



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**USO DE DATOS PASIVOS OBTENIDOS
MEDIANTE DISPOSITIVOS INERCIALES
PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN
DEL PAVIMENTO EN CICLOVÍAS**

MARIANA VALLE EGUREN

Tesis para optar al grado de:
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JUAN CARLOS HERRERA MALDONADO

Santiago de Chile, Abril, 2018
© 2018, Mariana Valle Eguren



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**USO DE DATOS PASIVOS OBTENIDOS
MEDIANTE DISPOSITIVOS INERCIALES
PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN
DEL PAVIMENTO EN CICLOVÍAS**

MARIANA VALLE EGUREN

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN CARLOS HERRERA MALDONADO

FELIPE DELGADO BREINBAUER

ALEJANDRO TUDELA ROMAN

GLORIA ARANCIBIA HERNÁNDEZ

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Abril, 2018

*A Dios, la Virgen María,
mi familia y amigos.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi familia. A mis padres, Ernesto y María Inés, por su apoyo incondicional, no solo en esta etapa, sino en toda la vida. En especial a mi mamá por ser mi *partner*. A mis hermanos, Andrea y Rodrigo, por ser mis eternos confidentes. Y a mis sobrinos, Valentina y Felipe, por el cariño y la alegría que me entregan día a día.

En segundo lugar agradecer a mi profesor guía Juan Carlos Herrera. Gracias por todo el apoyo entregado a nivel académico durante mis magister y por los consejos personales en los distintos momentos que viví durante esta etapa. Además, quiero agradecer a la profesora Patricia Galilea, quien fue una guía personal en mi paso por el Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mis amigos. A Hernán Catalán y Sebastián Muñoz, por su infinita paciencia, cariño, consejos y apoyo. A Tomás Ramírez por su compañía, disponibilidad y ayuda (sobre todo en la última etapa). A Ignacio Arismendi por la gentileza de ser el sujeto de prueba de esta investigación y Felipe González por sus innumerables explicaciones estadísticas. A Andrea Vera, Ignacio Tiznado, Nicolás Badiola, Elizabeth Peña y los miembros del pasillo por el apoyo entregado en esta etapa y por las amistades generadas.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos y Alcances.....	3
1.2. Estructura de la tesis.....	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Condición del pavimento en carreteras	5
2.2. Condición del pavimento en ciclovías	6
2.3. Experiencia internacional y nacional	8
3. METODOLOGÍA	12
3.1. Diseño Experimental.....	12
3.1.1. Experimento	12
3.1.2. Descripción y depuración de datos	18
3.2. Definición del Modelo	22
3.2.1. Construcción de Modelos.....	23
3.2.2. Comparación de Modelos	25
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	31
4.1. Resultados	31
4.1.1. Variables	31
4.1.2. Modelos.....	33

4.1.3.	Sensibilidad de las variables	35
4.2.	Comparación	39
4.2.1.	<i>Akaike Information Criterion</i> y <i>Bayesian Information Criterion</i>	39
4.2.2.	Área bajo la curva Característica Operativa del Receptor	40
4.2.3.	Errores tipo I, tipo II y Verdaderos Positivos	42
4.2.4.	Análisis por tipo de deterioro.....	43
4.3.	Discusión.....	46
5.	CONCLUSIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	51
	ANEXOS	55
	Anexo A: Base de Datos	56
	Anexo B: Detalle de Modelos.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Calificación del estado del pavimento de ciclovías.....	7
Tabla 3-1: Extracto de la Base de Datos	21
Tabla 3-2: Descripción estadística de las variables.....	22
Tabla 3-3: Características de las carpetas	25
Tabla 4-1: Correlación entre variables	32
Tabla 4-2: Valores promedio para cada modelo	34
Tabla 4-3: Log-verosimilitud y verosimilitud promedio por modelo	35
Tabla 4-4: Valores de AIC y BIC por modelo	39
Tabla 4-5: Valores AUROC por modelo	41
Tabla 4-6: Resumen valores AUROC calibración y validación	41
Tabla 4-7: Errores y Verdaderos Positivos por modelo	42
Tabla 4-8: Aciertos para el resalto alto por modelo.....	43
Tabla 4-9: Aciertos para el resalto bajo por modelo.....	44
Tabla 4-10: Aciertos para los baches por modelo.....	45
Tabla A-0-1: Detalle por carpeta Modelo A	57
Tabla A-0-2: Detalle por carpeta Modelo B	57
Tabla A-0-3: Detalle por carpeta Modelo C	58
Tabla A-0-4: Detalle por carpeta Modelo D	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Bicicleta equipada para medir la condición del pavimento.....	9
Figura 2-2: Vehículo equipado con un Perfilómetro Láser.....	9
Figura 2-3: Dispositivo inercial	11
Figura 3-1: Mapa de la ubicación de la ciclovía y fotografía de sus características.....	13
Figura 3-2: Diagrama de ubicación del dispositivo inercial	14
Figura 3-3: Resalto Bajo y Alto	15
Figura 3-4: Medidas como utilizado	16
Figura 3-5: Ubicación de elementos en la vía.....	16
Figura 3-6: Escenarios del experimento.....	17
Figura 3-7: Diagrama de traslación de puntos encontrados mediante <i>GPS</i>	19
Figura 3-8: Resultados de una prueba diagnóstico	28
Figura 3-9: Gráfico de la curva ROC.....	29
Figura 4-1: Diagrama de coordenadas de ejes respecto al movimiento de la bicicleta....	31
Figura 4-2: Sensibilidad de variables Modelo A	36
Figura 4-3: Sensibilidad de variables Modelo B.....	37
Figura 4-4: Sensibilidad de variables Modelo C.....	37
Figura 4-5: Sensibilidad de variables Modelo D	38

RESUMEN

Uno de los principales factores que consideran los ciclistas al escoger su ruta es la condición superficial de las ciclovías, ya que, al estar relacionado con las vibraciones experimentadas, afecta la comodidad del viaje. Las alternativas existentes para determinar esta condición no responden a la realidad del ciclista o son de compleja aplicación. Por esto, se propone una metodología basada en una regresión logística, que sea objetiva y específica para evaluar el estado de pavimentos en ciclovías.

Para obtener los datos, se diseñó un experimento en terreno que simula dos deterioros específicos: levantamientos del pavimento y baches. La recolección de estos se realizó mediante dispositivos inerciales adosados a una bicicleta de prueba.

Al aplicar la metodología propuesta se identificaron las variables inerciales necesarias para conocer el estado del pavimento. Entre ellas destacaron las rotaciones en los tres ejes y la aceleración vertical. Con estas variables, se generaron cuatro modelos capaces de identificar correctamente los problemas del pavimento. Al momento de comparar los modelos se aplicaron distintas pruebas estadísticas y se optó por el modelo que incorporaba las rotaciones en los tres ejes.

A futuro, con los resultados obtenidos se puede construir un indicador capaz de inferir el estado de la superficie a partir de las vibraciones experimentadas por los ciclistas. A su vez, se podría establecer un nivel de servicio asociado al pavimento de una ciclovía mediante estos indicadores. El nivel de servicio permitiría el desarrollo de un sistema de gestión de pavimentos para mejorar la experiencia de los usuarios, aportaría con información para la construcción de modelos de elección de ruta de ciclistas y podría ser de utilidad al momento de calcular la capacidad de las ciclovías.

Palabras clave: Ciclovías, estado del pavimento, vibraciones, regresión logística.

ABSTRACT

One of the main factors that cyclists consider when choosing their route is the bike lane's surface condition. This condition affects the comfort perceived by cyclists, since it is related to the vibrations they experienced when traveling. Alternatives currently available to measure the surface conditions are unsuitable for bike lanes or hard to implement. This work proposes a logistic regression based methodology to easily and objectively evaluate pavement's condition on bike lanes.

An experiment was designed to collect field data needed to calibrate and validate the model. The experimental design is intended to capture cyclist behavior when facing two particular pavement surface anomalies: potholes and blow-ups. Data were collected by an inertial measurement unit attached to a test bicycle.

Four logistics regression models were generated to properly identify poor surface conditions. These models allow the identification of the most relevant inertial variables required to detect superficial defects on bike lanes. Among these variables are the three-axis gyros and the vertical acceleration. The four models were compared and analyzed using different statistical tests. The chosen model incorporates the three-axis gyros.

Future research may use this information to generate a quality index able to infer the bike lane's surface conditions. This index could be used to determine the level of service of bike lanes based on their surface conditions. The level of service provides enough information to develop a pavement management strategy that could improve the cyclist's experiences. It could also be used to build route choice models and to estimate the bike lane capacity.

Keywords: Bike lanes, surface conditions, vibrations, logistic regression.

1. INTRODUCCIÓN

La bicicleta es un modo de transporte con múltiples beneficios. Esta es catalogada como un modo sustentable, ya que su uso reduce la contaminación atmosférica y acústica (Chapman, 2007; Lindsay *et al.*, 2011; Winters *et al.*, 2010; Zahabi *et al.*, 2016). Lo anterior se debe a que no requiere combustible para su funcionamiento, dada la ausencia de un motor de combustión. Otros de los beneficios del uso de la bicicleta por sobre el automóvil, es la disminución de la congestión vehicular producto del menor espacio vial requerido por las ciclovías (Damant-Sirois *et al.*, 2014; Martin & Shaheen, 2014; Hamilton & Wichman, 2018). Además, este modo es considerado eficiente en distancias cortas (Hydén *et al.*, 1999; Polcar & Ausserer, 2013; Rietveld & Daniel, 2004). Diversos estudios han demostrado que para viajes entre cinco y diez kilómetros la bicicleta es el modo más rápido, lo que genera un ahorro en el tiempo de viaje. Por otra parte, su uso tiene efectos positivos en la salud de las personas, principalmente por la actividad física que implica movilizarse en bicicleta. Esta actividad disminuye el riesgo de enfermedades cardiovasculares, diabetes, obesidad y ayuda a la salud mental (Pucher & Buehler, 2010; Pucher & Dijkstra, 2003; Lindsay *et al.*, 2011).

En Santiago los viajes en bicicleta han aumentado considerablemente en los últimos años. En 1991, la capital presentaba 130.172 viajes diarios en bicicleta, lo que equivale al 1,8% de la partición modal de ese año. Diez años después, los viajes diarios aumentaron y llegaron a ser 329.000; el 2,1% de la partición modal. Si bien el aumento en estos años no fue notorio, desde el 2001 al 2012 se registró un aumento de 105%, ya que se realizaron 676.000 viajes diarios, lo que significa un 3,9% de la partición modal (SECTRA, 2015).

Los sistemas de bicicletas públicas están presente en Santiago desde el 2013, por lo que se desconoce el efecto de estos programas en el número de viajes. En la actualidad la capital presenta un sistema integrado de bicicletas públicas presente en 15 comunas y con aproximadamente 3.000 bicicletas, llamado *BikeSantiago*. Adicional a este sistema, la comuna de Las Condes cuenta con su propio programa de bicicletas

públicas que posee alrededor de 1.000 bicicletas a disposición de sus vecinos. Estas iniciativas aumentan significativamente la oferta de este modo de transporte, lo que debería modificar la partición modal a favor de la bicicleta durante los últimos años.

De la mano con la cantidad de viajes realizados en bicicleta, la cantidad de kilómetros destinados para uso exclusivo de estas ha aumentado notoriamente en los últimos años. En el 2003 se contaba con solo 20 kilómetros de ciclovías en el Gran Santiago. Para el 2013 se habían construido un total de 236 kilómetros de ciclovías. Un último catastro a fines del 2016 indica que la capital tiene 287 kilómetros de facilidades exclusivas para bicicletas (GORE, 2017). A esta cantidad se le suman 829 kilómetros que se encuentran proyectados según el Plan Maestro de Transporte de Santiago (SECTRA, 2013; Steer Davies Gleave, 2013). Con esto, para el 2025 la capital contaría con una red de 1.116 kilómetros de ciclovías. En este trabajo se considerará una ciclovía aquel espacio destinado exclusivamente para la circulación de bicicletas, independiente de las características físicas y la ubicación de estos.

Diversos estudios alrededor del mundo han comprobado que la presencia de infraestructura exclusiva para bicicletas ha provocado un aumento del uso de estas (Garrard *et al.*, 2008; Pucher *et al.*, 2011; Pucher *et al.*, 2010). Desde esta perspectiva, es vital continuar con el plan de construcción de ciclovías para mejorar la condición de los actuales ciclistas e incentivar potenciales usuarios de bicicletas. Sin embargo, es necesario gestionar correctamente las ya existentes para alargar su vida útil y se obtenga así el efecto deseado.

Dentro de los aspectos de la infraestructura para ciclistas, la condición en que se encuentra el pavimento de la ciclovía o calle es de gran importancia. Este es uno de los principales factores que consideran los ciclistas al escoger su ruta, ya que el estado de las vías se relaciona directamente con las vibraciones experimentadas, lo cual afecta su experiencia y comodidad al desplazarse (Landis *et al.*, 1997; Jensen, 2007; Lépine *et al.*, 2014; Lépine *et al.*, 2011; Martens, 2011). Además, la condición superficial del pavimento es una característica pocas veces considerada en el nivel de servicio de una ciclovía (Landis *et al.*, 1997; Lépine *et al.*, 2011). Lo anterior cobra mayor relevancia al

considerar que, dadas las diferencias de uso entre una vía vehicular y una ciclovía, los métodos comúnmente usados para medir la condición de la primera no son directamente aplicables a la segunda.

1.1. Objetivos y Alcances

A partir de lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo conocer la condición del pavimento en ciclovías de forma remota? La respuesta permitiría realizar una mejor gestión de esta infraestructura y así incentivar su uso y mejorar la experiencia a los usuarios al circular por ellas.

La hipótesis principal de este trabajo es que los ciclistas se comportan distinto en función de la condición del pavimento de la ciclovía, y estas conductas se pueden inferir a partir de datos recolectados durante su viaje.

Así, el propósito de esta investigación es desarrollar una metodología que, utilizando datos recolectados a partir del comportamiento habitual de las personas al circular por ciclovías y sin la necesidad que realicen alguna acción específica (datos pasivos), permita evaluar el estado de pavimentos en ciclovías. En particular, se busca determinar la factibilidad de utilizar dispositivos inerciales (IMU: *Inertial Measurement Unit*, en inglés) para obtener datos que permitan generar modelos capaces de determinar la ubicación de irregularidades de la vía. Lo anterior implica identificar los datos que son necesarios obtener para conocer la condición del pavimento, y por ende, para la construcción de estos modelos.

Esta metodología facilitaría la inspección del pavimento al obtenerse de forma autónoma y no invasiva. Por esto, los datos utilizados y el mecanismo de recolección deben ser sencillos, prácticos y económicos. A futuro, se busca que la metodología tenga potencial para ser aplicada a gran escala y así conseguir el mayor beneficio de esta.

De esta forma, el principal aporte de esta investigación es la generación de una herramienta que permite la evaluación del pavimentos en ciclovías de forma objetiva,

autónoma y remota. El enfoque desarrollado es nuevo para este tipo de vías e incorpora dispositivos tecnológicos fundamentales para la creación de la metodología.

1.2. Estructura de la tesis

El trabajo se compone de cinco capítulos. El segundo de ellos corresponde a una revisión bibliográfica acerca del estudio de la condición de pavimentos en general y lo que sucede específicamente en las ciclovías. El tercer capítulo expone la metodología utilizada para alcanzar el objetivo propuesto. Este se encuentra dividido en dos subcapítulos que detallan el experimento realizado y explican los aspectos teóricos de los modelos. El cuarto capítulo expone los resultados obtenidos y las comparaciones realizadas a partir de estos. El último capítulo presenta las principales conclusiones obtenidas y las futuras líneas de investigación posibles.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se explica de manera global las diversas formas existentes para estudiar el estado del pavimento en vías. Se presentan las principales técnicas utilizadas en carreteras y ciclovías. Luego, se destacan algunas experiencias internacionales y nacionales para evaluar la condición superficial de la carpeta de rodado en las ciclovías.

2.1. Condición del pavimento en carreteras

La condición en que se encuentra el pavimento es un factor altamente estudiado en carreteras, debido a que un estado deficiente trae consigo altos costos de operación para los vehículos. Según Sánchez y De Solminihac (1989), la regularidad superficial es la característica más influyente en las sensaciones de comodidad y seguridad que experimenta el usuario al circular por autopistas (dada las altas velocidades propias de estas vías). Otro motivo por el cual es importante estudiar esta condición, es la presencia de camiones de carga, ya que el peso de estos facilita la aparición de deterioros en las carreteras. En las últimas décadas se han desarrollado distintas técnicas para medir la regularidad superficial del pavimento de una autopista. Entre ellas destacan dos alternativas: analizar la respuesta del vehículo al circular por la vía o estudiar directamente el perfil longitudinal de ella.

Dentro de las iniciativas propias de esta área de estudio destaca la gestionada por el Banco Mundial, que tenía como objetivo unificar las distintas formas de medir la regularidad superficial del pavimento en carreteras. El resultado de esta reunión con diversos investigadores fue el Índice de Rugosidad Internacional, más conocido como IRI (*International Roughness Index* en inglés). Este índice es la razón del movimiento relativo acumulado por la suspensión de un vehículo, dividido por la distancia recorrida (Osorio *et al.*, 2014; Sánchez & De Solminihac, 1989). La velocidad promedio a la que debe circular el vehículo para calcular el índice es 80 kilómetros por hora y el largo recomendado del tramo es 200 metros. Esta medida analiza la respuesta del automóvil al

circular por la vía, por lo que depende de las características mecánicas y la velocidad de este.

La otra alternativa consiste en estudiar el perfil longitudinal para conocer el estado del pavimento. El principal instrumento usado para esto son los perfilómetros. Existen distintos tipos que se agrupan en estáticos y dinámicos. Los primeros suelen ser muy precisos en cuanto a las mediciones, pero cada medición requiere tiempo. Los segundos son más rápidos y pueden ser bastantes precisos de acuerdo a la tecnología empleada. En el caso de las carreteras, se suelen utilizar camionetas equipadas con perfilómetros láseres que calculan de forma automática el perfil y simulan la circulación de un vehículo con lo que obtienen el IRI de la vía en cuestión (Sánchez & De Solminihac, 1989).

2.2. Condición del pavimento en ciclovías

En el caso de las ciclovías, una de las técnicas utilizadas para conocer la condición superficial del pavimento ha sido el IRI (Barbudo *et al.*, 2015; MINVU, 2015). Sin embargo, este indicador no es el adecuado para las ciclovía por varios motivos. En primer lugar, fue diseñado para vehículos motorizados circulando a altas velocidades, las cuales no pueden ser alcanzadas por los ciclistas. Por otra parte, la geometría de la bicicleta difiere bastante con la de un automóvil, lo que afecta directamente el índice propuesto (Kohler, 2015; Parkin, 2009; Martínez *et al.*, 2011). Estos aspectos son significativos al evaluar la superficie de un pavimento, ya que su respuesta dinámica es altamente sensible a la velocidad y geometría del vehículo en cuestión (Fuentes *et al.*, 2010).

Otra manera empleada para evaluar el pavimento en ciclovías son las escalas basadas en inspecciones visuales. Estas son principalmente usadas en Estados Unidos y suelen tener cinco niveles. La escala más conocida es la adaptación de la *FHWA's five-point pavement surface condition rating* para bicicletas (Eddy, 1996; Sprinkle Consulting, 2007; U.S. DOT, 1987). La clasificación de los cinco niveles utilizados se

encuentra en la Tabla 2-1 con la descripción correspondiente. Uno de los grandes problemas que presenta este tipo de evaluación es su subjetividad, ya que depende -en parte- del criterio de quien realiza la observación (Sprinkle Consulting, 2007; Landis, 1994).

Tabla 2-1: Calificación del estado del pavimento de ciclovías

CALIFICACIÓN	CONDICIÓN DEL PAVIMENTO
5.0 (Muy buena)	Solo pavimentos nuevos que son suaves y no presentan grietas ni parches obtienen esta calificación.
4.0 (Buena)	Pavimentos no tan suaves como el anterior, pero que igualmente entregan condiciones para un viaje agradable. Presentan signos de deterioro.
3.0 (Neutra)	Las condiciones para andar son notoriamente inferiores a las anteriores, tolera pobremente altas velocidades. Presenta defectos como ahuellamiento, grietas y parcheo superficial.
2.0 (Mala)	Los pavimentos presentan gran extensión de deterioros que afectan la velocidad de circulación. Pavimentos flexibles presentan 50% de la superficie con deterioros. Pavimentos rígidos presentan sellos en juntas, parcheo, grietas, etc.
1.0 (Muy Mala)	Los pavimentos están extremadamente deteriorados. Estos se presentan al menos en el 75% de la superficie.

Fuente: Eddy (1996)

El principal motivo de desgaste de una ciclovía es el medio ambiente, ya que no hay una exigencia estructural de la vía (excepto en lugares de ingreso o salida de vehículos motorizados). En carreteras, la presencia de problemas se debe principalmente a las cargas que circulan por ellas, las que suelen provocar fallas estructurales. Por lo anterior, el tipo de fallas que presenta una ciclovía es muy distinto al observado en carreteras (Osorio *et al.*, 2014).

Uno de los problemas que suelen enfrentar los pavimentos de las ciclovías son las fisuras y levantamientos provocados comúnmente por las raíces de árboles. Este tipo de

situaciones son de esperar dada la cercanía entre las ciclovías y áreas verdes. Otro deterioro superficial que afecta enormemente la comodidad del usuario son los baches. Esta falla suele ser más molesta en climas lluviosos, ya que al acumular agua es probable que el ciclista se moje al pasar por ellos (Martínez *et al.*, 2011). Frente a estas situaciones los usuarios suelen esquivar o disminuir su velocidad para enfrentar las imperfecciones de la vía y evitar así las incomodidades generadas.

2.3. Experiencia internacional y nacional

En distintos países del mundo se han realizado esfuerzos para medir el estado del pavimento en ciclovías, y por ende, mejorar la experiencia del ciclista. En Australia, la *Australian Road Research Board* (ARRB) utiliza un perfilómetro caminable para recolectar los datos necesarios para el cálculo del IRI (Cairney & King, 2003). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, este índice no resulta del todo adecuado para el estudio del pavimento de ciclovías.

En la Universidad de Illinois (Estados Unidos) utilizaron la inspección visual como herramienta para gestionar la red de ciclovías del Campus (Gharaibeh *et al.*, 1998). Si bien esta metodología es subjetiva, incorporaron distintos aspectos de las ciclovías. Entre ellos destacan problemas de diseños geométricos y el estado de las demarcaciones. Los cuales también afectan la comodidad del usuario al circular por las vías.

Europa ha destacado por buscar nuevas alternativas para conocer la condición superficial del pavimento en ciclovías. Uno de los estudios tuvo lugar en Bélgica (Martens, 2011), donde se utilizaron bicicletas para obtener las vibraciones experimentadas por los usuarios. Para lograrlo, equiparon cinco bicicletas con una tercera rueda trasera. Esta última funcionaba como un carro de arrastre y registraba las vibraciones para calcular el IRI a medida que circulaban por la vía. Este experimento fue llevado a cabo por el aparato gubernamental y las bicicletas eran manejadas por funcionarios específicos. La Figura 2-1 muestra el detalle de la bicicleta equipada.



Figura 2-1: Bicicleta equipada para medir la condición del pavimento. Fuente: Martens (2011)

En Dinamarca desarrollaron el *Bicycle Profile Index* (BPI) que se basa en la metodología utilizada para obtener el IRI (Kohler, 2015). El cálculo de este índice se realiza mediante un pequeño vehículo motorizado equipado con acelerómetros y perfilómetros láser que registran los datos a medida que circula por la ciclovía (Figura 2-2). Sin embargo, lo único que se conoce del índice es que considera un perfil longitudinal cada 2,5 centímetros. Esto se debe a que los detalles del algoritmo para determinar el BPI son secreto comercial.



Figura 2-2: Vehículo equipado con un Perfilómetro Láser. Fuente: Kohler (2015)

Latinoamérica no se queda atrás en esta área de estudio. En Colombia crearon el Índice de Condición de Ciclovías o ICC (Martínez *et al.*, 2011). Este índice considera una serie de factores como el material del pavimento, las características geométricas, la rugosidad de la superficie y las particularidades de las fallas presentes en la vía. Para recolectar esta información se realizan evaluaciones en terreno cada dos años. Sin embargo, no detalla cómo afectan estos aspectos al índice en cuestión.

Chile también ha tenido iniciativas vinculadas al tema. El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2015) señala en el “Manual de Construcción de ciclovías: Estándar técnico” que al terminar la construcción de la ciclovía, esta debe contar con un IRI de 4 m/km. Si bien se establece una condición inicial, esta conlleva una serie de problemas. Uno de ellos es el uso del IRI, que -como se mencionó anteriormente- no es adecuado para medir la condición superficial de una ciclovía. Otro problema es la falta de control posterior que permita realizar una correcta gestión de la red en el tiempo.

En Concepción se llevó a cabo una investigación que tenía como objetivo conocer la condición superficial de las ciclovías de la ciudad (Echaveguren *et al.*, 2015). Para esto se equiparon bicicletas con acelerómetros y sistemas de navegación satelital (*GPS, Global Positioning System*). Estos dispositivos registraban las aceleraciones verticales y su ubicación al recorrer la ciclovía. Con esta información se clasificaron las vías en tres categorías de acuerdo al nivel de aceleración registrada. De esta forma se buscaba establecer un nivel de servicio global, ya que las aceleraciones tienen directa relación con la comodidad experimentada por el usuario.

Este trabajo contempla el uso de dispositivos inerciales o IMU, por su sigla en inglés, similares a los utilizados en la investigación realizada en Concepción. Una de las ventajas que se obtienen al utilizar este tipo de tecnologías es la generación de datos pasivos. Estos dispositivos permiten que la recolección de información sea automática, lo que a su vez facilita la aplicación de la metodología. En la investigación realizada en Concepción y en este trabajo los datos son obtenidos simplemente al circular por la ciclovía en una bicicleta equipada con los dispositivos correspondientes.

Los dispositivos inerciales son capaces de estimar continuamente una serie de vectores propios de un objeto sin la necesidad de referencias externas (Ferrer, 2009). Estos pueden medir la variación en la rotación y aceleración de un objeto mediante un giroscopio y acelerómetro, respectivamente, y suelen estar presentes en los teléfonos inteligentes. Son los responsables, entre otras cosas, que sus pantallas puedan girar de acuerdo a la posición que encuentre el teléfono.

Otra ventaja de los IMU es su reducido tamaño y fácil accesibilidad. La dimensión estándar de estos dispositivos en el mercado es de 19 milímetros por 15 milímetros, similar al de una huella del dedo pulgar (Figura 2-3). Además, se puede acceder a ellos en las principales tiendas electrónicas por un bajo costo. Actualmente, en Santiago un dispositivo inercial tiene un costo promedio de tres mil pesos.

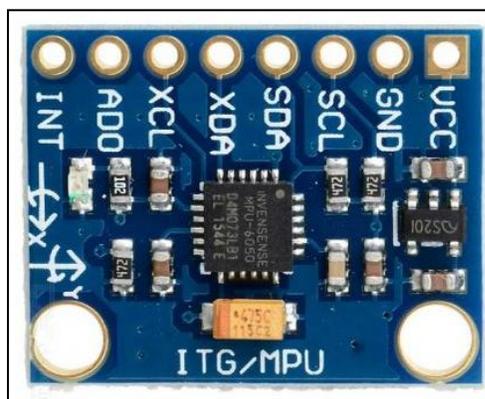


Figura 2-3: Dispositivo inercial. Fuente: *Maker Electrónico*

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se definen teóricamente los modelos a construir y las comparaciones a realizar. Además, se explica el experimento ejecutado y los datos obtenidos de este. Estos últimos son necesarios para poder aplicar la metodología propuesta, es decir, para estimar y validar los modelos. Con el fin de simplificar la comprensión, en primer lugar se presenta el experimento y la depuración de datos. Luego, se detallan las técnicas estadísticas de la construcción de los modelos y las herramientas de comparación a utilizar.

3.1. Diseño Experimental

En esta sección se presenta el experimento realizado y los datos obtenidos de este.

3.1.1. Experimento

Se diseñó y realizó un experimento para obtener los datos necesarios para estimar y validar modelos, y así llevar a cabo el análisis deseado. El objetivo de este es recolectar datos mediante los dispositivos inerciales de distintas situaciones a las que se ven enfrentados los ciclistas regularmente. Se eligieron dos problemas puntuales que suelen ser muy molestos para los usuarios. El primero de ellos son los levantamientos del pavimento que suelen ocurrir por la presencia de raíces de árboles cercanos a la ciclovía o la falta de soporte estructural de estas. El segundo problema estudiado fue la presencia de un bache en la vía. Hay que recordar que los ciclistas suelen esquivar estos obstáculos, al igual que un conductor de un automóvil.

a) Ciclovía

Para realizar el experimento se escogió una ciclovía al interior del Campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile. El trayecto comienza de dirección noreste en el ingreso al Campus por la calle Monseñor Carlos Casanueva hasta el estacionamiento de bicicletas en el Hall Central de la Universidad. Si bien la vía tiene una longitud total de 100 metros, se tomaron los 50 metros intermedios para el estudio, lo que permite al ciclista alcanzar la velocidad promedio de circulación. Esta ciclovía tiene una superficie de rodado de asfalto, es bidireccional y se encuentra aislada del flujo vehicular por separadores físicos. Cabe mencionar que el acceso de automóviles a esta calle se encuentra restringida solo a vehículos de servicio, lo que facilitó la toma de datos. En la Figura 3-1 se observa la vista aérea de donde se ubica la ciclovía y una fotografía con sus características.



Figura 3-1: Mapa de la ubicación de la ciclovía y fotografía de sus características
Fuente: Google Maps y Elaboración Propia

Con el fin de identificar posibles imperfecciones en la superficie de rodado de la ciclovía se midió su perfil longitudinal. Para esto se utilizó un nivel topográfico y una mira. Las mediciones se realizaron cada 10 centímetros para obtener una alta precisión del perfil de la vía. A pesar que el método utilizado se considera poco eficiente por la literatura (Sánchez y De Solminihac, 1989), al ser un tramo corto de análisis es capaz de

entregar los datos de manera precisa y eficaz. Las deformaciones encontradas son marginales para producir incomodidades en los ciclistas, por lo que no deberían interferir en los datos recolectados.

b) Bicicleta y equipamiento

Una vez escogido el lugar donde realizar la toma de datos fue necesario definir los instrumentos a utilizar. En primer lugar se eligió una bicicleta *Moonstone Oxford*, aro 26, con amortiguación delantera. Esta fue manejada por un único individuo de 1,74 metros de altura y 74 kilogramos de peso. Las instrucciones entregadas al sujeto de prueba indicaban que manejara de la forma más natural posible, incluyendo postura, velocidad y comportamiento frente a los problemas simulados. Adicionalmente, se equipó la bicicleta con un dispositivo inercial, el que fue posicionado debajo del asiento (Figura 3-2). Se eligió este lugar de instalación ya que es capaz de registrar las vibraciones que se transmiten directamente al ciclista sin molestar en la conducción y con el menor ruido posible.



Figura 3-2: Diagrama de ubicación del dispositivo inercial

El dispositivo inercial utilizado fue un *smartphone*, específicamente un iPhone 4. Este teléfono cuenta con un acelerómetro, un giroscopio, una brújula, y un sistema de navegación y localización mediante satélites (GPS). Para obtener la información del

iPhone se utilizó la aplicación SensorLog (Thomas, 2017). La gran ventaja de esta aplicación es lo amigable de la interfaz que muestra gráficos en vivo. Además, almacena los datos obtenidos en un archivo .csv y la frecuencia con la que toma los datos en este caso fue de 30 registros por segundo (cada registro está compuesto por una serie de datos que serán expuestos en la siguiente sección). Si bien el dispositivo utilizado y la tecnología existente permiten la transmisión de datos de modo que puedan ser analizados remotamente, en este caso se optó por extraer la información manualmente.

c) Características de los elementos

Como se explicó al inicio de esta sección, se replicaron dos problemas bastante molestos para los ciclistas. Para recrear el levantamiento de pavimento se construyó un resalto de madera, el cual ocupaba la totalidad de la ciclovía en un sentido y presentaba dos posibles alturas mediante un mecanismo removible. La primera de ellas era de seis centímetros y la segunda de cuatro centímetros. La parte inicial y final del resalto fue suavizada generando una pendiente, lo que es similar con la realidad. Estos detalles se pueden observar en la Figura 3-3. Adicionalmente, para que el resalto no se mueva al ser impactado por el ciclista se fijó con pesos en los extremos.

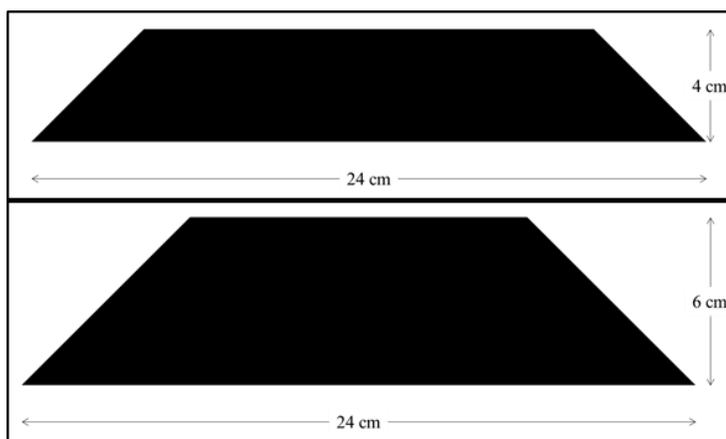


Figura 3-3: Resalto Bajo y Alto

En el caso del bache, los ciclistas suelen esquivar este tipo de imperfecciones en el pavimento, por lo que para recrearlo se utilizaron cuatro conos. De esta forma el ciclista se veía forzado a realizar la maniobra que interesaba analizar. El detalle de los conos utilizado se encuentra en la Figura 3-4. No se evaluó el caso en que el ciclista no sea capaz de esquivar un bache y caiga en él. Finalmente la Figura 3-5 muestra la ubicación de ambos elementos en la vía.

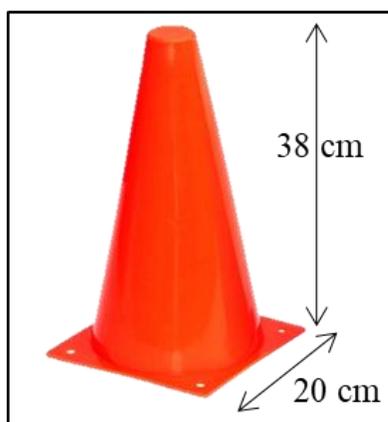


Figura 3-4: Medidas cono utilizado



Figura 3-5: Ubicación de elementos en la vía

d) Escenarios

Para obtener una cantidad suficiente de datos y evaluar todos los elementos presentados se construyeron cinco escenarios. El primer escenario no presenta alteraciones, ya que busca registrar las vibraciones en un caso normal. El segundo y tercer escenario buscan representar el levantamiento del pavimento en la ciclovía. En el segundo escenario se ubicó el resalto de seis centímetros de altura (resalto alto) a 23 metros del inicio. En el tercer escenario se utilizó el resalto bajo, cuatro centímetros de altura, y se encontraba a 29 metros. El cuarto escenario intenta representar un bache en la vía. Para esto se ubicó un grupo de pequeños conos a 32 metros del inicio del tramo en estudio. Finalmente, el quinto escenario combinaba elementos anteriores. Este contaba con un resalto bajo a 30 metros del origen y con unos conos a 17 metros. La ubicación de los elementos se decidió de forma aleatoria en el tramo central de la ciclovía. La Figura 3-6 muestra los últimos cuatro escenarios con los elementos utilizados.

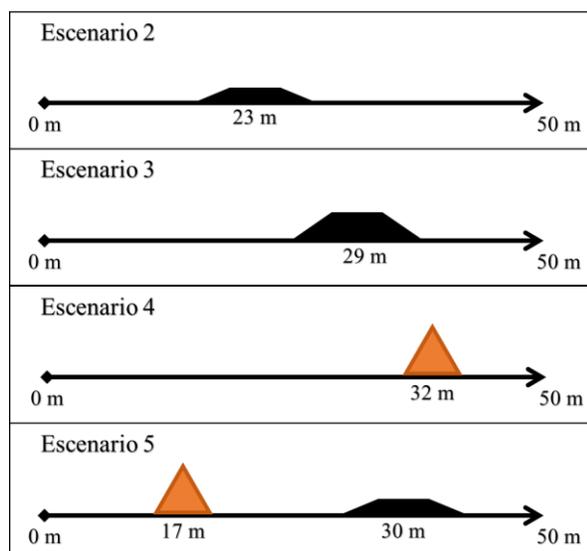


Figura 3-6: Escenarios del experimento

Para cada uno de los escenarios se realizaron dos repeticiones, lo que entrega suficiente información para desarrollar la metodología. Con esto se obtiene un total de 10 recorridos al tramo de análisis con distintos elementos. No obstante, debido a un problema del dispositivo inercial, una repetición del primer escenario no contaba con la totalidad de datos necesarios, pero no eran necesarios dado que no presentaba elementos. Por lo tanto, finalmente se cuentan con datos en nueve recorridos del tramo.

3.1.2. Descripción y depuración de datos

La aplicación utilizada entrega para cada registro una serie de datos: la hora, la velocidad, la altitud, la latitud, la longitud, el norte magnético, el norte real, la aceleración en los tres ejes, la componente de gravedad en cada eje, la rotación en los tres ejes y los ángulos de navegación, entre otros datos. Sin embargo, algunos de los datos obtenidos, como la altitud, no presentaban cambios en los distintos escenarios.

Para este estudio se seleccionan los siguientes datos: la velocidad en metros por segundo, la ubicación geográfica en coordenadas, el norte verdadero o azimut (360 grados), la rotación en los tres ejes en radianes por segundo y la aceleración real en los tres ejes en G ($G=9,8 \text{ m/s}^2$). Sobre esta última, cabe mencionar que al conocerse el efecto de la gravedad se le restó a la aceleración en cada eje (dado que el dispositivo se encontraba levemente inclinado), con lo que se obtuvo una aceleración real. El detalle de la base de datos se encuentra en el Anexo A.

Como los datos fueron tomados a lo largo del tiempo fue necesario relacionarlos con la ubicación en el tramo de análisis, es decir, georreferenciarlos. Interesa conocer la distancia de cada registro al punto de inicio de la ciclovía para evaluar los datos obtenidos cuando se enfrentan a los elementos de estudio.

En primer lugar, se identificó el punto de inicio y término del tramo en análisis en coordenadas geográficas. Con esto fue posible corregir las posibles desviaciones obtenidas con el *GPS*, ya que se trasladó cada registro a la línea recta conformada por los puntos mencionados (Figura 3-7). El algoritmo utilizado en este caso fue la distancia

mínima entre la recta y el punto geográfico registrado. No obstante, este presenta un grado de error ya que considera la superficie de la Tierra como plana. A pesar de esto, al ser un pequeño desplazamiento este error se considera despreciable.

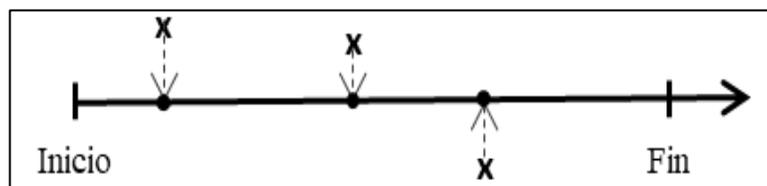


Figura 3-7: Diagrama de traslación de puntos encontrados mediante GPS

Una vez con los puntos corregidos en la recta se calculó la distancia entre cada uno de ellos y el punto de inicio. Para esto se utilizaron las fórmulas de *Vincenty*, las cuales consideran la Tierra como un elipsoide y entrega una precisión de 0,5 milímetros (Vincenty, 1975). Sin embargo, muchos registros compartían el punto geométrico, por lo que se realizó una interpolación entre todos los datos pertenecientes a una ubicación. Para esta interpolación se consideró la ubicación de los datos y la siguiente ubicación registrada. Así, se obtuvo una única distancia para cada registro de datos entregado.

Luego, se procedió a agrupar los datos cada 50 centímetros. Para esto se consideraron los valores comprendidos entre $\pm 0,25$ metros para el punto cero y así sucesivamente hasta llegar a los 50 metros de la ciclovía. En el caso de la velocidad y dirección horizontal se calculó la media aritmética para cada punto, mientras que para la aceleración y rotación en cada eje se calculó la media cuadrática, ya que estos valores oscilaban en torno a cero.

Una vez terminada la reubicación y agrupación de los datos se crearon dos nuevas variables. La primera es una variable *dummy* llamada *rumbo* que indica si el ciclista cambió su dirección horizontal, es decir, si giró en un tramo corto. Para determinar esta variable se utilizó el norte verdadero, se calculó el promedio de los últimos cinco valores y si este tenía una diferencia mayor a seis grados con el norte en análisis se consideraba

que el ciclista había cambiado su rumbo. Los seis grados fueron considerados, ya que equivalen al 1,67% del total de direcciones posibles y una variación mayor a eso en dos metros y medio implica que el ciclista está realizando maniobras con la bicicleta. Cuando efectivamente se observaba cambios en la dirección del ciclista se presentaba mediante valores de uno en la base de datos. Esta variable se creó para incorporar los cambios que se observaban en el norte real registrado de una manera sencilla. En otras palabras, no interesa conocer la dirección del ciclista, pero si los cambios repentinos de esta.

La segunda variable creada fue la presencia de problemas en el pavimento (y) que es la variable dependiente que espera predecir este trabajo. Esta variable toma valores de uno o cero, donde el primero representa un problema o deterioro y el segundo la ausencia de estos. Se eligió que fuera binaria para simplificar la ampliación a nuevos deterioros por estudiar. Para establecer los valores que debería tomar la variable y se utilizó la ubicación de los elementos en los escenarios simulados. En esta línea, el primer escenario presenta únicamente ceros, ya que no contaba con los elementos simulados.

Para asignar los valores de $y=1$ se determinó la longitud que afectaba cada elemento. En el caso de los resaltos se consideró como suficiente 1,5 metros en torno al problema, lo que equivale a tres puntos o registros de datos. Para los conos se espera que la maniobra realizada tenga un efecto más prolongado dado que para esquivarlos es necesario cambiar el comportamiento antes y después del elemento en sí mismo. Por esto se consideró una longitud de 2,5 metros, es decir cinco registros de datos, con los conos al centro de estos.

Unos de los problemas que se presentó en la toma de datos fue la ubicación de los elementos en los registros obtenidos. Esto debido a que el *GPS* no contaba con alta precisión y los efectos de los elementos utilizados quedaban desplazados unos centímetros. Por lo tanto, fue necesaria una corrección en cuanto a la ubicación de cada elemento. Para esto se analizaron los datos de manera gráfica y se identificó el desfase

existente. Esto se revisó para cada recorrido y se aplicó el desfase a la totalidad de los datos.

Otro problema observado se relaciona con los primeros registros para cada corrida. En los primeros 10 metros se observan muchas irregularidades en cuanto a la ubicación del ciclista, por lo que se decidió eliminar los 20 registros relacionados a esos tramos en cada corrida. Esto afecta la cantidad total de datos disponibles. En primer lugar se contaba con un total de 909 registros, ya que cada corrida tiene 101 registros. Luego de esta limpieza se obtienen 729 registros, que equivale al 80% del total de registros inicial. Cabe recordar que para cada registro se tiene una serie de datos.

A continuación, la Tabla 3-1 ejemplifica cómo está constituida la base de datos utilizada. En primer lugar, *y* es la variable dependiente que se espera estimar. El *recorrido* indica a qué corrida pertenece, por lo que entrega el escenario simulado. *Dist. (m)* es la distancia desde el inicio al punto del registro de datos. Las siguientes columnas representan las variables independientes asociadas al punto de estudio para el recorrido correspondiente.

Tabla 3-1: Extracto de la Base de Datos

<i>y</i>	Recorrido	Dist. (m)	Vel. (m/s)	Rot_x (rad/s)	Rot_y (rad/s)	Rot_z (rad/s)	Acc_x (G)	Acc_y (G)	Acc_z (G)	Rumbo
0	2	13,5	3,57	0,09	0,10	0,19	0,20	0,23	0,17	0
0	2	16	3,57	0,08	0,08	0,00	0,07	0,09	0,17	0
1	3	24,5	3,51	1,33	0,27	0,25	0,52	1,13	0,92	0

La Tabla 3-2 presenta la estadística descriptiva de las variables utilizadas para la construcción de los modelos.

Tabla 3-2: Descripción estadística de las variables

	Vel. (m/s)	Rot_x (rad/s)	Rot_y (rad/s)	Rot_z (rad/s)	Acc_x (G)	Acc_y (G)	Acc_z (G)
Promedio	4,09	0,12	0,18	0,13	0,15	0,20	0,24
Mínimo	0,61	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Máximo	5,97	2,32	1,43	1,13	0,95	2,13	1,93
Desviación Estándar	1,04	0,16	0,18	0,15	0,10	0,18	0,20

3.2. Definición del Modelo

Para obtener una metodología objetiva y específica que permita evaluar el estado de pavimentos en ciclovías se analizaron distintas técnicas estadísticas (regresiones lineales, logísticas y ordinales, entre otras). Entre ellas destacó la regresión logística, ya que estima la probabilidad que un evento ocurra. En este caso, el evento a predecir será la presencia de un deterioro en el pavimento de la ciclovía.

La regresión logística es un modelo lineal generalizado cuya función de enlace es *logit*. Este modelo es asintóticamente equivalente a otros modelos lineales generalizados en el campo de modelos de elección discreta, como el binomial con función de enlace *logit*. Una alternativa menos popular corresponde al modelo lineal generalizado binomial con función de enlace *probit*. Sin embargo, debido a que no se ha reportado mayores beneficios por su uso, se opta por la primera familia de modelos con función de enlace *logit*, en particular la regresión logística.

Esta última permite relacionar una variable dependiente, el estado del pavimento, con un conjunto de variables independientes. A diferencia de otras herramientas estadísticas, esta relación no es lineal. En estas regresiones la variable dependiente se caracteriza por tomar valores entre cero y uno (Hosmer & Lemeshow, 2000). Como se mencionó, en los datos obtenidos, se definió el cero como la ausencia de deterioros y el uno como la presencia de estos. La estimación de este tipo de modelos se alcanza por

máxima verosimilitud. Al ser esta más débil que la utilizada en regresiones lineales (mínimos cuadrados) se requiere una mayor cantidad de datos.

La probabilidad de ocurrencia del objeto en estudio se estima a partir de la Ecuación 3.1. En este caso P representa la probabilidad de que el punto en análisis presente un problema en el pavimento y $f(x)$ es la función que incluye las variables independientes.

$$P = \frac{1}{1 + e^{-f(x)}} \quad (3.1)$$

La generación del modelo consiste en determinar la función $f(x)$ que mejor predice la condición de la ciclovía. Esto implica definir las variables que forman parte de la función, y por lo tanto, identificar cuáles son capaces de captar deterioros en el pavimento.

3.2.1. Construcción de Modelos

Para definir las variables independientes de $f(x)$, y así construir los modelos, se consideró la relación existente entre las variables. A partir de un análisis de correlación, se puede mejorar la construcción de los modelos al no incorporar estas variables juntas en un modelo. Se considera que una de las variables tiene relación con otra si presentan valores mayores a 0,5 en el análisis y estrecha relación si este valor es sobre 0,7 (Devijver & Kittler, 1982).

Al momento de construir los modelos se propone incorporar todas las variables e ir sacando aquellas que no sean significativas. Este método es conocido como *step backward* y evita dejar fuera del modelo variables que puedan ser significativas. Para este procedimiento se utilizará el programa computacional *Stata*. Se definió la significancia estadística mediante el *test z* como el criterio de eliminación de variables de los modelos. Se busca que el valor de este *test* sea mayor a 1,96 para un intervalo de

confianza del 95%. Si la variable no cumple con este criterio debe ser retirada del modelo.

En cuanto a los modelos en general, se decidió usar distintos criterios para validarlos a medida que se construyan. El primero de ellos fue la prueba de ajuste general, que analiza si el modelo propuesto es estadísticamente distinto del modelo que considera solo la constante. En otras palabras, considera la capacidad explicativa de las variables independientes. El segundo criterio a utilizar es el valor del *pseudo* R^2 . Si bien, en el caso de una regresión logística el valor del *pseudo* R^2 no es directamente la capacidad predictiva del modelo, se busca que tenga un alto valor ya que se relaciona con esta capacidad.

Cada modelo seleccionado se contrastará con el modelo que incorporaba solo la constante. Esto con el fin de entender la riqueza que aportan las variables a los modelos estimados. Para realizar este análisis se calculará la log-verosimilitud promedio de cada modelo electo, que corresponde a la log-verosimilitud final dividida por el tamaño muestral, y a partir de ella se obtendrá la verosimilitud promedio. Este valor permitirá analizar la probabilidad promedio que el modelo le otorga al escenario realmente ocurrido (presencia o ausencia de deterioros).

Una vez observada la riqueza de las variables incorporadas en los modelos, se estudiará la importancia de cada una de ellas dentro de estos. Para cada modelo seleccionado se realizará un análisis de sensibilidad por variables. Este consistirá en evaluar el cambio en la probabilidad de ocurrencia de un evento al aumentar el valor de una variable desde su mínimo al máximo y mantener el resto de las variables en su media. El resultado se presentará en un gráfico por modelo que permitirá analizar la influencia de cada variable en su modelo.

Adicionalmente, se utilizará la técnica de validación cruzada con el fin de garantizar que los parámetros obtenidos son independientes de la partición realizada a la base de datos (Jung & Hu, 2015). En este caso se pretende usar el método de división de carpetas, ya que es de mayor utilidad cuando la base de datos no es de gran tamaño (Yang & Huang, 2014; Pérez *et al.*, 2015). Dentro de este método se generarán cinco

grupos o carpetas, por lo que los modelos se construirán con cuatro subconjuntos y el quinto grupo de datos se reservará para la validación. El error medio obtenido de los cinco análisis proporcionará el error cometido por el método, lo que permite evaluar la validez de este.

La construcción de las cinco carpetas se realizó de manera aleatoria. Las características propias de las carpetas creadas se presenta en la Tabla 3-3. Cada fila indica cómo queda la base de datos de calibración y validación al dejar la carpeta correspondiente para la validación.

Tabla 3-3: Características de las carpetas

	Cantidad de Datos		Cantidad de Deterioros		Porcentaje de Deterioros	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Carpeta 1	584	145	26	12	0,04	0,08
Carpeta 2	583	146	28	10	0,05	0,07
Carpeta 3	583	146	32	6	0,05	0,04
Carpeta 4	583	146	33	5	0,06	0,03
Carpeta 5	583	146	33	5	0,06	0,03

Al observar la Tabla 3-3 se puede notar la baja proporción de deterioros en cada carpeta. Esto implica que los modelos cuentan con pocos datos para estimar la identificación de imperfecciones. Si bien esto puede modificar los valores de la constante y los coeficientes del modelos, no es problemático en una regresión logística.

3.2.2. Comparación de Modelos

Con los modelos construidos, es necesario realizar una serie de análisis comparativos para evaluar su comportamiento y elegir el que satisfaga de mejor manera

las necesidades de la investigación. Se proponen cuatro herramientas que permitan realizar de mejor manera esta comparación.

a) *Akaike Information Criterion* y *Bayesian Information Criterion*

El primer análisis se realizará mediante los índices *Akaike Information Criterion* (AIC) y *Bayesian Information Criterion* (BIC). Estos indicadores entregan información de la capacidad predictiva y la complejidad en un modelo. En otras palabras, intentan encontrar un modelo sencillo y con una buena capacidad predictiva (Hosmer & Lemeshow, 2000). El cálculo de los índices viene dado por las Ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$AIC = -2 * \ln(L) + 2 * k \quad (3.2)$$

$$BIC = -2 * \ln(L) + \ln(n) * k \quad (3.3)$$

El primer componente de la ecuación de ambos índices es igual y corresponde la capacidad predictiva de cada modelo. Esto también es conocido como la bondad de ajuste del modelo que se representa como la máxima verosimilitud (L) del modelo para estos indicadores.

El segundo término de ambas ecuaciones está asociado a la complejidad del modelo. Esta viene representada por la letra k y equivale a la cantidad de parámetros estimados en el modelo. En el caso del BIC se incorpora la cantidad de datos utilizados (n) al calcular la complejidad del modelo. Este cambio logra que el índice sea independiente del tamaño de la muestra, ya que el cálculo de la máxima verosimilitud considera también la cantidad de datos. Esta diferencia entre ambos índices se concretiza en que el BIC penaliza más la complejidad que el AIC.

Al analizar las ecuaciones, es evidente que se busca el modelo con menor AIC y BIC. Esto ya que se espera un modelo con alta máxima verosimilitud (que en la ecuación tiene signo negativo), y sencillo o con menor cantidad de parámetros estimados (que está representado de manera positiva).

Una forma de comparar los modelos es evaluar los valores obtenidos al eliminar una variable. Para el caso del AIC, si la diferencia entre el índice de ambos modelos es menor a dos, se detiene la eliminación de variables. Esto se debe a que esta diferencia viene asociada a la resta de quitar la estimación de un parámetro y la bondad de ajuste se mantiene constante. En el caso del BIC, este análisis cambia debido a que el parámetro que acompaña en la multiplicación a k es logaritmo natural de la cantidad de datos y no dos, por lo que se debe considerar el valor de $\ln(n)$ en vez de dos como el caso anterior.

Además, se considera que la diferencia de los modelos es marginal si la resta entre los valores del mismo índice obtenido es menor a 10. En el caso de comparar modelos con diferentes variables, pero con la misma cantidad de parámetros estimados, estos índices se reducen a comparar solamente la bondad de ajuste, es decir, la máxima verosimilitud.

b) Área bajo la curva Característica Operativa del Receptor

Un segundo análisis se llevará a cabo con la curva Característica Operativa del Receptor o *Receiver Operating Characteristic* (ROC). El estudio del área bajo esta curva (AUROC) es un indicador general de la precisión de los modelos (Hosmer & Lemeshow, 2000). Una de las ventajas de esta herramienta es su fácil representación y comprensión. Además, permite evaluar todos los posibles umbrales de decisión en una regresión logística, ya que es una medida global e independiente del punto de corte o probabilidad obtenida.

La curva ROC se construye a partir de la especificidad y sensibilidad de los modelos. Para entender el significado de estos dos elementos es necesario aclarar ciertos conceptos que están involucrados en su definición. Los primeros cuatro conceptos básicos son los Verdaderos Positivos (VP), Falsos Positivos (FP), Verdaderos Negativos (VN) y los Falsos Negativos (FN). Antes, es necesario recordar que la variable dependiente en la regresión logística toma el valor de uno cuando el evento ocurre y cero en su ausencia. En esta línea los Verdaderos Positivos suceden cuando el valor observado es uno y el entregado por el modelo también es uno. Por otra parte, si en la

realidad el valor es cero y el modelo entrega un uno se llama Falso Positivo. Ahora, cuando el valor entregado por el modelo es cero existen las mismas dos opciones: que en realidad sea un cero (Verdadero Negativo) o que el valor realmente sea un uno (Falso Negativo). Esto se puede observar en la Figura 3-8.

		Realidad	
		0	1
Modelo	0	VN	FN
	1	FP	VP

Figura 3-8: Resultados de una prueba diagnóstica

A partir de estas cuatro definiciones, se pueden desarrollar las razones de Verdaderos Positivos (VPR) y de Falsos Positivos (FPR). La primera de ellas muestra cuántas veces el modelo califica correctamente la ocurrencia del evento (valor uno) del total de eventos que realmente ocurren. La razón de Falsos Positivos es la proporción entre la cantidad de veces que el modelo se equivoca al indicar la presencia de un evento cuando en realidad no ocurre y el total de casos observados sin alteraciones (valor cero). Las Ecuaciones 3.4 y 3.5 definen matemáticamente los conceptos explicados.

$$VPR = \frac{VP}{(VP + FN)} \quad (3.4)$$

$$FPR = \frac{FP}{(FP + VN)} \quad (3.5)$$

En la curva ROC, la sensibilidad equivale a la razón de Verdaderos Positivos y se encuentra en el eje de las ordenadas. En el eje de las abscisas se encuentra la razón de Falsos Positivos que representa a uno menos la especificidad (Figura 3-9).

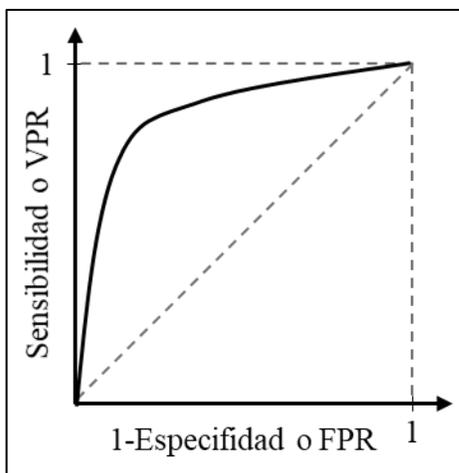


Figura 3-9: Gráfico de la curva ROC

Interesa conocer el área bajo la curva ROC. Mientras mayor sea este valor, mayor precisión tendrá el modelo analizado. El valor del área bajo la curva fluctúa entre 0,5 y 1. Si es de 0,5 quiere decir que el modelo no tiene precisión. Sobre el 0,8 se considera que el modelo es preciso y sobre 0,9 es muy preciso (Hosmer & Lemeshow, 2000). Existen otros umbrales de clasificación de acuerdo al área bajo la curva, pero para este trabajo se usaron estos valores.

La construcción de la curva y el cálculo de los valores asociados se realizarán para cada carpeta generada por la validación cruzada (cinco veces) y luego se promediarán los valores encontrados para cada modelo. En primer lugar, se llevará a cabo este análisis con los datos de la calibración. Sin embargo, este puede considerarse optimista, ya que se calcula la precisión de los modelos con los datos que fueron construidos. Por lo tanto, es necesario construir las curvas y calcular la precisión de los modelos con los datos de validación para los cinco casos. De esta forma se pueden observar los valores de área bajo la curva con los datos de calibración y validación para cada modelo.

c) Errores tipo I, tipo II y Verdaderos Positivos

El tercer análisis que se propone realizar para comparar los distintos modelos es estudiar en detalle la cantidad de errores y aciertos cometidos. Se estudiarán específicamente los errores del tipo I, tipo II y Verdaderos Positivos. Los errores de tipo I equivalen a los Falsos Positivos, que también se conocen como acusar al inocente. Estos suelen ser menos problemáticos en este caso, por lo que un modelo con estos errores se consideraría conservativo. En temas prácticos estos errores se pueden considerar como una precaución con respecto al caso de identificar efectivamente algún deterioro en el pavimento. Sin embargo, implican un gasto de revisiones en terreno cuando no corresponde.

Los errores de tipo II equivalen a los Falsos Negativos, en otras palabras no acusar al culpable. A diferencia de los anteriores estos son preocupantes, ya que en este estudio estos errores significan pasar por alto un deterioro en el pavimento. Los Verdaderos Positivos equivalen a los aciertos de las problemáticas presentes, por lo que son de gran importancia.

Para el cálculo de estos valores se promediarán los errores cometidos por los modelos en las cinco carpetas de la validación cruzada. Con esto se obtendrá el error promedio tipo I y II para cada modelo. Se busca aquel que cometa la menor cantidad de errores, ya que así sus predicciones son más confiable. En el caso de los Verdaderos Positivos, se calculará el porcentaje de aciertos promedio que cometa cada modelo, donde claramente se busca el modelo que tenga mayor porcentaje.

d) Análisis por tipo de deterioro

En último lugar se analizarán en detalle los Verdaderos Positivos y Falsos Negativos de los modelos para los tres elementos simulados: resalto alto, resalto bajo y conos. De esta forma, se espera poder asociar modelos específicos a ciertas imperfecciones presentes en los pavimentos e identificar las variables que son más relevante en cada elemento.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología expuesta a los datos recolectados mediante el experimento realizado. Luego se procede a comparar los modelos resultantes con las herramientas descritas en el marco teórico. Finalmente, se describe un análisis global de los resultados expuestos.

4.1. Resultados

En primer lugar se muestran los valores obtenidos al analizar las variables independientes dentro de la construcción de los modelos. En segundo lugar se exponen los modelos obtenidos al aplicar regresiones logísticas a los datos del experimento.

4.1.1. Variables

Como se mencionó en el capítulo anterior se seleccionaron ocho variables para construir los modelos. Se analizó la correlación entre ellas para no incorporarlas de manera conjunta en los modelos. La Tabla 4-1 presenta la correlación entre las variables elegidas para modelar. Para entender las relaciones entre variables es necesario definir la dirección de cada eje con respecto al movimiento de la bicicleta, lo que se presenta en la Figura 4-1.

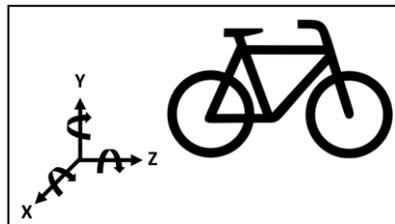


Figura 4-1: Diagrama de coordenadas de ejes respecto al movimiento de la bicicleta

Tabla 4-1: Correlación entre variables

	Rot_x	Rot_y	Rot_z	Acc_x	Acc_y	Acc_z	Rumbo	Velocidad
Rot_x	1							
Rot_y	0,12	1						
Rot_z	0,07	0,57	1					
Acc_x	0,53	0,40	0,27	1				
Acc_y	<u>0,77</u>	0,10	0,09	0,56	1			
Acc_z	<u>0,61</u>	0,08	0,05	0,51	<u>0,72</u>	1		
Rumbo	0,00	0,52	0,56	0,20	-0,03	-0,02	1	
Velocidad	-0,10	-0,01	-0,01	-0,05	-0,05	-0,06	0,02	1

Al analizar la Tabla 4-1 por columnas se observa que la rotación en torno al eje 'x' está relacionada con las tres aceleraciones. La rotación respecto al eje 'y' está correlacionada con el rumbo y la rotación en torno al eje 'z'. Esto es lógico, ya que al desviarse del trayecto, el ciclista girará en torno al eje 'y', cambiará de rumbo y tendrá un pequeño giro en torno al eje 'z'. Por esto último, la rotación entorno al eje 'z' también está relacionado con el cambio de rumbo. Finalmente, las aceleraciones están correlacionadas entre ellas y la velocidad no se encuentra relacionada con ninguna de las otras variables analizadas.

Dado que varias de las relaciones son cercanas al valor de corte (0,5) se decidió profundizar en las tres variables altamente correlacionadas: *Rot_x*, *Acc_y*, *Acc_z*. La relación existente entre la rotación entorno al eje 'x' con la aceleración respecto al eje 'y' sucede cuando el ciclista se ve enfrentado a un resalto, ya que es de esperar que en esta situación aumente la aceleración en la dirección de 'y' y el giro en torno al eje 'x'. Estas dos variables a su vez están relacionadas con la aceleración en torno al eje 'z'. Lo último se debe a que el ciclista instintivamente disminuye su velocidad (cambios en la aceleración en torno al eje 'z') al encontrarse con algún problema en la ciclovía. Por estas relaciones se decidió no incluir estas tres variables en un mismo modelo.

Es clave definir el signo esperado de las variables a utilizar en los modelos. De esta forma se puede descartar una variable si su coeficiente tiene el signo contrario. Se espera que el coeficiente de la velocidad tenga signo negativo en el modelo, ya que es probable que cuando se presenta un problema el ciclista disminuya la velocidad. Los coeficientes que acompañan al rumbo, las aceleraciones y rotaciones deberían tener signo positivo, debido a que al enfrentar dificultades los ciclistas suelen realizar maniobras que aumentan el valor de estas variables. Al construir los modelos, no se presentaron problemas de signos en las variables que resultaron significativas.

4.1.2. Modelos

A continuación se presenta la forma general de los cuatro modelos elegidos y el modelo solo constante (Ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5), y los parámetros promedios obtenidos para cada modelo (Tabla 4-2). Adicionalmente, se presentan los valores de la máxima log-verosimilitud, el *pseudo* R^2 y la clasificación del modelos de acuerdo a sus variables. El motivo por el cual se eligieron estos fue que cumplían los criterios descritos en el capítulo anterior. En el Anexo B se presenta el detalle de los resultados obtenidos de los modelos para cada carpeta de la validación cruzada.

$$\text{Modelo A} \quad f(x) = \theta_0 + \theta_1 * Rot_x + \theta_2 * Rot_y + \theta_3 * Rot_z \quad (4.1)$$

$$\text{Modelo B} \quad f(x) = \theta_0 + \theta_4 * Acc_y + \theta_2 * Rot_y + \theta_3 * Rot_z \quad (4.2)$$

$$\text{Modelo C} \quad f(x) = \theta_0 + \theta_1 * Rot_x + \theta_3 * Rot_z \quad (4.3)$$

$$\text{Modelo D} \quad f(x) = \theta_0 + \theta_4 * Acc_y + \theta_3 * Rot_z \quad (4.4)$$

$$\text{Modelo E} \quad f(x) = \theta_0 \quad (4.5)$$

Tabla 4-2: Valores promedio para cada modelo

Modelo	Constante	Aceleración eje 'y'	Rotación eje 'x'	Rotación eje 'y'	Rotación eje 'z'	Log-vero- similitud	Pseudo R ²	Clasifi- cación
A	-7,41	-	13,35	2,36	5,60	-43,42	64%	Complejo- Rotación
B	-7,64	8,43	-	3,96	4,27	-46,21	61%	Complejo- Aceleración
C	-7,17	-	14,25	-	7,10	-46,12	61%	Sencillo- Rotación
D	-6,71	7,85	-	-	6,48	-53,74	55%	Sencillo- Aceleración
E	-3,06	-	-	-	-	-106,31	-	Solo constante

En primer lugar se destaca la importancia o significancia estadística que tienen los giros o rotaciones, independientemente de la dirección en que ocurran, y la aceleración en el eje 'y' al momento de esquivar conos o enfrentar los resaltos. En estas situaciones suele ocurrir que el ciclista experimente desequilibrios, en los cuales los giros son más relevantes que las aceleraciones.

Una variable que se esperaba tuviera importancia era la velocidad, pero los resultados muestran que no es significativa. Una posible explicación es que al enfrentar los elementos de estudio, la disminución de esta variable por parte del ciclista no alcanzó los niveles esperados para ser relevante. De manera similar, la variable construida para representar el cambio de rumbo tampoco resultó significativa en los modelos. Esto se puede atribuir a que el efecto captado por esta variable también se refleja en las rotaciones en torno a eje 'y' y al eje 'z', ya que se encuentran correlacionadas.

Los modelos A y C incluyen el giro en torno al eje 'x' y los modelos B y D presenta la aceleración en la dirección del eje 'y'. Como se señaló previamente estas variables tienen alta correlación, por lo que capturan el mismo comportamiento. Por este motivo, se llamará al primer grupo como modelos rotacionales y al segundo grupo,

modelos de aceleración. Se aprecia que el giro en torno al eje 'z' se encuentra en los cuatro modelos presentados. Esto es un resultado esperable, ya que esta variable se relaciona con la inclinación natural al maniobrar la bicicleta.

Por último, al analizar el giro en torno al eje 'y' es evidente que un desvío del eje por el cual se desplaza el ciclista implique un cambio en esta variable, por lo que se ve afectada al esquivar los conos. Sin embargo, esta variable está presente en los modelos A y B, lo que implica que en el modelo C y D este tipo de comportamiento solo se explica mediante el giro en torno al eje 'z'. Dado que los modelos A y B tienen una variable más se les consideró como modelos complejos y los modelos C y D se denominaron modelos sencillos.

4.1.3. Sensibilidad de las variables

En primer lugar, se realizó el contraste entre los primeros cuatro modelos y el modelo solo constante. Los valores de la log-verosimilitud, la log-verosimilitud promedio y la verosimilitud promedio que se utilizan para este análisis se presentan en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Log-verosimilitud y verosimilitud promedio por modelo

Modelo	Log-verosimilitud	Log-verosimilitud promedio	Verosimilitud promedio
A	-43,42	-0,07	93%
B	-46,21	-0,08	92%
C	-46,12	-0,08	92%
D	-53,74	-0,09	91%
E	-106,32	-0,18	83%

Al estudiar la verosimilitud promedio, el modelo solo constante asigna una probabilidad del 83% al escenario ocurrido, mientras que el mejor modelo (modelo A) alcanza un 93%. El modelo solo constante es altamente predictivo debido al desbalance de la muestra, lo cual es natural dada la frecuencia de deterioros en el pavimento. Sin embargo, este no logra explicar los sucesos con la riqueza de cualquiera de los cuatro modelos elegidos. Estos últimos aumentan de forma significativa su poder predictivo, alcanzando una precisión extrema (sobre 90%), y permiten explicar adecuadamente el fenómeno en cuestión.

En segundo lugar, se analizó la influencia de cada variable en su respectivo modelo. Los resultados obtenidos se presentan por modelo en los siguientes gráficos (Figura 4-2, Figura 4-3, Figura 4-4 y Figura 4-5). El eje de las ordenadas representa la probabilidad de que el pavimento presente un deterioro a medida que cambia cada variable. Por otra parte, en el eje de las abscisas se encuentran las variables de cada modelo. Las rotaciones se expresan en radianes por segundo y la aceleración en G.

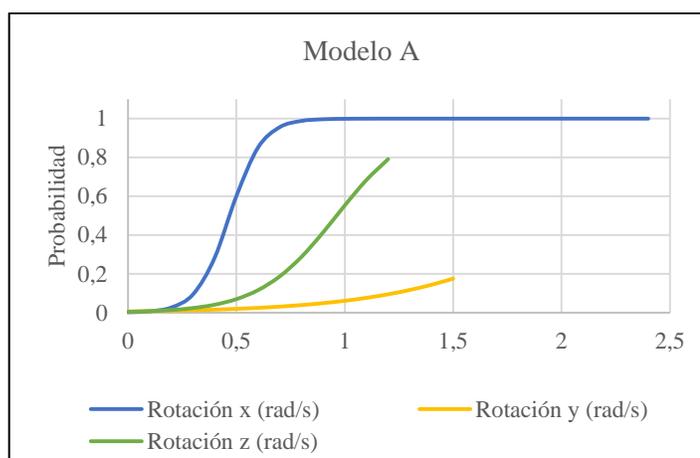


Figura 4-2: Sensibilidad de variables Modelo A

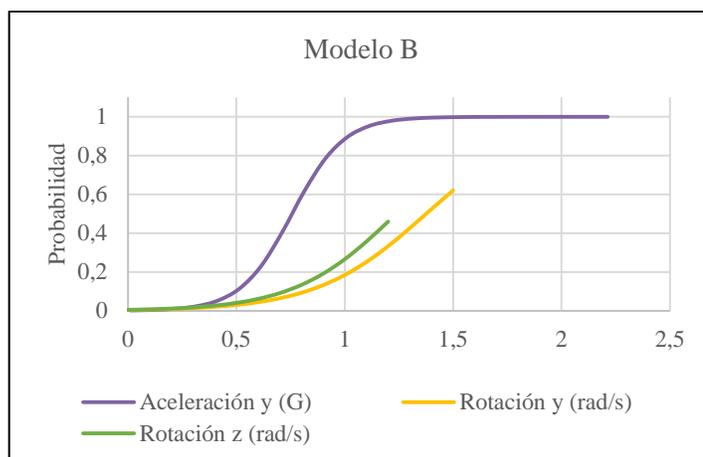


Figura 4-3: Sensibilidad de variables Modelo B

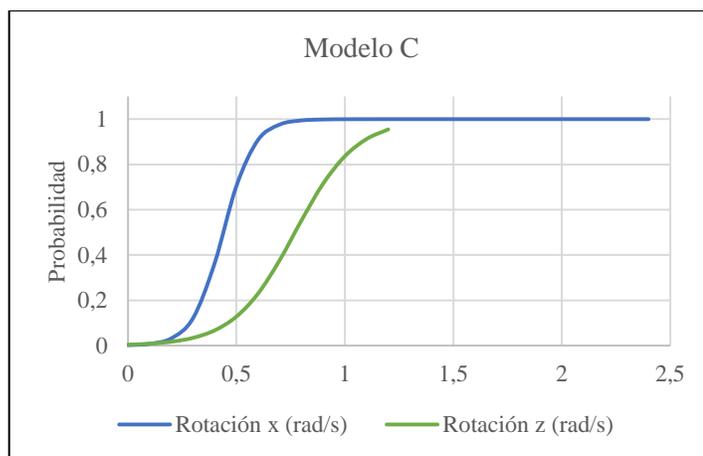


Figura 4-4: Sensibilidad de variables Modelo C

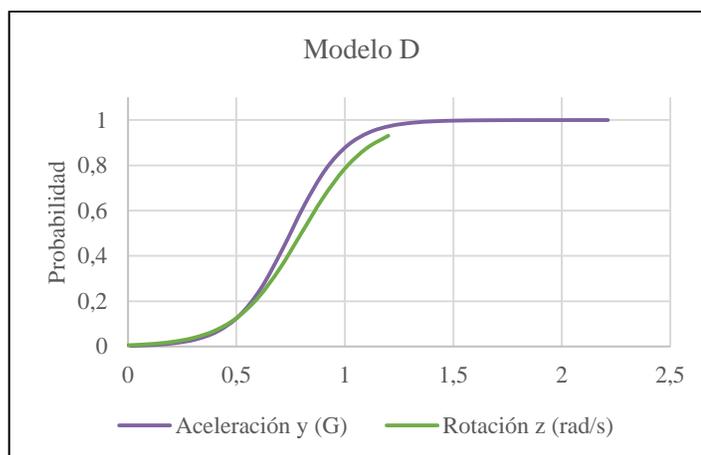


Figura 4-5: Sensibilidad de variables Modelo D

Al observar los gráficos se nota la importancia que tiene la rotación en el eje 'x' y la aceleración en el eje 'y' al momento de determinar un deterioro en el pavimento (por su alta pronunciación). Ambas variables tienen un umbral de cambio robusto, ya que se mantiene en los modelos complejos (A y B) y en los sencillos (C y D). En el caso de la rotación en el eje 'x' el límite es aproximadamente 0,5 radianes por segundo, mientras que la aceleración en el eje 'y' debe superar los 0,8 G.

Al analizar en los modelos complejos la rotación en el eje 'y' se destaca su poca influencia en el Modelo A. En cuanto a modelo con aceleración, la variable influye en la probabilidad de ocurrencia del evento cuando sus valores son cercanos a su límite superior. En otras palabras, la curva de esta variable no tiene una alta pendiente.

Finalmente, la rotación en el eje 'z' (presente en todos los modelos) resulta de gran importancia en los modelos sencillos. Su curva se vuelve más pronunciada, asemejándose a la curva de la rotación en 'x' y aceleración en 'y'. En ambos modelos el umbral de cambio es igual a 0,8 radianes por segundo, lo que demuestra la robustez de esta variable en estos modelos.

4.2. Comparación

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar las herramientas de comparación descritas en el marco teórico a los modelos seleccionados.

4.2.1. Akaike Information Criterion y Bayesian Information Criterion

Para usar estos criterios de información es necesario hacer el análisis por separado de los modelos de aceleración y rotación. Esto debido a que si comparamos el modelo A y B (complejos) se estaría solamente evaluando la máxima verosimilitud, ya que la cantidad de parámetros estimados y la cantidad de datos es la misma. Por esta razón se compararon los modelos sencillos y los complejos dentro de su categoría de aceleración o rotación. A continuación se presenta la Tabla 4-4 con los valores promedios de los índices para cada modelo. Para cálculo de estos se utilizaron las verosimilitud obtenidas en la calibración de los modelos.

Tabla 4-4: Valores de AIC y BIC por modelo

Modelo	AIC	BIC
A	95	112
B	100	118
C	98	111
D	113	127

En primer lugar se analizará el AIC. En este caso se puede comparar el modelo A con el C, ya que este último es una simplificación del primero. El modelo A tiene un menor índice, por lo que se prefiere este modelo. Al comparar el modelo B con el modelo D, se elige el modelo B. En ambos casos el modelo con mayor cantidad de

variables resultó mejor. En otras palabras, la complejidad otorgada por la variable extra también mejora la capacidad predictiva de los modelos. Sin embargo, la diferencia del índice entre modelos es marginal, por lo que todos los modelos son capaces de realizar buenas predicciones.

Al analizar el BIC, la situación cambia. En el caso de los modelos rotacionales, el modelo C tiene un menor BIC, pero nuevamente esta diferencia es marginal. Esto se debe a que este índice castiga más la complejidad del modelo. En los modelos de aceleración, el modelo B nuevamente presenta mejor índice.

De manera global, en el caso de los modelos B y D siempre obtiene mejores índices el modelo B. Al comparar los modelos rotacionales se elegirá el modelo A, ya que si bien obtiene mejores resultados en AIC y peores al observar el BIC, la diferencia en el índice BIC es marginal. Finalmente, entre los modelos A y B, el modelo A presenta menores valores en ambos casos por lo que se optaría por este.

4.2.2. Área bajo la curva Característica Operativa del Receptor

Al analizar el área bajo la curva Característica Operativa del Receptor se utilizaron los datos de la calibración y la validación. Los valores globales de AUROC fueron calculados como el promedio obtenido por cada carpeta de la validación cruzada. Al considerar los parámetros de clasificación los cuatro modelos tienen una alta precisión, donde destacan los modelos A y B.

La Tabla 4-5 muestra el promedio y la desviación estándar de los valores obtenidos en cada modelo. En el caso de los datos de calibración, la desviación estándar en todos los modelos es del orden de un centésimo. Sin embargo, al observar los datos de validación los valores presentan mayores desviaciones estándar, lo que se debe a que la cantidad de datos de validación son un quinto que en la calibración.

Tabla 4-5: Valores AUROC por modelo

Modelo	Calibración		Validación	
	Área	Desviación	Área	Desviación
A	0,983	0,002	0,985	0,010
B	0,981	0,002	0,982	0,011
C	0,974	0,004	0,948	0,052
D	0,954	0,008	0,956	0,032

En el caso de la calibración, al comparar los modelos A y C, se observa que el modelo A obtiene mejores resultados que el modelo C, por una diferencia mínima. En el caso de los modelos B y D, el modelo B es mejor que el modelo D, por una diferencia mayor que el caso anterior. Al momento de comparar los modelos complejos, estos presentan un área bajo la curva similar. Este análisis se puede observar de mejor manera en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6: Resumen valores AUROC calibración y validación

	Complejo	Sencillo	Complejo	Sencillo
Rotación	A 0,983	C 0,974	A 0,985	C 0,948
Aceleración	B 0,981	D 0,954	B 0,982	D 0,956

Los resultados obtenidos con la validación son similares al caso anterior. Los modelos complejos son mejores que los modelos con menos variables y el modelo A es ligeramente mejor que el modelo B (Tabla 4-6). Nuevamente las diferencias son marginales y todos los modelos son altamente precisos. Tanto en el caso de la calibración como de la validación el modelo con mayor área es el modelo A.

4.2.3. Errores tipo I, tipo II y Verdaderos Positivos

Para observar los errores que cometían los modelos, se trabajó con los datos de validación para cada carpeta y se promedió los valores obtenidos. Se calculó la cantidad de veces que los modelos cometían el error tipo I y el error tipo II, los que se presenta en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Errores y Verdaderos Positivos por modelo

Modelo	Error Tipo I	Error Tipo II	Verdaderos Positivos
A	1,6	3,4	55%
B	1,8	3,8	50%
C	2,6	3,2	58%
D	1,8	3,6	53%

Al analizar los errores de tipo I, se observa que el modelo C es el que más cantidad de este tipo de errores comete. Luego, los modelos B y D comenten la misma cantidad, y finalmente el modelo A se equivoca en promedio solo 1,6 veces. En el caso de los errores de tipo II, los modelos de aceleración tienen más errores de este tipo que los modelos rotacionales. En ambos casos la versión compleja del modelo se equivoca más que la sencilla. Al calcular el porcentaje de error global este es en promedio de un 4%.

Al considerar los errores cometidos por los modelos, se optaría por el modelo A. Si bien en los errores de tipo II el modelo C presenta menor cantidad de errores promedio, este comete gran cantidad de errores de tipo I. En esta línea, si se desea un modelo más conservador se debería optar por el modelo C, asumiendo que es probable que entregue Verdaderos Negativos. Al igual que en los análisis anteriores, las diferencias de errores entre los cuatro modelos no alcanzan a ser significativas.

Adicionalmente, se calculó la cantidad de aciertos de cada modelo (Verdaderos Positivos). Se obtuvo el porcentaje total de los aciertos para las cinco carpetas de la

validación cruzada (Tabla 4-7). Este análisis es similar al explicado en el caso de los errores. Los modelos rotacionales tienen mejor resultado que aquellos con aceleración. A su vez, los modelos sencillos son capaces de identificar más imperfecciones que los modelos complejos (dentro de su clasificación como rotacionales o de aceleración).

4.2.4. Análisis por tipo de deterioro

Finalmente, se decidió hacer un análisis detallado por elemento simulado. Para esto se consideraron los errores del tipo II (Falsos Negativos) y los aciertos (Verdaderos Positivos). En este análisis se consideraron los datos que contenían la calibración y validación en cada modelo. De esta forma se obtuvieron los siguientes casos para cada elemento.

a) Resalto alto

Para este elemento se consideraron tres puntos de análisis ($y=1$): uno previo, el punto exacto y un punto posterior. La Tabla 4-8 presenta la cantidad de aciertos de los modelos para los puntos geográficos de análisis y el porcentaje total.

Tabla 4-8: Aciertos para el resalto alto por modelo

Modelo	PREVIA	EXACTA	POSTERIOR	TOTAL
A	1/2	2/2	2/2	83%
B	1/2	2/2	2/2	83%
C	1/2	2/2	2/2	83%
D	2/2	2/2	2/2	100%

El punto exacto del resalto alto y el punto siguiente siempre son detectados por todos los modelos. Por otra parte, el punto previo al elemento presenta una identificación

media, el modelo D es el único que logra detectar la totalidad de los casos. A pesar del punto previo, un resalto alto es correctamente detectado por todos los modelos, ya que contar con dos puntos identificados permite estar alerta al respecto.

b) Resalto bajo

Los puntos de análisis para este elemento son los mismos que el caso anterior del resalto alto. La Tabla 4-9 presenta el detalle de los aciertos de los modelos y puntos de estudio.

Tabla 4-9: Aciertos para el resalto bajo por modelo

Modelo	PREVIA	EXACTA	POSTERIOR	TOTAL
A	1/4	3/4	4/4	67%
B	1/4	4/4	3/4	67%
C	2/4	3/4	4/4	75%
D	1/4	4/4	4/4	75%

En el caso del resalto bajo la ubicación previa a este es casi indetectable con claridad para cualquier modelo. Solo el modelo C la identifica la mitad de las veces. Sin embargo, la ubicación exacta y la siguiente al resalto bajo son detectadas por todos los modelos con diferencias marginales. Los modelos sencillos (C y D) aciertan una vez más que los modelos complejos en este elemento.

c) Baches (Conos)

A diferencia de los elementos anteriores, este contiene cinco ubicaciones de análisis. Dos anteriores al elemento, el lugar exacto y dos siguientes. Para esto, se nombraron las ubicaciones de la siguiente manera: ubicación inicial, ubicación previa, ubicación exacta, ubicación posterior y ubicación final. Se presenta la Tabla 4-10 con el

detalle de las detecciones por modelo y el porcentaje de acierto considerando las tres ubicaciones centrales (subtotal) y las cinco ubicaciones (total).

Tabla 4-10: Aciertos para los baches por modelo

Modelo	INICIAL	PREVIA	EXACTA	POSTERIOR	FINAL	SUBTOTAL	TOTAL
A	0/4	2/4	3/4	2/4	1/4	58%	40%
B	0/4	2/4	2/4	1/4	1/4	42%	30%
C	1/4	3/4	2/4	2/4	0/4	58%	40%
D	1/4	1/4	2/4	1/4	0/4	33%	25%

Este elemento fue más complejo de analizar. En primer lugar la ubicación final no pudo ser evaluada de manera íntegra, ya que los cuatro casos para esta ubicación se encuentran en una misma carpeta. Esto imposibilitó que la posición fuera calibrada y validada. A pesar de esto, los modelos A y B identificaron una vez correctamente el problema en esta ubicación.

Al momento de evaluar por orden las ubicaciones, la inicial es casi indetectable por todos los modelos. Los modelos sencillos solo detectaron una vez, los complejos ninguna. La ubicación previa al cono, la ubicación exacta y la ubicación posterior fue identificada parcialmente por todos los modelos. Si se analiza el elemento en su totalidad, los modelos A y C (rotacionales) tienen mejores resultados. Sin embargo, no alcanzan un 50% de identificación. Si se analizan las tres ubicaciones centrales, los modelos A y C sobrepasan el 50% de identificación.

A modo de resumen del análisis por elementos, para el caso de los resaltos los cuatro modelos se comportan de manera similar, donde los modelos sencillos son más exactos. En cuanto al bache, los modelos rotacionales responden mejor que los que contienen aceleraciones. Por lo tanto, sería preferible elegir el modelo A o C.

4.3. Discusión

Los cuatro modelos construidos son capaces de identificar correctamente problemas estudiados en los pavimentos de ciclovías de forma objetiva y autónoma. Dentro de los deterioros analizados, los modelos reconocen mejor los levantamientos de pavimentos que los baches. Sin embargo, ningún modelo predomina globalmente en la comparación realizada. A pesar de esta semejanza, por los valores obtenidos y la simplicidad en cuanto a instrumentos necesarios para la recolección de datos es posible elegir un modelo. Este es el modelo A, que incorpora las rotaciones en los tres ejes. Para obtener los datos es necesario un giroscopio y *GPS*.

En esta misma línea, es importante destacar que la construcción de los modelos implicó la identificación de las variables necesarias para evaluar el estado del pavimento. Para esto también se realizó un análisis de sensibilidad de las variables utilizadas en los modelos. Entre ellas destacaron la rotación en el eje 'x' y la aceleración en el eje 'y' por su robustez en el umbral de cambio en sus respectivos modelos. Además, se identificó la importancia de la rotación en 'z' para los modelos sencillos, donde nuevamente la variable mantuvo el umbral de cambio entre modelos.

Uno de los problemas del experimento realizado es que evalúa únicamente tramos rectos. En la realidad muchos recorridos de los ciclistas presentan curvas o virajes, estos elementos no están considerados dentro del experimento y los modelos desarrollados. Sin embargo, este problema se puede solucionar al incorporar variables capaces de identificar este comportamiento o que se relacionen al recorrido del ciclista.

El experimento evalúa ciertas dificultades puntuales a las cuales se ve enfrentado el usuario en la vía. Sin embargo, existen otros inconvenientes presentes en las ciclovías que pueden ser incluidos a futuro (intersecciones, fisuras, juntas, peladuras, hundimientos). Algunos de estos problemas suelen desarrollarse de manera continua a lo largo de la ruta. Si bien esto no está considerado de manera específica en el experimento realizado, la metodología propuesta se puede extender fácilmente para considerar esos

casos. No se descarta que los modelos incluyan distintas variables a las aquí encontradas.

El experimento ejecutado buscó validar la metodología propuesta, por lo que el modelo calibrado se ajusta a los escenarios estudiados. Así, un aspecto a considerar en el futuro es la cantidad de datos a utilizar. Contar con un mayor número de datos de nuevas repeticiones o información no considerada (como el material del pavimento), permitiría perfeccionar los modelos desarrollados en este trabajo. Esto permite identificar nuevas problemáticas en los pavimentos de ciclovías y calibrar los modelos a gran escala. En esta misma línea, otro aspecto a considerar es el ruido registrado en los datos debido a la forma de conducir del ciclista y la bicicleta utilizada (Lépine *et al.*, 2011). Por esto, para que lo presentado tenga validez es necesario una cantidad razonable de ciclistas o datos en un mismo tramo de análisis.

Por otra parte, con un mayor número de datos podría ser interesante analizar otras herramientas para desarrollar los modelos. Una alternativa sería el uso de máquinas de aprendizajes. Esto permitiría solucionar la ponderación de los distintos tipos de errores que cometen los modelos y los posibles problemas asociados a la baja cantidad de deterioros registrados.

En cuanto a la captura de datos, en el experimento estos fueron recolectados directamente. Sin embargo, la tecnología implementada y las redes de datos existentes permiten que la información pueda ser obtenida de forma remota, y por ende, aplicar la metodología planteada remotamente (una vez calibrados los modelos).

La metodología propuesta presenta algunas ventajas que la hacen atractiva para su uso masivo. La primera de ellas es la simplificación del proceso de captura de datos, ya que utiliza dispositivos inerciales. Estos también permiten desarrollar una metodología accesible y fácil de masificar, debido al aumento de la oferta de ellos por los avances tecnológicos. En segundo lugar, este método no es invasivo con la ciclovía. En otras palabras, para obtener los datos, y por ende, conocer la condición del pavimento, no es necesario intervenir o cerrar la vía. Se necesita únicamente que circulen bicicletas equipadas con el dispositivo.

Otra ventaja es la disminución del costo asociado a conocer la condición del pavimento en ciclovías. Se elimina la necesidad de programar visitas globales a terreno para conocer el estado del pavimento, y estas se limitan a las ubicaciones que presenten problemas. En otras palabras, optimiza la gestión del pavimento en ciclovías. Si bien existe un costo asociado al equipamiento de bicicletas con este dispositivo y la transmisión de información con datos celulares (para hacerlo en forma remota), este es menor al costo de los equipos tecnológicos existentes o la mano de obra necesaria para obtener la condición del pavimento.

Las regresiones logísticas probaron ser una herramienta útil para detectar imperfecciones en el pavimento de ciclovías. Sin embargo, esta herramienta no permite ponderar la importancia de los distintos tipos de errores que comenten los modelos. En esta investigación, los errores de tipo II son más críticos que los errores tipo I, por lo que implica cada uno de ellos. Otras herramientas, como los métodos de aprendizaje recién mencionados, podrían ser de utilidad.

5. CONCLUSIONES

El principal aporte de esta investigación es la propuesta y validación preliminar de una metodología capaz de determinar la condición del pavimento en ciclovías de forma remota. Dentro de ella destaca la utilización de dispositivos inerciales y la identificación de las variables necesarias para conocer esta condición. A pesar de lo acotado del experimento y resultados, este es el primer acercamiento en el área, lo que implica la apertura de un nuevo enfoque de investigación de este tema. Además, los resultados obtenidos demuestran que la metodología desarrollada es promisoría.

La metodología desarrollada en este trabajo es capaz de inferir el estado del pavimento de la ciclovía de forma objetiva y específica. El uso de dispositivos inerciales permitió el correcto desarrollo de esta, dado que entregaba los datos pasivos de forma remota. A su vez, las regresiones logísticas no presentaron problemas al construir los modelos con las características de la muestra y la variable dependiente. A pesar de lo controlado del experimento, la metodología diseñada es fácil de calibrar y aplicar a gran escala, y por ende, a la realidad. En otras palabras, esta responde a la pregunta de investigación, satisface los objetivos propuestos y concuerda con la hipótesis planteada.

La metodología generada puede ser utilizada de varias formas. A corto plazo, entrega la información necesaria para desarrollar un sistema de gestión del pavimento en ciclovías, ya que permite conocer problemas en las vías y realizar las mantenciones necesarias. A largo plazo, esta metodología puede generar un índice de calidad del pavimento en ciclovías y establecer un nivel de servicio de este.

Un proyecto concreto que se podría realizar en un futuro cercano sería equipar las bicicletas públicas con dispositivos inerciales y *GPS*. De esta forma se recolectaría continuamente la información necesaria para aplicar la metodología propuesta y así conocer el estado del pavimento de las ciclovías. Además, da paso a una masividad inmediata, solucionando las limitaciones de la cantidad de datos, y a una calibración en función de las características propias de las bicicletas públicas.

Con esta información se podría construir un indicador que permita inferir el estado de la superficie a partir de las vibraciones experimentadas por los ciclistas. A su vez, se busca que con los indicadores se establezca un nivel de servicio asociado al pavimento de una ciclovía. El nivel de servicio, permitiría el desarrollo de un sistema de gestión de pavimentos para mejorar la experiencia de los usuarios, aportaría con información para la construcción de modelos de elección de ruta de ciclistas y podría ser de utilidad al momento de calcular la capacidad de las ciclovías.

BIBLIOGRAFÍA

Barbudo, A., Jiménez, J. R., Ledesma, E. F., & Sierra, M. J. (2015). Regularidad superficial y adherencia en vías ciclistas - recomendaciones de diseño disponibles. *Informes de La Construcción*, 67(540), 124-135. <https://doi.org/10.3989/ic.15.010>

Cairney, P., & King, K. (2003). *Development of a performance based specification for a major bicycle facility*. ARRB Transport Research. Vermont, Victoria, Australia.

Chapman, L. (2007). Transport and climate change: a review. *Journal of Transport Geography*, 15(5), 354-367. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.008>

Damant-Sirois, G., Grimsrud, M., & El-Geneidy, A. M. (2014). What's your type: a multidimensional cyclist typology? *Transportation*, 41(6), 1153-1169. <https://doi.org/10.1007/s11116-014-9523-8>

Devijver, P. A., & Kittler, J. (1982). *Pattern Recognition: A Statistical Approach*. Prentice-Hall, Londres, Inglaterra.

Echaveguren, T., Montoya, C., & Tudela, A. (2015). Evaluación de Condición Superficial de Ciclovías usando Aceleraciones Verticales Obtenidas con GPS. *XVII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, 1, 1-14. Concepción, Chile.

Eddy, N. (1996). Developing a level of service for bicycle use. *ProBike Pro-Walk*, 96, 3-6.

Ferrer Mínguez, G. (2009). Integración Kalman de sensores inerciales INS con GPS en un UAV. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona, Enginyeria de Telecomunicació. Barcelona, España.

Fuentes, L., Gunaratne, M., & Hess, D. (2010). Evaluation of the effect of pavement roughness on skid resistance. *Journal of Transportation Engineering*, 136(7), 640-653. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000118](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000118)

Garrard, J., Rose, G., & Lo, S. K. (2008). Promoting transportation cycling for women: The role of bicycle infrastructure. *Preventive Medicine*, 46(1), 55-59. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2007.07.010>

Gharaibeh, N., Wilson, C., Darter, M., & Jones, G. (1998). Development of a bike path Management System for the University of Illinois at Urbana-Champaign. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1636), 56-63. <https://doi.org/10.3141/1636-09>

Gobierno Regional Metropolitano de Santiago (2017). *Catastro de Ciclovías del Gran Santiago año 2016*. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

Hamilton, T. L., & Wichman, C. J. (2018). Bicycle infrastructure and traffic congestion: Evidence from DC's Capital Bikeshare. *Journal of Environmental Economics and Management*, 87, 72-93. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.03.007>

Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression*. (2da Ed.). New York: Chichester, Wiley.

Hydén, C., Nilsson, A., & Risser, R. (1999). *How to enhance Walking and Cycling instead of shorter car trips and to make these modes safer Public*. Department of Traffic Planning and Engineering, University of Lund, Sweden, 158.

Jensen, S. U. (2007). Pedestrian and Bicyclist Level of Service on Roadway Segments. *Transportation Research Record*, 2031(1), 43-51. <https://doi.org/10.3141/2031-06>

Jung, Y., & Hu, J. (2015). AK-fold averaging cross-validation procedure. *Journal of nonparametric statistics*, 27(2), 167-179. <http://dx.doi.org/10.1080/10485252.2015.1010532>

Kohler, E. (2015). Medición de Irregularidad Superficial en Pavimentos de Aeropuertos, Viales y Ciclovías. *Ingeniería de Transporte*, 18(2), 21-24.

Landis, B. (1994). Bicycle Interaction Hazard Score: a Theoretical Model. *Transportation Research Record*, (1438), 3-8.

Landis, B., Vattikuti, V., & Brannick, M. (1997). Real-Time Human Perceptions: Toward a Bicycle Level of Service. *Transportation Research Record*, 1578(1), 119–126. <https://doi.org/10.3141/1578-15>

Lépine, J., Champoux, Y., & Drouet, J. M. (2011). Excitation techniques for testing bike vibration transmission in the laboratory. En *Society for Experimental Mechanics* (Vol. 6, pp. 263-289). Québec, Canada.

Lépine, J., Champoux, Y., & Drouet, J. M. (2014). Road bike comfort: on the measurement of vibrations induced to cyclist. *Sports Engineering*, 17, 113-122. <https://doi.org/10.1007/s12283-013-0145-8>

Lindsay, G., Macmillan, A., & Woodward, A. (2011). Moving urban trips from cars to bicycles: impact on health and emissions. *Australian and New Zealand journal of public health*, 35(1), 54-60. <https://doi.org/10.1111/j.1753-6405.2010.00621.x>

Martens, S. (2011). Bicycles measure the quality of cycle paths in Belgium. *Eltis the urban mobility portal*. Recuperado de <http://www.eltis.org>.

Martin, E. W., & Shaheen, S. A. (2014). Evaluating public transit modal shift dynamics in response to bikesharing: a tale of two US cities. *Journal of Transport Geography*, *41*, 315-324. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.06.026>

Martínez, G., Fuentes, L. G., & Torregroza, L. M. (2011). Revisión del sistema de gestión de pavimentos de la red ciclorrutas de Bogotá. *Revista ingeniería de construcción*, *26*(2), 150-170.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2015). *Construcción de ciclovías: Estándar técnico. Espacios públicos urbanos*. Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

Osorio, A., Chamorro, A., Tighe, S., & Videla, C. (2014). Calibration and validation of condition indicator for managing urban pavement networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2455), 28-36. <https://doi.org/10.3141/2455-04>

Parkin, J. (2009). The humps and the bumps: objective measurement using an instrumented bicycle. *Research and Innovation Conference*, *1*, 3.

Pérez, L., Delegido, J., Rivera-Caicedo, J. P., & Verrelst, J. (2015). Análisis de métodos de validación cruzada para la obtención robusta de parámetros biofísicos. *Revista Española de Teledetección*, *2015*(4), 55-65. <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2015.4153>

Polcar, A., & Ausserer, K. (2013). *Reducing car trips by promoting alternative modes of transportation*. Faculty of Agronomy Mendel University in Brno, Zemědělská, 1.

Pucher, J., & Buehler, R. (2010). Walking and cycling for healthy cities. *Built Environment*, *36*(4), 391-414. <https://doi.org/10.2148/benv.36.4.391>

Pucher, J., Buehler, R., & Seinen, M. (2011). Bicycling renaissance in North America? An update and re-appraisal of cycling trends and policies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *45*(6), 451-475. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.03.001>

Pucher, J., & Dijkstra, L. (2003). Promoting safe walking and cycling to improve public health: lessons from the Netherlands and Germany. *American journal of public health*, *93*(9), 1509-1516.

Pucher, J., Dill, J., & Handy, S. (2010). Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: an international review. *Preventive medicine*, *50*, S106-S125. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2009.07.028>

Rietveld, P., & Daniel, V. (2004). Determinants of bicycle use: Do municipal policies matter? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(7), 531-550. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2004.05.003>

Sánchez, I., & De Solminihaç, H. (1989). EL IRI: un indicador de la regularidad superficial. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 6, 1-17.

Secretaría de Transporte. (2015). *Encuesta origen destino de viajes 2012* (Informe Técnico). Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

Secretaría de Transporte. (2015). Plan Maestro de Transporte de Santiago 2025. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

Sprinkle Consulting Inc. (2007). *Bicycle Level Of Service: Applies Model*. Tampa, Florida, Estados Unidos.

Steer Davies Gleave (2013). *Análisis y Evaluación del Plan Maestro de Ciclovías del Gran Santiago* (Informe ejecutivo). Santiago, Chile.

Thomas, B. (2017). *SensorLog* (Versión 1.9.2) [Software de Aplicación Móvil].

U.S. Department of Transportation (1987). *Highway performance monitoring system field manual*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Washington D.C., Estados Unidos.

Vincenty, T. (1975). Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. *Survey review*, 23(176), 88-93. <https://doi.org/10.1179/sre.1975.23.176.88>

Winters, M., Brauer, M., Setton, E. M., & Teschke, K. (2010). Built environment influences on healthy transportation choices: Bicycling versus driving. *Journal of Urban Health*, 87(6), 969-993. <https://doi.org/10.1007/s11524-010-9509-6>

Yang, Y., & Huang, S. (2014). Suitability of five cross validation methods for performance evaluation of nonlinear mixed-effects forest models—a case study. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 87(5), 654-662. <http://dx.doi.org/10.1093/forestry/cpu025>

Zahabi, S. A. H., Chang, A., Miranda-Moreno, L. F., & Patterson, Z. (2016). Exploring the link between the neighborhood typologies, bicycle infrastructure and commuting cycling over time and the potential impact on commuter GHG emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47(August), 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.05.008>

ANEXOS

Anexo A: Base de Datos

En el link: <http://xurl.es/BBDDTesis> se incluye los datos utilizados en esta investigación.

Anexo B: Detalle de Modelos

En este anexo se presentan los coeficiente obtenidos en cada carpeta para los cuatro modelos elegidos.

Tabla A-0-1: Detalle por carpeta Modelo A

Modelo A	Constante		Rotación eje 'x'		Rotación eje 'y'		Rotación eje 'z'	
	Coeficiente	Test-z	Coeficiente	Test-z	Coeficiente	Test-z	Coeficiente	Test-z
Carpeta 1	-7,77	-8,75	14,81	5,67	1,81	1,48	5,73	4,4
Carpeta 2	-6,95	-9,56	10,51	4,84	2,69	2,55	4,69	3,85
Carpeta 3	-7,77	-9,13	15,57	5,71	2,54	2,56	6,24	5,29
Carpeta 4	-7,12	-9,83	12,62	6,02	2,21	2,29	5,68	5,04
Carpeta 5	-7,45	-9,47	13,26	5,98	2,54	2,35	5,69	4,06

Tabla A-0-2: Detalle por carpeta Modelo B

Modelo B	Constante		Aceleración eje 'y'		Rotación eje 'y'		Rotación eje 'z'	
	Coeficiente	Test-z	Coeficiente	Test-z	Coeficiente	Test-z	Coeficiente	Test-z
Carpeta 1	-7,74	-8,98	8,58	6,56	3,71	3,13	4,00	3,50
Carpeta 2	-7,36	-9,47	7,43	5,74	3,74	3,43	3,87	3,45
Carpeta 3	-7,67	-9,44	8,66	6,02	4,42	4,46	4,55	4,50
Carpeta 4	-7,51	-9,80	8,57	6,73	3,68	3,66	4,43	4,31
Carpeta 5	-7,92	-9,23	8,92	6,70	4,23	3,68	4,52	3,58

Tabla A-0-3: Detalle por carpeta Modelo C

Modelo C	Constante		Rotación eje 'x'		Rotación eje 'z'	
	Coefficiente	Test-z	Coefficiente	Test-z	Coefficiente	Test-z
Carpeta 1	-7,59	-8,80	15,54	5,82	6,71	6,13
Carpeta 2	-6,72	-9,65	11,69	5,21	6,55	6,86
Carpeta 3	-7,45	-9,48	16,60	6,13	7,55	7,17
Carpeta 4	-6,88	-10,03	13,46	6,35	6,91	7,00
Carpeta 5	-7,21	-9,68	13,98	6,26	7,76	6,39

Tabla A-0-4: Detalle por carpeta Modelo D

Modelo D	Constante		Aceleración eje 'y'		Rotación eje 'z'	
	Coefficiente	Test-z	Coefficiente	Test-z	Coefficiente	Test-z
Carpeta 1	-6,81	-10,00	8,00	6,52	5,62	5,91
Carpeta 2	-6,62	-10,15	7,19	5,74	6,19	6,78
Carpeta 3	-6,45	-10,71	7,68	5,88	6,75	7,12
Carpeta 4	-6,67	-10,64	8,07	6,73	6,36	6,85
Carpeta 5	-7,02	-10,21	8,32	6,68	7,50	6,66