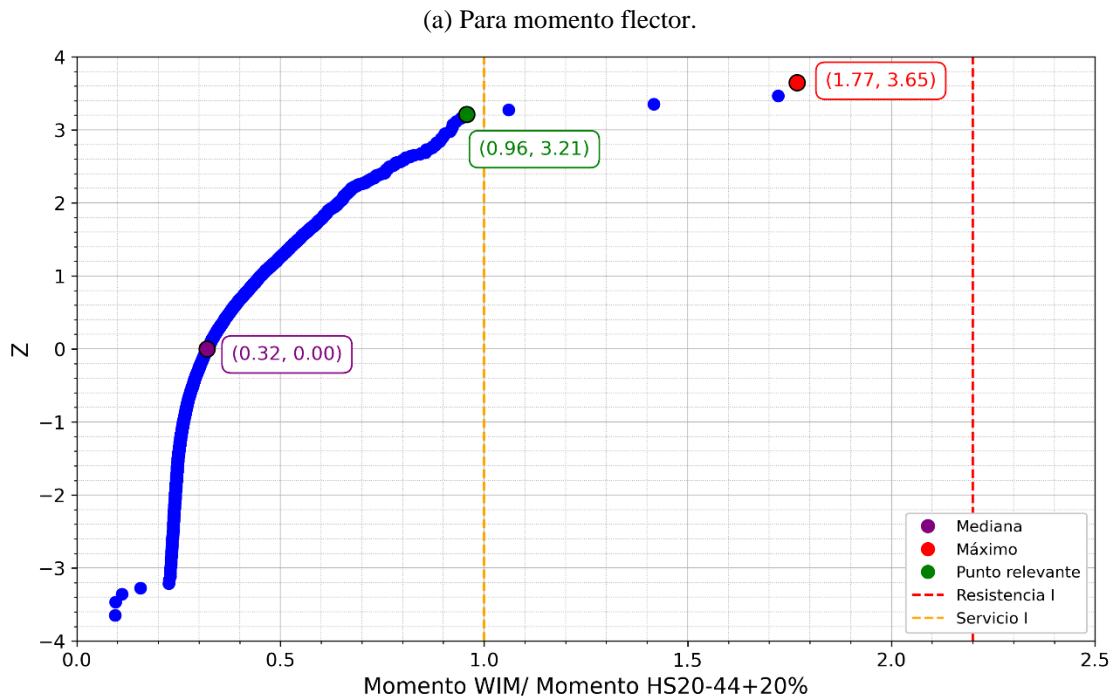
Inicialmente se calculó el momento y corte de diseño según el MC Vol. 3 (HS20-44+20%). Los resultados se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Momento y corte de diseño.

| Momento HS20-44+20% [ton-m] | Corte HS20-44+20% [ton] |
|-----------------------------|-------------------------|
| 277.47 | 35.81 |

Estos valores representan el límite para servicio (según la Ecuación 2.2), el cual define la condición correspondiente al uso vehicular normal del puente.

A continuación, se graficaron las razones de demanda, las cuales se muestran desde la Figura 4.12 hasta la Figura 4.16. Estos gráficos muestran la probabilidad acumulada en escala normal de las razones de utilización para momento flector y corte, definidos como la demanda inducida por el tráfico real sobre demanda de diseño.



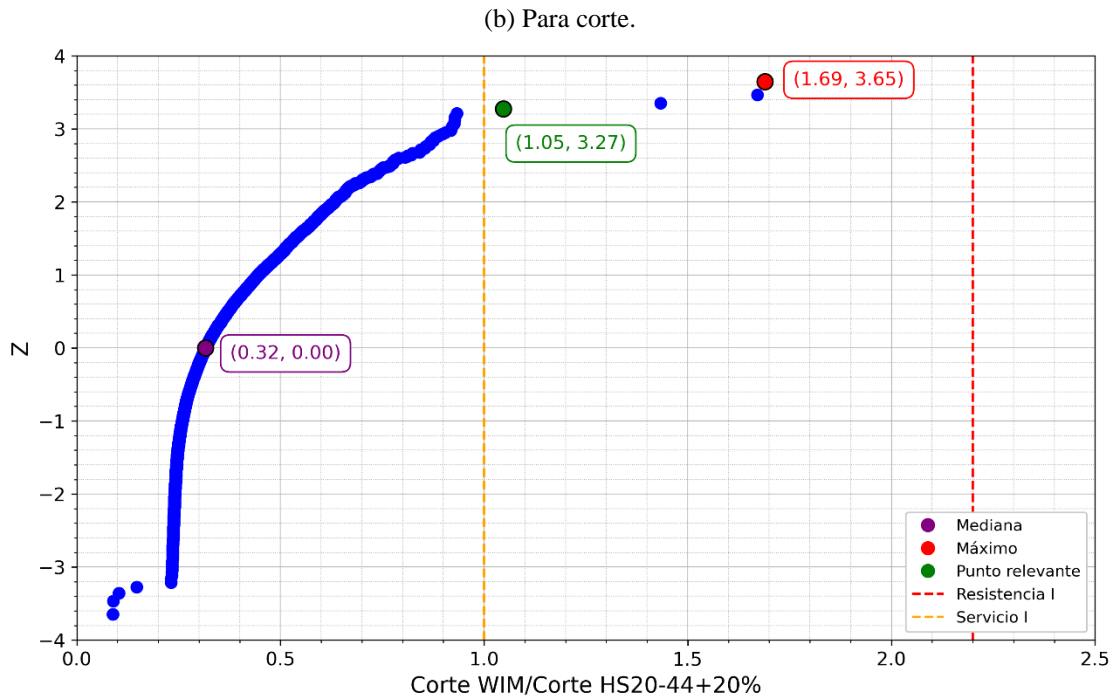


Figura 4.12. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para dos ejes.

En la Figura 4.12 (a) se destacan tres puntos clave para el análisis de momento flector generado por vehículos de dos ejes. El punto color morado representa la mediana de los datos, con un valor de 0.32, indicando que el 50% de los vehículos generan un momento flector por debajo de un 32% del momento flector de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo representa la máxima razón de demanda detectada en los datos con un valor de 1.77, es decir, dicho vehículo generó un momento flector 77% superior al momento flector de diseño. El punto color verde representa el punto más cercano a una razón de demanda igual a 1.00, en este caso tiene una coordenada 3.21 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 99.93% o un 0.07% de probabilidad de que los momentos medidos superen el momento flector de diseño.

Además, se presentan dos líneas punteadas: la línea de color naranja representa el límite de diseño para servicio (según la Ecuación 2.2), mientras que la línea de color rojo indica el límite de diseño por resistencia (según la Ecuación 2.3).

En la Figura 4.12 (b) se realiza el análisis análogo para corte. El punto color morado tiene un valor de 0.32, indicando que el 50% de los vehículos generan un corte por debajo de un 32% del corte de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 1.69, es decir, dicho vehículo generó un corte

69% superior al corte de diseño. El punto color verde tiene una coordenada 3.27 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 99.95% o un 0.05% de probabilidad de que los cortes medidos superen el corte de diseño.

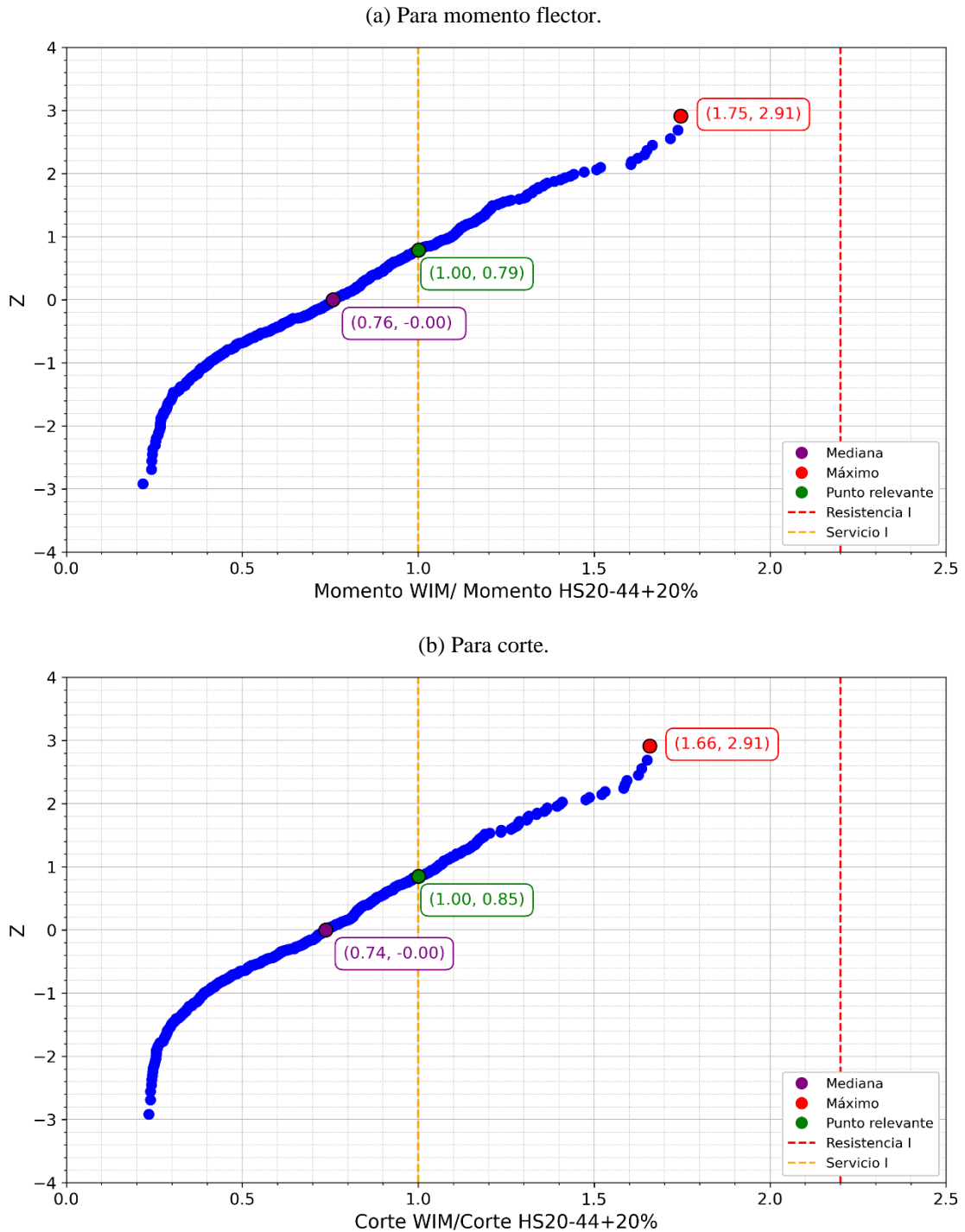
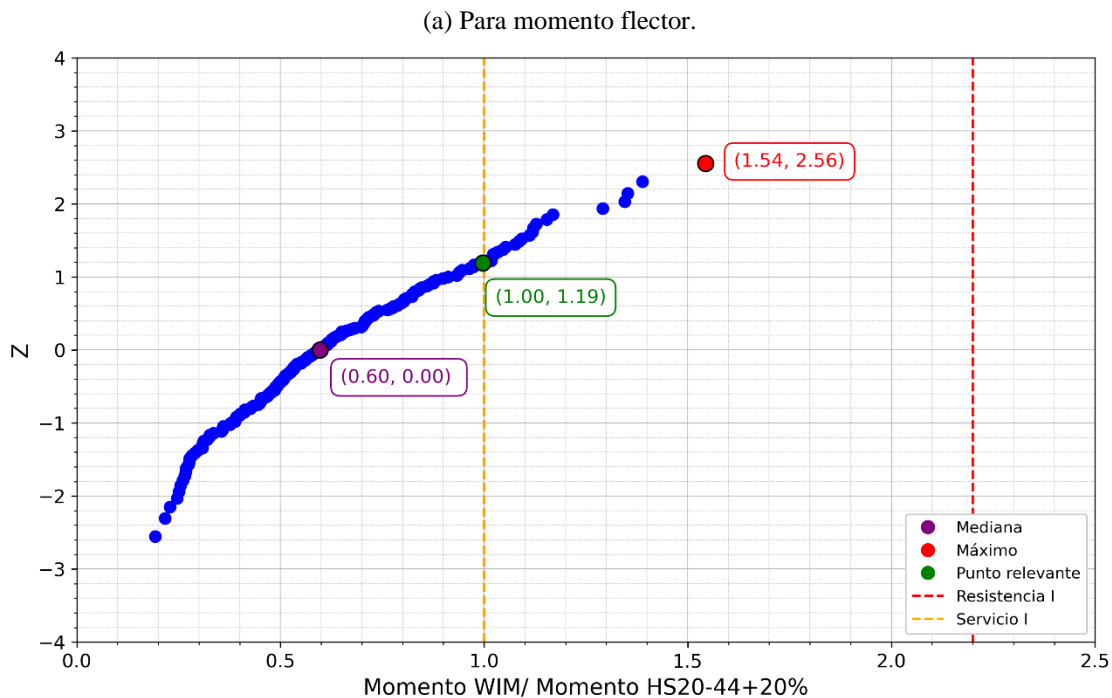


Figura 4.13. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para tres ejes.

En la Figura 4.13 (a) se destacan tres puntos clave para el análisis de momento flector generado por vehículos de tres ejes. El punto color morado tiene un valor de 0.76, indicando que el 50% de los vehículos generan un momento por debajo de un 76% del momento de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 1.75, es decir, dicho vehículo generó un momento 75% superior al momento de diseño. El punto color verde tiene una coordenada 0.79 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 78.52% o un 21.48% de probabilidad de que los momentos medidos superen el momento de diseño.

En la Figura 4.13 (b) se realiza el análisis análogo para corte. El punto color morado tiene un valor de 0.74, indicando que el 50% de los vehículos generan un corte por debajo de un 74% del corte de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 1.66, es decir, dicho vehículo generó un corte 66% superior al corte de diseño. El punto color verde tiene una coordenada 0.85 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 80.23% o un 19.77% de probabilidad de que los cortes medidos superen el corte de diseño.



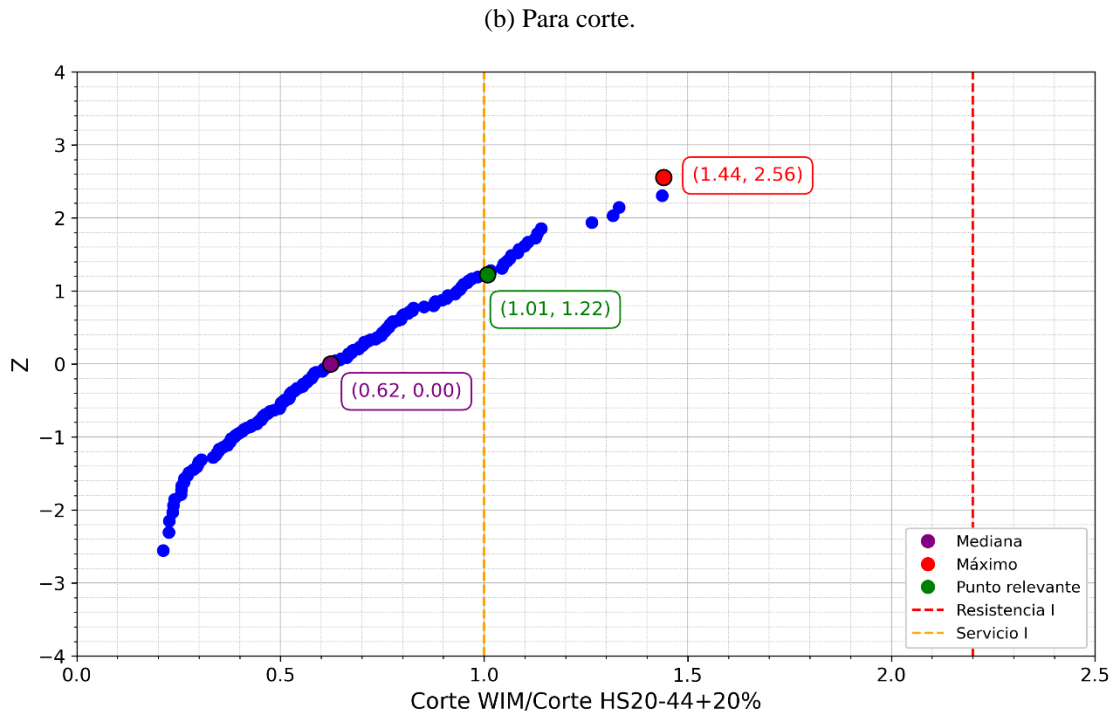


Figura 4.14. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para cuatro ejes.

En la Figura 4.14 (a) se destacan tres puntos clave para el análisis de momento flector generado por vehículos de cuatro ejes. El punto color morado tiene un valor de 0.60, indicando que el 50% de los vehículos generan un momento por debajo de un 60% del momento de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 1.54, es decir, dicho vehículo generó un momento 54% superior al momento de diseño. El punto color verde tiene una coordenada 1.19 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 88.30% o un 11.70% de probabilidad de que los momentos medidos superen el momento de diseño.

En la Figura 4.14 (b) se realiza el análisis análogo para corte. El punto color morado tiene un valor de 0.62, indicando que el 50% de los vehículos generan un corte por debajo de un 62% del corte de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 1.44, es decir, dicho vehículo generó un corte 44% superior al corte de diseño. El punto color verde tiene una coordenada 1.22 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 88.88% o un 11.12% de probabilidad de que los cortes medidos superen el corte de diseño.

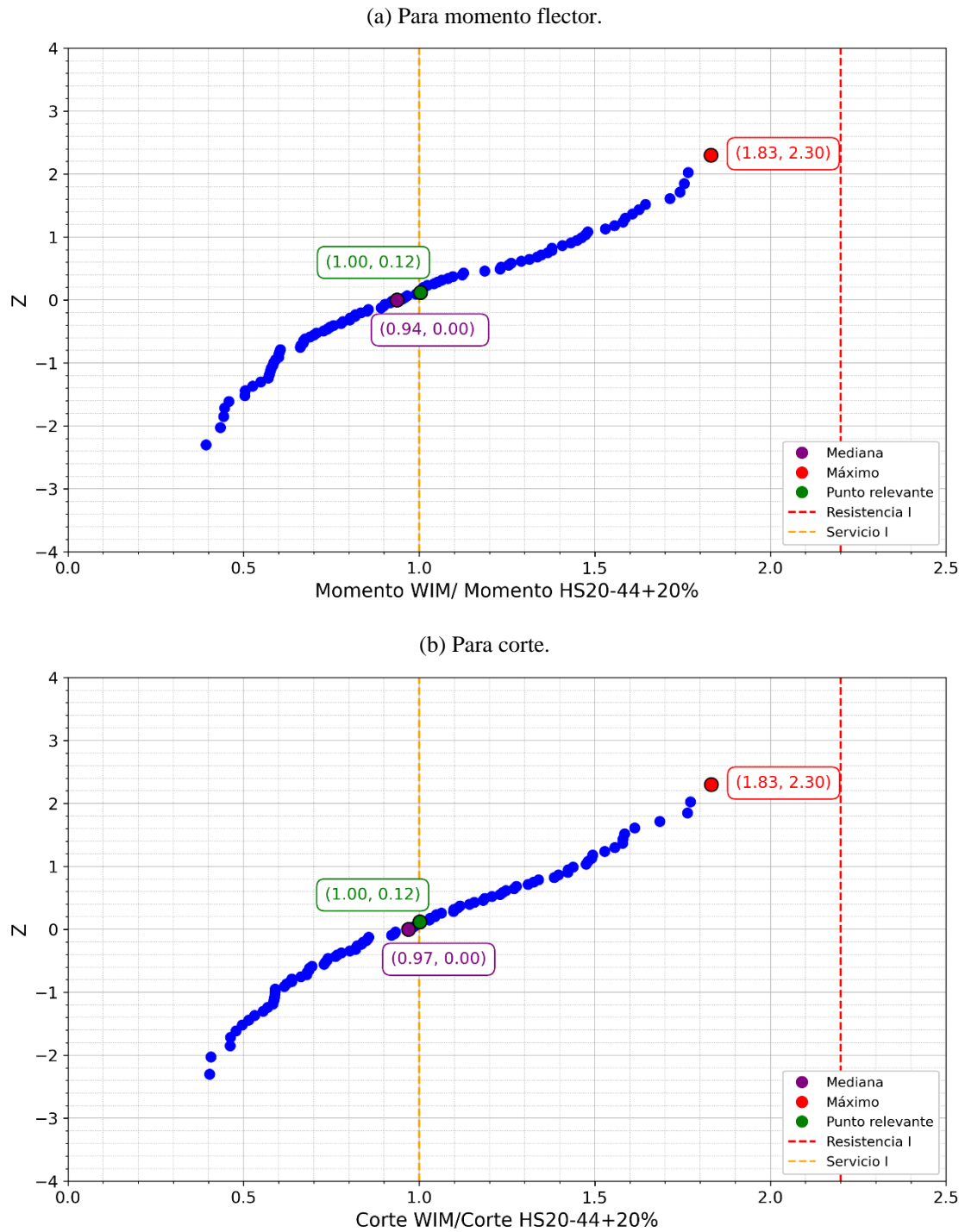
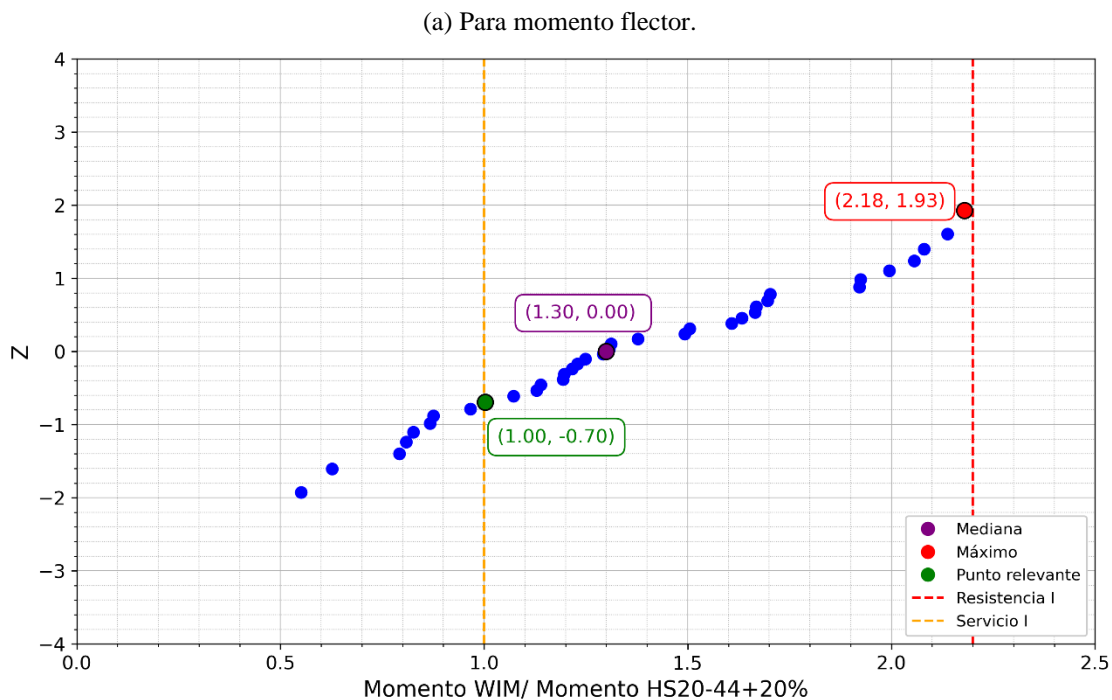


Figura 4.15. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para cinco ejes.

En la Figura 4.15 (a) se destacan tres puntos clave para el análisis de momento flector generado por vehículos de cinco ejes. El punto color morado tiene un valor de 0.94, indicando que el 50% de los vehículos generan un momento por debajo de un 94% del momento de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 1.83, es decir, dicho vehículo generó un momento 83% superior al

momento de diseño. El punto color verde tiene una coordenada 0.12 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 54.78% o un 45.22% de probabilidad de que los momentos medidos superen el momento de diseño.

En la Figura 4.15 (b) se realiza el análisis análogo para corte. El punto color morado tiene un valor de 0.97, indicando que el 50% de los vehículos generan un corte por debajo de un 97% del corte de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 1.83, es decir, dicho vehículo generó un corte 83% superior al corte de diseño. El punto color verde tiene una coordenada 0.12 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 54.78% o un 45.22% de probabilidad de que los cortes medidos superen el corte de diseño.



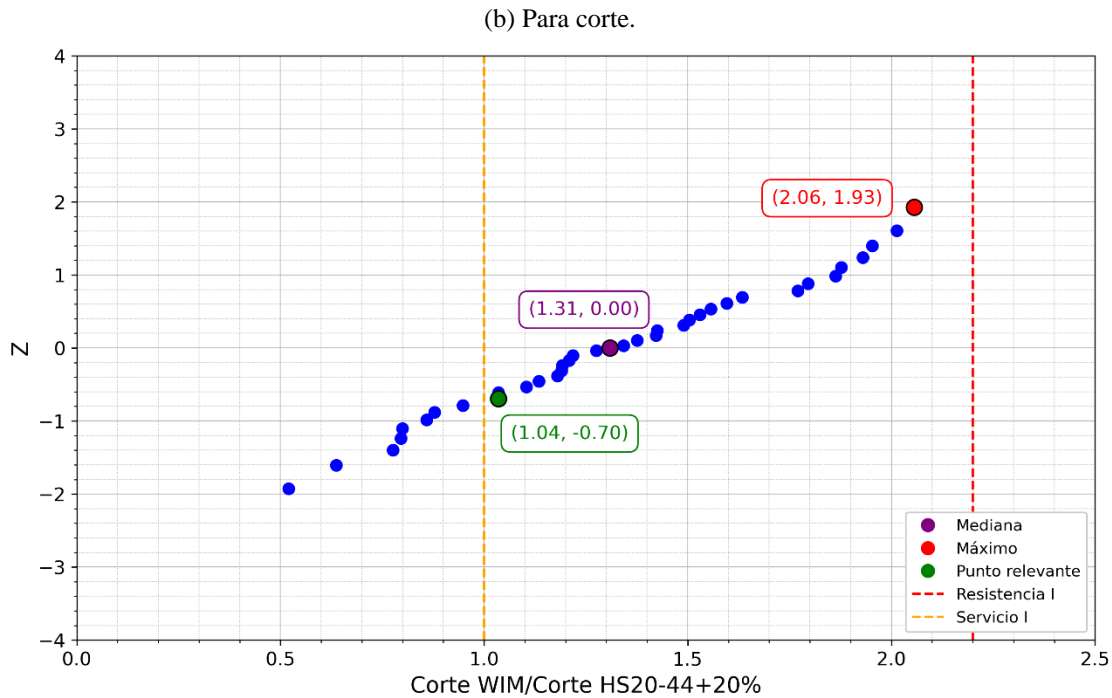


Figura 4.16. Probabilidad de la Razón WIM/HS20-44+20% para seis ejes.

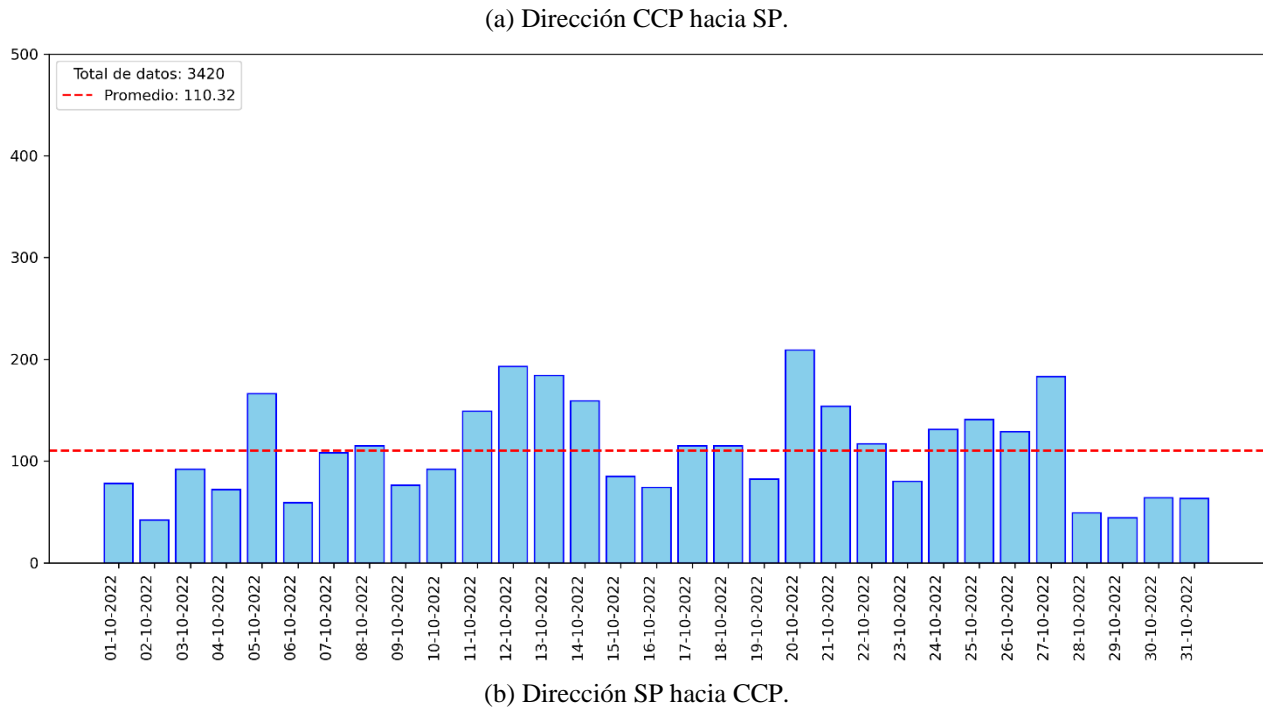
En la Figura 4.16 (a) se destacan tres puntos clave para el análisis de momento flector generado por vehículos de seis ejes. El punto color morado tiene un valor de 1.30, indicando que el 50% de los vehículos generan un momento por debajo de un 130% del momento de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 2.18, es decir, dicho vehículo generó un momento 118% superior al momento de diseño (alcanzando el límite para el diseño por resistencia). El punto color verde tiene una coordenada -0.70 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 24.20% o un 75.80% de probabilidad de que los momentos medidos superen el momento de diseño.

En la Figura 4.16 (b) se realiza el análisis análogo para corte. El punto color morado tiene un valor de 1.31, indicando que el 50% de los vehículos generan un corte por debajo de un 131% del corte de diseño (HS20-44+20%). El punto color rojo tiene un valor de 2.06, es decir, dicho vehículo generó un corte de un 106% superior al corte de diseño. El punto color verde tiene una coordenada -0.70 en Y, este último valor significa que el punto tiene una probabilidad acumulada del 24.20% o un 75.80% de probabilidad de que los cortes medidos superen el corte de diseño.

Los vehículos de mayor número de ejes generan mayores demandas relativas, con probabilidades de excedencia del diseño en servicio significativamente superiores, incluso alcanzando el valor de diseño por resistencia. Lo anterior indica la necesidad de revisar los criterios de diseño basados en modelos de tráfico actuales para mejorar la seguridad y durabilidad de las estructuras.

4.6 Vida útil y comportamiento a fatiga

En la Figura 4.17 (a) y (b) se muestran gráficos con los datos diarios obtenidos luego de eliminar vehículos livianos (PBV<9ton) para ambas direcciones en estudio.



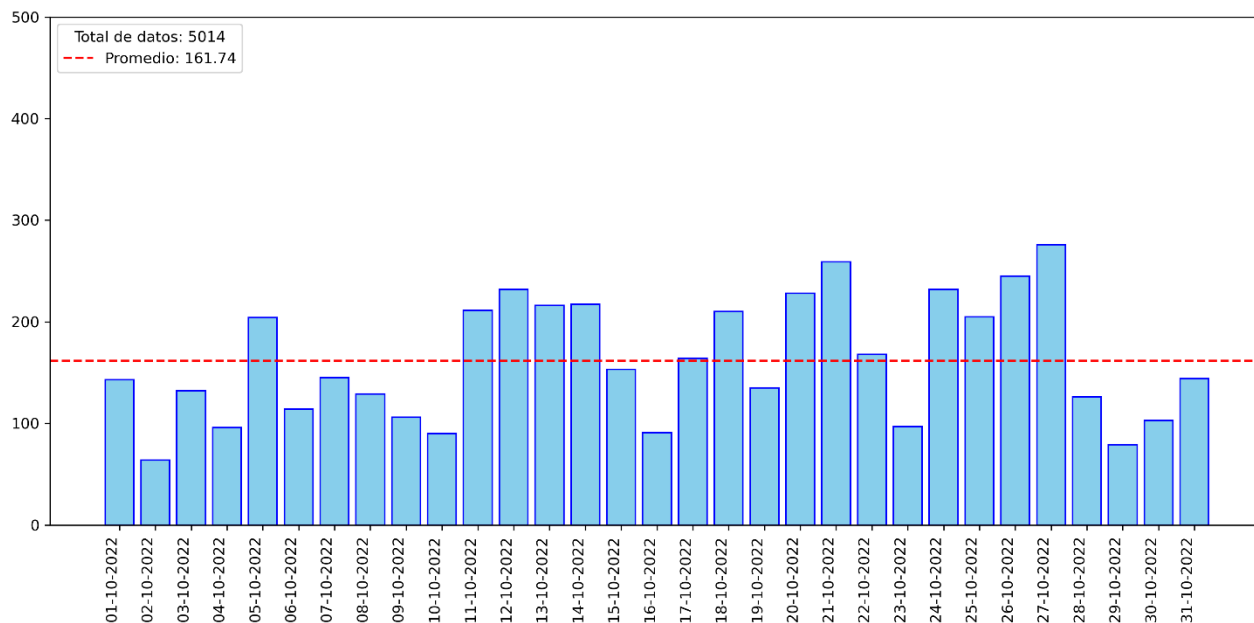


Figura 4.17. Datos por día con PBV mayor a 9 ton en octubre de 2022.

Se observa en la Figura 4.17 (b) que el promedio de vehículos pesados en la dirección SP a CCP tiene un valor de 161.74, el cual es mayor al mostrado en (b) que tiene un valor de 110.32.

Con esta información, se establece un ADTT de 170, con el fin de tomar un enfoque conservador en la estimación del deterioro que causa el camión de diseño para fatiga.

El total de datos, obtenido a partir de los gráficos, es 8434. Este valor será el total de ciclos generado por el paso de vehículos pesados registrados por el WIM. En la Tabla 4.5 se resumen los parámetros iniciales para cuantificar deterioro del puente Juan Pablo II.

Tabla 4.5. Parámetros iniciales

| | |
|----------------------|------|
| N | 8434 |
| m | 3.5 |
| ADTT (Vehículos/día) | 170 |
| Vida útil (días) | 3652 |

Utilizando estos valores y aplicando la Ecuación 2.15, se obtiene una cantidad proyectada de 620520 pasadas durante la vida útil (T).

La Tabla 4.6 presenta el momento efectivo de los vehículos pesados registrados y el momento de diseño a fatiga, los cuales se utilizan en la Ecuación 2.16 para calcular el daño de los vehículos WIM (numerador) y el daño del camión de diseño a fatiga (denominador).

Tabla 4.6. Resultados de daño generado por vehículos WIM y por el camión de diseño a fatiga.

| | |
|---------------------------------|----------|
| Momento efectivo (ton-m) | 155.02 |
| Momento diseño a fatiga (ton-m) | 158.72 |
| Daño vehículos WIM | 4.69E+13 |
| Daño camión de diseño a fatiga | 3.12E+13 |

Finalmente, en la Tabla 4.7, se presenta el índice de acumulación de daño.

Tabla 4.7. Índice de acumulación de daño

| | |
|----------|------|
| α | 1.50 |
|----------|------|

Este índice nos indica que el daño generado por los vehículos pesados es un 50% mayor al daño generado el camión de diseño a fatiga. Esto se traduce en una vida útil remanente de 5 años.

En la Tabla 4.8 se presenta la influencia por eje en la Ecuación 2.11.

Tabla 4.8. Contribución por eje a la sumatoria de momento efectivo.

| Número de ejes | Número de registros | $\sum \left(\frac{n_i}{N} \right) * (M_i^m)$ | % del total | % por vehículo |
|----------------|---------------------|---|-------------|----------------|
| 2 | 7558 | 13367906 | 29% | 0.004% |
| 3 | 560 | 16599692 | 36% | 0.064% |
| 4 | 188 | 3091388 | 7% | 0.035% |
| 5 | 92 | 6582506 | 14% | 0.154% |
| 6 | 36 | 6736557 | 15% | 0.403% |

Se observa que los vehículos de tres ejes contribuyen con el 29% a la sumatoria del momento efectivo, siendo el grupo con mayor participación en este parámetro. Sin embargo, este valor depende directamente de la cantidad registrada de vehículos pesados de tres ejes. Por ello, se calculó el aporte porcentual individual según el número de ejes, resultando que los vehículos de seis ejes generan un 0.403% de la sumatoria, lo que equivale a seis veces más que el aporte individual de los vehículos de tres ejes. Este análisis evidencia la influencia significativa del número de ejes en la distribución de las cargas y su impacto acumulativo sobre la estructura.

4.6 Conclusión

La inspección visual del puente evidenció diversas patologías que afectan su desempeño en serviciabilidad, incluyendo fisuración en cepas, deterioro de juntas de dilatación, tope sísmico corroído, y otros daños significativos. Estos hallazgos destacan la necesidad urgente de mantenimiento para prolongar su vida útil y mitigar riesgos de seguridad.

En la consolidación de la base de datos se identificó un error sistemático en el cálculo del PBV, ya que el sistema WIM sumaba solo los tres primeros pesos por eje, afectando los registros de vehículos de cuatro o más ejes. La corrección de este error, mediante el recálculo del PBV, mejoró la precisión de los datos para el análisis posterior, sin embargo, deja en evidencia que el sistema WIM utilizado presentaba errores importantes. Octubre de 2022 fue seleccionado como el mes de referencia debido a la mayor cantidad de registros consistentes y completos. El estudio de este mes reveló que 208133 vehículos (31% del total) violan los límites de velocidad y PBV. Se identificó que los vehículos más comunes en circulación son aquellos con dos ejes, representando el 99% del total de registros. Por otro lado, los vehículos con mayor peso bruto corresponden a configuraciones de seis ejes, alcanzando pesos superiores a 90 toneladas. Si bien estos últimos no son los más comunes, los PBV que alcanzan implican un mayor impacto en la estructura del puente.

Los resultados demostraron que algunos vehículos generan momentos flectores y esfuerzos cortantes que superan las demandas de diseño definidas por el modelo HS20-44 con un incremento del 20% aplicado (MC Vol. 3). En particular, para la configuración de seis ejes, se observó una probabilidad del 76% de que los momentos y esfuerzos cortantes excedan los valores de diseño. Además, los momentos flectores alcanzados llegan a ser más del doble del momento flector considerado en el diseño. Esta situación evidencia que el tráfico actual está sometiendo al puente a sollicitaciones significativamente superiores a las contempladas por las normas vigentes, lo que compromete la seguridad estructural de la infraestructura y subraya la necesidad urgente de actualizar los patrones de diseño.

La evaluación de fatiga utilizando la metodología adaptada de Babu (2019) mostró que el tráfico pesado ha contribuido significativamente a la acumulación de daño en las vigas pretensadas del puente. El índice de daño acumulado tuvo un valor de 1.50, es decir, los diez años de vida útil

proyectados, se reducen a cinco años con el flujo vehicular actual del puente, esto refleja la necesidad de implementar restricciones de circulación o reforzar la estructura para evitar un colapso prematuro. En general, los resultados subrayan la importancia de un monitoreo continuo y una gestión adecuada del tráfico pesado en el puente Juan Pablo II para garantizar su seguridad y funcionalidad a largo plazo. Este estudio proporciona una base para la toma de decisiones en políticas de conservación y mejora de infraestructura crítica.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES

En este estudio se evaluaros los efectos estructurales inducidos por el tráfico pesado real que solicita el Puente Juan Pablo II, Concepción. Los efectos estructurales considerados fueron: (1) momentos flectores; (2) fuerzas cortantes; y, (3) deterioro por fatiga. Los análisis realizados permiten obtener las siguientes conclusiones:

1. Se describió la condición estructural actual del puente Juan Pablo II mediante la inspección de planos y una visita a terreno documentada mediante fotografías. Durante este proceso, se identificaron patologías y errores constructivos que evidencian la necesidad de realizar labores de mantención para garantizar la extensión de su vida útil y asegurar su serviciabilidad.
2. Se consolidó una base de datos de tráfico real sobre el puente Juan Pablo II utilizando información obtenida mediante tecnología de pesaje en movimiento (WIM). La base de datos contenía registros de circulación vehicular recopilados durante un período de siete meses. Para el análisis, se seleccionó un mes específico, aplicando filtros necesarios para garantizar la fiabilidad de los datos. Como resultado, se identificó que el mes de octubre de 2022 presentaba la mayor regularidad (promedio diario de vehículos) y cantidad de registros (669922). Cabe destacar la importancia del proceso de filtrado, ya que permitió detectar y corregir un error sistemático donde la sumatoria de pesos por eje no coincidía con el PBV en vehículos cuatro ejes o más, logrando así una mejora significativa la confiabilidad de los datos.
3. Se identificó la configuración de los vehículos más frecuentes y los de mayor tonelaje que circulan sobre el puente Juan Pablo II. Utilizando una rutina desarrollada en Python, se analizó la base de datos agrupada por número de ejes, velocidad y PBV. Los resultados revelaron que un 30% de los vehículos circulan excediendo los límites legales de velocidad o PBV. Además, se concluyó que los vehículos más frecuentes son los de dos ejes, mientras que los más pesados corresponden a los de seis ejes.
4. Se calcularon los efectos estructurales, específicamente momentos flectores y fuerzas cortantes, inducidos por el tráfico real. Para ello, se realizó una comparación entre los momentos y cortes generados por los camiones registrados mediante tecnología WIM y los valores correspondientes al camión estándar vigente utilizado para el diseño en Chile, HS20-44+20%. Los resultados indicaron que los vehículos de seis ejes tienen una probabilidad del 76% de superar el momento generado por el HS20-44+20%, alcanzando valores que superan más del doble de lo previsto (sobre el límite ultimo de resistencia).

5. Se cuantificó el deterioro estructural del puente causado por el paso de vehículos pesados, utilizando la metodología propuesta por Babu (2019). Se calculó el índice de acumulación de daño, definido como la relación entre el daño generado por los vehículos registrados mediante tecnología WIM y el daño producido por el camión de diseño a fatiga, considerando una vida útil remanente proyectada de diez años. Los resultados indicaron que, proyectando el tráfico medido durante 2022, la vida útil remanente del puente se reduce a solo cinco años. Además, comparando el aporte según el número de ejes a la ecuación de daño de vehículos WIM, se concluyó que los vehículos de seis ejes generan un daño 100 veces mayor en comparación con los vehículos de dos ejes.

Para futuras líneas de investigación, se recomienda desarrollar un camión de diseño que represente de manera más fiel el tráfico actual registrado por los sistemas de pesaje en movimiento (WIM), ya que las recomendaciones actuales están resultando insuficientes. Asimismo, se sugiere diseñar un sistema que permita calcular con mayor precisión la cantidad de ciclos de fatiga generados por el paso de un camión, considerando su número de ejes. Esto contribuiría a mejorar significativamente la exactitud del cálculo del índice de acumulación de daño.

Bibliografía

- AASHTO. (1965). *Standard Specifications for Highway Bridges* (9th ed.).
- AASHTO. (1974). *Standard Specifications for Highway Bridges. 11th.*
- AASHTO. (2002). *Standard specifications for highway bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2012). *AASHTO LRFD bridge design specifications, customary U.S. units with 2012 and 2013 interim revisions ; and 2012 Errata*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- AASHTO. (2017). *AASHTO LRFD bridge design specifications, Part I: Sections 1-6*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI. (1963). *Building code requirements for reinforced concrete* (5th ed.).
- AISC. (2022). *AISC 360-22 Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction.*
- ASTM. (2017). *Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1049-85R17>
- Babu, A. (2019). *Quantifying the Fatigue Damage Accumulation in Bridges*.
- biobiochile.cl. (2024, September 30). *Bío Bío: Gobierno espera dejar avanzado lineamientos para futura reposición de Puente Juan Pablo II*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2024/09/30/bio-bio-gobierno-espera-dejar-avanzado-lineamientos-para-futura-reposicion-de-puente-juan-pablo-ii.shtml>
- Casas, J. R., & Crespo-Minguillon, C. (1998). Probabilistic response of prestressed concrete bridges to fatigue. *Engineering Structures*, 20(11), 940–947. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00187-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00187-9)
- Chotickai, P., & Bowman, M. D. (2006). Truck Models for Improved Fatigue Life Predictions of Steel Bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 11(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2006\)11:1\(71\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2006)11:1(71))
- Cook, W. (2014). *Bridge Failure Rates, Consequences, and Predictive Trends*. <https://digitalcommons.usu.edu/etd/2163>
- Diario Concepción. (2023, January 10). *Tránsito ilegal por puente Juan Pablo II: confirman multas a más de 300 camiones en 2022*. <https://www.diarioconcepcion.cl/ciudad/2023/01/10/transito-ilegal-por-puente-juan-pablo-ii-confirman-multas-a-mas-de-300-camiones-en-2022.html>

- Estadística Básica* - Google Libros. (n.d.). Retrieved January 21, 2025, from https://books.google.es/books?id=pLF16E8nF6gC&pg=PA97&dq=distribuci%C3%B3n+normal,+distribuci%C3%B3n+de+Gauss+o+distribuci%C3%B3n+gaussiana,+a+una+de+las+distribuciones+de+probabilidad&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj__aL99oTYAhXHtRoKHayaD7MQ6AEIJzAA#v=onepage&q=distribuci%C3%B3n%20normal%2C%20distribuci%C3%B3n%20de%20Gauss%20o%20distribuci%C3%B3n%20gaussiana%2C%20a%20una%20de%20las%20distribuciones%20de%20probabilidad&f=false
- Fisher, J. W. (1984a). FATIGUE AND FRACTURE IN STEEL BRIDGES: CASE STUDIES. In *Fatigue and Fract in Steel Briges*. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(85\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0141-0296(85)90040-9)
- Fisher, J. W. (1984b). FATIGUE AND FRACTURE IN STEEL BRIDGES: CASE STUDIES. In *Fatigue and Fract in Steel Briges*. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(85\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0141-0296(85)90040-9)
- Ghosn, M., Sivakumar, B., & Moses, F. (2011). Protocols for Collecting and Using Traffic Data in Bridge Design. *Protocols for Collecting and Using Traffic Data in Bridge Design*. <https://doi.org/10.17226/14521>
- ICAFAL. (2018). *Reparacion Puente Juan Pablo II en Concepción*. <https://www.icafalsicomaq.cl/puentes/reparacion-juan-pablo.html>
- Laman, J. A., & Nowak, A. S. (1996). Fatigue-Load Models for Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 122(7). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1996\)122:7\(726\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1996)122:7(726))
- Miner, M. A. (1945). Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 12(3). <https://doi.org/10.1115/1.4009458>
- Ministerio de transporte y telecomunicaciones. (2010, November 13). *Resolución 247 EXENTA*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1019323>
- MOP. (2023). *VOLUMEN N° 3 INSTRUCCIONES Y CRITERIOS DE DISEÑO MANUAL DE CARRETERAS EDICIÓN 2023*.
- Prozzi, A. (2012). *Oversize/Overweight Vehicle Permit Fee Study (FHWA/TX-13/0-6736-2)*. www.ntis.gov.
- United State Department Geological Survey. (2024). Maule, Chile Earthquake: M8.8 on February 27, 2010.
- Wilson, W. M., & Coombe, J. V. (1939). *Fatigue tests of connection angles*.
- Wöhler, A. (1870). Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl. *Zeitschrift Für Bauwesen*, 20, 73–106.

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 |
|--|
| <p>Los puentes son infraestructuras clave para la conectividad y el desarrollo económico. En Chile, el diseño de los puentes sigue normas basadas en especificaciones de 2002, que, aunque contemplan un aumento del 20% en las cargas del HS20-44, no reflejan las cargas vehiculares actuales.</p> <p>Los análisis de demanda y deterioro muestran la necesidad urgente de actualizar estas normativas para adaptarlas a las condiciones actuales del tráfico en el país. Esta actualización es crucial para garantizar la seguridad, la capacidad y la resiliencia de los puentes, alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 9: "Industria, Innovación e Infraestructura". Este ODS promueve la construcción de infraestructuras sostenibles y resilientes, esenciales para el crecimiento económico y la conectividad.</p> <p>Modernizar la infraestructura de puentes no solo mejora la seguridad vial, sino que también contribuye al desarrollo inclusivo y prepara al país para enfrentar desafíos futuros, asegurando un crecimiento sostenible a largo plazo.</p> |

ANEXO 3.4

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
data = pd.read_excel('03.-Oct-2022.xlsx', skiprows=3)
data['Fecha'] = pd.to_datetime(data['Fecha'], format='%d-%m-%Y %H:%M:%S')
num_filas = data.shape[0]
print(f"La cantidad de filas es: {num_filas}")
# Eliminar filas duplicadas
data = data.drop_duplicates()

# Calcular el número de ejes con peso > 0
NoEjes = data[[f'Peso Eje {i} [Kg]' for i in range(1, 8)]] != 0
data['NoEjes'] = NoEjes.sum(axis=1)

# Calcular el peso total sumando todos los ejes
data['Peso total [Kg]'] = data[[f'Peso Eje {i} [Kg]' for i in range(1, 8)]] .sum(axis=1)

# Filtrar vehículos con velocidad menor a 150 km/h
data = data[data['Velocidad'] <= 150]

# Filtrar vehículos con distancias entre ejes fuera del rango [1000, 30000], pero permitir 0
data = data[
    ((data['Distancia Eje 1-2 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 1-2 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 1-2 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 2-3 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 2-3 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 2-3 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 3-4 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 3-4 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 3-4 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 4-5 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 4-5 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 4-5 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 5-6 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 5-6 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 5-6 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 6-7 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 6-7 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 6-7 [m]'] <= 30000)))
]

# Verificar si algún eje supera el 80% del peso total
mask = ((data['Peso Eje 1 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 2 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 3 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 4 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 5 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 6 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 7 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']))

# Filtrar las filas donde algún eje aporte más del 80% del peso total
data = data[~mask]
```

```
num_filas = data.shape[0]
print(f"La cantidad de filas es: {num_filas}")
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Filtrar datos por dirección
CtoSP = data[data['Pista'] == "Concepcion - San Pedro"]
SPtoC = data[data['Pista'] == "San Pedro - Concepcion"]

# Contar registros diarios para Concepción a San Pedro
daily_counts_CtoSP = CtoSP.groupby(CtoSP['Fecha'].dt.date).size()

# Crear un rango completo de fechas para el mes de octubre
october_dates = pd.date_range(start='2022-10-01', end='2022-10-31', freq='D')
daily_counts_CtoSP = daily_counts_CtoSP.reindex(october_dates, fill_value=0) # Rellenar días sin
datos

# Calcular el promedio y total de datos para Concepción a San Pedro
mean_data_CtoSP = daily_counts_CtoSP.mean()
total_data_CtoSP = daily_counts_CtoSP.sum()

# Crear un gráfico de columnas para Concepción a San Pedro
fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))
bars = ax.bar(daily_counts_CtoSP.index.strftime('%Y-%m-%d'), daily_counts_CtoSP.values,
color='skyblue', edgecolor='blue')

# Configurar etiquetas del eje x
ax.set_xticks(range(len(daily_counts_CtoSP.index)))
ax.set_xticklabels(daily_counts_CtoSP.index.strftime('%d-%m-%Y'), rotation=90, ha='right')
plt.ylim(0, 18000)

# Agregar línea de promedio
ax.axhline(y=mean_data_CtoSP, color='red', linestyle='--', label=f"Promedio:
{mean_data_CtoSP:.2f}")

# Agregar una leyenda con el total
ax.legend(title=f"Total de datos: {total_data_CtoSP}", loc='upper left')

# Guardar la figura
plt.tight_layout()
plt.savefig('Octubre_CCPaSP.png', dpi=300)
plt.show()

# Contar registros diarios para San Pedro a Concepción
daily_counts_SPtoC = SPtoC.groupby(SPtoC['Fecha'].dt.date).size()
```

```

# Reindexar para San Pedro a Concepción y rellenar días sin datos
daily_counts_SPtoC = daily_counts_SPtoC.reindex(october_dates, fill_value=0)

# Calcular el promedio y total de datos para San Pedro a Concepción
mean_data_SPtoC = daily_counts_SPtoC.mean()
total_data_SPtoC = daily_counts_SPtoC.sum()

# Crear un gráfico de columnas para San Pedro a Concepción
fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))
bars = ax.bar(daily_counts_SPtoC.index.strftime('%Y-%m-%d'), daily_counts_SPtoC.values,
color='skyblue', edgecolor='blue')

# Configurar etiquetas del eje x
ax.set_xticks(range(len(daily_counts_SPtoC.index)))
ax.set_xticklabels(daily_counts_SPtoC.index.strftime('%d-%m-%Y'), rotation=90, ha='right')
plt.ylim(0, 18000)

# Agregar línea de promedio
ax.axhline(y=mean_data_SPtoC, color='red', linestyle='--', label=f"Promedio:
{mean_data_SPtoC:.2f}")

# Agregar una leyenda con el total
ax.legend(title=f"Total de datos: {total_data_SPtoC}", loc='upper left')

# Guardar la figura
plt.tight_layout()
plt.savefig('Octubre_SPaCCP.png', dpi=300)
plt.show()

```

ANEXO 3.5

```

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
ata = pd.read_excel('03.-Oct-2022.xlsx', skiprows=3)

# Eliminar filas duplicadas
data = data.drop_duplicates()

# Calcular el número de ejes con peso > 0
NoEjes = data[[f'Peso Eje {i} [Kg]' for i in range(1, 8)]] != 0
data['NoEjes'] = NoEjes.sum(axis=1)

# Calcular el peso total sumando todos los ejes
data['Peso total [Kg]'] = data[[f'Peso Eje {i} [Kg]' for i in range(1, 8)]].sum(axis=1)

# Filtrar vehículos con velocidad menor a 150 km/h

```

```
data = data[data['Velocidad'] <= 150]

# Filtrar vehículos con distancias entre ejes fuera del rango [1000, 30000], pero permitir 0
data = data[
    ((data['Distancia Eje 1-2 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 1-2 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 1-2 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 2-3 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 2-3 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 2-3 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 3-4 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 3-4 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 3-4 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 4-5 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 4-5 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 4-5 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 5-6 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 5-6 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 5-6 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 6-7 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 6-7 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 6-7 [m]'] <= 30000)))

# Crear una máscara que verifica si algún eje supera el 80% del peso total
mask = ((data['Peso Eje 1 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 2 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 3 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 4 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 5 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 6 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 7 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']))

# Filtrar las filas donde algún eje aporte más del 80% del peso total
data = data[~mask]

num_filas = data.shape[0]
print(f"La cantidad de filas es: {num_filas}")

# Gráfico de dispersión para todos los ejes
# Agregar una columna para el peso total en toneladas
data['Peso total [ton]'] = data['Peso total [Kg]'] / 1000
velocidad = data['Velocidad']
peso_bruto_vehicular = data['Peso total [ton]']
num_vehiculos = len(data)

# Filtrar vehículos que superan los 70 km/h
vehiculos_sobre_70 = data[data['Velocidad'] > 70]
num_vehiculos_sobre_70 = len(vehiculos_sobre_70)

# Filtrar vehículos que superan las 10 toneladas
vehiculos_sobre_10_ton = data[data['Peso total [Kg]'] > 10000]
num_vehiculos_sobre_10_ton = len(vehiculos_sobre_10_ton)

# Filtrar vehículos que superan tanto los 70 km/h como las 10 toneladas
```

```
vehiculos_sobre_70_10 = data[(data['Velocidad'] > 70) & (data['Peso total [Kg]'] > 10000)]
num_vehiculos_sobre_70_10 = len(vehiculos_sobre_70_10)

# Crear el gráfico de dispersión
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.grid(True, zorder=1) # La grilla tiene zorder bajo
plt.scatter(peso_bruto_vehicular, velocidad, color='blue', alpha=0.5, zorder=2) # Los puntos tienen
zorder alto
plt.xlim(-5, 100) # Limita el eje X de -5 a 100 toneladas
plt.ylim(0, 160) # Limita el eje Y de 0 a 160 km/h

# Establecer los ticks de los ejes cada 10 unidades
plt.xticks(np.arange(0, 101, 10)) # De 0 a 100 toneladas con paso de 10
plt.yticks(np.arange(0, 161, 10)) # De 0 a 160 km/h con paso de 10

# Mover el eje Y ligeramente hacia la derecha para separar el 0
plt.gca().spines['left'].set_position(('axes', -0.01)) # 0.05 es un pequeño margen desde el eje Y

# Etiquetas y título
plt.xlabel('Peso Bruto Vehicular [ton]', fontsize=14)
plt.ylabel('Velocidad [km/h]', fontsize=14)

# Líneas de límite
limite_velocidad = 70
plt.axhline(y=limite_velocidad, color='red', linestyle='--', linewidth=1.5, label=f'Límite de Velocidad:
{limite_velocidad} km/h', zorder=3)
limite_peso = 10
plt.axvline(x=limite_peso, color='orange', linestyle='--', linewidth=1.5, label=f'Límite de Peso:
{limite_peso} toneladas', zorder=3)

# Agregar la leyenda con los 3 grupos de vehículos
plt.legend(title=f'N° Vehículos: {num_vehiculos}\n'
           f'N° Vehículos sobre 70 km/h: {num_vehiculos_sobre_70}\n'
           f'N° Vehículos sobre 10 toneladas: {num_vehiculos_sobre_10_ton}\n'
           f'N° Vehículos sobre 70 km/h y 10 toneladas: {num_vehiculos_sobre_70_10}')

# Guardar el gráfico
plt.savefig("VP_TOTAL.png", dpi=300)
plt.show()

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Crear un bucle para el número de ejes de 2 a 6
for N in range(2, 7): # Limitar de 2 a 6 ejes
    # Filtrar datos según el número de ejes y otras condiciones
    EJExN = data[(data['NoEjes'] == N)]
```

```
velocidad = EJExN['Velocidad']
peso_bruto_vehicular = EJExN['Peso total [ton]']
num_vehiculos = len(EJExN)

# Filtrar vehículos que superan los 70 km/h
vehiculos_sobre_70 = EJExN[EJExN['Velocidad'] > 70]
num_vehiculos_sobre_70 = len(vehiculos_sobre_70)

# Filtrar vehículos que superan las 10 toneladas
vehiculos_sobre_10_ton = EJExN[EJExN['Peso total [ton]'] > 10]
num_vehiculos_sobre_10_ton = len(vehiculos_sobre_10_ton)

# Filtrar vehículos que superan tanto los 70 km/h como las 10 toneladas
vehiculos_sobre_70_10 = EJExN[(EJExN['Velocidad'] > 70) & (EJExN['Peso total [ton]'] > 10)]
num_vehiculos_sobre_70_10 = len(vehiculos_sobre_70_10)

# Crear el gráfico de dispersión
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.grid(True, zorder=1) # Grilla con zorder bajo
plt.axhline(y=70, color='red', linestyle='--', linewidth=1.5, label='Límite Vel: 70 km/h', zorder=3)
# Línea roja
plt.axvline(x=10, color='orange', linestyle='--', linewidth=1.5, label='Límite Peso: 10 toneladas',
zorder=3) # Línea naranja
plt.scatter(peso_bruto_vehicular, velocidad, color='blue', alpha=0.5, zorder=2) # Puntos con zorder
alto
plt.xlim(-5, 100)
plt.ylim(0, 160)

# Establecer los ticks de los ejes cada 10 unidades
plt.xticks(np.arange(0, 101, 10))
plt.yticks(np.arange(0, 161, 10))

# Etiquetas y título
plt.xlabel('Peso Bruto Vehicular [ton]', fontsize=14)
plt.ylabel('Velocidad [km/h]', fontsize=14)

# Agregar la leyenda
plt.legend(title=f'N° Vehículos: {num_vehiculos}\n'
           f'N° Vehículos sobre 70 km/h: {num_vehiculos_sobre_70}\n'
           f'N° Vehículos sobre 10 toneladas: {num_vehiculos_sobre_10_ton}\n'
           f'N° Vehículos sobre 70 km/h y 10 toneladas: {num_vehiculos_sobre_70_10}',
           fontsize=10, loc='upper right')

# Guardar el gráfico
plt.savefig(f'VvsP_{N}_ejes.png', dpi=300, bbox_inches='tight')
plt.close()
```

ANEXO 3.6

Anexo 3.6.1

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
data = pd.read_excel('03.-Oct-2022.xlsx', skiprows=3)
data['Fecha'] = pd.to_datetime(data['Fecha'], format='%d-%m-%Y %H:%M:%S')
# Eliminar filas duplicadas
data = data.drop_duplicates()

# Calcular el número de ejes con peso > 0
NoEjes = data[['Peso Eje {i} [Kg]' for i in range(1, 8)]] != 0
data['NoEjes'] = NoEjes.sum(axis=1)

# Calcular el peso total sumando todos los ejes
data['Peso total [Kg]'] = data[['Peso Eje {i} [Kg]' for i in range(1, 8)]] .sum(axis=1)

# Filtrar vehículos con velocidad menor a 150 km/h
data = data[data['Velocidad'] <= 150]

# Filtrar vehículos con distancias entre ejes fuera del rango [1000, 30000], pero permitir 0
data = data[
    ((data['Distancia Eje 1-2 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 1-2 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 1-2 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 2-3 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 2-3 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 2-3 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 3-4 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 3-4 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 3-4 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 4-5 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 4-5 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 4-5 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 5-6 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 5-6 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 5-6 [m]'] <= 30000))) &
    ((data['Distancia Eje 6-7 [m]'] == 0) | ((data['Distancia Eje 6-7 [m]'] >= 1000) & (data['Distancia Eje 6-7 [m]'] <= 30000)))
]

# Crear una máscara que verifica si algún eje supera el 80% del peso total
mask = ((data['Peso Eje 1 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 2 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 3 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 4 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 5 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 6 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']) |
        (data['Peso Eje 7 [Kg]'] > 0.8 * data['Peso total [Kg]']))

# Filtrar las filas donde algún eje aporte más del 80% del peso total
data = data[~mask]
```

```

num_filas = data.shape[0]
print(f"La cantidad de filas es: {num_filas}")

# Definir número de ejes
N = 2
EJExN = data[(data['NoEjes'] == N)
& (data['Peso total [Kg]'] >= 9000)]
# Convertir los datos filtrados a un array de NumPy
datos = np.array(EJExN)

# Extraer las columnas específicas (ajusta los índices si cambian)
ejes_dist = datos[:, [4, 5, 11]]

# Convertir distancias de mm a m
ejes_dist /= 1000

# Guardar el archivo TXT con el número de ejes en el nombre
output_filename = f'{N}ejes.txt'
np.savetxt(output_filename, ejes_dist, delimiter=',', fmt='% .3f')

print(f"Archivo guardado como {output_filename}")

```

Anexo 3.6.2

```

import numpy as np

A=np.loadtxt('2ejes.txt',delimiter=',')

# Datos de entrada
L = 33 # Longitud del puente
DL = 0.10 # Incremento
matriz_resultados = np.zeros((len(A), 2))

# Función para calcular las fuerzas internas
def shear_and_moment_diagrams_optimized(X, P, a, L):
    # Ajuste para manejar si la carga está parcialmente fuera del puente
    if a > L:
        return np.zeros_like(X), np.zeros_like(X) # Si el camión está completamente fuera, no hay momento ni cortante

    R_left = P * (L - a) / L
    R_right = P * a / L

    # Momentos y cortantes vectorizados
    M = np.where(X <= a, R_left * X, R_left * X - P * (X - a))
    V = np.where(X <= a, R_left, -R_right)
    return M, V

```

```

# Función principal optimizada
for i in range(len(A)):
    L1, L2, L3 = A[i]
    Load = [L1, L2]
    Spacing = np.array([0, L3])
    Loc_Pos = np.cumsum(Spacing) # Posición de cada carga en el puente

    # Vector de posiciones del puente
    X = np.arange(0, L + DL, DL) # Posiciones dentro del puente
    Truck_Pos = np.arange(0, L + DL, DL) # Posiciones posibles del camión

    # Inicializar máximos
    Mmax, Vmax = float('-inf'), float('-inf')

    # Bucle sobre posiciones del camión
    for position in Truck_Pos:
        SumM, SumV = 0, 0
        for j, P in enumerate(Load):
            # Calcular las fuerzas internas solo si el camión está dentro del puente
            M, V = shear_and_moment_diagrams_optimized(X, P, position + Loc_Pos[j], L)
            SumM += M
            SumV += V
        # Actualizar máximos
        Mmax = max(Mmax, np.max(SumM))
        Vmax = max(Vmax, np.max(np.abs(SumV)))

    # Guardar resultados
    matriz_resultados[i] = [Mmax, Vmax]

matriz2 = np.array(matriz_resultados)

np.savetxt('2ejesMC.txt', matriz2, delimiter=',', fmt='% .2f')

```

Anexo 3.6.3

```

print('**** Manual de Carreteras HS20-44+20% ****')
print('Maximum Moment and Shear - Simple Span - One Lane')

span = 33 #m
L = span/.3048 #ft
IM = min(50/(L+125),0.30)
MOP = 1.20

# Caso a: Standard HS20-44+20%
# valid for L>2a (28 ft). Tandem constrols for L<37 ft.
# Max moment Barre's Teorem

```

```

P = 32*MOP
a = 14
x = L/2 - 5/6*a
A = P*( 9/4 - 9/4*(x/L) -3/2*(a/L))
Ma = A*x + (A-P)*a
# shear forces x=0
x = 0
Va = P*( 9/4 - 9/4*(x/L) -3/2*(a/L))

#Caso b: HS20 lane loading and concentrated load
M_lane = 0.64 * L**2 / 8
V_lane = 0.64 * L / 2

Mb = M_lane + 18*L/4
Vb = V_lane + 26

#Caso c: Military loading
P = 24
a = 4
# bending moment Barre's Teorem
x = L/2 - 1/4*a
A = 2*P - P/L*(2*x+a)
Mc = A*x
# shear force
x = 0
Vc = 2*P - P/L*(2*x+a)

# Unit change kip-ft to ton-m
Ma = Ma*0.4536*.3048
Mb = Mb*0.4536*.3048
Mc = Mc*0.4536*.3048
Va = Va*0.4536
Vb = Vb*0.4536
Vc = Vc*0.4536

# Print results
print( "Luz : {:.2f} m".format(span))
print( "Impacto : {:.2f} ".format(IM))
print( "M_LL : {:.2f} ton-m".format( max(Ma, Mb, Mc) ) )
print( "M_LLIM : {:.2f} ton-m".format( max(Ma, Mb, Mc)*(1+IM) ) )
print( "V_LL : {:.2f} ton".format( max(Va, Vb, Vc) ) )
print( "V_LLIM : {:.2f} ton".format( max(Va, Vb, Vc)*(1+IM) ) )

```

Anexo 3.6.3

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

```

```
from scipy.stats import norm

# Ordenar la matriz por momentos en orden ascendente
indices_ordenados = np.argsort(matriz_resultados[:, 0])
momento_orden = matriz_resultados[indices_ordenados, 0]
momento_diseño = 277.47
FU_momento = momento_orden / momento_diseño

# Ordenar la matriz por cortes en orden ascendente
indices_ordenados = np.argsort(matriz_resultados[:, 1])
corte_orden = matriz_resultados[indices_ordenados, 1]
corte_diseño = 35.81
FU_corte = corte_orden / corte_diseño

# Crear el vector n_i / (N + 1)
N = len(FU_momento)
n_i_vector = np.arange(1, N + 1) / (N + 1)
vector_inversa_normal = norm.ppf(n_i_vector)

# Calcular la mediana de FU_momento y FU_corte
mediana_momento = np.median(FU_momento)
mediana_corte = np.median(FU_corte)
mediana_inversa_normal = np.median(vector_inversa_normal)

# Calcular la desviación estándar
std_FU_momento = np.std(FU_momento)
std_FU_corte = np.std(FU_corte)

# Encontrar los puntos máximos de FU_momento y FU_corte
max_fu_momento = np.max(FU_momento)
max_fu_corte = np.max(FU_corte)

# Encontrar los índices correspondientes a los puntos máximos
indice_max_fu_momento = np.argmax(FU_momento)
indice_max_fu_corte = np.argmax(FU_corte)

# Encontrar el punto más cercano a FU = 1 en FU_momento
distancia_fu_momento = np.abs(FU_momento - 1)
indice_fu_cercano_momento = np.argmin(distancia_fu_momento)
coordenada_fu_momento = FU_momento[indice_fu_cercano_momento]
probabilidad_acumulada_momento = vector_inversa_normal[indice_fu_cercano_momento]

# Encontrar el punto más cercano a FU = 1 en FU_corte
distancia_fu_corte = np.abs(FU_corte - 1)
indice_fu_cercano_corte = np.argmin(distancia_fu_corte)
coordenada_fu_corte = FU_corte[indice_fu_cercano_corte]
probabilidad_acumulada_corte = vector_inversa_normal[indice_fu_cercano_corte]
```

```
# Graficar puntos de la inversa de la normal estándar vs FU momento
plt.figure(figsize=(10, 6))

# Mostrar grilla más densa antes de los puntos
plt.grid(True, which="both", axis='both', linestyle='-', linewidth=0.5, zorder=1)
plt.minorticks_on()
plt.grid(True, which='minor', axis='both', linestyle=':', linewidth=0.5, zorder=1)

# Graficar los puntos por encima de la grilla
scatter_momento = plt.scatter(FU_momento, vector_inversa_normal, color='b', s=50, zorder=2)

# Resaltar el punto de la mediana
plt.scatter(media_nano_momento, mediana_inversa_normal, color='purple', s=100, edgecolors='black',
zorder=3)

# Resaltar el punto de máximo FU
plt.scatter(max_fu_momento, vector_inversa_normal[indice_max_fu_momento], color='red', s=100,
edgecolors='black', zorder=3,
label=f'Máximo FU Momento: {max_fu_momento:.2f}')

# Resaltar el punto más cercano a FU = 1
plt.scatter(coordenada_fu_momento, probabilidad_acumulada_momento, color='green', s=100,
edgecolors='black', zorder=3,
label=f'Punto más cercano a FU=1: ({coordenada_fu_momento:.2f},
{probabilidad_acumulada_momento:.2f}'))

# Etiquetas al lado de los puntos
plt.text(media_nano_momento + 0.06, mediana_inversa_normal - 0.2,
f'({media_nano_momento:.2f}, {mediana_inversa_normal:.2f}) ', color='purple', fontsize=12,
ha='left', va='bottom',
bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='purple', boxstyle='round,pad=0.5'), zorder=4)

plt.text(max_fu_momento +0.07, vector_inversa_normal[indice_max_fu_momento] -0.1,
f'({max_fu_momento:.2f}, {vector_inversa_normal[indice_max_fu_momento]:.2f})',
color='red', fontsize=12, ha='left', va='bottom',
bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='red', boxstyle='round,pad=0.5'), zorder=4)

plt.text(coordenada_fu_momento + 0.03, probabilidad_acumulada_momento - 0.6,
f'({coordenada_fu_momento:.2f}, {probabilidad_acumulada_momento:.2f})', color='green',
fontsize=12, ha='left', va='bottom',
bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='green', boxstyle='round,pad=0.5'), zorder=4)

# Configuración de etiquetas y título
plt.xlabel('Momento WIM/ Momento HS20-44+20%', fontsize=14)
plt.ylabel('Z', fontsize=14)
plt.xlim(0, 2.5)
plt.ylim(-4, 4)
plt.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=12)
```

```
plt.tick_params(axis='both', which='minor', labelsz=10)

# Leyenda
plt.legend(loc='lower right', handles=[scatter_momento,
    plt.Line2D([0], [0], marker='o', color='w', markerfacecolor='purple',
markersize=10, label='Mediana'),
    plt.Line2D([0], [0], marker='o', color='w', markerfacecolor='red',
markersize=10, label='Máximo'),
    plt.Line2D([0], [0], marker='o', color='w', markerfacecolor='green',
markersize=10, label='Punto relevante')])

# Guardar la figura
plt.tight_layout()
plt.savefig('FU_M_2ejes.png', dpi=300)
plt.show()

# Repetir para la gráfica FU corte (se aplican los mismos cambios)
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.grid(True, which="both", axis='both', linestyle='-', linewidth=0.5, zorder=1)
plt.minorticks_on()
plt.grid(True, which='minor', axis='both', linestyle=':', linewidth=0.5, zorder=1)

scatter_corte = plt.scatter(FU_corte, vector_inversa_normal, color='b', s=50, zorder=2)
plt.scatter(media_n corte, media_n inversa_normal, color='purple', s=100, edgecolors='black',
zorder=3)
plt.scatter(max_fu_corte, vector_inversa_normal[indice_max_fu_corte], color='red', s=100,
edgecolors='black', zorder=3,
    label=f'Máximo FU Corte: {max_fu_corte:.2f}')
plt.scatter(coordenada_fu_corte, probabilidad_acumulada_corte, color='green', s=100,
edgecolors='black', zorder=3,
    label=f'Punto más cercano a FU=1: ({coordenada_fu_corte:.2f},
{probabilidad_acumulada_corte:.2f}'))

plt.text(media_n corte + 0.06, media_n inversa_normal - 0.2,
    f'({media_n corte:.2f}, {media_n inversa_normal:.2f})', color='purple', fontsize=12, ha='left',
va='bottom',
    bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='purple', boxstyle='round,pad=0.5'), zorder=4)

plt.text(max_fu_corte + 0.07, vector_inversa_normal[indice_max_fu_corte] - 0.1,
    f'({max_fu_corte:.2f}, {vector_inversa_normal[indice_max_fu_corte]:.2f})', color='red',
fontsize=12, ha='left', va='bottom',
    bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='red', boxstyle='round,pad=0.5'), zorder=4)

plt.text(coordenada_fu_corte + 0.03, probabilidad_acumulada_corte - 0.6,
    f'({coordenada_fu_corte:.2f}, {probabilidad_acumulada_corte:.2f})', color='green',
fontsize=12, ha='left', va='bottom',
    bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='green', boxstyle='round,pad=0.5'), zorder=4)
```

```

plt.xlabel('Corte WIM/Corte HS20-44+20%', fontsize=14)
plt.ylabel('Z', fontsize=14)
plt.xlim(0, 2.5)
plt.ylim(-4, 4)
plt.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=12)
plt.tick_params(axis='both', which='minor', labelsize=10)

plt.legend(loc='lower right', handles=[scatter_corte,
                                     plt.Line2D([0], [0], marker='o', color='w', markerfacecolor='purple',
                                                  markersize=10, label='Mediana'),
                                     plt.Line2D([0], [0], marker='o', color='w', markerfacecolor='red',
                                                  markersize=10, label='Máximo'),
                                     plt.Line2D([0], [0], marker='o', color='w', markerfacecolor='green',
                                                  markersize=10, label='Punto relevante')])

plt.tight_layout()
plt.savefig('FU_V_2ejes.png', dpi=300)
plt.show()

```

ANEXO 3.7

```

import numpy as np

# Datos de entrada para el camión de tres ejes
L = 33 # Longitud del puente en metros
DL = 0.10 # Incremento de posición en metros
P1, P2, P3 = 6.4*0.4536, 25.6*0.4536, 25.6*0.4536 # Cargas en los ejes en toneladas
D12, D23 = 14*0.3048, 30*0.3048 # Distancias entre ejes en metros

# Posiciones de las cargas del camión
Loc_Pos = np.array([0, D12, D12 + D23]) # Distancias acumuladas de los ejes
Load = np.array([P1, P2, P3]) # Cargas en cada eje

# Vector de posiciones del puente
X = np.arange(0, L + DL, DL) # Posiciones a lo largo del puente
Truck_Pos = np.arange(0, L + DL, DL) # Posiciones posibles del camión

# Función para calcular los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector
def shear_and_moment_diagrams(X, P, a, L):
    if a > L: # Si el eje está completamente fuera del puente, no hay fuerzas
        return np.zeros_like(X), np.zeros_like(X)

    R_left = P * (L - a) / L
    R_right = P * a / L

```

```
M = np.where(X <= a, R_left * X, R_left * X - P * (X - a))
V = np.where(X <= a, R_left, -R_right)
return M, V

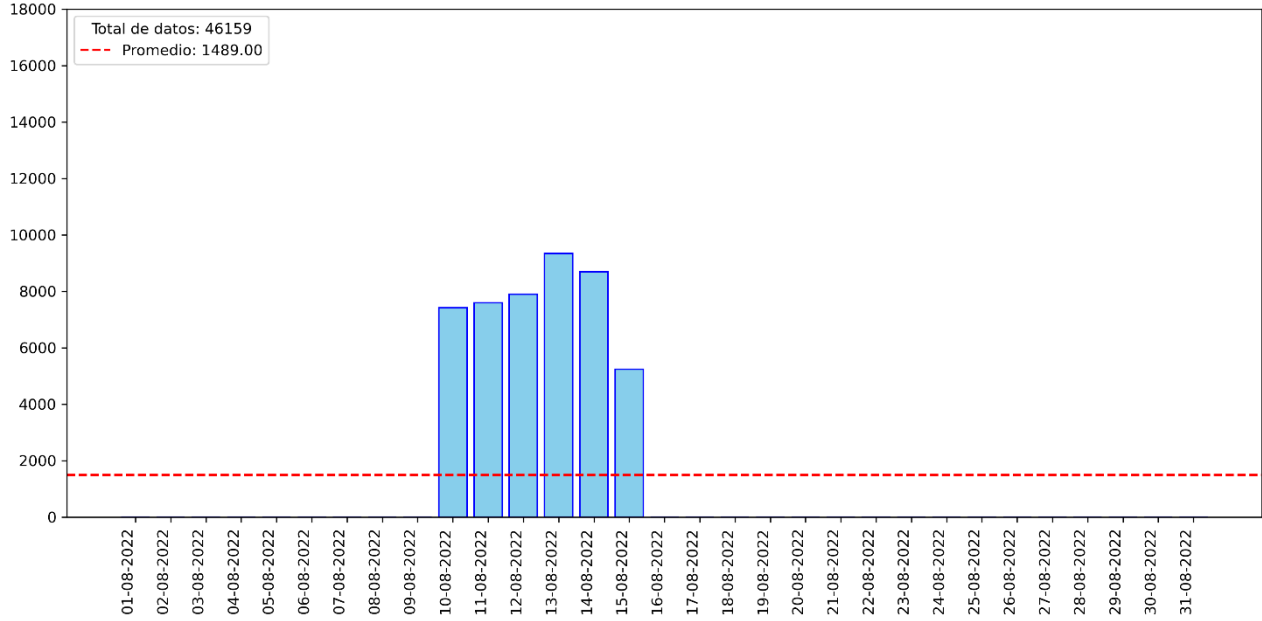
# Inicializar máximos
Mmax, Vmax = float('-inf'), float('-inf')

# Bucle sobre posiciones del camión
for position in Truck_Pos:
    SumM, SumV = 0, 0
    for j, P in enumerate(Load):
        M, V = shear_and_moment_diagrams(X, P, position + Loc_Pos[j], L)
        SumM += M
        SumV += V
    # Actualizar máximos
    Mmax = max(Mmax, np.max(SumM))
    Vmax = max(Vmax, np.max(np.abs(SumV)))

# Resultados
print(f"Momento máximo: {Mmax:.2f} tonelada-metro")
print(f"Fuerza cortante máxima: {Vmax:.2f} toneladas")
```

ANEXO 4.3

(a) Dirección CCP-SP.



(b) Dirección SP-CCP.

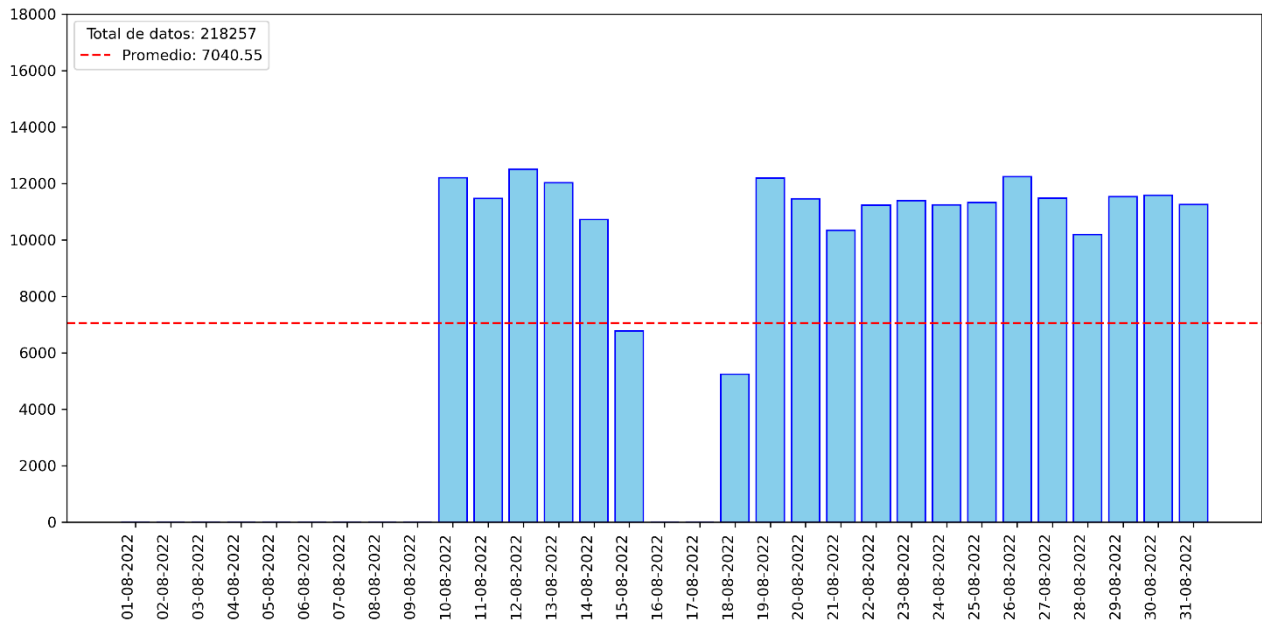
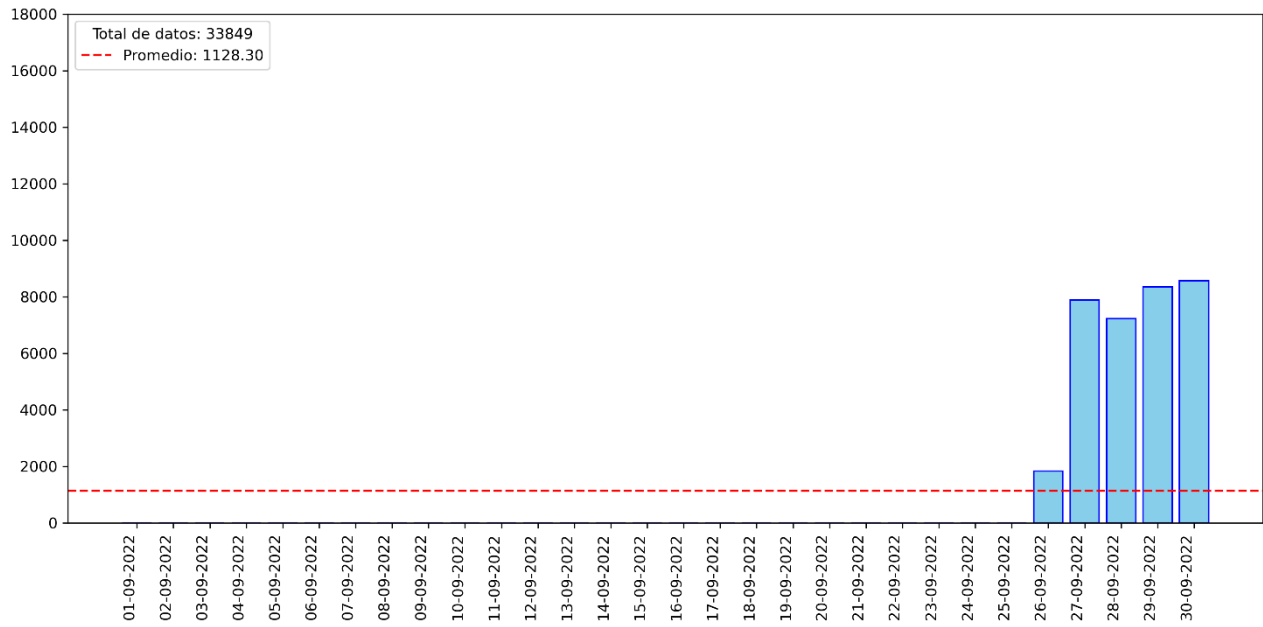


Figura A.4.1. Datos por día en agosto de 2022.

(a) Dirección CCP-SP.



(b) Dirección SP-CCP.

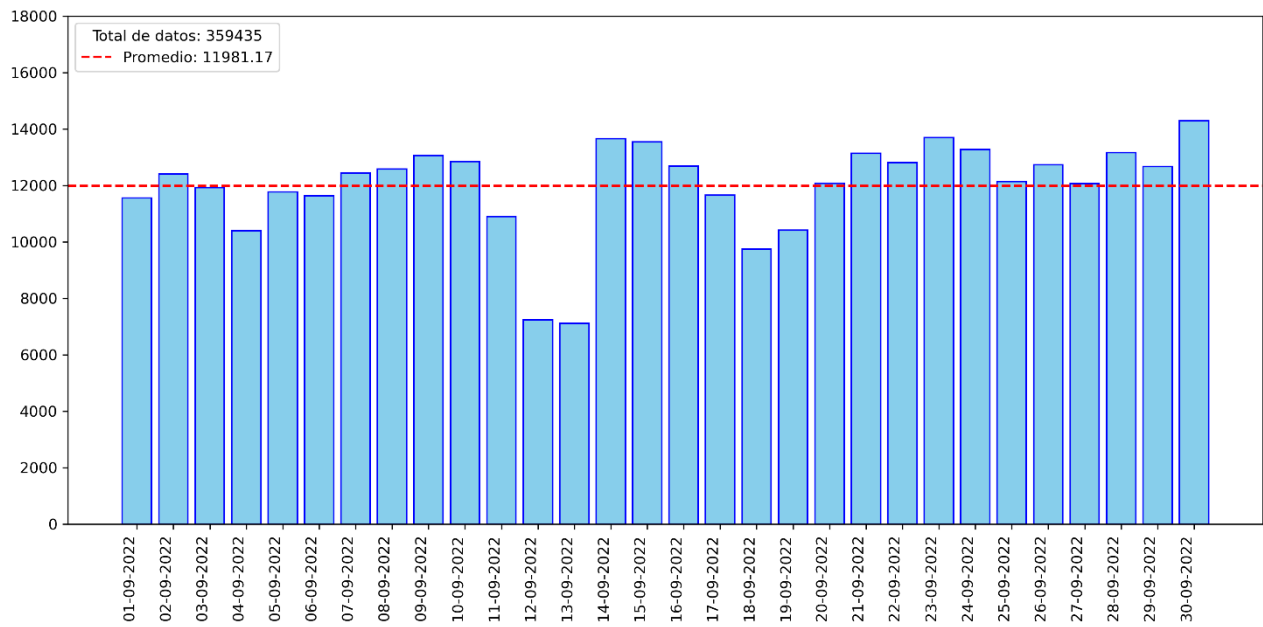
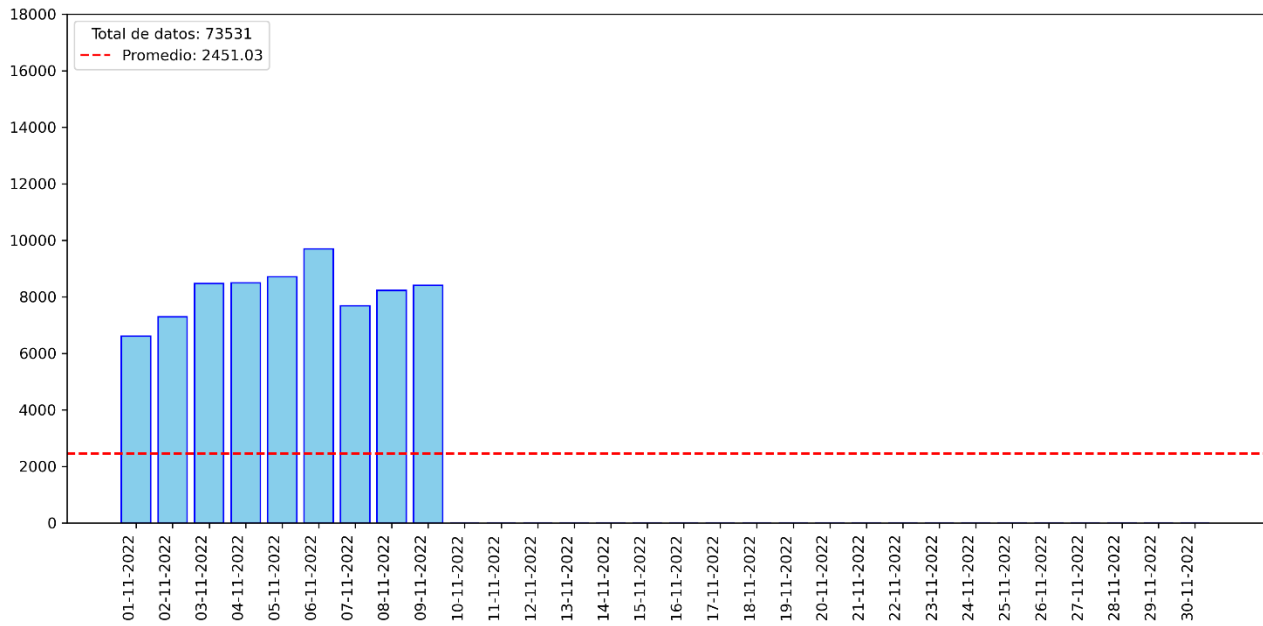


Figura A.4.2. Datos por día en septiembre de 2022.

(a) Dirección CCP-SP.



(b) Dirección SP-CCP.

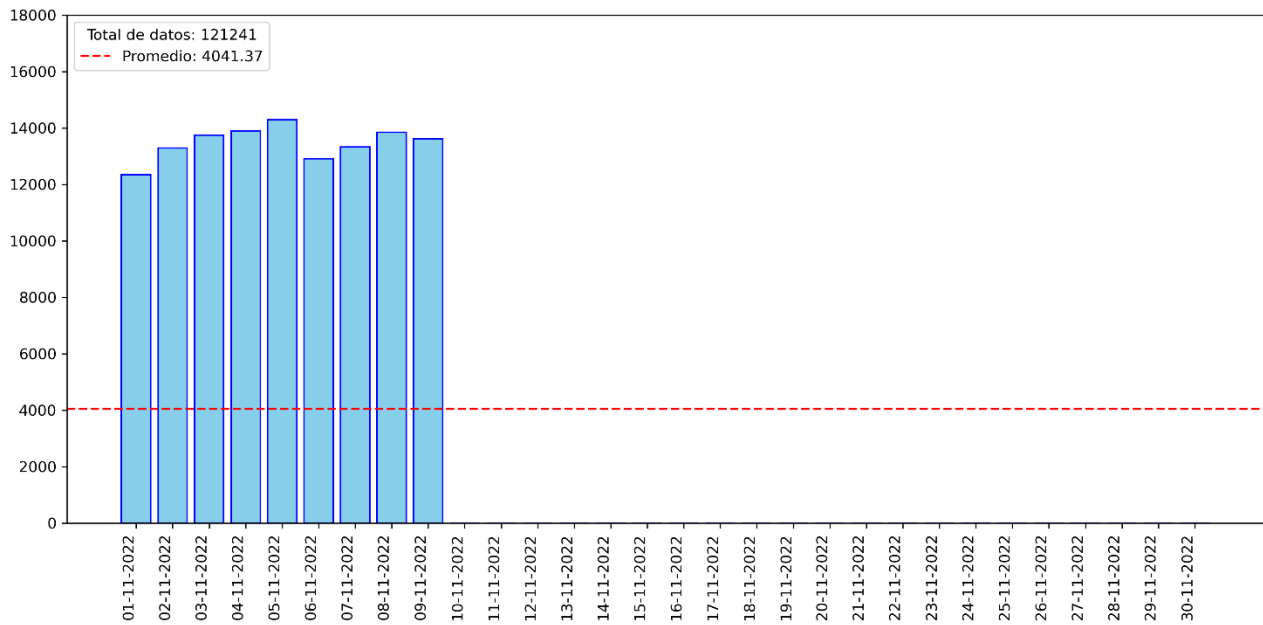
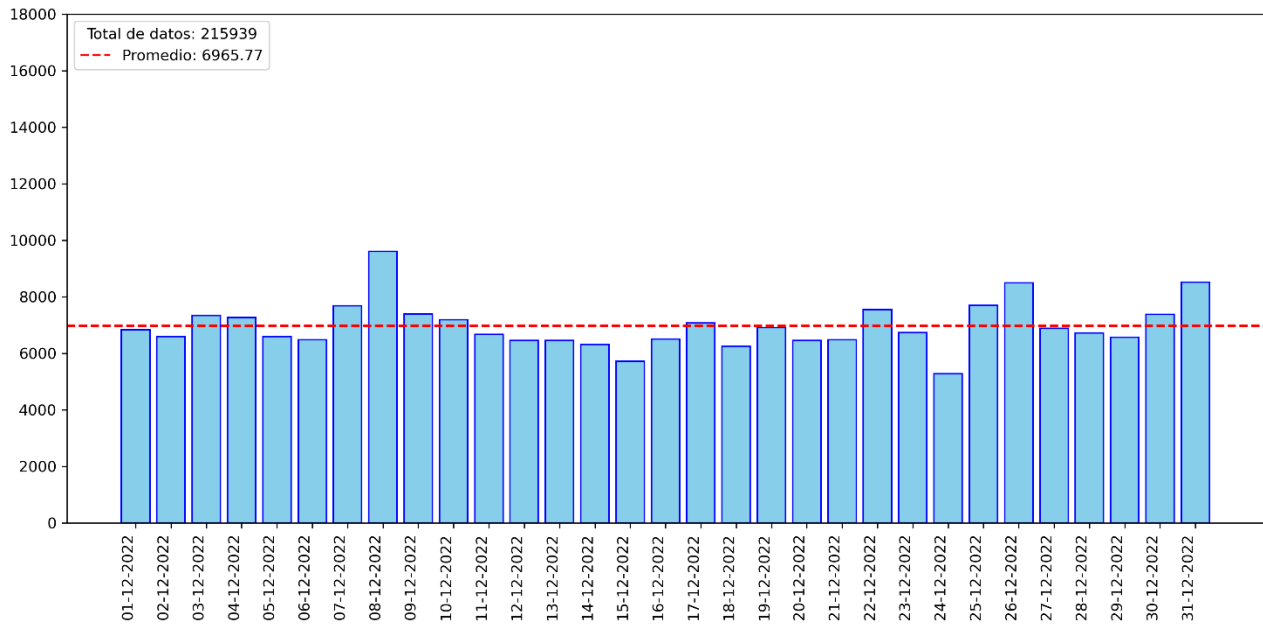


Figura A.4.3. Datos por día en noviembre de 2022.

(a) Dirección CCP-SP.



(b) Dirección SP-CCP.

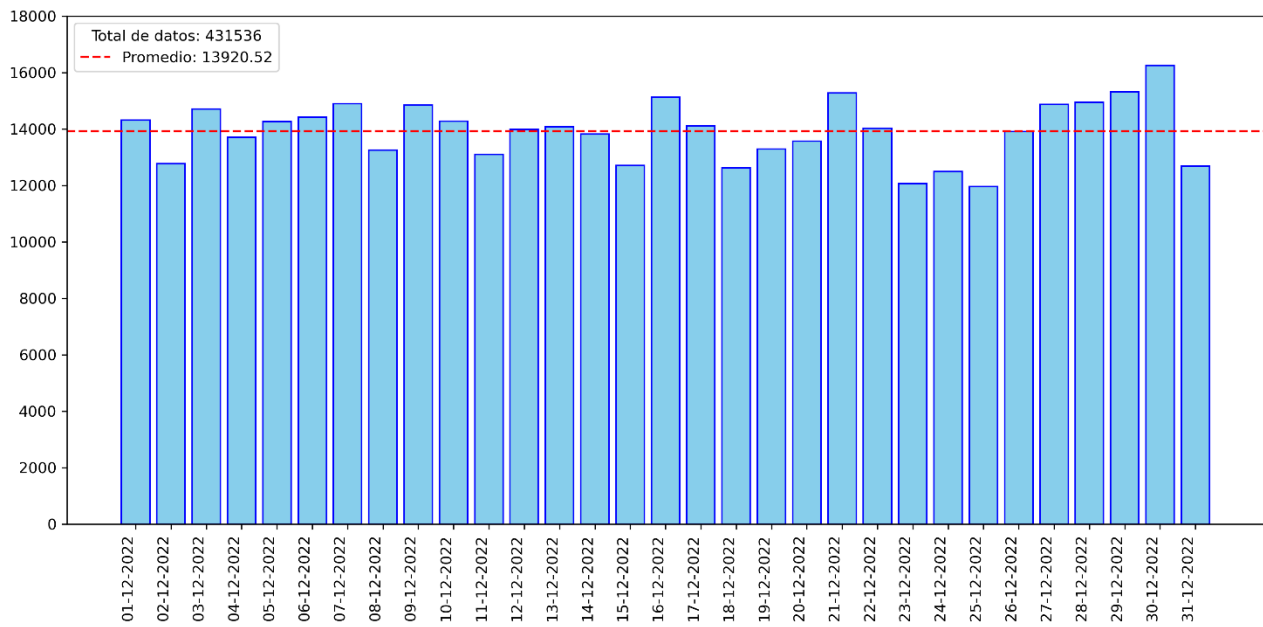
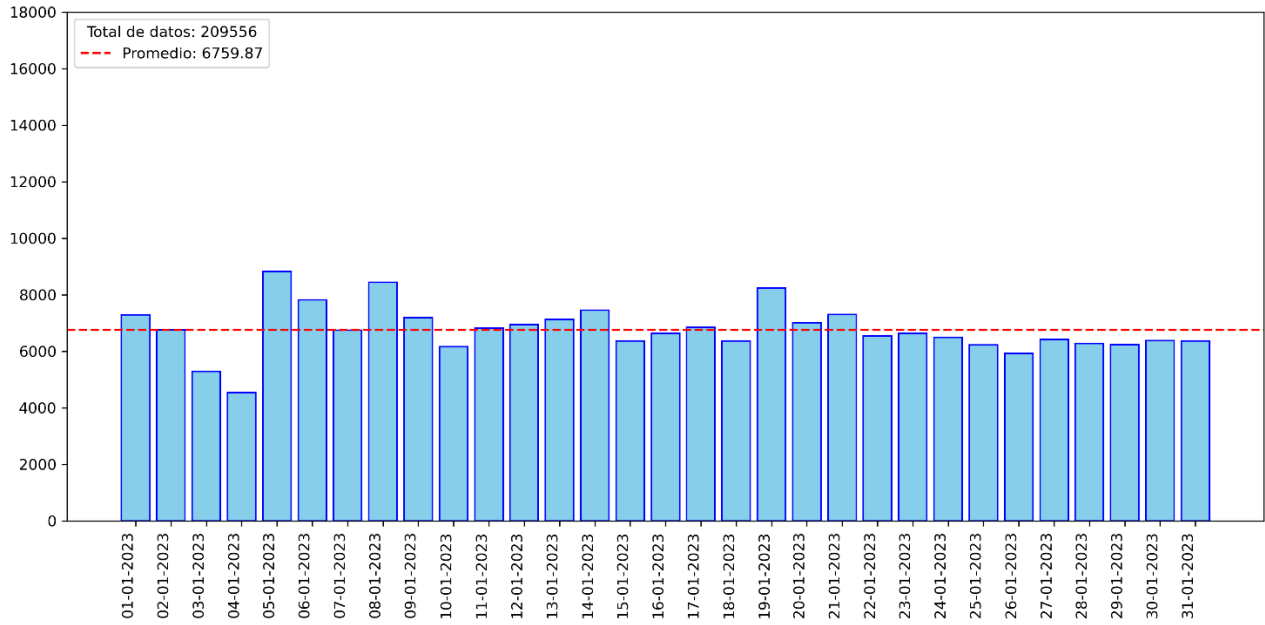


Figura A.4.4. Datos por día en diciembre de 2022.

(a) Dirección CCP- SP.



(b) Dirección SP-CCP.

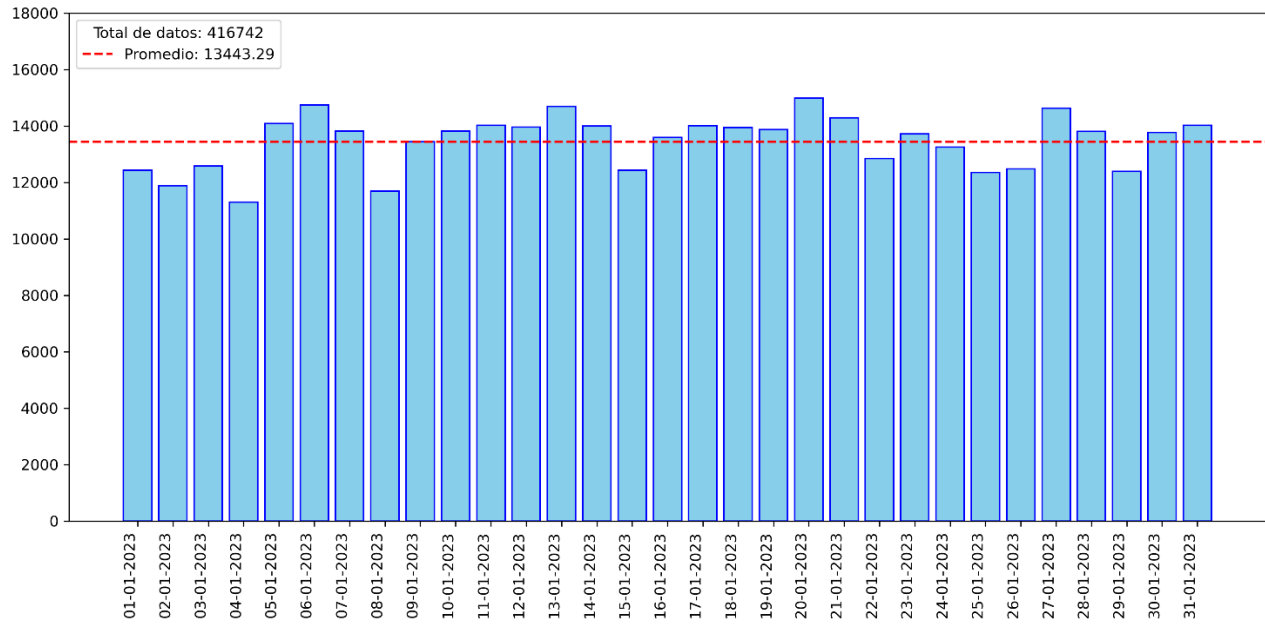
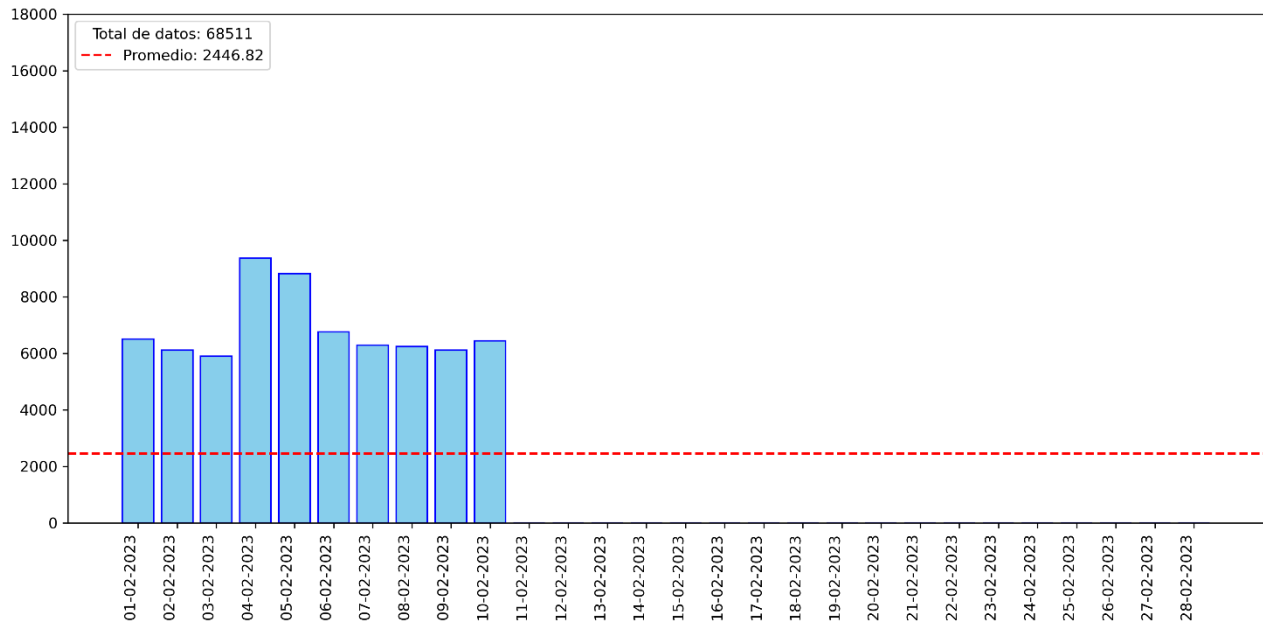


Figura A.4.5. Datos por día en enero de 2023.

(a) Dirección CCP-SP.



(b) Dirección SP-CCP.

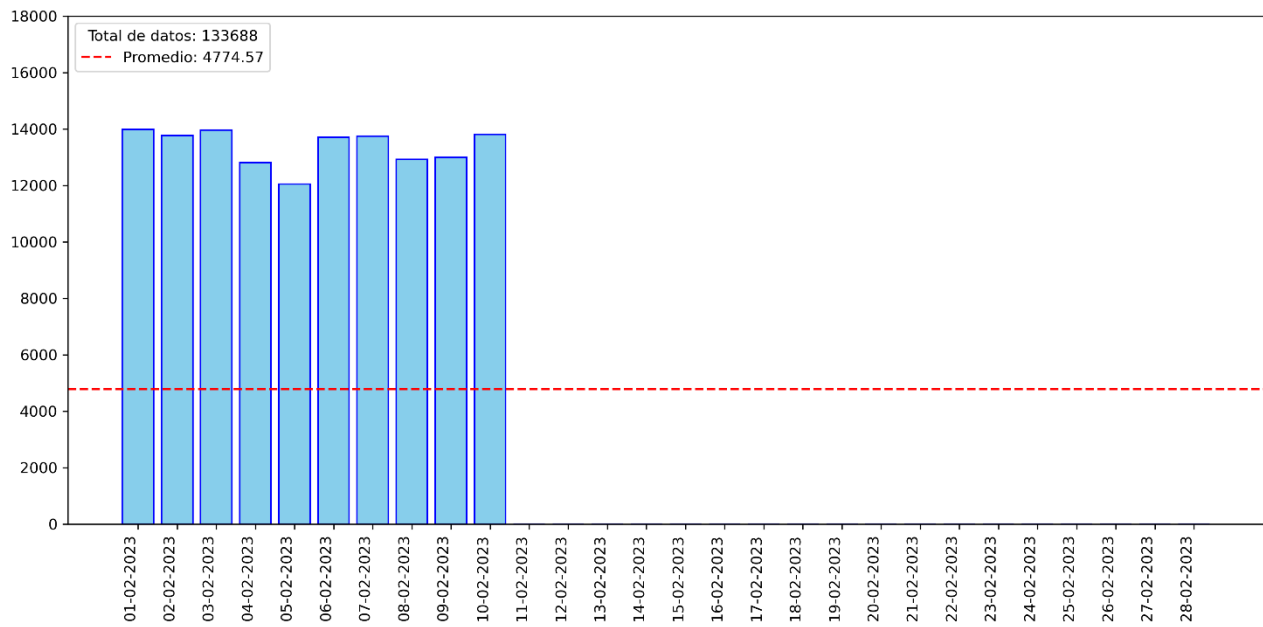


Figura A.4.6. Datos por día en febrero de 2023.

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

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Nicolás Cisternas Sepúlveda
Título de la memoria : Efectos del Tráfico Pesado Real en Puente Juan Pablo II, Concepción
Fecha de la presentación oral : 17/03/25

Profesor(es) Guía : Víctor Aguilar Vidal
Profesor(es) Revisor(es) : Rodrigo Silva Muñoz
Concepto :
Calificación :

Resumen

El puente Juan Pablo II ha sido un componente esencial para la conectividad entre Concepción y San Pedro de la Paz desde su inauguración en 1974. No obstante, el paso del tiempo, los eventos sísmicos significativos y el tránsito no autorizado de camiones de alto tonelaje han comprometido su integridad estructural. Esta investigación analiza los efectos del tráfico pesado real sobre la estructura del puente, utilizando datos recopilados mediante un sistema de pesaje en movimiento (*Weigh-In-Motion*, WIM) instalado en la salida sur del puente entre agosto de 2022 y febrero de 2023. El estudio incluye la consolidación de una base de datos de tráfico, la identificación de configuraciones vehiculares más frecuentes y de mayor tonelaje, la comparación de momentos flectores y fuerzas cortantes inducidas por el tráfico real con las de diseño, así como la cuantificación del daño por fatiga y la estimación de la vida útil remanente del puente.

Los resultados indican que, si bien la mayoría de los vehículos cumplen con las restricciones legales, una proporción significativa de camiones supera los límites de peso bruto vehicular (PBV) y velocidad. El análisis estructural muestra que algunos camiones generan momentos flectores y fuerzas cortantes mayores a las demandas de diseño definidas por el patrón HS20-44+20%. La evaluación de fatiga revela una acumulación de daños que podría comprometer la seguridad estructural si no se implementan medidas de mitigación adecuadas. Este estudio ofrece información crucial para la gestión de infraestructura crítica y el desarrollo de estrategias de conservación.