



**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE OBRAS CIVILES**

***“Sincronización semafórica para ciclos: Análisis de la estrategia y su viabilidad
para el caso de estudio de la Av. San Martín en la ciudad de Temuco”***

**KAREN ISAMAR QUINTANA BREVIS
2025**



UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN OBRAS CIVILES

-

***“Sincronización semafórica para ciclos: Análisis de la estrategia y su viabilidad
para el caso de estudio de la Av. San Martín en la ciudad de Temuco”***

**TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

Profesor Guia: Maximiliano Exequiel Lizana Maldonado
Profesor Co-Guia: Lorena Katherine Ortiz Jerez

**KAREN ISAMAR QUINTANA BREVIS
2025**

***“Sincronización semafórica para ciclos: Análisis de la estrategia y su viabilidad
para el caso de estudio de la Av. San Martín en la ciudad de Temuco”***

KAREN ISAMAR QUINTANA BREVIS

**MAXIMILIANO EXEQUIEL
LIZANA MALDONADO
Profesor Guía**

**LORENA KATHERINE ORTIZ
JEREZ
Profesor Co-Guía**

**MAURICIO ANDRÉS JARA CAMPOS
Académico Evaluador**

**BENJAMÍN ALEJANDRO GÓMEZ
LÓPEZ
Académico Evaluador**

**Calificación trabajo escrito:
Calificación examen:
Calificación final:**

Dedicatoria

A mi familia, por ser mi apoyo y ejemplo de fortaleza. Gracias por su apoyo incondicional en cada paso, por sus enseñanzas y su cariño.

A mi hija, que ha sido mi compañera incondicional desde el primer día: en las clases, en los desvelos, en las reuniones, en todos los momentos de caos y de calma. Gracias por la paciencia, por tus abrazos oportunos y por recordarme que cada día vale la pena seguir. Este logro es tanto mío como tuyo. Muchas gracias corazón.

A Rubén, quien ha sido un apoyo y pilar fundamental durante este proceso.

A Cata, Dany y todos esos compañeros que me apoyaron en el transcurso de mi proyecto y en los problemas que se me presentaron.

Y finalmente, a mí misma por no rendirme cuando la vida me ha puesto luces rojas... por aprender a cruzarlas con la cabeza fría y el corazón valiente.

Y bueno, ahora espero que se me sincronicen las luces verdes... para seguir adelante.

Agradecimiento

Partiré agradeciendo a Dios por todas las oportunidades que me ha dado, por permitirme seguir mis sueños a pesar de todos los contratiempos, por ponerme personas que me acompañan y me guían y, por sobre todo darme una compañera de vida.

El camino recorrido no ha sido fácil. Sin duda, en esta instancia quiero agradecer a las personas que he conocido en la universidad, sean profesores y compañeros que en algún momento de la vida compartimos etapas, aventuras y trabajos.

Agradezco profundamente a quienes con su guía formaron parte de este proceso que está llegando a su fin, abriendo las puertas de una nueva etapa que he esperado con ansias.

También quiero agradecer al equipo de la UOCT, que me ayudo durante este proceso, han soportado mis insistentes solicitudes de datos y tuvieron la paciencia de responder. Gracias por hacer más ameno este proceso.

A la profesora Lorena Ortiz, muchas gracias por proponerme el tema. Verdaderamente fue una fuente de motivación que me abrió los ojos a un mundo más allá de lo aprendido en clases. A pesar del estrés y los contratiempos, aprendí muchísimo, tanto durante la tesis como en mi práctica en la unidad operativa.

A los profesores de la comisión, profe Mauricio y profe Benja, gracias por aceptar formar parte esto. Espero sinceramente que mi trabajo les resulte interesante de leer (bueno al menos un poco).

Y Finalmente agradezco al Profesor Maximiliano, a pesar de no haberlo conocido durante las clases, si llegue a conocerlo en esta etapa y he tenido la fortuna de aprender de su sabiduría, quizás fue lo mejor. Muchas gracias por acoger mi tema y guiarme de la mejor manera. Sin dudas, he aprendido cosas que me servirán a futuro ya que espero encontrar trabajo en esto, y si no al menos me quedaran buenos conocimientos que guardare de anécdotas.

Resumen

La presente investigación tiene por objetivo establecer los criterios técnicos y operativos necesarios para implementar una estrategia de sincronización semafórica adaptada a ciclos tomando como caso de estudio el eje Avenida San Martín en la ciudad de Temuco, Chile. A partir de la revisión de experiencias internacionales, normativas nacionales y manuales técnicos, se identifican los parámetros claves que permiten adaptar la programación semafórica a las necesidades del modo ciclista, considerando variables como velocidad de desplazamiento, la duración de fases y las características del entorno vial.

La metodología propuesta posee un enfoque replicable, permitiendo su aplicación en otros contextos urbanos que cuenten con infraestructura ciclista y requerimientos de coordinación semafórica. En el caso específico analizado, se realizó un diagnóstico técnico del corredor seleccionado, abordando aspectos relativos a la infraestructura vial, el sistema semafórico y el comportamiento del flujo ciclista. Este diagnóstico se basó en la observación directa en terreno, análisis de registros audiovisuales proporcionados por la UOCT y privados, y recorridos de la zona de estudio. Sobre esta base, se desarrolló una propuesta de sincronización orientada a una velocidad objetivo de ciclos de 16 km/h, la cual fue modelada utilizando diagramas espacio temporal.

La evaluación de la estrategia consideró indicadores como el número de detenciones, el tiempo de viaje para ciclistas y los posibles efectos sobre los modos motorizados, la validación se realizó a través de dos metodologías complementarias: análisis audiovisual y mediciones mediante GPS. Los resultados obtenidos indican mejoras significativas en términos de fluidez y regularidad del desplazamiento ciclista. No obstante, se advierte que estos resultados se obtuvieron en cierto grado bajo condiciones controladas, por lo que su extrapolación a escenarios reales requiere factores como el comportamiento espontáneo de los usuarios, su grado de conocimiento del sistema y la existencia de medidas complementarias de señalización vial.

Asimismo, si bien no se identificaron alteraciones críticas en la operación vehicular dentro del tramo analizado, se propone como línea de investigación futura la evaluación detallada del impacto sobre el flujo motorizado en contextos urbanos complejos. Se concluye que la estrategia de onda verde constituye una alternativa técnicamente viable para fomentar la movilidad activa, siendo su implementación especialmente pertinente en entornos urbanos que promueven el transporte sostenible y la convivencia vial.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1.	Introducción.....	2
1.1.	Contexto general de la movilidad ciclista en Temuco.....	3
1.2.	Importancia de la movilidad activa en Chile y Temuco.....	5
1.3.	Descripción del problema.....	5
1.4.	Justificación del estudio.....	6
1.5.	Objetivos.....	7
1.5.1.	Objetivo general	7
1.5.2.	Objetivos específicos.....	7
1.6.	Alcances y limitaciones del estudio.....	8
1.6.1.	Alcances del estudio	8
1.6.2.	Limitaciones del estudio	8
Capítulo 2.	Marco teórico y antecedentes	11
2.1.	Movilidad ciclista en el entorno urbano	11
2.1.1.	Rol de la bicicleta como modo de transporte sostenible	11
2.1.2.	Barreras y desafíos para ciclistas en entornos urbanos.....	11
2.2.	Contexto territorial: Ciudad de Temuco y zona de estudio	12
2.3.	Sincronización semafórica y su aplicación al modo ciclista	14
2.3.1.	Beneficios y problemáticas de la coordinación de intersecciones.....	15
2.3.2.	Desventajas de la onda verde.....	16
2.3.3.	Sistemas semafóricos para ciclovías.....	17
2.4.	Casos de estudios relevantes: Experiencias internacionales.....	18
2.5.	Revisión de normativa y documentos técnicos.....	19
2.6.	Criterios técnicos para sincronización semafórica ciclista	21
2.7.	Herramientas de análisis.....	22
2.7.1.	Diagrama espacio – tiempo: construcción e interpretación.....	22
2.7.2.	Implementación de la estrategia en Centrac: Parámetros y supuestos.....	24
Capítulo 3.	Metodología.....	27
3.1.	Diseño general de la investigación y tipo de estudio.....	27
3.2.	Variables consideradas y delimitación del estudio.....	29
3.3.	Etapas del trabajo metodológico.....	30
3.3.1.	Levantamiento de criterios técnicos	30
3.3.2.	Diagnóstico de ciclovías existentes y selección de corredor.....	30
3.3.3.	Caracterización del corredor seleccionado	33
3.3.4.	Levantamiento y análisis del flujo ciclistas en el tramo 2.....	33
3.3.5.	Obtención y análisis de datos de medios audiovisuales	34
3.3.6.	Medición de la velocidad ciclista	35
3.3.7.	Ajuste del tramo de análisis.....	35
3.4.	Modelación y simulación.....	36
3.4.1.	Aplicación del modelo de sincronización.....	36

3.4.2.	Simulación y análisis con diagrama espacio tiempo	38
3.5.	Implementación y desempeño de la estrategia	38
Capítulo 4.	Resultados.....	42
4.1.	Criterios operativos y parámetros de diseño para OVC	42
4.2.	Selección de la ciclovía candidata a onda verde.....	42
4.3.	Zona de estudio y caracterización del corredor San Martín	45
4.4.	Cálculo de velocidad ciclista	54
4.5.	Ajuste al tramo seleccionado	57
4.6.	Evaluación de nivel de servicio de sincronización actual para ciclos	59
4.7.	Evaluación de nivel de servicio de sincronización semafórica propuesta para ciclos...	60
4.8.	Impacto sobre la operación del tráfico	63
4.8.1.	Evaluación de desempeño basada en análisis de videos.....	64
4.8.2.	Evaluación basada en recorridos con GPS para ciclistas con información de la estrategia 70	
4.8.3.	Conclusión del análisis operativo de la implementación.....	72
Capítulo 5.	Conclusiones y recomendaciones	74
Capítulo 6.	Referencias	78
Capítulo 7.	Anexos	81

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Tabla resumen de experiencias internacionales de “Onda Verde Ciclista”	19
Tabla 3.1: Condiciones climáticas óptimas para toma de datos.	30
Tabla 3.2: Escala de criterios seleccionados.	31
Tabla 3.3: Criterios considerados y sus ponderaciones.....	33
Tabla 3.4: Puntos de toma de datos audiovisuales.	34
Tabla 3.5: Parámetros necesarios para desarrollar el modelo.	36
Tabla 3.6: Indicadores para evaluar desempeño.....	39
Tabla 4.1: Parámetros de diseño para estrategia de OVC	42
Tabla 4.2: Ciclovías y sus características para análisis.	43
Tabla 4.3: Cálculo de puntaje ponderado para cada ciclovía analizada.	44
Tabla 4.4: Caracterización del tramo escogido en el corredor San Martín.	46
Tabla 4.5: Resumen de resultados obtenidos para cada tipo de ciclo.....	55
Tabla 4.6: Velocidad desagregada por ciclo y periodo.	56
Tabla 4.7: Valores obtenidos para desfases de verde e inicio de sistema.	61
Tabla 4.8: Comparación de los tiempos de viaje para cada situación según diagramas espacio-tiempo.	63
Tabla 4.9: Cuantificación de los indicadores medidos en el escenario con usuarios sin información de la estrategia.....	64
Tabla 4.10: Tiempos de viaje en segundo entre Arturo Prat y Las Heras, medidos mediante medios audiovisuales (usuarios sin información).....	65
Tabla 4.11: Cuantificación de los indicadores medidos en el escenario usuarios con información de la estrategia.	66
Tabla 4.12: Tiempos de viaje entre Arturo Prat y Las Heras, medidos mediante medios audiovisuales (usuarios con información).	67
Tabla 4.13: Comparación de criterios seleccionados para medir impacto en modo motorizado, sentido único de circulación de Prat a Las Heras.	68
Tabla 4.14: Resultados medios de los indicadores obtenidos de los viajes realizados con GPS. .	70
Anexo B	
Tabla B. 1: Programaciones semafóricas de las intersecciones para los diferentes periodos. Fuente: UOCT	83
Anexo C	
Tabla C. 1: Flujo medio por día obtenido mediante registro de contadores.....	84

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ciclovías existentes en Temuco.....	12
Figura 2.2 : Topografía de la ciudad de Temuco. (Eltit, 2011).	13
Figura 2.3: Red vial básica de Temuco según PRC. FUENTE: Plan regulador Comunal de Temuco.	14
Figura 2.4: Diagrama espacio tiempo para cuatro intersecciones sincronizadas. (FHWA, 2013) ..	23
Figura 3.1: Diagrama de la metodología empleada.	28
Figura 4.1: Plano de las ciclovías a analizar para seleccionar la adecuada.	43
Figura 4.2: Ciclovía emplazada en corredor San Martín y su subdivisión de tramos.	46
Figura 4.3: Condición de ciclovía en corredor San Martín	47
Figura 4.4: Atraveso de calzada R. Freire en mal estado, con desgaste total de demarcaciones...	47
Figura 4.5: Avenida Caupolicán con San Martín	47
Figura 4.6: Atraveso de calzada con demarcación visible	47
Figura 4.7: Intersección S. Martín - R. Freire, presenta virajes sin protección y vehículos interfieren la ciclovía	48
Figura 4.8: S. Martín - Lynch, se visualiza un auto virando con semáforo ciclista en verde, en muchos casos no se respeta la prioridad.	48
Figura 4.9: Degaste de demarcaciones, pintura y segregación de ciclovía San Martín.	48
Figura 4.10: Estado de la ciclovía S. Martín, con señal vertical en mal estado y desgaste de la vía de circulación ciclista.	48
Figura 4.11: Contador de ciclos presente en la zona seleccionada. A) Ubicación del contador en el tramo. B) Visualización en terreno del contador.	51
Figura 4.12: Demanda horaria ciclista total (ciclos/hora) en el corredor san Martín, según contador automático localizado en San Martín con Vicuña Mackenna. A) mediana por hora de martes a jueves, B) Distribución del flujo por hora.....	52
Figura 4.13: Disposición de las cámaras consideradas, en plomo cámaras UOCT y en rojo cámara privada.	53
Figura 4.14: Gráfico de conteo de ciclistas en tramo San Martín entre Caupolicán - Arturo Prat, del martes 10 de junio de 2025, mediante medios audiovisuales para los 3 periodos considerados (P1. 8:00 a 9:00, P2. 15:00 a 16:00 y P3. 17:00 a 18:00).	54
Figura 4.15: Distribución de velocidades obtenidas por tipo de ciclo.....	55
Figura 4.16: Gráfico de violín de velocidad de bicicleta por periodo de estudio.....	57
Figura 4.17: Gráfico de violín de velocidad de scooter por periodo de estudio.....	57
Figura 4.18: Plano de tramo de ciclovía de San Martín a estudiar.	58
Figura 4.19 : Diagramas espacio-tiempo para el corredor San Martín (15:00 a 16:00 horas) para la situación actual. A) Situación actual para escenario vehicular (30 km/h) y B) Situación actual para escenario ciclista (16 km/h).	60
Figura 4.20 : Diagramas espacio-tiempo para el corredor San Martín (15:00 a 16:00 horas) para la situación con onda verde. A) Situación con onda verde para escenario vehicular (30 km/h) y B) Situación con onda verde para escenario ciclista (16 km/h).	62
Figura 4.21: Recorrido ciclista Prat a Carrera - perfil de velocidad situación actual.....	71
Figura 4.22: Recorrido ciclista Prat a Carrera - perfil de velocidad situación OVC.....	71
Figura 4.23: Recorrido ciclista Carrera a Prat - perfil de velocidad situación actual.....	71
Figura 4.24: Recorrido ciclista Carrera a Prat - perfil de velocidad situación OVC.....	71
Anexo A	
Figura A. 1: Sistema semafórico ciclistas, obtenido de Manual de señalización	81
Anexo B	

Figura B. 1: Cámaras de video gestionadas por UOCT en Temuco.....	82
Anexo E	
Figura E. 1: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de Prat hacia G. Carrera.	86
Figura E. 2: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de Prat hacia G. Carrera.	86
Figura E. 3: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de Prat hacia G. Carrera.	86
Figura E. 4: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de Prat hacia G. Carrera.	86
Figura E. 5: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de G. Carrera hacia Prat.	87
Figura E. 6: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de G. Carrera hacia Prat.	87
Figura E. 7: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de G. Carrera hacia Prat.	87
Figura E. 8: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario OVC de Prat hacia G. Carrera.	88
Figura E. 9: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario OVC de Prat hacia G. Carrera.	88
Figura E. 10: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario OVC de G. Carrera hacia Prat.	88
Figura E. 11: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario OVC de G. Carrera hacia Prat.	88

CAPÍTULO 1

Introducción

Capítulo 1. Introducción

La movilidad activa ha adquirido un papel fundamental en la planificación urbana contemporánea. La movilidad activa, referida al uso de modos de transporte que requieren esfuerzo físico por parte de los usuarios, como caminar y andar en bicicleta (Litman, 2013), ofrece una alternativa concreta para enfrentar los desafíos de congestión, contaminación y sedentarismo en las ciudades. La promoción de este tipo de movilidad responde a la necesidad de promover modos de transporte saludables, eficientes y ambientalmente sostenibles, con el fin de mitigar los impactos ambientales del transporte motorizado y mejorar la calidad de vida en las ciudades (Banister, 2008). Dentro de este enfoque, la bicicleta ha sido promovida activamente como modo de transporte eficiente, lo que ha llevado a la adaptación de políticas públicas para facilitar su integración a la infraestructura vial existente. En este contexto, diversas ciudades han implementado estrategias específicas para integrar este modo al sistema de tránsito, tales como sistemas de sincronización semafórica adaptada a la velocidad promedio de los ciclistas, también conocidos como “onda verde ciclista”, cuyo objetivo es optimizar los tiempos de viaje, mejorar la seguridad vial y fomentar el uso de este modo de transporte (NACTO, 2024). Las experiencias internacionales muestran que la aplicación de esta estrategia puede aumentar significativamente la eficiencia del sistema urbano de transporte (Fietsberaad, 2006). En definitiva, la movilidad activa, particularmente la bicicleta requiere herramientas de gestión modernas que consideren características operativas, siendo la sincronización semafórica una medida de dicho esfuerzo.

La sincronización semafórica adaptada a ciclistas ha mostrado buenos resultados en ciudades internacionales, pero hasta dónde llega el conocimiento del autor, en Chile, a pesar del aumento del uso de ciclos, aun no se ha implementado. En ciudades como Copenhague, Ámsterdam, Bogotá y New York se ha demostrado con éxito la efectividad de esta estrategia, permitiendo que ciclistas mantengan una velocidad constante sin interrupciones frecuentes. En estos contextos, dicha iniciativa a logrado mejorar la seguridad en intersecciones y la fluidez del tráfico no motorizado, adoptándose una velocidad de progresión en un rango de 15 a 20 km/h (Apostola, 2014). En contraste, en ciudades chilenas donde el uso de la bicicleta ha aumentado significativamente, aún no se han adoptado políticas similares. Temuco, no es la excepción a pesar de que un 10% de sus habitantes declaran la bicicleta como su principal modo de transporte, superando la media nacional de un 7% según datos del Ministerio del Medio Ambiente, (Ministerio del Medio Ambiente, 2018). Aquí, la infraestructura actual de la ciudad representa importantes desafíos, como la necesidad de establecer una mayor conectividad y el de evaluar adaptación semafórica para ciclos. Este panorama plantea una interrogante clave: ¿Es factible la implementación de una sincronización semafórica orientada a ciclos en el contexto urbano actual de Temuco?

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la factibilidad de implementar una sincronización semafórica para bicicletas en un tramo ciclista de Temuco. El análisis se plantea desde dos dimensiones: una mirada técnica, considerando parámetros de diseño, infraestructura y programaciones vigentes, y desde una perspectiva operativa, vinculada al funcionamiento real y la gestión diaria del sistema. Para ello, se propone identificar los criterios técnicos de sincronización aplicables al modo ciclista, analizar la infraestructura vial y los flujos ciclistas observados, modelar una propuesta de onda verde en un corredor representativo y determinar su impacto en la movilidad urbana. La investigación se basa en una metodología mixta que incluye revisión de la normativa internacional y local, el levantamiento de datos empíricos mediante aforos automáticos y registros audiovisuales, así como el uso de herramientas de análisis espacial y modelación semafórica. Esta

aproximación permite explorar tanto las condiciones actuales como los escenarios de mejora mediante su implementación en la Unidad Operativa de Control del Tránsito (UOCT), organismo dependiente del Ministerio de Transporte y Telecomunicación encargado de la gestión y coordinación de semáforos a nivel regional. En síntesis, este enfoque metodológico busca comprender tanto las condiciones actuales del sistema de transporte ciclista en Temuco como los posibles beneficios de la implementación de la sincronización semafórica, proporcionando una base sólida para futuras mejoras en la movilidad urbana.

Este documento se estructura en cinco capítulos. En el Capítulo 1 se desarrolla el marco introductorio, que contextualiza el problema y presenta los objetivos de estudio. El Capítulo 2 expone el marco teórico, abordando los fundamentos técnicos de la sincronización semafórica y la movilidad ciclista. En el capítulo 3 se describe la metodología empleada, incluyendo la recolección y análisis de datos. En el capítulo 4 se presentan y discuten los resultados obtenidos, con énfasis en la viabilidad operativa del modelo propuesto. Finalmente, en el capítulo 5 se entregan las conclusiones y recomendaciones para futuras aplicaciones de la onda verde en el contexto urbano local de Temuco.

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que, en el tramo seleccionado de avenida San Martín, es posible identificar condiciones técnicas y operativas favorables para aplicar una estrategia de sincronización específica para bicicletas. Entre estas destacan la magnitud del flujo ciclista, las distancias regulares entre intersecciones y continuidad del trazado. Las simulaciones espaciotemporales realizadas mostraron que la introducción de ajustes en los tiempos de inicio de luz verde redujo el número de detenciones, aumento la continuidad del desplazamiento y mejoró la velocidad de circulación en el tramo analizado. Asimismo, se observaron beneficios complementarios, como una mayor percepción de seguridad vial y un mejor comportamiento de los usuarios ciclistas frente a la intersección semaforizada. Estos hallazgos constituyen una base técnica que demuestra que la onda verde ciclista mejora la eficiencia de los viajes en bicicleta en el corredor analizado. La implementación de la medida efectivamente redujo el número de detenciones, aumento la continuidad del desplazamiento y la velocidad de circulación ciclista. Asimismo, se observaron beneficios complementarios, como un aumento en las condiciones de seguridad vial percibidas y un mejor comportamiento de los usuarios ciclistas ante una intersección semaforizada. En conjunto, los resultados confirman la factibilidad de implementar estrategias de sincronización orientada a ciclos en el tramo analizado, adicionalmente se determinaron parámetros que sirven de referencia para analizar otras ciclovías del entorno urbano.

1.1. Contexto general de la movilidad ciclista en Temuco

En los últimos años, la ciudad de Temuco ha experimentado una transformación progresiva en su sistema de movilidad urbana, impulsada por políticas públicas orientadas a fortalecer los modos no motorizados, especialmente la bicicleta. Este cambio responde a desafíos como la congestión vehicular, la contaminación ambiental y la necesidad de promover desplazamientos más sustentables y seguros. Según Eltit (2011), el crecimiento exponencial del parque automotor, junto con estructura vial fragmentada, ha generado congestión y ha impulsado el desarrollo de propuestas que posicionan a la bicicleta como una alternativa viable, siempre que se cuente con infraestructura adecuada y políticas dirigidas a fomentar su uso (Eltit, 2011). Además, se han desarrollado metodologías recientes para identificar corredores verdes urbanos, que pueden contribuir a la planificación de redes de movilidad sostenible en Temuco (Lora et al., 2024). La bicicleta, por su

bajo impacto ambiental y eficiencia, se ha consolidado como una alternativa viable al transporte motorizado (Ríos et al., 2015). Con el creciente uso de la bicicleta, las autoridades locales se enfrentan a desafíos de mejorar la infraestructura vial para garantizar fluidez y seguridad de este modo de transporte (NACTO, 2024). La ciudad sin embargo aún enfrenta retos importantes en la conectividad de la red ciclista, lo que limita la potencia del uso generalizado de la bicicleta (Lora et al., 2024) (Eltit, 2011).

En Temuco, a pesar de los avances en la infraestructura ciclista, persisten desafíos relacionados con la continuidad y conectividad de la red, especialmente en las áreas céntricas donde la alta densidad vehicular limita la fluidez del flujo ciclista. El plan maestro de ciclovías Temuco-Padre Las Casas ha sido un paso importante en el desarrollo de la infraestructura ciclista, estableciendo una red de más de 40 km de infraestructura ciclista planificada, de los cuales más de 23 km ya están implementadas (Solutiva Consultores, 2015). Este desarrollo ha sido complementado por un aumento significativo en el número de viajes en bicicletas, evidenciado por los datos de los contadores automáticos ubicados en vías claves de la red. Sin embargo, a pesar de estos logros, la ciudad aun enfrenta desafíos significativos principalmente en la conectividad entre tramos y en las intersecciones semaforizadas, especialmente en zonas de alta densidad vehicular como el centro de la ciudad. La falta de integración entre tramos de ciclovía, la congestión vehicular y peatonal en estas áreas urbanas reduce la eficiencia de los desplazamientos ciclistas, obligando a estos a lidiar con interrupciones frecuentes y riesgos de seguridad. Según datos de SECTRA, diagnósticos del plan maestro de ciclovías y encuestas del Ministerio del Medio Ambiente, el uso de la bicicleta ha crecido sostenidamente, alcanzando un 7% de participación modal en algunos sectores urbanos, lo que resalta la necesidad urgente de abordar estos problemas. A pesar de los esfuerzos por mejorar la infraestructura, persisten barreras que afectan la conectividad, eficiencia y seguridad del flujo ciclista, estas barreras deben ser consideradas en las políticas y estrategias para garantizar que estas sean efectivas.

Un aspecto clave que afecta la movilidad ciclista es la interrupción de los trayectos en cruces controlados por semáforos, donde los desfases semafóricos entre intersecciones no están adaptados a la velocidad promedio de circulación de este modo. Esta situación genera frecuentes detenciones, aumento del tiempo de viaje y pérdida de continuidad, desincentivando el uso de la bicicleta, especialmente en viajes laborales o educativos. La falta de sincronismo adecuado representa un riesgo adicional para los usuarios de este modo ya que incrementa la exposición a siniestros en las intersecciones (Welle et al., 2015). Por lo tanto, se vuelve urgente abordar la sincronización de semáforos para facilitar un flujo continuo de ciclistas, mejorando la seguridad y la eficiencia del sistema de transporte.

La necesidad de estrategias de gestión específicas, como la sincronización semafórica orientada a ciclistas, más conocida como “onda verde ciclista”, surge en este contexto como una solución técnica con potencial para mejorar la eficiencia y seguridad del modo ciclista en Temuco. Esta estrategia ha sido aplicada con éxito en otras ciudades del mundo, como Copenhague, Ámsterdam o Bogotá, y ha demostrado ser efectiva para optimizar los tiempos de viaje, reducir los accidentes y aumentar la percepción de seguridad entre los ciclistas (Fietsberaad, 2006). En Temuco, la implementación de la onda verde representaría una oportunidad para fortalecer las políticas locales de movilidad activa, alineándose con la tendencia mundial hacia la sostenibilidad. Al optimizar el flujo ciclista, no solo se facilita el transporte, sino que también contribuye a un entorno más seguro

y saludable. Esta medida podría ser clave para hacer de la bicicleta un medio de transporte más accesible en la ciudad y así avanzar hacia la inclusividad de los modos.

1.2. Importancia de la movilidad activa en Chile y Temuco

La movilidad activa, entendida como los desplazamientos no motorizados realizados principalmente caminando o en bicicleta, ha adquirido una creciente relevancia en las políticas públicas de transporte y planificación urbana en Chile. A nivel general, este tipo de movilidad no solo fomenta la actividad física y salud, sino que también contribuye a reducir emisiones contaminantes y a mejorar la equidad en el acceso al transporte, facilitando alternativas para quienes no utilizan modos motorizados (Pucher y Buehler, 2012).

En el caso de Chile, el impulso hacia la movilidad activa se ha materializado a través de iniciativas como Plan Nacional de Movilidad Urbana Sustentable y el Manual de Vialidad Ciclo-Inclusiva elaborado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (SECTRA, 2024), los cuales promueven la construcción de infraestructura adecuada para ciclistas y peatones y fortalecen el marco normativo en la materia. En el caso de Temuco, la movilidad activa cobra particular importancia por su papel en enfrentar problemáticas de congestión y contaminación propias de la ciudad, así como por el aumento progresivo del uso de la bicicleta en los últimos años. Este escenario refuerza la necesidad de avanzar en medidas que consoliden un sistema de transporte urbano sostenible, equitativo y alineado con las políticas nacionales de movilidad.

En este contexto, la movilidad activa no solo representa una alternativa saludable y sostenible, sino que se configura como un elemento central en la planificación del transporte urbano en Chile y particularmente en Temuco. Sin embargo, el reconocimiento de su importancia contrasta con los desafíos que aún persisten en materia de infraestructura, gestión, y seguridad, lo que plantea la necesidad de profundizar en las condiciones que limitan su consolidación plena dentro del sistema de transporte local.

1.3. Descripción del problema

El uso de la bicicleta ha sido promovido como una solución sostenible frente a los crecientes problemas de congestión y contaminación en ciudades como Temuco. El acelerado crecimiento urbano ha provocado mayores tiempos de desplazamiento, aumento en los niveles de polución y una reducción general en la eficiencia del sistema de transporte. Si bien la bicicleta representa una alternativa accesible, económica y ambientalmente responsable, su integración en la infraestructura urbana aún es incipiente. Uno de los principales obstáculos, es la falta de adaptación del sistema semafórico, que continúa respondiendo a los patrones del tránsito motorizado. Esta situación genera detenciones frecuentes entre intersecciones semaforizadas lo que contribuye a disminuir la satisfacción de usar este modo y por ende su utilización como modo de transporte. En Temuco, el crecimiento sostenido del uso de la bicicleta ha puesto en evidencia esta limitación, sobre todo en sectores con alta densidad de cruces regulados. Por tanto, si bien el uso de la bicicleta se presenta como una estrategia efectiva frente a problemas como la congestión y contaminación, su potencial se ve limitado por condiciones estructurales que aún no garantizan una circulación segura y eficiente para este modo de transporte.

Entre los principales problemas que enfrentan los ciclistas al detenerse en intersecciones reguladas destacan dos situaciones recurrentes:

- a) **Infracción de luz roja:** Este comportamiento ciclista, uno de los más típicos que interfiere directamente con el tráfico vehicular. Estudios indican que su frecuencia es altamente dependiente de las condiciones climáticas adversas, como el frío y la lluvia. Sin embargo, a pesar de ser una conducta habitual, representa un comportamiento fuera de normativa y de alto riesgo para la seguridad vial (Graystone et al., 2022).
- b) **Comportamiento ciclista en intersección semaforizada:** Muchos ciclistas perciben la señalización semafórica como un factor de retraso, aunque valoran su presencia en contexto de alto tráfico motorizado. La percepción de seguridad asociada a los semáforos varía según el grupo etario y el género: las personas mayores suelen apreciarlos más por el orden y seguridad que imponen, mientras que los jóvenes tienden a priorizar la rapidez de trayecto, siendo las mujeres más proclives para utilizar cruces señalizados. Estas diferencias muestran que la señalización semafórica debe adaptarse a las características y necesidades diversas de los usuarios, promoviendo un enfoque que minimice la percepción negativa y fomente viajes ciclistas más fluidos (CROW, 2011).

Ante esas problemáticas, ha surgido a nivel internacional el interés por desarrollar sistemas de sincronización semafórica específicos para bicicletas, comúnmente conocidos como ondas verdes ciclistas. Estas estrategias buscan coordinar los tiempos de luz verde en función de una velocidad representativa del ciclista promedio, permitiendo desplazamientos fluidos entre intersecciones semaforizadas. Si bien su aplicación ha mostrado resultados positivos en algunos contextos urbanos, su implementación efectiva requiere una evaluación rigurosa de múltiples factores. Entre ellos se encuentran:

- A) La determinación de una velocidad adecuada para el diseño de onda verde;
- B) La compatibilidad de la infraestructura semafórica con este tipo de programación;
- C) Las características geométricas del corredor;
- D) Posibles efectos sobre otros modos de transporte; y
- E) La adaptación del comportamiento ciclista al sistema propuesto.

Por tanto, el análisis de la factibilidad técnica y operativa de una onda verde ciclista resulta esencial para determinar su aplicabilidad real en ciudades como Temuco. Este estudio se plantea en ese marco, evaluar qué condiciones requiere esta estrategia para ser estudiada e implementada, de modo que contribuya a la movilidad eficiente, segura y sostenible para los ciclistas.

1.4. Justificación del estudio

El crecimiento sostenido del uso de la bicicleta en ciudades chilenas, como en Temuco, ha impulsado la implementación de infraestructura ciclo-inclusiva. Sin embargo, este desarrollo físico no ha sido acompañado por estrategias operativas que permitan optimizar la experiencia de viaje ciclista, especialmente en las intersecciones reguladas por semáforos, donde persiste una lógica de diseño orientada exclusivamente al tránsito motorizado. Esta desconexión genera limitaciones para este modo de transporte, como detenciones innecesarias, pérdidas de tiempos y comportamientos de riesgo por parte de los usuarios, afectando la continuidad, eficiencia y seguridad de los desplazamientos. La falta de integración entre la infraestructura ciclista y la gestión semafórica

constituye una barrera para consolidar la bicicleta como modo de transporte competitivo en entornos urbanos.

Actualmente, en Temuco no existen estudios que evalúen la factibilidad de aplicar sincronización semafórica adaptada a ciclos, lo cual representa una oportunidad para investigar esta estrategia en un contexto urbano intermedio como Temuco, que combina el tamaño poblacional, la complejidad vial de un centro regional con una red regulada por sistemas modernos de control. A pesar de que este tipo de estrategia ha sido implementada en otras ciudades del mundo, su viabilidad técnica y operativa en entornos como el de Temuco requiere ser evaluada considerando las condiciones locales de infraestructura, programación semafórica y comportamiento modal.

Este estudio busca abordar esa brecha mediante un enfoque técnico aplicado, que permita identificar condiciones favorables para la implementación de una sincronización ciclista eficiente, incorporando criterios de diseño reales, observación empírica y modelación espacio temporal. Mas allá del diseño puntual, el trabajo se alinea con principios establecidos por el marco nacional de movilidad urbana, que integra el enfoque de equidad modal y los lineamientos del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. En ese sentido, la investigación aporta evidencia útil para futuras decisiones de planificación, actualización de normativa e inversión pública, constituyendo a una movilidad urbana más segura, inclusiva y sostenible.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica de implementar una sincronización semafórica adaptada a bicicletas para el caso de estudio de un eje vial de la ciudad de Temuco.

1.5.2. Objetivos específicos

OE1. Identificar criterios operativos y parámetros de diseño para sincronización semafórica ciclista aplicable al contexto urbano de Temuco.

OE2. Obtener las condiciones actuales de la infraestructura vial y condiciones operativas del sistema semafórico en un corredor vial seleccionado de Temuco.

OE3. Caracterizar el flujo ciclista mediante observación en terreno, grabaciones u otro.

OE4. Analizar el funcionamiento actual del sistema semafórico en relación con el flujo ciclista, utilizando diagrama espacio tiempo y modelación simple.

OE5. Elaborar una propuesta técnica de sincronización semafórica para bicicletas en corredor de Temuco, basada en los resultados del análisis del corredor seleccionado y sustentada en normativas nacionales e internacionales.

OE6. Evaluar el impacto de la propuesta sobre las condiciones de operación del tráfico, mediante comparación de escenarios y considerando indicadores como numero de paradas, demoras, colas y eficiencia global.

1.6. Alcances y limitaciones del estudio

1.6.1. Alcances del estudio

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la factibilidad de implementar una estrategia de sincronización semafórica para bicicletas en un entorno urbano de Temuco, específicamente en un corredor vial seleccionado. El análisis se centra en la infraestructura vial existente, el flujo ciclista y su relación con el sistema semafórico urbano, con el fin de proponer ajustes técnicos que optimicen la movilidad ciclista. Además, se evaluará la viabilidad de la implementación de una onda verde adaptada a velocidad promedio de ciclistas, considerando características específicas del tráfico urbano de Temuco, tales como la densidad ciclista y patrones de flujo en distintos momentos del día. Así, los resultados de esta investigación buscan contribuir a las políticas públicas de movilidad urbana sostenible y proporcionarán una base técnica para mejorar la integración de la bicicleta dentro del sistema de transporte urbano.

El estudio se delimita a una red específica de ciclovías y semáforos conectados a la UOCT dentro del centro de Temuco, con un enfoque particular en los tramos que presentan mayor flujo ciclista. Para ello se utilizan herramientas como aforos ciclistas, el monitoreo en cámaras de video, y los datos semafóricos de la ciudad. Así también se emplea la implementación para analizar los posibles impactos de la sincronización semafórica sobre la fluidez del tránsito ciclista. Estos alcances permiten desarrollar una evaluación detallada de la factibilidad técnica de una sincronización adaptada a bicicletas, a partir de datos representativos y herramientas analíticas. Cabe señalar que el estudio se centra en la movilidad ciclista y no aborda en profundidad los efectos sobre otros modos de transporte, que actualmente constituyen el criterio principal de coordinación semafórica en condiciones de flujo mixto.

1.6.2. Limitaciones del estudio

Este estudio presenta limitaciones inherentes a su alcance y metodología. En primer lugar, la información sobre las condiciones actuales de la infraestructura ciclista y el comportamiento del flujo ciclista puede estar sujeta a imprecisiones, especialmente en zonas con menor cobertura de aforos o registros históricos. Además, la ausencia de estudios previos sobre la sincronización semafórica para bicicletas en Temuco representa un desafío adicional al contar con pocos datos de base para hacer comparaciones directas o proyecciones de su impacto. Estas limitaciones podrían restringir la aplicabilidad de los resultados a otras áreas urbanas de la ciudad o incluso a otras ciudades chilenas con condiciones distintas.

El análisis se enfoca en tramos urbanos céntricos de Temuco, por lo que los resultados podrían no ser representativos de zonas periféricas, donde existen diferencias significativas en términos de densidad de tráfico, diseño vial o cobertura de infraestructura ciclista. Además, el estudio aborda específicamente los efectos operativos de la sincronización semafórica, sin considerar otras dimensiones como el confort del viaje o la calidad de la infraestructura complementaria o no representativos de zonas periféricas con menor densidad de tráfico o infraestructura diferente. De igual manera el análisis de las interacciones entre ciclistas y otros modos de transporte se centrará en los efectos de la sincronización semafórica, sin abordar otros factores como la percepción de seguridad o la infraestructura complementaria. Por lo tanto, los resultados del estudio deberán considerarse dentro de los límites de la muestra seleccionada, no siendo extrapolables sin más análisis a otros contextos urbanos.

Cabe señalar que la infraestructura estudiada es utilizada de forma compartida por otros modos de micro movilidad, particularmente scooter y bicicletas eléctricas, cuyas características de operación (aceleración, velocidad y estabilidad) difieren de las bicicletas convencionales. La presencia de estos móviles puede introducir variabilidad en los indicadores evaluados, y la falta de segmentación específica por tipo de vehículo limita la capacidad para atribuir los cambios exclusivamente al modo ciclistas convencionales. Por lo tanto, se debe buscar un equilibrio de diseño y operación de forma que todos los móviles que se desplazan por la ciclovía perciban un beneficio real de las medidas implementadas.

Finalmente, la implementación de la estrategia propuesta, de ser viable, dependerá de factores externos como los recursos disponibles para infraestructura, la disposición política para llevar a cabo modificaciones necesarias y la aceptación social de los usuarios de bicicletas y vehículos motorizados. Estos factores no serán abordados directamente en el estudio, pero influirán en el éxito de la estrategia una vez implementada. Por lo tanto, las recomendaciones resultantes deben interpretarse dentro de estos límites, entendiendo que cambios propuestos requieren un contexto favorable para su adaptación exitosa.

Cabe señalar que este estudio no cuenta con financiamiento para intervenciones piloto ni contempla la evaluación de estos factores contextuales. No obstante, su influencia sobre la efectividad real de la estrategia es ineludible, por lo que las recomendaciones técnicas presentadas deben ser interpretadas dentro de estos límites. La viabilidad final de la medida dependerá, en última instancia, de un entorno institucional, presupuestario y social favorable que permita su adaptación e implementación efectiva.

CAPÍTULO 2

Marco teórico y antecedentes

Capítulo 2. Marco teórico y antecedentes

2.1. Movilidad ciclista en el entorno urbano

La movilidad ciclista ocupa un lugar cada vez más protagónico en la planificación urbana contemporánea (Pucher y Buehler, 2012). Este enfoque ha adquirido fuerza en ciudades que buscan reducir su huella de carbono y descongestionar la infraestructura vial. Además, promueve hábitos de vida saludables y una movilidad ambientalmente responsable (Organización Mundial de la Salud, 2025). Para su implementación efectiva, se requiere una combinación de políticas públicas específicas, diseño urbano inclusivo y una gestión de tránsito que considere particularidades de este modo de transporte (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2015) (CROW, 2011). La integración de estos elementos es clave para garantizar desplazamientos eficientes y seguros para los ciclistas. Por tanto, su incorporación estratégica en el entorno urbano responde no solo a criterios de sostenibilidad, sino también a la necesidad de construir una ciudad más equitativa y funcional.

2.1.1. Rol de la bicicleta como modo de transporte sostenible

La bicicleta constituye un modo de transporte eficiente, de bajo costo y ambientalmente sustentable. En comparación con los modos motorizados, no emiten gases contaminantes, contribuye a la reducción del ruido urbano y promueve una ocupación más racional del espacio público. En términos de equidad, la bicicleta es una herramienta clave para generar acceso a oportunidades urbanas ya que permite el desplazamiento de grupos sociales que no tienen acceso al transporte motorizado (Litman, 2013).

La bicicleta es una opción viable, estratégica y con efectos integrales para la ciudad. En distancias menores a 5 km, la bicicleta puede ser competitiva en tiempos de viaje a otros modos, especialmente en zonas de congestión. Su uso promueve la movilidad sostenible, al reducir la dependencia del automóvil y las emisiones contaminantes. La incorporación de este modo en políticas públicas de movilidad no solo representa una solución funcional al problema del transporte. Adicionalmente trae beneficios sociales amplios, como mejoras en salud, la vitalidad urbana y la economía local. Finalmente integrar la bicicleta a la movilidad urbana no solo soluciona problemas de transporte, sino que mejora la calidad de vida y el funcionamiento integral de la ciudad.

2.1.2. Barreras y desafíos para ciclistas en entornos urbanos

A pesar de las ventajas, la bicicleta enfrenta diversas barreras en entornos urbanos latinoamericanos, particularmente en ciudades como Temuco. Uno de los principales es la infraestructura incompleta o discontinua, con ciclovías mal conectadas o interrumpidas en cruces claves. Además, se evidencia una falta de prioridad operacional, ya que los sistemas semafóricos no consideran los patrones de circulación de los ciclistas, lo que genera detenciones frecuentes y riesgos en intersecciones. La inseguridad vial también representa un factor disuasivo, debido a la convivencia con vehículos motorizados en tramos no segregados. A esto se suma la percepción de inseguridad y escasa cultura vial, donde el temor a siniestros y el bajo respeto hacia los ciclistas afectan negativamente su uso cotidiano. En conjunto, estas barreras evidencian la necesidad de políticas más inclusivas e infraestructura adaptada que reconozca al ciclista como un usuario relevante dentro del sistema de movilidad urbana.

2.2. Contexto territorial: Ciudad de Temuco y zona de estudio

La ciudad de Temuco, capital de la región de la Araucanía, constituye un centro urbano intermedio con un crecimiento sostenido en términos demográficos, extensión territorial y parque vehicular. Esta expansión ha generado una creciente presión sobre el sistema de transporte, evidenciada en niveles significativos de congestión vial, sobrecarga del transporte público y una infraestructura aún limitada para modos no motorizados. En respuesta a estas condiciones, el uso de la bicicleta ha experimentado un incremento sostenido en los últimos años, incentivado tanto por políticas públicas como por factores económicos y ambientales. Sin embargo, persisten desafíos relevantes en cuanto a conectividad, seguridad vial y adecuación de las condiciones operativas para los usuarios ciclistas, especialmente en zonas centrales de la ciudad.

La zona de estudio seleccionada corresponde a la zona de Temuco que concentra ciclovías las cuales se muestran en la Figura 2.1, gran densidad de usuarios, infraestructura semafórica y cámaras de monitoreo. Este entorno resulta adecuado para evaluar la viabilidad técnica de una estrategia de sincronización semafórica orientada al modo ciclista, al combinar condiciones de alta demanda con disponibilidad de datos operacionales.



Figura 2.1: Ciclovías existentes en Temuco.

La ciudad de Temuco se emplaza sobre una topografía levemente ondulada, con presencia de lomajes suaves y zonas con pendiente moderada, especialmente hacia el sector norponiente. Estas condiciones topográficas influyen directamente en la movilidad urbana condicionando el trazado vial, la infraestructura de transporte y la experiencia de viaje de los modos activos como la bicicleta. Las pendientes afectan la velocidad y el esfuerzo requerido al desplazarse, generando diferencias significativas entre los distintos segmentos de usuarios, según edad, condición física y tipo de bicicleta. Para la planificación de medidas como una onda verde ciclistas (OVC), las variables topográficas son importantes de considerar ya que influyen en la capacidad de los usuarios de

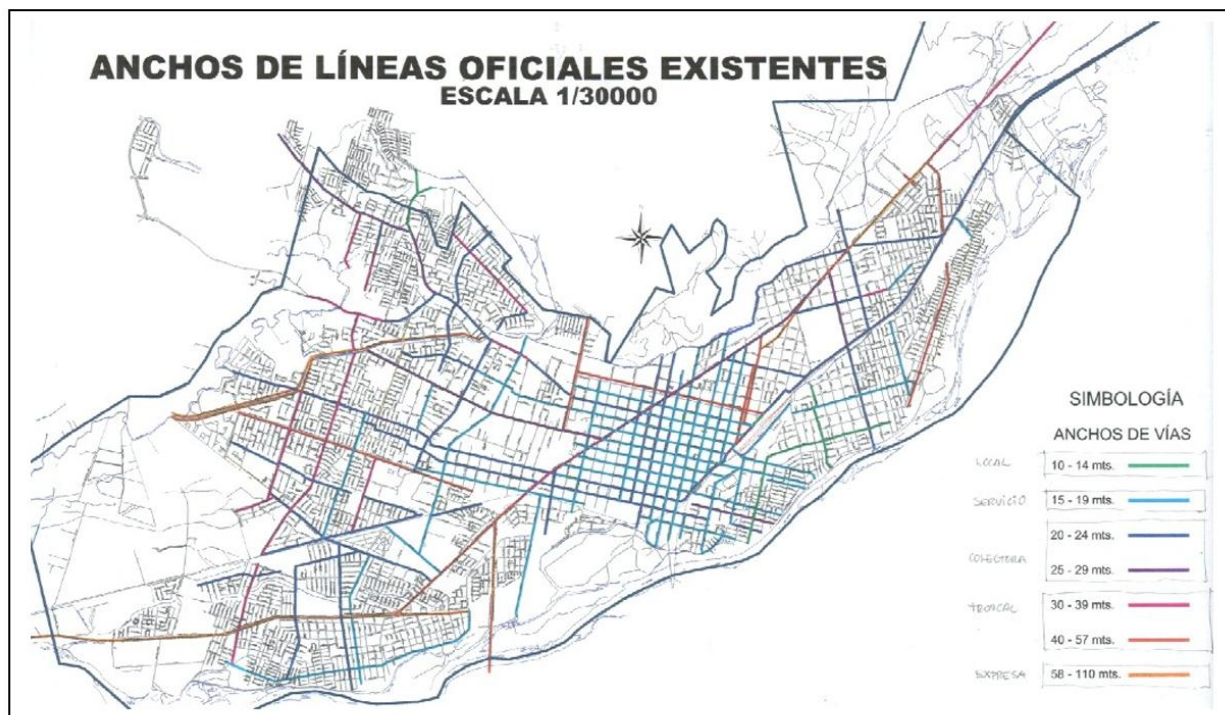
mantener una velocidad constante. En la Figura 2.2 se presenta el modelo topográfico de la ciudad, donde se observan las principales zonas topográficas y el trazado vial.



Figura 2.2 : Topografía de la ciudad de Temuco. (Eltit, 2011).

La red vial básica según el PRC de la comuna se conforma por vías que atraviesan tramos importantes de la ciudad y permiten articular flujos principales de movilidad. El sistema troncal se estructura principalmente en torno a un circuito diagonal que conecta distintos sectores de la ciudad con la ruta 5, se tienen Rudecindo Ortega y Caupolicán, que luego bifurcan para continuar al sur por la ruta 5 y hacia el poniente por Francisco Salazar y Manuel Recabarren. Por otro lado, se tienen las vías colectoras, las que comunican diferentes sectores y barrios de la ciudad, se desarrollan en el eje oriente poniente, y concuerdan con el crecimiento de la ciudad, entre ellas se encuentra: Luis Duran, Pedro de Valdivia, Lautaro, Inglaterra, Manuel Rodríguez, Avenida Alemania, Manuel Montt, Claro solar, San Martín, O'Higgins, Avenida Pablo Neruda y Las Encinas. La ciudad se extiende al sur-poniente a través de Gabriela Mistral y Simón Bolívar junto a Imperial, mientras que por el Norte se encuentra Barros Arana, algunas otras de carácter colector son transversales como Inés de Suárez, Javiera Carrera, Andes, Olimpia, Italia, Francia y Senador Estébanez. Mientras que las restantes en su mayoría conforman las de carácter de servicio que se encargan de conectar con las colectoras.

Esta red estructurante cumple un rol fundamental en la definición de tramos con potencial para estrategias de gestión de tránsito, ya que define corredores de gran jerarquía, flujo y conectividad. La Figura 2.3 muestra la estructura vial definida en el plan regulador comunal y servirá como base para la selección de corredores.



Plano Nº 25 Anchos de Líneas Oficiales Existentes Temuco 2000 /OTPR

Figura 2.3: Red vial básica de Temuco según PRC. FUENTE: Plan regulador Comunal de Temuco.

2.3. Sincronización semafórica y su aplicación al modo ciclista

La bicicleta podría ser el modo de transporte preferido, permite desplazarse de forma fácil, rápida y económica. Sin embargo, para que sea rápido y eficiente se requiere minimizar el número de paradas. Para lograr este objetivo se pueden utilizar estrategias avanzadas de gestión semafórica, como las ondas verdes ciclistas. Las ondas verdes implementadas pueden ser de los siguientes tipos, cada uno con sus ventajas, limitaciones y niveles distintos de intervención sobre el tráfico:

1.- Sincronización semafórica a velocidad ciclista constante

Esta estrategia de gestión del tráfico se basa en una gestión coordinada de los ciclos semafóricos, ajustados a una velocidad promedio constante de circulación ciclistas. Es una técnica orientada a reducir la cantidad de detenciones, mejorar la fluidez y aumentar la seguridad en los desplazamientos (Apostola, 2014). Desde la perspectiva de la movilidad urbana sostenible, esta forma de sincronización cobra relevancia, ya que promueve trayectos más seguros, eficientes y atractivos para los usuarios de la bicicleta, quienes generalmente circulan a una menor velocidad que los vehículos motorizados (NACTO, 2024). No obstante, esta solución puede generar impactos

negativos sobre otros modos de transporte, especialmente en las vías transversales, al aumentar los tiempos de espera o retrasos para automóviles y peatones que cruzan la arteria sincronizada.

2.- Asesoría de velocidad al usuario

Este enfoque consiste en, aconsejar a los usuarios sobre la velocidad a la cual viajar para llegar a la próxima intersección en luz verde. Estas recomendaciones de velocidad sugerida se basan en las distancias entre semáforos y ventanas verdes definidas dentro del ciclo semafórico. Sin embargo, las velocidades pueden resultar demasiado bajas o altas, dependiendo de la ubicación y diseño de la vía. Además, esta estrategia no considera suficientemente la diversidad de condiciones físicas y culturales de los ciclistas, ni las características técnicas de sus bicicletas (peso, tipo, mantenimiento, etc.). Como consecuencia, muchos usuarios no logran alcanzar ni mantener la velocidad indicada, viéndose forzados a detenerse en las intersecciones. Esto genera frustración, pérdida de eficiencia y reduce los beneficios esperados de la onda (Apostola, 2014).

3.- Consejo de velocidad con intervención del sistema semafórico a favor del modo ciclista

Este enfoque combina el asesoramiento dinámico de velocidad con ajustes activos del sistema semafórico que prioriza al ciclista. A los usuarios se les indica la velocidad óptima que deben mantener para cruzar las intersecciones en luz verde, la cual ha sido previamente determinada en función del comportamiento real medido en la vía. Esta velocidad representativa, al representar las capacidades medias de la muestra, es por tanto accesible para la mayoría de los usuarios por lo cual se utiliza como base para sincronizar los semáforos. Este método da consejos sobre la velocidad a transitar, la cual deriva de la optimización de señales de tráfico, es decir la velocidad a la cual se sincronizaron los semáforos. De esta manera, se garantiza que la recomendación sea accesible, realista y eficaz para un amplio espectro de usuarios, incentivando la continuidad del desplazamiento y promoviendo una experiencia de viaje fluida y segura. Así las ondas verdes pueden entenderse como una estrategia compuesta por dos sub-estrategias complementarias, una optimización de señales a través de la optimización de ciclos semafóricos, donde se coordinan las fases para reducir detenciones y un asesoramiento de velocidad que informa sobre la velocidad adecuada para mantener una circulación continua. La integración de ambas permite adaptar la infraestructura semafórica a las particularidades del flujo ciclista, promoviendo trayectos fluidos, seguros y eficientes (CROW, 2011).

2.3.1. Beneficios y problemáticas de la coordinación de intersecciones

La coordinación semafórica, entendida como la programación sincronizada de semáforos a lo largo de un corredor, tiene como objetivo facilitar el flujo continuo del tránsito reduciendo paradas, demoras y tiempo de viaje (FHWA, 2013). En términos esta estrategia busca que los móviles puedan desplazarse sin detenerse durante todo el recorrido. No obstante, incluso en sistemas avanzados, este ideal rara vez se alcanza completamente, debido a la complejidad de condiciones urbanas y la variabilidad del comportamiento de los usuarios. En el caso de los modos activos, como la bicicleta, la coordinación semafórica, frecuentemente denominada onda verde ciclista, ofrece beneficios significativos cuando se adapta adecuadamente al perfil de los ciclistas. Esta sincronización puede visualizarse mediante un diagrama espacio temporal, el cual representa el desplazamiento de los usuarios en función del tiempo y permite analizar la relación entre su velocidad de circulación y los tiempos de luz verde disponibles en cada intersección del recorrido (FHWA, 2013). Los beneficios de este tipo de intervención se hacen evidentes en corredores que cumplen ciertas condiciones necesarias, intersecciones cercanas entre sí, ciclos semafóricos de

igual duración, flujos relativamente constantes y una velocidad de sincronización representativa del comportamiento promedio de los usuarios de bicicletas (NACTO, 2024).

Entre los principales objetivos de la onda verde ciclista destacan:

- **Mejorar la fluidez del tráfico ciclista:** Reduciendo tiempo de parada y optimizando la continuidad del trayecto.
- **Fomentar el uso de la bicicleta:** Al brindar una experiencia de viaje más cómoda, eficiente y segura.
- **Promover la salud y el bien estar físico:** Minimizando paradas y arranques innecesarios para ciclistas, lo cual reduce el estrés físico asociado y favorece un pedaleo constante y menos extenuante (CROW, 2011), (NACTO, 2024).

Sin embargo, la implementación de ondas verdes, si bien es favorable, también plantea desafíos importantes que se deben considerar, especialmente en lo relativo al equilibrio de prioridades entre ciclistas y modos motorizados. En muchos casos, la decisión sobre qué modo priorizar resulta evidente: se otorga prioridad al flujo mayor volumen de usuarios, bajo una lógica de eficiencia operacional. No obstante, la situación se vuelve compleja a medida que la densidad de ambos modos se asemeja o cuando se busca asignar prioridad a un determinado modo, por criterios de sostenibilidad, seguridad vial o equidad modal (Litman, 2013). En estos contextos, la definición de prioridad no puede depender únicamente del conteo de usuarios, sino que sustentarse en políticas públicas claras, objetivos de movilidad sustentable y, eventualmente, en criterios dinámicos que consideren el impacto marginal de detener cada flujo.

A continuación, se presentan los tres tipos de enfoques de priorización en el contexto urbano:

Caso 1- Prioridad ciclista: Un gran pelotón de ciclistas circula por la vía principal, mientras que en la vía transversal hay escasa presencia de vehículos motorizados. La prioridad se asigna al flujo ciclista (CROW, 2011) (NACTO, 2024).

Caso 2- Prioridad motorizada: La vía principal presenta reducida presencia de ciclistas, mientras que en la vía transversal hay alta densidad vehicular. Se otorga prioridad al modo motorizado (FHWA, 2013).

Caso 3- Situación de conflicto de prioridad: Ambas corrientes presentan flujos significativos o se desea favorecer a los ciclistas por criterios de inclusividad o equidad modal. Este escenario requiere evaluación compleja y la aplicación de criterios diferentes a el conteo de demanda (Litman, 2013).

Estas situaciones demuestran que la sincronización semafórica no debe entenderse solamente como una herramienta técnica, sino también como un instrumento de política pública, capaz de reflejar decisiones estratégicas sobre qué tipo de movilidad priorizar. Por ello su diseño e implementación deben estar alineados con objetivos de sostenibilidad, seguridad y accesibilidad definidos por el marco normativo vigente y las condiciones del entorno urbano intervenido.

2.3.2. Desventajas de la onda verde

No obstante, la implementación de onda verde ciclista debe evaluarse rigurosamente ya que su funcionamiento implica una modificación de prioridad del sistema de control semafórico, el que

normalmente está enfocado en el flujo vehicular, entre los posibles problemas debe tenerse consideraciones en:

- Efectos sobre otros modos de transporte: Si se modifica la prioridad en la vía es posible que se generen intereses contrapuestos, es decir que aumenten tiempos de espera de un modo, mientras los de otro modo disminuyan.
- Complejidad de la programación: La sincronización requiere de distancias regulares entre intersecciones y tiempos de ciclos compatibles con la velocidad de los ciclistas.
- Presencia variable de flujos de bicicletas: En horarios de baja demanda la estrategia puede perder eficiencia o generar efectos no deseados, como tiempos muertos.
- Interacciones entre los sentidos de circulación: El flujo alto generalmente se da en un sentido por horario punta por lo que la sincronización debe efectuarse en casos que se requiera y que se balancee de modo tal que el tráfico de otros modos y otros sentidos no se vean afectados negativamente, sino que se garantice la eficiencia general del cruce.

Por lo tanto, la evaluación de los diferentes aspectos que podrían constituir consecuencias derivadas de la implementación de la estrategia resulta fundamental, dado que no es posible saber a priori si los efectos serán plenamente positivos. En particular, será necesario verificar si es factible generar la ruta de viaje ciclista continua y fluida en el corredor seleccionado, y más aún, determinar si la implementación generara impactos negativos significativos en otros modos de transporte que comparten el espacio vial.

Entre los efectos negativos que se pueden presentar se tienen, el aumento de tiempos de espera para los otros modos en los cruces transversales, aumento de paradas en el modo motorizado al modificar la velocidad de sincronización, la dificultad para generar una sincronización bidireccional si se requiere, la complejidad asociada a la programación semafórica cuando la distancia entre intersecciones no es uniforme y se consideran movimientos transversales, la pérdida de eficiencia del sistema general si el flujo de ciclistas es bajo en ciertos tramos horarios. Estas incertidumbres justifican la necesidad de un análisis integral que considere tanto los beneficios esperados como los posibles efectos colaterales sobre la operación del sistema de tránsito.

2.3.3. Sistemas semafóricos para ciclovías

El control de las señales de tráfico es uno de los componentes clave del sistema semafórico, ya que regula las fases de luz verde para los distintos grupos de usuarios en la intersección. Esta programación influye directamente en la eficiencia del flujo vehicular y en la seguridad de los modos más vulnerables, como peatones y ciclistas. Existen tres tipos de controladores del tráfico clasificados según su grado de flexibilidad y respuesta ante la demanda:

- 1.- **Control de tiempo fijo:** Las fases verdes tienen duración y orden preestablecidos, que se repiten de forma cíclica sin considerar las condiciones del tránsito en tiempo real.
- 2.- **Control actuado:** Este sistema requiere de la intervención o detección de usuarios, mediante sensores, botones u otro dispositivo para activar determinadas fases semafóricas.
- 3.- **Control adaptativo:** Se trata de un sistema avanzado, que ajusta en tiempo real la duración y el orden de las fases en función del patrón de llegada de los usuarios y la densidad del tráfico en la intersección, utilizando tecnologías como cámaras, lazos inductivos o algoritmos predictivos.

El tipo 1 de control fijo, es ampliamente utilizado en la unidad operativa de control del tránsito en Chile, incluida la ciudad de Temuco, donde todos los controladores instalados en las ciclovías operan bajo esa modalidad. Las especificaciones técnicas de los semáforos y sus características se incluyen en el Anexo A.1.

2.4. Casos de estudios relevantes: Experiencias internacionales

La onda verde ciclista es una estrategia que se ha implementado en diversas ciudades del mundo, si bien en cada lugar no se tuvieron las mismas consideraciones, el objetivo es otorgar un grado de importancia al tráfico de bicicletas a través de medidas que permiten a los ciclistas a travasar luces verdes consecutivas en un corredor determinado, con el fin de disminuir la demora y las paradas a lo largo del tramo intervenido.

La primera ola verde se desarrolló en Odense, Dinamarca, donde se desarrolló un corredor para bicicletas acompañado de postes bajos con luces verdes intermitentes instaladas entre dos intersecciones. Estas luces se encienden progresivamente en función del tiempo semafórico, indicando al ciclista como avanzar para mantener la velocidad necesaria para llegar a la siguiente intersección semafórica en luz verde (Andersen, 2013)

Posteriormente, en 2006 se realizó una ola verde para ciclistas a mayor escala, en Copenhague. Esta estrategia abarco a 12 intersecciones semaforizadas en un tramo de 2 km, sincronizadas de forma que los ciclistas que circulan a velocidad constante determinada encontraran siempre luz verde en su trayecto hacia el centro de la ciudad. Los tiempos fueron programados en función del sentido predominante de flujo (ida o regreso), y los resultados demostraron una reducción en el número de paradas y un incremento en la velocidad promedio del flujo ciclista. (Hoegh, 2007).

En Ámsterdam se implementó una onda ciclista para la velocidad objetivo de 18 km/h, en un tramo de 500 metros que incluyo 11 semáforos sincronizados en ambos sentidos. Si bien esta medida favoreció la continuidad del flujo ciclista, se evidencio que el tráfico vehicular experimento perdida de prioridad, lo que redujo su eficiencia en ese tramo. (Ámsterdam, 2007).

En 2009 en la calle Valencia de San Francisco se inició un piloto temporal, con el objetivo de priorizar el tráfico de bicicletas. La sincronización permitió a los usuarios mantener una velocidad constante para atravesar 10 intersecciones consecutivas de luz verde, funcionando en ambos sentidos de la vía. (Bialick, 2011)

En Rotterdam se diseñó un sistema Evergreen, que consta de luces LED cada 5 m, a lo largo de un corredor. Estas luces se encienden progresivamente desde un punto antes del cruce, de modo que, si el ciclista permanece dentro del bloque verde, su paso por el semáforo está garantizado sin detención.

En la ciudad Graz, Austria, se implementó una variante de onda verde, donde los semáforos permanecen en verde para los ciclistas y peatones de forma predeterminada, y solo cambian a favor del flujo motorizado cuando se detecta su presencia mediante bucles inductivos. Esta estrategia prioriza de forma estructural a los modos no motorizados.

Estas experiencias demuestran que, si bien la implementación de ondas verdes ciclistas puede implicar ajustes de prioridad modal, su efecto en términos de fluidez, eficiencia y comodidad para los ciclistas es altamente positivo. Además, reflejan formas tecnológicas y de programaciones para lograr el mismo objetivo: una movilidad ciclista más fluida, segura y priorizada.

Tabla 2.1: Tabla resumen de experiencias internacionales de “Onda Verde Ciclista”.

Ciudad	País	Longitud/ semáforos	Velocidad objetivo	Tecnología/ características	Resultado clave
Odense	Dinamarca	Entre 2 intersecciones	s.i	Iluminación en postes, guía progresiva	Guiar a ciclista para llegar en verde
Copenhague	Dinamarca	2 km / 12 semáforos	20 km/h	s.i	s.i
Ámsterdam	Países bajos	500 m / 11 semáforos	18 km/h	Coordinación fija a velocidad representativa	Flujo ciclista continuo. Flujo motorizado más lento
San Francisco	EE. UU	10 semáforos	s.i	Sincronización tradicional bidireccional	Prioridad ciclista, ambos sentidos con más fluides.
Rotterdam	Países bajos	s.i	Guía Visual	Sistema EverGreen LED	Paso en verde si se mantiene en bloque
Graz	Austria	Semáforo individual	s.i	Prioridad verde para modo activo y actuado por inducción para vehículos	Prioridad ciclista

*s.i: sin información.

2.5. Revisión de normativa y documentos técnicos

En Chile, el marco normativo y técnico vinculado a la movilidad ciclista ha evolucionado en los últimos años para dar respuesta al crecimiento del uso de la bicicleta como modo de transporte urbano. Esta revisión se centra en identificar los principales documentos que sustentan la planificación, diseño y operación de la infraestructura ciclista, con énfasis en, aquellos que entregan criterios técnicos aplicables a la gestión semafórica adaptada al modo ciclista.

Leyes y reglamentos generales:

- Ley de convivencia de Modos, ley N.º 21088 (2018)

Modifica la ley de tránsito N.º 18290, incorporando principios de equidad modal, respeto mutuo entre usuarios y seguridad vial. Reduce la velocidad máxima urbana a 50 km/h, y obliga a mantener una distancia lateral mínima de 1.5 m al adelantar ciclistas.

Además de la legislación, existen diversas guías, manuales y estrategias nacionales que abordan el desarrollo de infraestructura ciclista, convivencia modal, semaforización entre otros ítems. A modo general, a continuación, se presentan los más importantes

- Guías de diseño vial ciclo-inclusivo (SECTRA, Guía diseño vial ciclo-inclusivo, 2024)
- Guía de composición y diseño operacional de ciclovías (SECTRA, 2019)
- Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (MTT, 2021)
- Manual de señalización del tránsito (capítulo 6) (CONASET, 2020)

En estos documentos se establecen las condiciones básicas para una circulación segura de ciclistas, se promueve la integración de infraestructura adecuada para este modo de transporte, además se regula el uso de semáforos y señaléticas para los modos de transporte.

Con el objetivo de sustentar técnicamente el diagnóstico de la red ciclo-vial urbana y los criterios aplicados para la selección de corredores, se realizó un levantamiento bibliográfico y documental basado en fuentes académicas, normativas y técnicas. Esta revisión incluyó documentos emitidos por organismos nacionales como la UOCT, el MTT, así como guías metodológicas internacionales como las desarrolladas por la federal highway administration (FHWA).

El análisis se centró en tres ejes principales:

- (1) Diseño y operación de ciclovías,
- (2) Estrategias de sincronización semafórica, y
- (3) parámetros de evaluación del flujo ciclista.

Este levantamiento permitió definir los fundamentos conceptuales para la selección de tramos, los criterios de descarte técnico y la estructura de evaluación de desempeño de la estrategia de onda verde. Los documentos consultados presentan lineamientos claves para la sincronización semafórica, consideraciones de las particularidades del desplazamiento ciclista en entorno urbano.

- Velocidad de desplazamiento

La guía NACTO recomienda adaptar los parámetros semafóricos a las velocidades operacionales del entorno urbano, proponiendo una velocidad objetivo entre 16 – 29 km/h para estrategias de coordinación tipo onda verde. Por su parte, el manual CROW propone una velocidad ciclista normalizada entre 15 – 20 km/h, ajustada según factores como la duración del esfuerzo, la resistencia total enfrentada, el motivo de viaje y las condiciones geométricas del entorno. Adicionalmente destaca una aceleración más baja en ciclista que móviles motorizados, lo cual debe ser considerado para diseñar cruces y desfases.

- Duración de fases semafóricas

NACTO recomienda una duración mínima de luz verde de 12 s y máxima de 25 s, junto con un intervalo mínimo de rojo-rojo de 2 s. Asimismo, se señala la importancia de diferenciar el inicio del verde para permitir maniobras de viraje seguras y evitar conflictos con otros modos. Por otro lado, CROW advierte sobre el impacto negativo de fases demasiado largas para los ciclistas, especialmente cuando deben detenerse. Recomendamos evitar ciclos más largos de 120 s y optar por fases cortas y amigables con la dinámica ciclista, especialmente en entornos urbanos. Según

FHWA la longitud del ciclo debe ser la misma para las intersecciones del plan de coordinación, para tener una relación coherente basada en el tiempo.

- Separación entre intersecciones

El manual CROW, indica que cuando las intersecciones se encuentran cercanas aproximadamente entre 100 y 250 m de distancia, es recomendable aplicar estrategias de sincronización cuando el flujo por la arteria sea estable y se vea favorecido. En caso de intersecciones más distanciadas, se sugiere complementar con otras medidas estructurales o de gestión para mantener condiciones de desplazamiento fluido.

- Probabilidad de detención e impacto en la experiencia ciclista

CROW introduce el concepto de probabilidad de detención, definida como la relación entre la duración de la luz roja y el ciclo total del semáforo. Este indicador permite estimar la frecuencia con la que un ciclista deberá detenerse ante una señal, y se puede combinar con el tiempo de espera para obtener índice de detención. Este índice permite clasificar la experiencia del usuario:

- Valor entre 15 y 20 s se consideran buenos para entornos urbanos
- Valor de 90 s límite máximo aceptable en situaciones excepcionales

La acumulación de detenciones frecuentes se traduce en pérdida de energía muscular, incomodidad y reducción de la eficiencia del viaje. Por lo tanto, se sugiere priorizar esquemas de control que reduzcan la probabilidad de detención y acorten el tiempo de espera, especialmente en corredores con alta presencia ciclista.

- Probabilidad de detención y eficiencia energética

El manual CROW introduce el concepto de infraestructura ciclo amistosa, que debe minimizar la pérdida de energía provocada por:

- Fricción de rodadura
- Resistencia aerodinámica
- Aceleraciones y frenadas
- Vibraciones del pavimento, y
- Pendiente en el trazado

Se enfatiza que estas resistencias deben ser vencidas por el esfuerzo muscular del usuario, por lo que cada diseño debe buscar reducir las cargas al máximo para fomentar un desplazamiento cómodo, eficiente y sin altas pérdidas de energía.

2.6. Criterios técnicos para sincronización semafórica ciclista

La sincronización semafórica orientada a bicicletas debe considerar parámetros técnicos que aseguren la fluidez, continuidad y seguridad de los usuarios. Estos parámetros mencionados deben ser coherentes con la normativa vigente y adaptados al contexto urbano local. Diversos manuales técnicos internacionales como los desarrollados por NACTO y CROW, recomiendan que las velocidades de sincronización semafórica para ciclistas se sitúen en un rango entre 15 y 25 km/h, dependiendo del entorno urbano, la tipología de la ciclovía y el comportamiento real de los usuarios. Así mismo, se ha documentado que la distancia entre intersecciones semaforizadas cumple un rol determinante en la efectividad de la estrategia, siendo efectiva cuando se ubica entre

los 100 y 250 metros, ya que ello permite establecer desfases coordinados que faciliten trayectos continuos a velocidad constante.

El tiempo de ciclo semafórico debe armonizarse con el flujo vehicular y peatonal, situándose entre 40 y 120 segundos como indica el Manual de Señalización del Tránsito. Estos criterios, junto a la observación de flujos ciclistas sostenidos serán la base para evaluar la factibilidad de implementación en el corredor de estudio.

2.7. Herramientas de análisis

2.7.1. Diagrama espacio – tiempo: construcción e interpretación

Una de las herramientas utilizadas en el análisis de coordinación de señales de tránsito es el diagrama espacio tiempo, instrumento grafico que permite visualizar la relación entre el tiempo de operación de los semáforos y la distancia entre intersecciones a lo largo de un eje vial determinado (FHWA, 2013). Este tipo de representación es fundamental para evaluar la viabilidad de estrategias como la sincronización semafórica adaptada a velocidades ciclistas, comúnmente denominada onda verde ciclista.

Este método facilita el análisis de la coordinación semafórica, permitiendo evaluar la viabilidad de estrategias como la onda verde ciclista. La efectividad de la sincronización se justifica mediante la proximidad entre intersecciones y la relación entre los volúmenes de tráfico en cada tramo. Cuando los flujos son significativos y presentan patrones predecibles, la optimización geométrica de los ciclos semafóricos puede mejorar la operatividad del sistema, reduciendo tiempos de espera, número de paradas y mejorando la fluidez del tráfico.

A) Fundamento conceptual

El diagrama modela el desplazamiento de un usuario (vehículo motorizado, bicicleta o peatón) en función del tiempo y el espacio. En este sistema de coordenadas, se tiene:

- El eje horizontal x representa el tiempo en segundos
- El eje vertical y representa la distancia acumulada entre intersección es en metros.

La Figura 2.4 muestra cómo se representa un diagrama de espacio tiempo para intersecciones coordinadas.

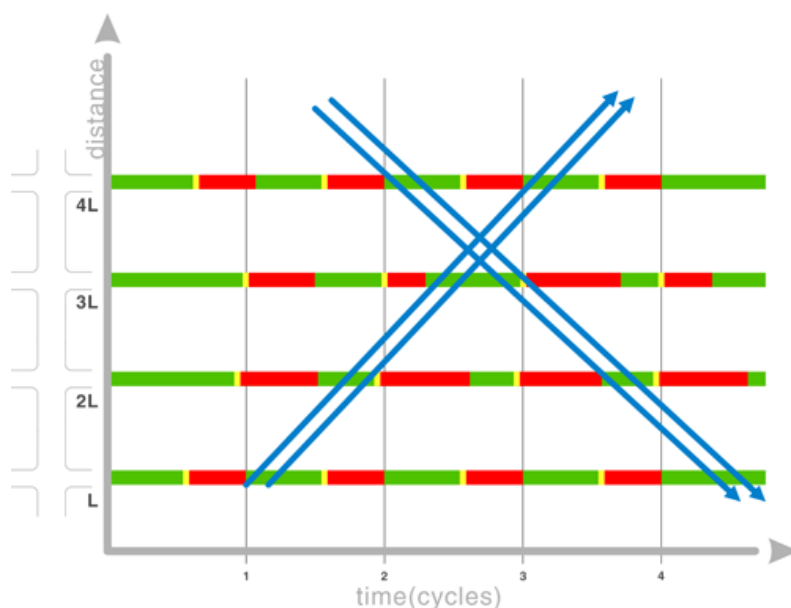


Figura 2.4: Diagrama espacio tiempo para cuatro intersecciones sincronizadas (FHWA, 2013).

Las líneas trazadas sobre el plano representan el movimiento del usuario a velocidad constante, como se muestra en Figura 2.4. La pendiente de dicha línea es inversamente proporcional a la velocidad del desplazamiento. Este enfoque permite identificar si un usuario puede atravesar sucesivas intersecciones sin detenerse, en función de la programación de semáforos.

B) Metodología de construcción

Para elaborar un diagrama de este tipo se requieren los siguientes insumos técnicos:

- Geometría del cruce: Longitud entre cruces, sentido de flujo.
- Datos de programación semafórica: tiempos de ciclo, fases verdes y rojas, desfases entre intersecciones.
- Velocidad objetivo de coordinación.
- Horizonte de análisis.

Con estos datos se trazan las ventanas de paso o fases verdes de cada intersección, proyectadas en su ubicación correspondiente. Posteriormente se superponen las trayectorias de desplazamiento estimadas, evaluando su coincidencia o no con los tiempos de paso permitidos.

C) Interpretación de resultados

El análisis del diagrama permite:

- Determinar si un ciclista puede mantener una velocidad sin detenerse.
- Identificar puntos críticos donde ocurren paradas forzadas o pérdidas de continuidad.
- Evaluar la eficiencia del sistema semafórico antes distintas velocidades de operación.
- Diagnosticar la necesidad de ajustes en desfases, tiempos de verde o distribución de fases.

La continuidad de las trayectorias a lo largo de múltiples intersecciones sugiere una coordinación efectiva. En contraste, líneas que interceptan repetidamente zonas de luz roja indican falta de sincronismo o velocidad objetivo mal definida.

Finalmente, este tipo de diagrama es útil en contextos urbanos de densidad media como Temuco, ya que permiten adaptar la programación semafórica a velocidades ciclistas reales y garantizar trayectos fluidos según lo establecido en el manual de carreteras y las recomendaciones de la UOCT, las velocidades sugeridas para coordinación ciclista se sitúan entre 15 a 25 km/h, mientras que las distancias optimas entre cruces para una sincronización efectiva oscila entre 100 a 250 metros. Estos valores, junto con los datos observados de velocidad y flujo, permiten diseñar una estrategia que reduzca los tiempos de espera, aumente la seguridad vial y mejore la experiencia del usuario ciclista.

2.7.2. Implementación de la estrategia en Centrac: Parámetros y supuestos

La correcta implementación de estrategias de sincronización semafórica, como la onda verde ciclista, requiere un conocimiento preciso de las capacidades del sistema de control de tráfico empleado. En el caso de este estudio, se considera el software Centrac, utilizado por la unidad operativa de control del tránsito UOCT Araucanía, como plataforma para la programación y gestión de planes semafóricos.

a. Tipos de datos manejados por Centrac

El software funciona como un sistema centralizado de gestión de intersecciones semaforizadas, el cual se basa en el tratamiento de datos de entrada para activar comandos que modulan los tiempos de ciclo, fases y desfases, y genera datos de salida que reflejan el estado actual y el desempeño de la red.

- Datos de entrada: Los datos que Centrac requiere para su operación pueden clasificarse en
 - Datos estáticos
 - ✓ Topología de la red (intersecciones, conectividad vial)
 - ✓ Configuración de grupos semafóricos y fases
 - ✓ Planes de tiempo predefinidos por horario o condición climática
 - ✓ Parámetros de coordinación como offsets y ciclo
 - Datos dinámicos
 - ✓ Volúmenes de tráfico
 - ✓ Tiempos de ocupación y colas
 - ✓ Información de incidentes o congestión

En el caso particular de la UOCT Araucanía la licencia Centrac no contempla capacidades adaptativas, por lo tanto, el sistema trabaja exclusivamente con planes fijos preprogramados por horario.

- Datos de salida: Centrac genera múltiples tipos de datos de salida, útiles para el análisis de desempeño y planificación.
 - Estado en tiempo de real de los controladores
 - Registro de ejecución de planes y cambios de fases
 - Reporte de comunicación como conexión o desconexión
 - Alerta de fallos
 - Datos exportables sobre ejecución de ciclos, tiempos de verde y desfases.

Estos datos son esenciales para evaluar y verificar el comportamiento del sistema y para validar mediante simulación o monitoreo, el efecto de una estrategia como la sincronización ciclista.

b. Relevancia de los datos en la estrategia de control

Al diseñar una estrategia como la onda verde ciclista, es fundamental conocer que datos de entrada acepta en sistema para generar o modificar planes de control, así como que datos puede entregar para evaluar los resultados.

En particular, para una estrategia de coordinación semafórica para ciclistas, con Centracs operando en modo fijo, se consideran como insumos claves:

- Velocidad objetivo del flujo ciclista (para definir desfases)
- Distancia entre intersecciones (para calcular desfases de ciclos)
- Horarios de mayor demanda ciclista (para establecer planes prioritarios)
- Tiempos de ciclos compatibles con velocidades bajas.

Y como salidas relevantes:

- Verificación de ejecución de los desfases programados
- Validación de tiempos de paso y retardo por intersección
- Identificación de puntos con desincronización o acumulación

c. Limitaciones actuales de la operación

La implementación de estrategias avanzadas, como la gestión dinámica del verde según demanda ciclista, requiere licencias más avanzadas de software o módulos de control adaptativo. En la situación actual, la operación con planes fijos limita la posibilidad de:

- Ajustar en tiempo real los ciclos semafóricos en función del flujo ciclista
- Priorizar dinámicamente a bicicletas en cruces
- Responde a variaciones horarias no contempladas en planes predefinidos

Por ello, la estrategia de onda verde propuesta se basa exclusivamente en la programación y coordinación estática de semáforos, compatible con la versión implementada en la UOCT Araucanía.

CAPÍTULO 3

Metodología

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se detallan los recursos, técnicas y procedimientos a utilizar en la investigación.

3.1. Diseño general de la investigación y tipo de estudio

La presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo con carácter descriptivo diagnóstico, que busca recopilar, analizar y representar datos medibles relacionados con las condiciones del entorno vial, el comportamiento ciclista y los parámetros operacionales del sistema semafórico en corredores urbanos seleccionados de Temuco. Este enfoque permite evaluar la factibilidad técnica de implementar una estrategia de sincronización semafórica adaptada a la velocidad promedio de desplazamiento de los ciclistas con base en evidencia empírica. El estudio se estructura en una secuencia de etapas metodológicas que permiten avanzar de forma lógica desde el análisis del contexto hasta la validación de la estrategia implementada. Estas etapas son:

1. Revisión normativa y técnica: Se realiza un levantamiento de antecedentes legales, normativos y técnicos relacionados con la operación semafórica, la gestión de tránsito ciclista y el uso del software Centrac. Esta etapa establece los marcos de referencia y las restricciones del sistema actual en la UOCT Araucanía.
2. Selección de corredores ciclistas candidatos: Se identifica y selecciona una ciclovía que cumpla ciertas condiciones mínimas de continuidad, infraestructura y presencia de intersecciones semaforizadas, consideradas aptas para la implementación de una onda verde ciclista.
3. Diagnóstico en terreno: se realiza un reconocimiento físico de las ciclovías seleccionadas, incluyendo levantamiento geométrico, ubicación de semáforos y cámaras de UOCT, conectividad vial y puntos de conflicto.
4. Recolección y análisis de datos de aforo: se procesan registros de contadores automáticos de bicicletas o conteo manual a partir de videos con el fin de caracterizar la demanda ciclista por sentido y franja horaria. Estos datos son fundamentales para definir horarios prioritarios de operación.
5. Implementación: Se aplica la estrategia de sincronización semafórica utilizando el entorno de programación del software Centrac, con el objetivo de facilitar el desplazamiento fluido de ciclistas a lo largo de un corredor determinado. En esta etapa la coordinación se diseña a partir del análisis de un diagrama espacio tiempo, considerando una velocidad de circulación ciclista previamente definida y ajustando únicamente el inicio de verde mediante un desfase relacionado con la distancia entre intersecciones y la velocidad.
6. Evaluación de la estrategia: Una vez implementada la OVC, se evalúa su desempeño en términos de eficiencia y efectividad para el modo ciclista. La evaluación se realiza mediante comparación de escenario actual vs escenario con onda verde, midiendo indicadores como: detenciones, tiempo de viaje y comportamiento de los ciclistas frente a los ciclos semafóricos. Los datos se obtienen a partir de grabaciones y pruebas piloto en terreno.

La metodología se centra en el tratamiento de datos provenientes de fuentes primarias: como son las mediciones en terreno, grabaciones de video, registros GPS y de fuentes secundarias: como contadores automáticos y documentos normativos. Estos datos permiten construir una base de criterios técnicos que sustentan la propuesta de sincronización. Además, se considera la validación de la propuesta a través de la implementación de esta y una posterior medición de indicadores cuantificables, como paradas y demoras. Finalmente se realiza un análisis comparativo de los escenarios actual y el propuesto con la estrategia planteada e implementada en el tramo seleccionado. El enfoque diagnóstico permite reconocer patrones operativos actuales, limitaciones y oportunidades de mejora, mientras que el componente descriptivo facilita caracterizar los elementos claves del corredor y del sistema ciclista en función de parámetros relevantes para la estrategia.

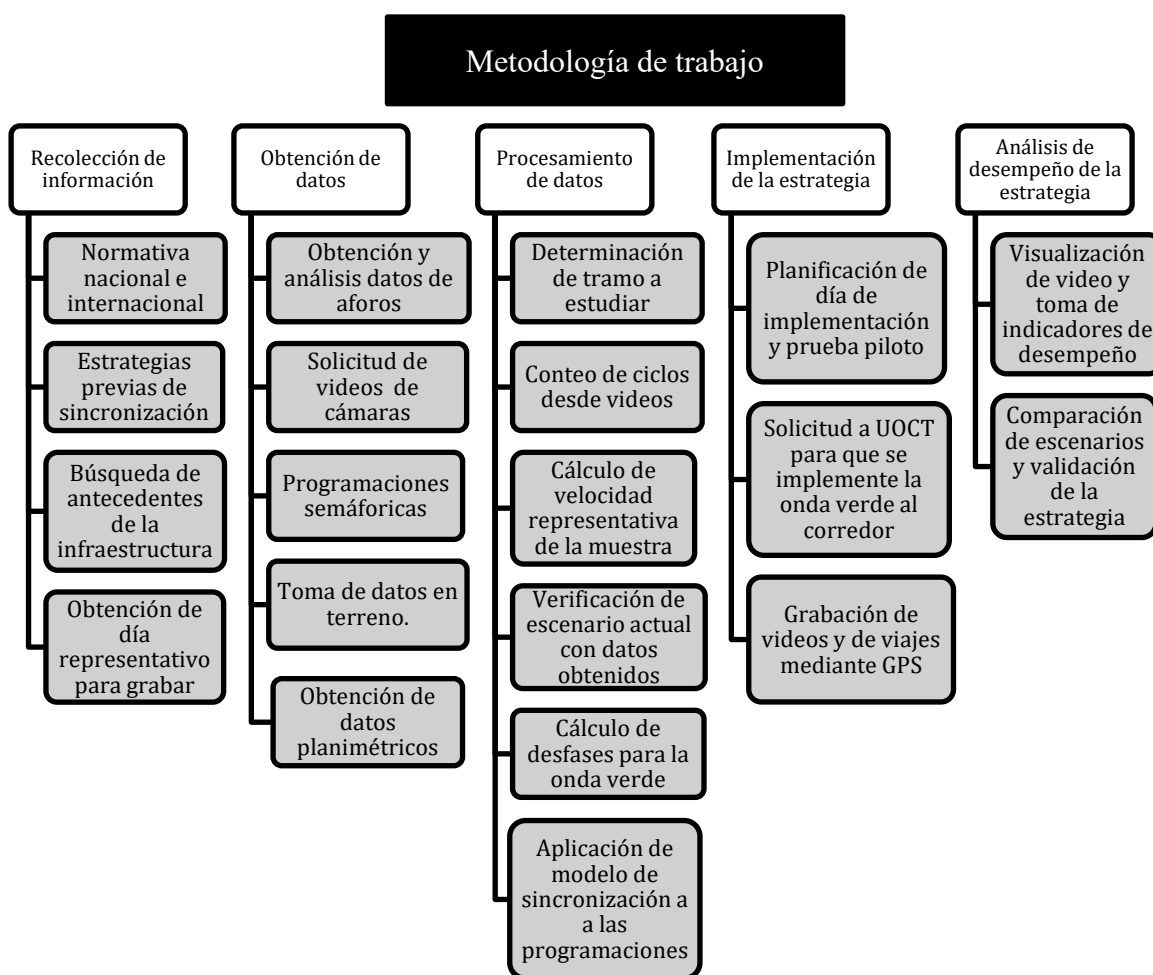


Figura 3.1: Diagrama de la metodología empleada.

3.2. Variables consideradas y delimitación del estudio

La investigación se aplicará a un tramo urbano del centro de Temuco, donde se definen un conjunto de variables claves que permiten caracterizar la demanda y las condiciones operativas de los corredores.

Las variables por considerar son las siguientes:

- Flujo de ciclos (ciclos/hora): Numero de ciclos que atraviesan una sección durante un periodo de tiempo determinando. Se emplea para caracterizar la intensidad del uso de la infraestructura ciclista.
- Velocidad promedio directa de circulación (m/s): velocidad media observada en el tramo definido sin interferencia de las detenciones, se utiliza como parámetro base para el diseño de la onda verde.
- Numero de paradas: cantidad de veces que un ciclista debe detenerse debido a un semáforo en rojo a lo largo del tramo.
- Distancia entre intersecciones (m): Distancia que hay entre intersecciones semaforizadas, con semáforos ciclistas, información clave para calcular desfases entre ciclos semafóricos.
- Configuración de los ciclos semafóricos actuales (s): duración total de ciclo, tiempos de verde y rojo. Utilizados para ver compatibilidad de sincronización.

El análisis se planifica en la franja horaria de mayor uso ciclista, determinada a partir de aforos y del análisis del perfil horario, priorizando condiciones de operación representativas, es decir, sin presencia de eventos anómalos y en días hábiles con condiciones climáticas normales. No obstante, la implementación de la estrategia debe coordinarse con los lineamientos establecidos por la UOCT, que busca resguardar el funcionamiento del sistema semafórico centralizado y evitar impactos negativos relevantes sobre el flujo motorizado. En este sentido, la elección de un horario punta vehicular no resulta pertinente, ya que incrementa la interferencia entre la demanda de los distintos modos y dificulta la evaluación del efecto ciclista. Adicionalmente el estudio presenta ciertas limitaciones, tales como:

- **Ámbito espacial:** El estudio se concentra en un corredor urbano de la ciudad de Temuco, seleccionado a partir de un análisis multicriterio aplicado a la red de ciclovías existentes. Se da prioridad a tramos uniformes con más de 3 intersecciones semaforizadas conectadas a la UOCT.
- **Ámbito temporal:** La recolección de datos y análisis se concentra en días laborales, es decir martes a jueves, excluyendo feriados o eventos anómalos y en horarios de alta demanda de este modo de transporte, lo cual se determina previamente mediante el análisis de aforos de contadores.
- **Ámbito climático:** Se considera el clima templado lluvioso con influencia mediterránea propio de Temuco (PRC), para evitar sesgo asociado a la disminución del uso de la bicicleta en días con precipitaciones intensas, los datos recopilados para el análisis deben corresponder a jornadas con condiciones meteorológicas normales para la zona de estudio. Se consultará el registro meteorológico para excluir días atípicos, las condiciones climáticas a considerar se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Condiciones climáticas óptimas para toma de datos.

Condición climática	Descripción	Se realiza toma de datos
Día seco	Sin precipitación, cielo despejado o nublado parcial	Si
Lluvia ligera	Precipitación menos a 1mm/h, sin afectar visibilidad	Si
Luvia moderada a intensa	Precipitación sostenida o superior a 2mm/h	No
Viento fuerte	Superior a 40 km/h	No
Temperatura extrema	Menor a 3°C	No
Evento climático excepcional	Tormenta, granizo o alerta meteorológica	No

3.3. Etapas del trabajo metodológico

El trabajo se desarrolló en las siguientes etapas

3.3.1. Levantamiento de criterios técnicos

Este apartado describe el proceso de recopilación y sistematización de criterios técnicos necesarios para evaluar la factibilidad de implementar una estrategia de sincronización semafórica orientada a bicicletas en un corredor urbano. El objetivo de este levantamiento es establecer parámetros objetivos y medibles que permitan, en primera etapa, identificar ciclovías candidatas donde exista probabilidad de poder implementar una onda verde ciclista. Y en segunda etapa, seleccionar los tramos óptimos dentro de dichas ciclovías, donde exista una mayor probabilidad técnica de sincronizar semáforos y justificar la cantidad considerada de estos.

Para esto, se consultó literatura especializada y documentos normativos nacionales e internacionales, tales como:

- Manual de ciclovías urbanas
- Manual de control de tránsito
- Design manual for bicycle traffic (CROW, 2011)
- Urban bikeway design guide (NACTO, 2024)

3.3.2. Diagnóstico de ciclovías existentes y selección de corredor

En esta sección se presenta la aplicación de los criterios técnicos definidos previamente, con el objetivo de identificar y seleccionar ciclovías, como también tramos específicos dentro del área urbana de Temuco que sean aptos para una estrategia de onda verde ciclista.

Los criterios establecidos fueron operacionalizados mediante una matriz comparativa, la cual asigna puntajes a cada ciclovía en función de diversas variables técnicas, tales como:

- Conectividad vial: Nivel de integración de la ciclovía con vías importantes o con infraestructura ciclista.
- Continuidad y linealidad: Grado de continuidad física y dirección uniforme del trazado, sin interrupciones ni desvíos significativos.
- Condiciones de operación semafórica: Existencia de intersecciones controladas por semáforos conectados al sistema de gestión centralizada gestionada por la UOCT.
- Demanda ciclista estimada: Flujo de usuarios observado o proyectado, según datos disponibles.

Además, de las ciclovías existentes se descartan aquellas que no cumplan ciertas condiciones mínimas de viabilidad, definidas como criterios de exclusión, aquellas que no cumplan con estos criterios serán descartadas del análisis, a saber:

- Cantidad mínima de semáforos conectados a UOCT

Toda ciclovía que no cuente con al menos tres intersecciones semaforizadas gestionadas por el Centrac de la UOCT será excluida del estudio, debido a la insuficiente capacidad de intervención mediante la estrategia.

- Tramos extensos sin control semafórico

Se descartan aquellas ciclovías que presentan segmentos continuos superiores a 500m sin presencia de semáforos, ya que ello limita la posibilidad de coordinación temporal y reduce la eficacia del sistema.

- Geometría heterogénea o discontinua

Ciclovías que presentan una trazabilidad irregular, con cambios abruptos en el alineamiento, discontinuidades o desvíos significativos, también serán excluidas por comprometer la aplicación eficiente de una onda verde ciclista.

Finalmente, tras la aplicación de este procedimiento, se identifica un corredor prioritario que cumple con los requisitos técnicos y operacionales para ser considerado caso de estudio. Este corredor presenta una alta conectividad vial, buena continuidad geométrica y una adecuada densidad ciclista en las intersecciones semaforizadas, lo que permite su intervención efectiva a través del sistema de gestión.

Estructura del diagnóstico:

Para estructurar el diagnóstico se desarrollaron distintos insumos metodológicos que permiten evaluar y comparar las ciclovías de forma objetiva. En primer lugar, se elaboró una Matriz de comparación multicriterio, construida en base a atributos técnicos previamente definidos. Cada criterio fue escalado de acuerdo con los rangos y valores asignados, tal como se presenta en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2: Escala de criterios seleccionados.

Criterio	Rango	Valor
Cámaras en eje o cerca (1 cuadra)	Mayor igual a 2	3
	1 cámara	2
	0 cámara	1
Numero de Semáforos integrados	Mayor igual a 8	3
	Entre 5 y 8	2
	Menor igual a 5	1
Flujo	Mayor a 500 cic/día	3
	Menor a 500 cic/día	2
	Sin datos	1
Coeficiente de variación	Menor o igual a 15	3
	Entre 16 y 36	2
	Mayor a 36	1
Distancia máxima entre cámaras	Solo hay 1	1
	≥ 530	2
	< 530	3
Continuidad de la estructura	+1 discontinuidad	1
	1 discontinuidad	2
	Sin discontinuidad	3

En el caso del coeficiente de variación de distancia entre semáforos, el valor no se obtiene de manera directa, sino que requiere un cálculo previo. Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Para cada ciclovía seleccionada se obtienen las distancias entre semáforos consecutivos que presenta.
2. Se calcula la media ($\bar{x}$) y desviación estándar (σ) de los valores obtenidos de distancias de separación.
3. Se determina el coeficiente de variación (CV) aplicando la siguiente formula:

$$CV = \frac{\bar{x}}{\sigma} * 100$$

Ecuación 3-1

4. El resultado de este cálculo es el que posteriormente se clasifica con los valores presentados en la Tabla 3.2 para asignar el puntaje correspondiente.

Luego, se realiza la asignación de puntajes y cálculo de suma ponderada, lo cual permite determinar el grado de prioridad de cada corredor ciclista para su selección final. Los criterios considerados y sus ponderaciones son los siguientes:

Tabla 3.3: Criterios considerados y sus ponderaciones.

Ciclovía	Cámaras [n°]	Máx distancia cámaras [m]	Cruces integrados [n°]	Coefficiente de variación de Distancia entre cruces	Flujo ciclista estimado [cic/día]	Continuidad	Total ponderado
Ponderador	17%	17%	18%	18%	15%	15%	100%

El puntaje total de cada ciclovía se calcula mediante la siguiente formula:

$$Puntaje\ total = \sum_{i=1}^n (Puntaje_i \times Peso_i)$$

Ecuación 3-2

Finalmente, se selecciona como corredor ciclista prioritario la ciclovía que obtiene el mayor puntaje ponderado.

3.3.3. Caracterización del corredor seleccionado

Una vez definido el corredor a estudiar, se procede a caracterizar detalladamente sus condiciones físicas y operativas, para orientar la propuesta a la realidad del entorno urbano. Esta caracterización se estructura en los siguientes ejes:

- Medición de distancias entre intersecciones: se miden las longitudes entre intersecciones semaforizadas, desde la línea de detención previa al cruce de calzada hasta la línea de detención correspondiente en la siguiente intersección, considerando solo tramos con semáforos. Esta información es útil para ajustar los desfases de los ciclos semafóricos.
- Identificación de equipamiento e infraestructura asociada: para cada corredor se identificó la presencia y ubicación de elementos como: Cámaras de monitoreo UOCT, semáforos vehiculares y ciclistas.
- Elementos de señalización vial e infraestructura ciclista: Se identificó la señalización vertical y horizontal orientada a la seguridad ciclista, así como también la infraestructura presente y el estado de funcionamiento de esta.

Esta información permite determinar el nivel de control operativo disponible y los recursos tecnológicos con los que se cuenta para ejecutar una estrategia de sincronización.

3.3.4. Levantamiento y análisis del flujo ciclistas en el tramo 2

- Contador

Este apartado describe el tratamiento de datos obtenidos desde un contador automático de ciclistas ubicado en Temuco, específicamente en la intersección de Avenida San Martín con Vicuña Mackenna. La información fue solicitada vía ley de transparencia y proporcionada en formato Excel con resolución horaria.

El análisis de datos de flujo ciclista tuvo como objetivo identificar los horarios y tramos de mayor demanda, a fin de definir los períodos prioritarios para la implementación de onda verde ciclista. Se seleccionaron días representativos (martes a jueves, sin feriados) durante los meses de mayo y junio, coincidentes con el levantamiento audiovisual y observación en terreno. Se calculan indicadores de variación horaria del flujo, lo que permite detectar las horas de mayor concentración de usuarios. Esta información constituye la base técnica para seleccionar los horarios de intervención y evaluar posteriormente el impacto de la estrategia de sincronización semafórica.

- Videos

A partir de los videos recopilados se definen puntos de control coincidentes con las intersecciones semaforizadas del tramo. En dichos puntos se efectuó un conteo manual de ciclistas, desagregando la información por sentido de circulación y por periodo horario. Para la toma de videos se seleccionan periodos representativos seleccionados anteriormente mediante el análisis de los datos del contador. Los conteos se sistematizan en planillas de registro y posteriormente se grafican con el fin de determinar posibles pérdidas de flujo entre las intersecciones mediante las variaciones intra-tramo. Con ello es posible contrastar la uniformidad de los volúmenes del corredor y evaluar la estabilidad del flujo ciclista bajo las condiciones normales de operación.

3.3.5. Obtención y análisis de datos de medios audiovisuales

Este apartado describe el proceso de recopilación, tratamiento y análisis de registros audiovisuales utilizados para caracterizar la dinámica del flujo ciclista en el corredor seleccionado. El objetivo principal es obtener datos empíricos que permitan cuantificar variables fundamentales para la planificación de una estrategia de onda verde, tales como el flujo por intersección, la velocidad promedio de circulación, la formación de pelotones y el comportamiento frente a los ciclos semafóricos. Para ello se utilizaron cámaras instaladas en puntos estratégicos del corredor, que tengan visibilidad de las intersecciones y que sean propiedad de la UOCT, o en caso de ser privada solicitar por medio de carta formal la solicitud de datos para fines académicos. Los horarios seleccionados para las grabaciones fueron definidos previamente a partir del análisis del contador automático, este análisis arroja los periodos de estudio. Los puntos de control audiovisual se ubican en los puntos mostrados en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Puntos de toma de datos audiovisuales.

Ciclovía	San Martín (SM)
Intersección	SM - Av. Caupolicán SM - Las Heras B. O'Higgins - AP

A partir del material recolectado, se extrae información mediante hojas de cálculo, registrando número de ciclistas por tiempo, el tiempo de paso por puntos de referencia, tiempos de espera frente a semáforos, trayectorias de circulación y posibles comportamientos en intersecciones. Adicionalmente estos datos permiten el cálculo de la velocidad promedio en terreno, analizar

indicadores de permanencia y dispersión de flujo entre tramos consecutivos, con el fin de validar tramos más adecuados para la implementación.

3.3.6. Medición de la velocidad ciclista

La velocidad promedio de desplazamiento es un parámetro clave para el diseño de estrategias de sincronización semafórica adaptadas al modo ciclista. Este apartado describe el procedimiento a utilizar para obtener velocidades empíricas en terreno, detallando el diseño metodológico, los criterios de medición, el tratamiento de datos y el cálculo del valor representativo que se utilizara en los modelos de onda verde. El objetivo principal es determinar la velocidad efectiva de circulación, es decir, la velocidad en movimiento de los ciclistas, excluyendo detenciones en semáforos o interferencias externas, con el fin de construir diagramas espacio-tiempo realistas y ajustar los desfases semafóricos de acuerdo con el comportamiento real del flujo. La representatividad de la velocidad promedio de circulación resulta esencial para asegurar que los modelos reflejen adecuadamente las dinámicas observadas en la ciclovía. Un valor mal estimado podría generar desfases poco útiles o ineficientes. Por tanto, se requiere un valor altamente representativo, que sea aprovechado por el mayor número de usuarios, para garantizar que la estrategia propuesta beneficie de manera efectiva la experiencia de desplazamiento de los ciclistas. En caso de que el valor definido no resulte suficientemente representativo del comportamiento real, es importante considerar que la velocidad ciclista es flujo libre ósea presenta una alta variabilidad, condicionada por factores como las capacidades físicas individuales, la motivación del viaje, el tipo de bicicleta utilizada, entre otros. Esta dispersión puede afectar la efectividad de la estrategia de sincronización si no se contempla adecuadamente. Por ello, se deben establecer mecanismos correctivos, tales como la redefinición del valor de velocidad mediante nuevas mediciones, o bien, acciones de información y difusión orientadas a los usuarios de la vía, comunicando de forma clara la existencia de una estrategia de onda verde y la velocidad de implementación esperada. Esta última medida puede fomentar una mayor alineación entre diseño semafórico y el comportamiento de los ciclistas, maximizando el aprovechamiento de la sincronización.

La metodología aplicada se basa en el análisis de registros audiovisuales obtenidos en terreno. En videos de resolución alta y buena visibilidad, se definen dos puntos de control ubicados antes del cruce, donde los ciclistas ya se desplazan a velocidad estable. Se registra el tiempo exacto en que cada ciclista cruza ambos puntos, y se calcula el tiempo transcurrido entre ellos. Luego a través de herramientas de georeferenciación de Google Earth, se ubican los puntos ya mencionados y se mide la distancia entre ellos. Con esta información, se obtiene la velocidad individual de cada ciclista mediante la formula básica de distancia dividida en tiempo.

Este procedimiento se aplica sobre registros válidos de ciclistas, excluyendo valores atípicos. A partir de estos datos se calculan medidas representativas de velocidad, como la media y la mediana, obteniendo un valor representativo de referencia que fundamenta el diseño de la onda verde ciclista.

3.3.7. Ajuste del tramo de análisis

La delimitación inicial del área de estudio considera el tramo entre Caupolicán y Arturo Prat, con una amplia extensión y presencia de múltiples intersecciones semaforizadas. No obstante, durante el desarrollo del proyecto se identificaron limitaciones prácticas que condicionan la factibilidad de trabajar sobre toda la extensión definida. Entre estas se encuentra la baja densidad de cámaras de monitoreo disponibles, la disposición no uniforme de semáforos y la existencia de intersecciones

críticas de alto impacto en la red vial, como el cruce Caupolicán-San Martín, cuya programación no puede ser modificada sin afectar el flujo vehicular prioritario. Adicionalmente, si existen tramos que presentan distintas densidades semafóricas y alguno de ellos presenta distancias superiores a 200 m, presenta una limitación que dificulta una velocidad de progresión estable debido a la distancia del recorrido y a las interferencias a las que se ve expuesto el flujo entre esas intersecciones semaforizadas consecutivas. Estas condiciones obligan a replantear la delimitación original con el fin de garantizar un análisis riguroso y factible dentro de los recursos disponibles. En consecuencia, debe ajustarse el tramo a un subtramo que presenta mayor homogeneidad en la distribución de semáforos y en las distancias entre estas intersecciones. Este ajuste permite concentrar el análisis a un sector operativo representativo, reduciendo la necesidad de intervenciones adicionales y asegurando la validez de los resultados a obtener.

3.4. Modelación y simulación

3.4.1. Aplicación del modelo de sincronización

En el contexto de planificación urbana y movilidad sustentable, la coordinación semafórica se plantea como una herramienta clave para mejorar la eficiencia del tránsito y promover modos activos de transporte. Tradicionalmente estos sistemas han sido diseñados para vehículos motorizados, priorizando la fluidez vehicular por sobre otros criterios. Sin embargo, en escenarios urbanos donde se busca fomentar el uso de la bicicleta, surge la necesidad de adaptar estas estrategias para facilitar desplazamientos más seguros y fluidos para ciclistas.

En esta etapa se implementará un modelo de sincronización semafórica enfocada en la circulación de ciclos, con el objetivo de generar una onda verde ciclista a velocidad constante a lo largo del corredor seleccionado. El propósito es facilitar desplazamientos continuos a una velocidad promedio constante definida para ciclistas, lo que permite reducir las detenciones en las intersecciones semaforizadas y en consecuencia el tiempo total de viaje. El modelo adoptado corresponde a una sincronización progresiva unidireccional basada en el desplazamiento uniforme, metodología comúnmente utilizada en ondas verdes vehiculares, en este trabajo este concepto se adaptará a las particularidades del modo ciclista. Se asume una coordinación lineal entre las intersecciones, permitiendo así estructurar una progresión semafórica acorde con la velocidad estimada para este tipo de usuario.

A) Variables de entrada

Los principales parámetros necesarios para el desarrollo del modelo se muestran en la Tabla 3.5 :

Tabla 3.5: Parámetros necesarios para desarrollar el modelo.

Parámetro	Descripción
Velocidad promedio directa de circulación	Obtenida a partir del levantamiento de datos en terreno, a través de videos y observación directa.
Distancia entre intersecciones	Medidas mediante herramientas de georreferenciamiento.
Tiempos de ciclo y fases actuales de los semáforos	Recopilados desde registros de la UOCT.
Desfase	Se calculan con datos empíricos obtenidos en terreno, para generar un desplazamiento continuo de ciclistas entre cruces.
Hora seleccionada	Obtenido de tratamiento de datos contadores y disponibilidad horaria de implementación en UOCT.

B) Herramientas de implementación

El modelo se desarrolla en hojas de cálculo y se visualiza mediante diagramas espacio-tiempo, el cual permitirá validar gráficamente la coherencia de la sincronización propuesta. La validación se completará con simulaciones y ajustes manuales. Para la aplicación del modelo se consideran los siguientes supuestos:

- Velocidad constante ciclista
- Corredor con geometría homogénea
- Inicio de desplazamiento con fase verde activa para el corredor.
- Circulación continua y estable durante la hora de análisis
- Se prioriza el sentido de mayor flujo, sin embargo, para implementación se consideran las limitaciones presentadas por UOCT, relacionadas a impacto vehicular en horas punta.

C) Cálculo de offset

A partir de los supuestos anteriores se calcula el tiempo de llegada a cada intersección y se ajustan los desfases para alinear los verdes según la velocidad calculada. Este proceso se formaliza mediante Ecuación 3-3 :

$$Desfase(i + 1) = Desfase(i) + \frac{d_i}{v}$$

Ecuación 3-3

Donde: d_i : distancia entre la intersección i e $i + 1$

v : velocidad objetivo en m/s

$Desfase(i)$: desfase entre punto de partida y intersección i

Este procedimiento se realiza para cada par de intersecciones consecutivas, de forma de ajustar las fases verdes según el paso esperado del grupo ciclista. Este cálculo permite determinar los tiempos de apertura de cada semáforo, considerando tolerancia según ancho de pelotón y variaciones en la velocidad. La programación final se valida mediante gráficos y análisis secuencial de tiempo de viaje.

D) Resultado esperado

El resultado de este proceso corresponde a una propuesta de programación semafórica ajustada mediante la modificación de desfases entre intersecciones, manteniendo constantes los tiempos de ciclo y fases existentes. Esta propuesta permite optimizar el paso ciclista a lo largo del tramo en estudio en el sentido seleccionado, facilitando desplazamientos continuos y reduciendo detenciones. La programación obtenida servirá de insumo base para una eventual implementación operativa o para su validación mediante simulación.

3.4.2. Simulación y análisis con diagrama espacio tiempo

Definidos los parámetros mediante el modelo propuesto en el ítem anterior, se procede a la validación preliminar de la estrategia a través del uso de diagramas espacio tiempo. Esta herramienta permite representar gráficamente la interacción entre el flujo ciclista y la programación semafórica, proporcionando una evaluación tanto cualitativa como cuantitativa de la estrategia propuesta.

El procedimiento seguido contempla lo siguiente:

- Representación gráfica del corredor: se modela el tramo seleccionado en un eje longitudinal (distancia), marcando las posiciones de las intersecciones semaforizadas y su respectiva distancia de separación.
- Construcción de las bandas de luz verde: utilizando los desfases calculados, se grafican las ventanas de paso verde para cada intersección en el eje temporal.
- Simulación de las trayectorias de los ciclistas: se incorporan trayectorias que representen la velocidad promedio de ciclistas calculada previamente.
- Comparación de escenarios: se contrastan al menos dos escenarios, uno correspondiente a la situación actual de programación y otro con la estrategia propuesta, evaluando visualmente mejoras en términos de continuidad del viaje, número de paradas y sincronía general.
- Identificación de ajustes necesarios: si el análisis evidencia desfases o situaciones de conflicto se revisan los parámetros del modelo y se ajustan.

El diagrama espacio tiempo se constituye así en una herramienta clave para la verificación gráfica y preliminar de la estrategia, antes de una posible simulación computacional o implementación en software Centrac de UOCT, permitiendo anticipar el desempeño de la estrategia y facilitar su comprensión.

3.5. Implementación y desempeño de la estrategia

La etapa final de esta investigación contempla la implementación piloto de la estrategia de onda verde y la evaluación de su desempeño operativo, con el objetivo de determinar su eficacia en la mejora del flujo ciclista y su impacto sobre el sistema de transporte urbano.

La implementación se realiza mediante la configuración de la estrategia en el sistema Centrac, a través de la UOCT. Esta integración permite programar los desfases semafóricos óptimos directamente en los controladores del corredor seleccionado, facilitando una validación en condiciones reales con posibilidad de monitoreo. Posteriormente, se evalúa el desempeño mediante una comparación de escenarios, la situación actual versus la situación con la estrategia implementada. Se consideran los indicadores presentados en Tabla 3.6:

Tabla 3.6: Indicadores para evaluar desempeño.

Indicador	Descripción	Interpretación	Unidad
Numero de paradas	Cantidad de veces que un ciclista debe detenerse a lo largo de un recorrido debido a semáforo en rojo.	Su reducción refleja mayor eficiencia en desplazamiento	Nº de detenciones
Demora promedio	Tiempo adicional experimentado por los usuarios respecto a un recorrido sin interrupción.	Su reducción refleja mayor fluidez.	s o min
Tiempo de viaje vehicular	Duración en segundos del recorrido realizado por un vehículo entre A. Prat y Las Heras	Permite evaluar el impacto de la estrategia sobre el modo motorizado	s
Tiempo de viaje ciclista	Duración en segundos del recorrido realizado por un ciclista entre A. Prat y Las Heras	Su reducción indica mayor eficiencia del flujo y aprovechamiento de la OV	s
Cruces en rojo	Proporción de ciclistas que atraviesan intersección con fase roja	Su reducción refleja una mejora en la seguridad vial	%
Cruces en verde	Proporción de ciclistas que atraviesan intersección en fase verde sin detenerse, se consideran solo las salidas del tramo luego de pasar la OV	El aumento sugiere una buena sincronización y ajuste de velocidad.	%

*El tiempo de viaje se mide considerando el recorrido de un vehículo o ciclo entre dos puntos de control. Para ello, se identifica el instante en que el usuario atraviesa la primera intersección y se registra el momento en que cruza la segunda. La diferencia entre ambos registros corresponde al tiempo total de viaje en dicho tramo.

Finalidad de esta implementación

La finalidad de esta implementación es evaluar la factibilidad técnica y operativa de una estrategia de onda verde ciclista en un entorno controlado mediante el software Centrac, considerando las limitaciones de configuración actuales, planes fijos por horario sin control adaptativo. El análisis busca responder a la pregunta: ¿Es posible implementar una onda verde ciclista funcional en el tramo de corredor seleccionado utilizando la herramienta de control Centrac con su configuración actual? Para ello, la implementación tiene los siguientes objetivos:

- Verificar si los desfases se ajustan adecuadamente a la velocidad de circulación ciclista predeterminada, manteniendo los tiempos de verde y duración de las fases.
- Comprobar la viabilidad geométrica y temporal de sincronizar una o más intersecciones consecutivas dentro del corredor evaluado, dadas las distancias entre cruces y los horarios de operación.
- Identificar las limitaciones funcionales del sistema, tales como restricciones en la programación, incompatibilidad de desfases, rigidez horaria o dificultades para adaptar los planes a las características del flujo ciclista.
- Detectar puntos críticos donde la estrategia no se aplica eficientemente ya sea por razones técnicas del software o por condiciones externas como geometría inadecuada, flujo vehicular dominante, etc.
- Generar evidencia técnica que sirve como base para futuras propuestas de mejora tanto a nivel de operación (planes o ajustes), como de infraestructura (sensores, priorización de modos, mejora en plataforma de circulación, etc.)

Para medir el impacto generado por la estrategia implementada en el tramo de estudio, se aplican dos metodologías de evaluación, que permiten observar tanto el comportamiento en tiempo real como el desempeño técnico del sistema:

1. Análisis audiovisual mediante cámaras UOCT, considerando tres grupos de observación.

Se visualizan los usuarios en la línea de parada antes de atravesar A. Prat y se les toma la hora, luego se visualizan en la línea de parada antes de atravesar Las Heras y se toma el tiempo de llegada. Finalmente se calcula la variación entre valor final – inicial y se obtiene el tiempo de viaje. Para las paradas se identifica si el usuario para y si lo hace se toma el tiempo, luego se obtienen los valores de todas las detenciones y se calcula el promedio de la muestra y finalmente para el caso de los comportamientos se determina si el usuario atraviesa en rojo o verde y luego se calculan los porcentajes respecto al total de la muestra para cada escenario. Estos indicadores se determinan para cada muestra según corresponda:

Usuarios no informados ciclistas,

Usuarios informados ciclistas sobre la velocidad objetivo de la OV

Usuarios de modo vehicular.

2. Recorridos con GPS realizados en bicicleta por usuarios a 16 km/h aproximadamente.

Se realizaron recorridos controlados utilizando bicicletas equipadas con dispositivos GPS para registrar el desplazamiento real a lo largo del tramo de estudio y monitorear la velocidad en tiempo real, tanto en el escenario actual como en el escenario propuesto con estrategia de onda verde. Esta evaluación permitió medir indicadores técnicos claves relacionados con la eficiencia del viaje, tales como la velocidad promedio, número de detenciones y tiempo detenido acumulado y total de desplazamiento. Los datos fueron procesados mediante la plataforma Strava de donde se extrajeron gráficos del comportamiento de la velocidad y se determinaron los indicadores. Para estandarizar el ensayo, a los participantes se les informó previamente sobre la velocidad de sincronización de 16 km/h y se les dio una introducción breve sobre la estrategia.

CAPÍTULO 4

Resultados

Capítulo 4. Resultados

En este ítem se muestra la información obtenida de la búsqueda bibliográfica, así como la selección y caracterización de una ciclovía potencialmente apta para la implementación de una estrategia de onda verde orientada a ciclistas. A partir de esta selección, se determinó la velocidad promedio de circulación ciclistas, con el objetivo de definir una coordinación semafórica que permita un desplazamiento fluido a lo largo del corredor. Posteriormente, se contrasta la sincronización actual con estrategia propuesta, evaluando su desempeño mediante indicadores clave, tales como: número de paradas, tiempo total de viaje y efectividad general de la onda verde. Esta comparación permitió cuantificar los beneficios potenciales para los usuarios del modo ciclista, en términos de eficiencia y comodidad en el desplazamiento.

4.1. Criterios operativos y parámetros de diseño para OVC

Del análisis normativo se derivan los siguientes parámetros de diseño para la estrategia de onda verde ciclista:

Tabla 4.1: Parámetros de diseño para estrategia de OVC.

Parámetro	Rango de valores	Fuente
Velocidad promedio objetivo	15 – 21 km/h	NACTO y CROW
Distancia entre intersecciones	100 – 250 m	CROW
Tiempo de ciclo semafórico	60 -120 s	UOCT, NACTO
Desfase optimo entre intersecciones	Variable (basado en distancia y velocidad objetivo)	NACTO, UOCT
Flujo ciclista	*	**

*No hay rango de valores definidos en la documentación revisada, ni valor recomendado en las principales guías internacionales.

**A diferencia de los otros parámetros considerados no se ha identificado un umbral o rango de valores para el flujo ciclista, que permita justificar la implementación de una OVC. En consecuencia, el presente estudio considera esta ausencia normativa como un vacío relevante y recomienda que futuras investigaciones o guías técnicas incluyan umbrales de flujo considerando tanto beneficios de continuidad ciclista como su impacto en otros modos.

4.2. Selección de la ciclovía candidata a onda verde

Considerando la capacidad técnica y el alcance temporal de este estudio, se decidió seleccionar una ciclovía. Para lo cual se desarrolló una evaluación cualitativa y cuantitativa en base a indicadores claves mencionados en la metodología punto 3.3.2. Como resultado del proceso de evaluación y descarte aplicado a las ciclovías del área urbana de Temuco, se identificaron inicialmente aquellas con características potencialmente aptas para la implementación de una estrategia de sincronización semafórica orientada a ciclistas. Las ciclovías seleccionadas en esta primera etapa se caracterizan por presentar un trazado relativamente continuo, presencia de alta densidad de intersecciones reguladas por semáforos y condiciones físicas básicas que permiten considerar su inclusión en una estrategia de coordinación. En la Figura 4.1 se presenta el mapa de ciclovías consideradas como candidatas tras el análisis preliminar.

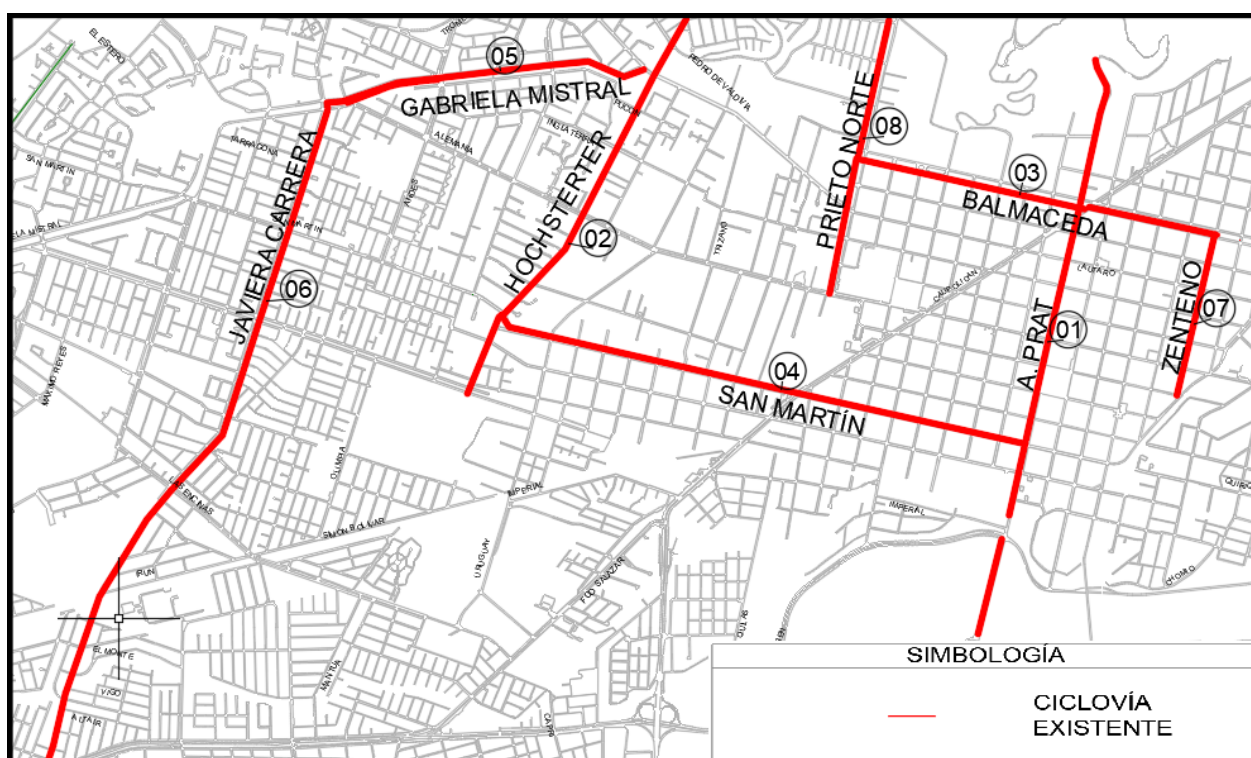


Figura 4.1: Plano de las ciclovías a analizar para seleccionar la adecuada.

Posteriormente, se aplicó una matriz de evaluación comparativa entre ciclovías preseleccionadas, incorporando criterios tales como: continuidad del trazado, cobertura semafórica integrada a la unidad operativa, presencia y densidad de cámaras de monitoreo, coeficiente de variación entre distancias de cruces y demanda ciclista aproximada (presentados en 3.3.2.). Cada ciclovía fue caracterizada de forma cualitativa y cuantitativa, considerando observaciones en terreno y análisis técnico, los valores obtenidos para cada una de ellas se presentan a continuación:

Tabla 4.2: Ciclovías y sus características para análisis.

Ciclovía	Longitud [m]	Cámaras UOCT [nº]	Máx. distancia cámaras [m]	Cruces integrados [nº]	Distancia entre cruces	Flujo ciclista estimado [cic/día]	Continuidad
A. Prat (1)	935	4	718	11	1.7	593	2.0
Hochstetter (2)	1200	0	x	0	60.0	573	2.0
Balmaceda (3)	1425	1	x	5	17.2	523	3.0
San Martín (4)	1053	2	526.5	8	35.3	503	3.0
G. Mistral (5)	1300	2	730	3	39.6	500	1.0

Ciclovía	Longitud [m]	Cámaras UOCT [n°]	Máx. distancia cámaras [m]	Cruces integrados [n°]	Distancia entre cruces	Flujo ciclista estimado [cic/día]	Continuidad
J. Carrera (6)	3100	1	x	8	28.2	297	2.0
Zenteno (7)	725	2	480	5	1.2	-	2.0
P. Norte (8)	1160	1	x	3	68.7	-	3.0

X*: indica que la ciclovía tiene menos de 2 cámaras por tanto no se considera la distancia.

-: indica que no hay datos sobre el flujo ciclista de la ciclovía.

La distancia entre cruces es un factor estimado de acuerdo con lo indicado en 3.3.2. el cual es una medida que incorpora la diferencia en distancia entre cruces. Por otra parte, la continuidad es un valor que se asigna a la ciclovía de acuerdo con la cantidad de discontinuidad que presenta. Aplicando la escala presentada en metodología a los valores de cada una se obtiene el puntaje total ponderado por ciclovía.

Tabla 4.3: Cálculo de puntaje ponderado para cada ciclovía analizada.

Ciclovía	Cámaras [n°]	Máx distancia cámaras [m]	Cruces integrados [n°]	Distancia entre cruces	Flujo ciclista estimado [cic/día]	Continuidad	Total ponderado
Ponderador	17%	17%	18%	18%	15%	15%	
A. Pratt	3	2	3	3	3	2	2.68
Hochstetter	1	1	1	1	3	2	1.45
Balmaceda	2	1	1	2	3	3	1.78
San Martín	3	3	3	2	3	3	2.82
G. Mistral	3	2	1	1	3	1	1.81
J. Carrera	2	1	3	2	2	2	1.84
Zenteno	3	3	1	3	1	2	2.19
P. Norte	2	1	1	1	1	3	1.3

Como resultado del análisis, la ciclovía emplazada sobre Avenida San Martín obtuvo la mayor puntuación en la matriz de evaluación, destacando por:

- Trazado longitudinal continuo, que conecta múltiples intersecciones semaforizadas a lo largo de un corredor recto y de extensión significativa
- La existencia de infraestructura semafórica operativa e integrada a la unidad operativa en la mayoría de sus cruces, lo que permite el diseño de bandas de coordinación que pueden ser implementadas rápidamente.
- La presencia de espacio vial exclusivo para ciclistas a lo largo de todo el corredor, con una delimitación reconocible pese al deterioro parcial de la infraestructura.

Debido al criterio aplicado y su ubicación estratégica central con conectividad a zonas relevantes de la ciudad, se considera que la elección del corredor mencionado es razonable para considerar la ciclovía San Martín un corredor piloto para evaluar la factibilidad de una estrategia de onda verde ciclista.

4.3. Zona de estudio y caracterización del corredor San Martín

La zona de estudio corresponde a un tramo del eje Avenida San Martín que cuenta con la presencia de la ciclovía, ubicado en el sector centro de la ciudad de Temuco, Región de La Araucanía. El tramo seleccionado se extiende entre la intersección con Arturo Prat y Hochstetter, abarcando un segmento de importancia estructural dentro de la red vial comunal. A lo largo de este tramo de corredor se emplaza una ciclovía bidireccional segregada en calzada, para uso exclusivo de ciclos, formando parte de una red de movilidad activa que busca conectar a través de su trazado áreas residenciales, educativas y de servicios.

Como parte del análisis al corredor seleccionado, se prioriza caracterizar sus condiciones reales a través del levantamiento de datos en terreno, los datos a observar correspondieron a una descripción de la infraestructura presente en la estructura, presencia y operatividad de la infraestructura, geometría para circulación, pendientes, interferencias, ubicación de cámaras de monitoreo y contadores de usuarios.

- **Diagnóstico de la ciclovía seleccionada**

El tramo de corredor seleccionado es un eje estructurante de tres pistas con un sentido de tránsito de oriente a poniente, con una extensión aproximada de 2350 metros. Dispone de una ciclovía bidireccional, lateral continúa segregada en calzada. Su condición general se puede describir como alta conectividad, trazado uniforme con degaste y buena cobertura semafórica. Dada su extensión y configuración, el corredor se subdivide en dos tramos: el primero desde oeste hasta Caupolicán (1297m), y el segundo entre Caupolicán y Arturo Prat (1053m). Esta separación responde a diferencias en la distribución geométrica de los semáforos y el hecho que los dispositivos del primer tramo no se encuentran integrados al sistema de control centralizado, si bien la integración de los semáforos al sistema centralizado no constituye un requisito indispensable para implementar una estrategia de OVC, en este caso se considera especialmente relevante, ya que permite realizar los ajustes de desfases de manera rápida y con menos trámites administrativos. Esto representa una ventaja en el marco del presente estudio, dado que facilita la implementación dentro de las limitaciones de tiempo disponibles para el desarrollo del proyecto. En este contexto, se considera únicamente el segundo tramo para su análisis, ya que presenta condiciones compatibles con la estrategia de coordinación, como disposición regular de semáforos, buena cobertura de cámaras y trazado más uniforme. En la Figura 4.2 se visualiza toda la extensión de la ciclovía y su posterior subdivisión en tramos.

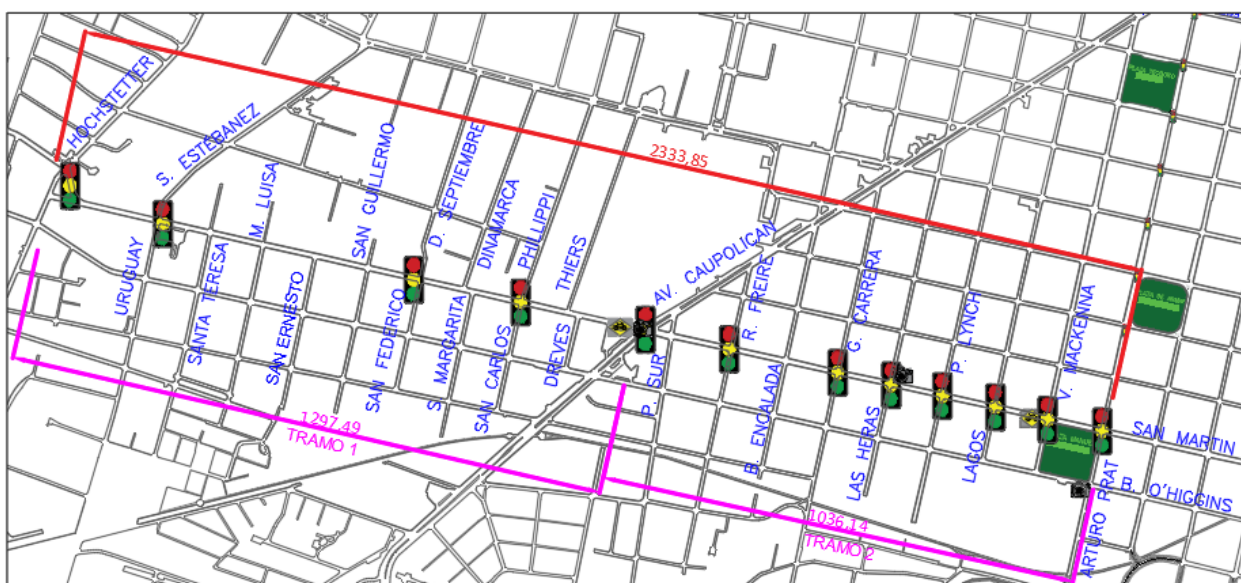


Figura 4.2: Ciclovía emplazada en corredor San Martín y su subdivisión de tramos.

Tabla 4.4: Caracterización del tramo escogido en el corredor San Martín.

Variable	Valor observado
Longitud total(m)	1053 m
Ancho disponible	2.4 m
Numero de semáforos integrados a UOCT	8
Presencia Cámara UOCT	1 en eje y 1 cercana (1 cuadra)
Pendiente significativa	baja
Continuidad	Completa
Interferencias	Virajes sin protección
Compatibilidad	Alta

La ciclovía emplazada sobre avenida San Martín representa uno de los principales corredores ciclistas del área céntrica de Temuco. Sin embargo, a partir del levantamiento en terreno y el registro fotográfico, se identificaron diversos aspectos críticos que comprometen su efectividad, seguridad y continuidad operacional. Si bien se detectan deficiencias en su estado y conservación, aún presenta condiciones técnicas suficientes para ser considerada viable dentro de una estrategia de onda verde. Su deficiencia se presenta a continuación:

- **Deterioro de infraestructura**, la superficie de rodadura presenta un desgaste progresivo, evidenciado por grietas, irregularidades y parches, especialmente en tramos cercanos a intersecciones. Así mismo, la pintura azul característica del trazado se encuentra desgastada casi en su totalidad en ciertos sectores, afectando la visibilidad del espacio exclusivo ciclista Figura 4.3 y Figura 4.4. Adicionalmente se visualizaron también algunos cruces de calzada

que evidencian mantención y que otorgan visibilidad a la demarcación ciclista tal como se ve en Figura 4.5 y Figura 4.6.

Resumen estado infraestructura



Figura 4.3: Condición de ciclovia en corredor San Martín.



Figura 4.4: Atravesio de calzada R. Freire en mal estado, con desgaste total de demarcaciones.



Figura 4.5: Avenida Caupolicán con San Martín.



Figura 4.6: Atravesio de calzada con demarcación visible.

- **Falta de prioridad efectiva**, se registran múltiples casos en los que vehículos motorizados realizan virajes sin respetar el paso ciclista, incluso cuando este dispone de semáforo en

verde y la prioridad, lo que evidencia una falla tanto de diseño como en el cumplimiento normativo, esto se evidencia en Figura 4.7 y Figura 4.8

Virajes sin protección



Figura 4.7: Intersección S. Martín - R. Freire, presenta virajes sin protección y vehículos interfieren la ciclovía.



Figura 4.8: S. Martín - Lynch, se visualiza un auto virando con semáforo ciclista en verde, en muchos casos no se respeta la prioridad.

- La ciclovía carece de elementos de **protección lateral efectiva** en varios tramos, lo que la expone a invasiones vehiculares, especialmente en maniobras de estacionamiento o virajes. La falta de señalización vertical clara, sumado al desgaste de las demarcaciones, disminuye la jerarquía visual del ciclista dentro del sistema vial.

Protección lateral



Figura 4.9: Degaste de demarcaciones, pintura y segregación de ciclovía San Martín.

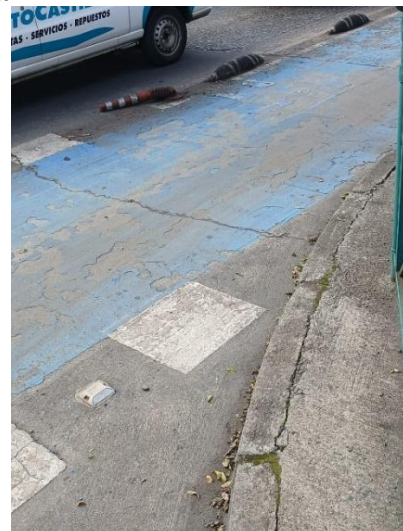


Figura 4.10: Estado de la ciclovía S. Martín, con señal vertical en mal estado y desgaste de la vía de circulación ciclista.

A pesar de las condiciones antes descritas, la estructura presente en el tramo seleccionado (tramo 2), cumple criterios que permiten su incorporación en una estrategia de coordinación semafórica, estos criterios relevantes son, trazado continuo y de extensión suficiente que permite trabajar una banda de coordinación entre múltiples intersecciones, existencia de red semafórica operativa conformada por cruces regulados por semáforos en la mayoría de sus intersecciones, espacio vial reservado al ciclista en todo el trayecto aunque presenta desgaste el corredor mantiene un espacio definido y reconocible y finalmente existe una demanda real de ciclistas urbanos que transitan por gran parte de la estructura. Si bien la ciclovia de avenida San Martín cumple una función estructural clave dentro de la red ciclista urbana, el estado actual del tramo 2 presenta deficiencias en el estado de la infraestructura, operación y convivencia modal. Sin embargo, la cobertura semafórica, la densidad semafórica y la utilización efectiva por parte de usuarios la posicionan como un corredor funcional y estratégicamente viable para aplicar una onda verde ciclista. Por tanto, para lograr una implementación eficiente, se sugieren intervenciones de bajo costo que aborden, reforzamiento de señalización y demarcaciones, sensibilización a conductores sobre prioridad ciclista en la vía, así el corredor no se descarta por infraestructura deteriorada, sino que se potencia recomendando acciones correctivas en el tramo a intervenir.

• Diagnóstico del sistema semafórico en el tramo seleccionado

En el contexto del presente estudio, se evaluaron los principales parámetros operativos del sistema semafórico en el tramo seleccionado (tramo 2), con el objetivo de determinar su grado de compatibilidad con una estrategia de sincronización tipo onda verde ciclista. El análisis se centra en los siguientes aspectos:

- **Tiempo total de ciclo:** El tiempo de ciclo de las intersecciones del corredor estudiados, oscila entre los 48 a 120 segundos, valores que se ajustan al rango técnico recomendado para implementar coordinación progresiva sin generar tiempos de espera excesivos.
- **Configuración de las fases:** Las intersecciones presentan generalmente 2 fases vehiculares y 2 peatonales, sin etapas exclusivas diferenciadas para bicicletas, estas son consideradas en conjunto con las fases vehiculares de la vía en cual esta inserta la ciclovia. No obstante, el patrón de fases existentes es compatible en ciertos periodos con la introducción de desfases progresivos a velocidades promedio.
- **Desfases actuales:** Se verifican los desfases programados entre intersecciones durante los horarios analizados, se detecta que San Martín se encuentra sincronizado para una velocidad de 30 km/h, velocidad que resulta elevada para el tránsito ciclista de la zona.
- **Flexibilidad del sistema:** Al ser corredores con semáforos integrados a la central UOCT, se cuenta con la capacidad técnica de modificar parámetros como tiempos de luz verde, desfases y ciclos, lo que habilita la posibilidad de diseñar una programación específica, respetando los repartos vehiculares.
- **Horarios de control y prioridad:** Se observó que el tramo funciona bajo planes fijos por franja horaria, sin sistemas de detección activa o de prioridad dinámica para bicicletas. Esto implica que la onda verde debe basarse en condiciones promedio observadas y no en detección en tiempo real.

En conjunto, el diagnóstico revela que, si bien el sistema semafórico actual no fue diseñado específicamente para bicicletas, posee infraestructura lógica y tecnología necesaria para ser ajustado con el fin de implementar una onda verde ciclista en el tramo seleccionado. La presencia de control centralizado, tiempos de ciclo compatibles en ciertos periodos y la regulación en la disposición de intersecciones configuran un escenario positivo para la estrategia.

Como se mencionó anteriormente el funcionamiento del sistema semafórico es un componente central para la implementación de estrategias de coordinación progresiva como onda verde. Por ello, se analizó la programación actual de cada intersección a lo largo del corredor seleccionado, diferenciando tres periodos clave: Punta mañana (8:00 a 9:00), Punta medio día (15:00 a 16:00) y punta tarde (17:00 a 19:00). La evaluación considera los tiempos de ciclo, duración de fases y desfases de las intersecciones ver Anexo B.5.

En San Martín, se determinó que 6 intersecciones (A. Prat, V. Mackenna, Lagos, Lynch, Las Heras y G. Carrera) mantienen ciclos de igual duración en todos los periodos estudiados, y adicionalmente estas intersecciones se encuentran distribuida a una distancia regular entre ellas, lo que favorece su factibilidad técnica para una onda verde, al facilitar la coordinación de fases y definición de bandas de paso.

- **Comportamiento del flujo ciclista**

- A) A partir de contador



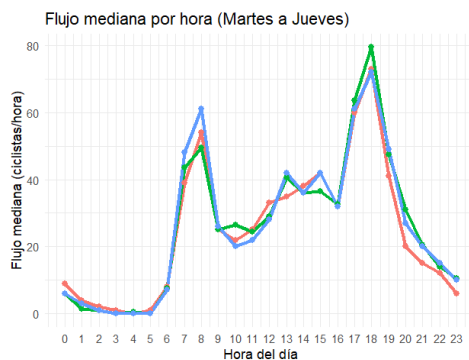
A. Ubicación espacial de contador en Tramo 2 (seleccionado)



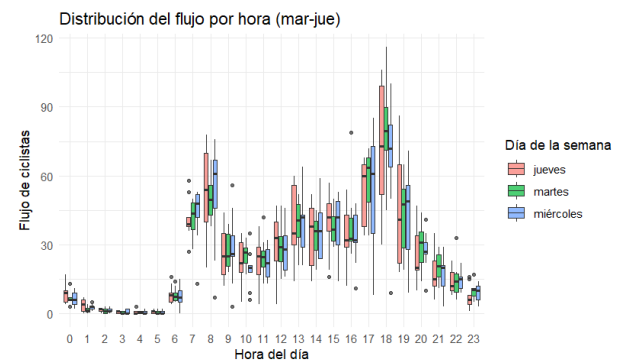
B. Visualización del contador en terreno

Figura 4.11: Contador de ciclos presente en la zona seleccionada. A) Ubicación del contador en el tramo. B) Visualización en terreno del contador.

A partir de datos obtenidos desde el contador automático ubicado en el tramo 2 seleccionado de la Av. San Martín, entre las calles V. Mackenna y Lagos, se logró caracterizar el comportamiento horario del flujo ciclista. Los datos del contador fueron solicitados a través de transparencia para el año 2024, permitiendo obtener información detallada sobre el flujo ciclista en días representativos, martes a jueves, sin presencia de feriados, durante los meses de mayo y junio de 2024. En la Figura 4.11 en A se muestra la ubicación del contador dentro del tramo seleccionado, mientras que en B una visualización del contador en terreno. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos proporcionados por el contador. Los gráficos permiten observar el comportamiento horario típico de los usuarios de la ciclovía, revelando los patrones de flujo ciclista a lo largo del día.



A. Mediana por hora



B. Distribución del flujo por hora

Figura 4.12: Demanda horaria ciclista total (ciclos/hora) en el corredor san Martín, según contador automático localizado en San Martín con Vicuña Mackenna. A) mediana por hora de martes a jueves, B) Distribución del flujo por hora.

El análisis de los gráficos generados a partir de los datos obtenidos del contador automático permite observar patrones distintivos en el comportamiento horario del flujo ciclista a lo largo del día, pero con dos representaciones graficas distintas: un gráfico de líneas que utiliza la mediana horaria y un boxplot que ilustra la distribución del flujo ciclista. Ambos gráficos, aunque representados de forma diferente, reflejan patrones similares en el comportamiento del flujo ciclista durante los días considerados. En la Figura 4.12 el grafico de líneas A resalta los picos más pronunciados en las horas punta mañana y tarde, mientras que, en el periodo intermedio, se aprecia una mayor variabilidad en el comportamiento de los usuarios. Este gráfico resalta las tendencias centrales, basándose en la mediana de los datos horarios. En contraste, el gráfico boxplot B presenta la distribución completa del flujo ciclista, destacando la variabilidad en el flujo durante el día. Este gráfico muestra la dispersión de los datos y permite visualizar de forma clara los rangos de valores y las posibles anomalías en el flujo. Ambos gráficos coinciden en mostrar un aumento significativo en el flujo ciclista durante la tarde, pero el boxplot también destaca la dispersión de datos alrededor del mediodía, lo cual puede ser atribuido a factores del entorno urbano y los usos del suelo cercano.

Del análisis se identificaron con claridad tres períodos puntas:

- Mañana: entre las 8:00 y 9:00 horas
- Medio día: entre las 15:00 y 16:00 horas
- Tarde: entre las 17:00 y 19:00 horas

Estas franjas corresponden a los periodos de mayor flujo ciclista, por lo tanto, se establecen como prioritarios para tomar datos audiovisuales. Esta información es clave para determinar el comportamiento dinámico del desplazamiento y las velocidades reales de operación, sirviendo como base técnica para la propuesta y evaluación de una estrategia de sincronización semafórica adaptada a ciclistas.

B) A partir de análisis de videos

Se solicitaron los videos de la UOCT correspondientes al tramo seleccionado de la ciclovía San Martín para el martes 10 de junio de 2025 y se procedió al conteo manual de los ciclistas, lo cual permitió obtener los datos de flujo ciclista en los puntos de control seleccionados, que se presentan en la Figura 4.13.

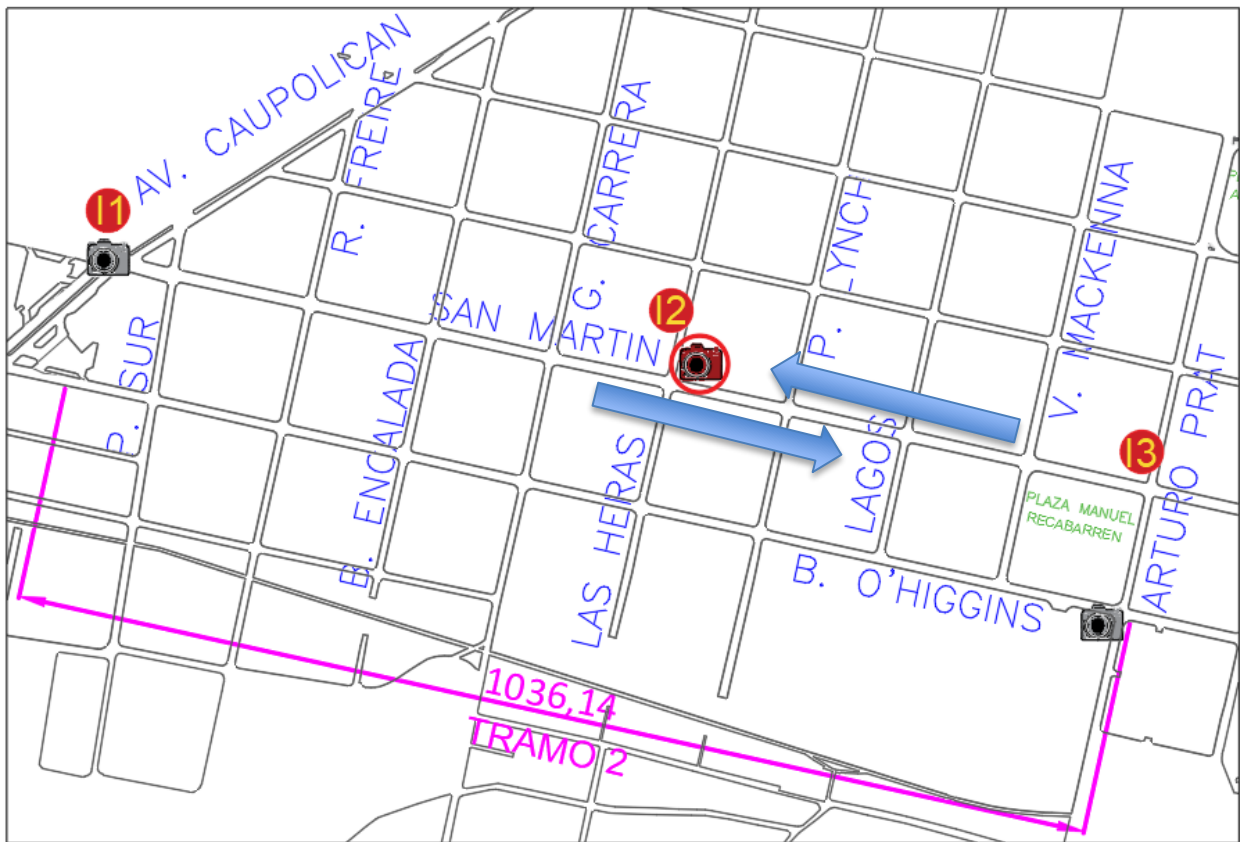


Figura 4.13: Disposición de las cámaras consideradas, en plomo cámaras UOCT y en rojo cámara privada.

A partir de estos datos, el análisis gráfico mostro que los volúmenes de ciclistas son uniformes en las intersecciones ya que no se evidencia pérdida de más de 5 ciclistas entre intersecciones, salvo con unos casos puntuales como el del sentido a Caupolicán en el periodo de 8 a 9 am. A continuación, en la Figura 4.14 se presenta el grafico obtenido con los datos levantados a través de video para cada una de las intersecciones estudiadas y en los diferentes periodos obtenidos como representativos.

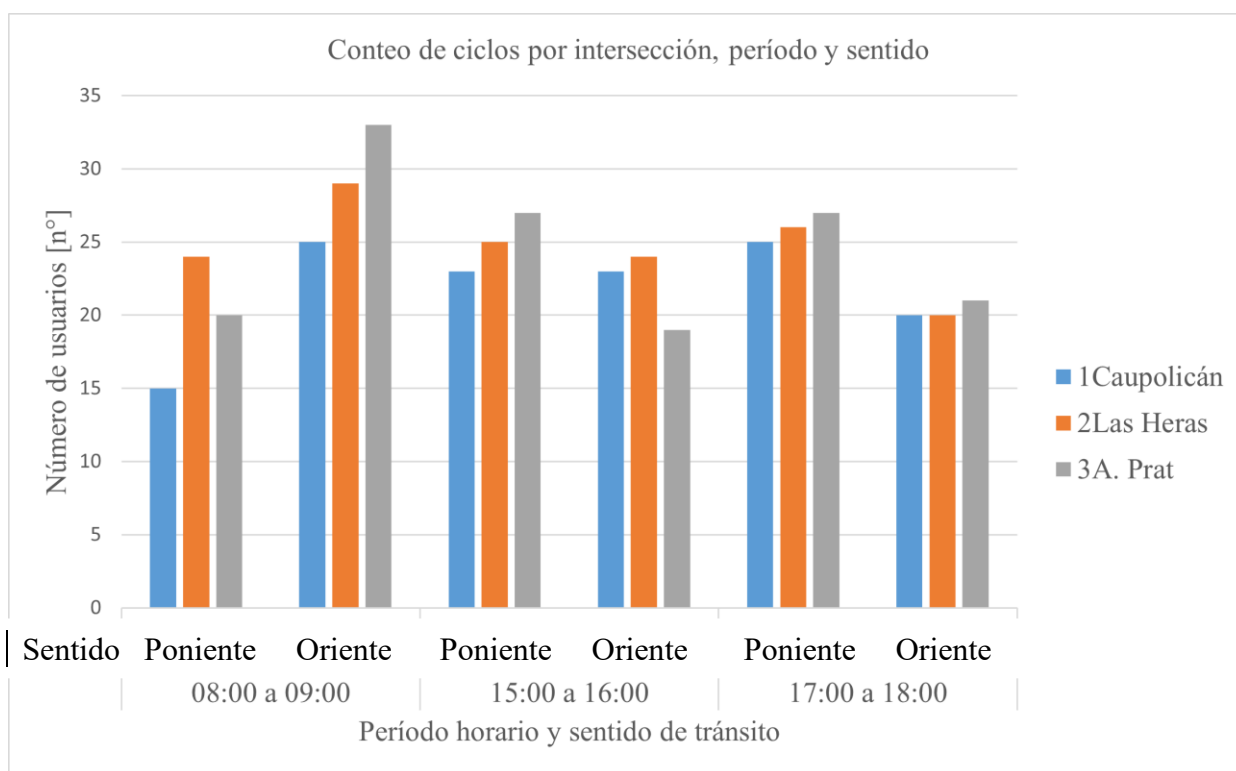


Figura 4.14: Gráfico de conteo de ciclistas en tramo San Martín entre Caupolicán - Arturo Prat, del martes 10 de junio de 2025, mediante medios audiovisuales para los 3 periodos considerados (P1. 8:00 a 9:00, P2. 15:00 a 16:00 y P3. 17:00 a 18:00).

El gráfico muestra que, para cada período (P1-P3) y en ambos sentidos (Poniente/Oriente), los conteos por punto de control son cercanos entre sí, sin caídas pronunciadas a lo largo del tramo. En P1 se observa el mayor peak hacia Prat con incrementos I1-I3 de 25-29-33, mientras que hacia Caupolicán los valores de 15-24-20 son menores, pero sin rupturas, con diferencias intra-tramos acotadas de aproximadamente 4 a 9 ciclistas. En P2 ambos sentidos están muy próximos Caupolicán 23-24-27 y Prat 22-24-19, con diferencias intra-tramos acotadas de aproximadamente 3 a 5 ciclistas. En P3 las series son prácticamente planas Caupolicán 25-26-27 y Prat 20-20-21, con diferencias intra-tramos acotadas de aproximadamente 2 ciclistas. En conjunto, no se aprecia pérdida sistemática de usuarios entre Caupolicán-Prat, ni cambios abruptos entre periodos, por lo que el flujo dentro del tramo es estable.

4.4. Cálculo de velocidad ciclista

Este apartado presenta los resultados obtenidos del análisis de velocidad ciclista en el corredor evaluado, diferenciado por tipo de ciclo y periodo horario. Las mediciones se realizaron a partir de registros audiovisuales, los que permitieron identificar velocidades para bicicletas y scooter bajo condiciones reales de circulación. Los valores levantados y la velocidad calculada se pueden visualizar en el Anexo D.1. , donde se tiene la hora en las que los usuarios atraviesan cada punto

de control, para posteriormente calcular la variación de $t_f - t_i$ para obtener tiempo de desplazamiento y con esto obtener la velocidad, mediante la formula básica.

A continuación, se presentan los resultados generales agregados por tipo de ciclo, obtenidos para el corredor:

Tabla 4.5: Resumen de resultados obtenidos para cada tipo de ciclo.

Tipo vehículo	Promedio velocidad (m/s)	Mediana velocidad (m/s)	Des. Est. velocidad (m/s)	Nº usuarios medidos
Bicicleta	15.4	14.9	4	95
Scooter	19.1	19.1	3.3	36
Todo	16.4	17.4	4.1	131

En la Figura 4.15, se visualiza la distribución de velocidades observadas para cada tipo de ciclos mediante gráficos de violín, lo cual permite identificar la densidad, dispersión, valores centrales y posibles atípicos.

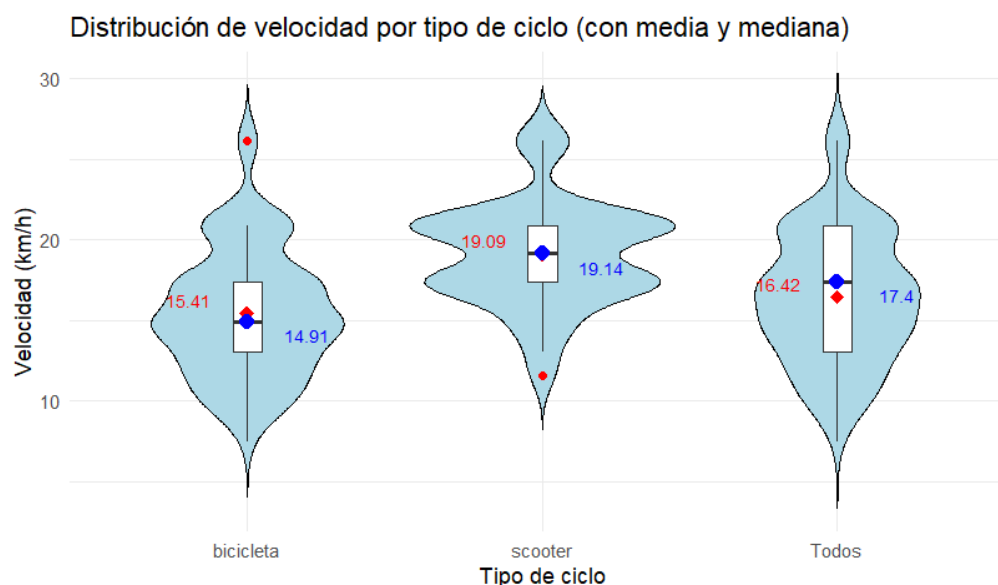


Figura 4.15: Distribución de velocidades obtenidas por tipo de ciclo.

Se observa que los scooter presentan velocidades significativamente más altas que las bicicletas, con menor dispersión, lo que indica una mayor uniformidad en su comportamiento de tránsito. En contraste, las bicicletas muestran mayor variabilidad, aunque las medidas centrales se ubican cercanas a 15 km/h, evidenciando que la mayoría de los ciclistas mantienen un ritmo relativamente constante, pero con usuarios que se alejan de la media, sin embargo la mayor densidad de usuarios se ubica en la parte cercana a las medidas de tendencia central, lo cual se visualiza por el mayor ensanchamiento del violín, se visualiza también una zona más alta que tiene un ensanchamiento

menor pero igual presenta una forma de violín, esta zona puede estar ligada a la presencia de bicicletas eléctricas en la ciclovía.

Dado que la estrategia de sincronización requiere definir una velocidad base para el cálculo de desfases semafóricos, se selecciona un valor de 16 km/h, correspondiente al entero más cercano al promedio ponderado por cantidad de usuarios. Esta selección permite un equilibrio razonable entre las velocidades observadas de Scooter y bicicletas, asegurando que la coordinación no penalice a ninguno de los grupos. Estos resultados son coherentes con lo propuesto en manuales de referencia como NACTO y CROW, que sugieren un rango de velocidad en el cual se encuentra inserto el valor seleccionado y también sugieren utilizar velocidades representativas de los usuarios predominantes para el diseño de la estrategia de OVC.

Para el caso de datos segregados las variaciones observadas no resultan suficientemente significativas como para justificar el uso de velocidades diferenciadas por horario. Además, es importante considerar que, a diferencia de la bicicleta, el scooter eléctrico no requiere esfuerzo físico para acelerar, lo que reduce la incomodidad asociada a detenciones frecuentes o cambios de ritmo. En consecuencia, los ciclistas son más sensibles a interrupciones en la circulación continua, lo cual refuerza la necesidad de adoptar un valor de diseño que favorezca su desplazamiento eficiente. Por tanto, se confirma la validez del valor de diseño previamente adoptado de 16 km/h, el cual representa adecuadamente el comportamiento agregado de los modos observados y responde a las necesidades de los usuarios ciclistas, que constituyen el grupo predominante en la vía.

La tabla siguiente presenta los valores de velocidad por tipo de ciclo desagregados según el periodo horario estudiado.

Tabla 4.6: Velocidad desagregada por ciclo y periodo.

Vehículo	Periodo	Media [km/h]	Mediana [km/h]	Desviación estándar	N usuarios
Bicicleta	1 (8:00 a 9:00)	14.6	14.9	3.4	26
Scooter	1 (8:00 a 9:00)	18	17.4	2.4	14
Bicicleta	2 (15:00 a 16:00)	15.2	14.9	4.1	34
Scooter	2 (15:00 a 16:00)	21.4	20.9	3.4	12
Bicicleta	3 (17:00 a 19:00)	16.3	14.9	4.2	35
Scooter	3 (17:00 a 19:00)	17.9	17.4	2.9	10

El análisis de la velocidad desagregada por grupo de tipo de ciclo y periodo de desplazamiento evidencia que los ciclistas presentan valores relativamente estables a lo largo del día, con una ligera tendencia creciente de 14.6 a 16.3 km/h, mientras que los scooters mantienen velocidades superiores con un máximo de 21.4 km/h entre las 15 y 16 horas. Esta variación puede atribuirse principalmente a factores operativos y de comportamiento: en la mañana los desplazamientos suelen estar más condicionados por interacciones con flujos vehiculares y peatonales en horas punta, lo que limita la velocidad, mientras que en la tarde los viajes tienden a realizarse con una mayor dispersión de velocidades, lo que refleja la coexistencia de usuarios de distintos perfiles desde deportivos, recreativos a de transporte, con diferentes condiciones físicas y patrones de desplazamiento.

Posteriormente se visualiza el comportamiento de los usuarios de acuerdo con el periodo horario y el tipo de ciclo.

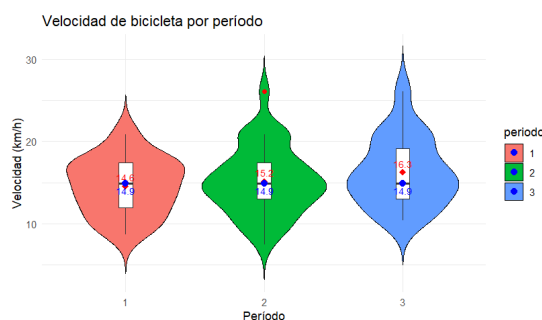


Figura 4.16: Gráfico de violín de velocidad de bicicleta por periodo de estudio.

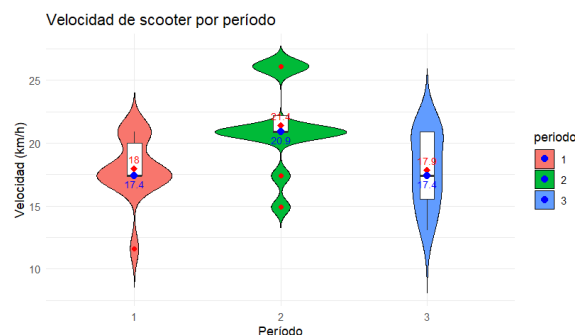


Figura 4.17: Gráfico de violín de velocidad de scooter por periodo de estudio.

El comportamiento de los usuarios varía según tipo de ciclo y el periodo estudiado, mostrando diferencias importantes entre bicicletas y scooter eléctricos. Para las bicicletas, la distribución de velocidades observadas se mantiene relativamente constante a lo largo de los tres periodos, con una mediana estable y una leve tendencia creciente en la media, lo que indica que algunos ciclistas mantienen ritmos más altos en determinados horarios como se ve en la Figura 4.16. En contraste, los scooters presentan mayor uniformidad en su desplazamiento, aunque con velocidades más elevadas y variaciones entre periodos, alcanzando una media máxima de 21,4 km/h en el segundo periodo y presentando algunos valores atípicos que reflejan usuarios que circulan significativamente más rápido que la mayoría ver en la Figura 4.17.

Estos gráficos permiten visualizar claramente las diferencias de comportamiento entre los distintos tipos de ciclos y periodos horarios, proporcionando una base sólida que respalda la selección de la velocidad de diseño adoptada para la estrategia de OVC.

4.5. Ajuste al tramo seleccionado

La evaluación de la estrategia OVC en un tramo extenso, como la zona oriente de San Martín, con más de 1000 m de extensión, requiere medios audiovisuales en al menos dos intersecciones adicionales, o en su defecto, personal en terreno para realizar mediciones. Dada la limitación de recursos y el tiempo disponible para el proyecto, se opta por acotar la zona de intervención a un tramo más factible de estudiar con los medios disponibles.

En consecuencia, se seleccionó inicialmente el tramo 2 entre Caupolicán y A. Prat como área de análisis, asegurando la viabilidad técnica y la posibilidad de realizar un seguimiento detallado de los indicadores de desempeño. No obstante, este tramo presenta diferencias internas que condicionan su utilización completa: la primera mitad desde Prat a Carrera incluye 6 semáforos consecutivos, mientras que en la mitad restante solo se ubican dos intersecciones semaforizadas. Una de ellas corresponde a la intersección Caupolicán -San Martín, inserta en una arteria principal que conecta la región con zonas de emergencias, como el hospital, dicha intersección posee

programación semafórica distinta y restricciones operativas que impiden interferir en su funcionamiento sin evaluar los impactos sobre vehículos de emergencia.

Por otro lado, la intersección Ramón Freire, ubicada aproximadamente en el punto medio entre G. Carrera y Caupolicán, se relaciona con las seis intersecciones mencionadas anteriormente, sin embargo, su distancia respecto la intersección semaforizada más cercana es mayor a 200 m, lo que requiere medidas específicas para garantizar que los ciclistas mantengan la velocidad esperada según la estrategia. En consecuencia, aunque la extensión hasta Caupolicán podría considerarse, el segmento no se incluye completo debido a las razones ya mencionadas y que se listan a continuación:

- Tramo de gran extensión con baja densidad de cámaras
- Disposición geométrica de los semáforos no es uniforme, se pueden visualizar un tramo de más densidad semafórica.
- Presencia de una intersección de alta importancia en la red vial de la comuna y de la región que no puede modificar sin tener ciertas consideraciones especiales.

Por lo tanto, el tramo seleccionado final corresponde a la sección entre Arturo Prat y General Carrera, delimitada como óptima para la implementación piloto. Esta decisión permite concentrar los recursos en un subtramo que presenta condiciones homogéneas de semaforización, trazado continuo y factibilidad operativa, facilitando la implementación rápida de los ajustes en los desfases y reduciendo la necesidad de intervenciones adicionales o trámites complejos. La Figura 4.18 presenta el plano del corredor San Martín tramo 2 y el tramo seleccionado para la implementación de la estrategia de OVC (delimitado por rectángulo verde), destacando los puntos de control, las intersecciones relevantes y la ubicación del equipo de monitoreo. Con estos antecedentes, la selección del subtramo queda justificada, garantizando que la estrategia pueda implementarse de forma segura y dentro del tiempo disponible. A partir de este punto, **cualquier referencia al “tramo seleccionado” se entenderá como el subtramo final entre Arturo Prat y General Carrera**, delimitado en el plano con rectángulo color verde.

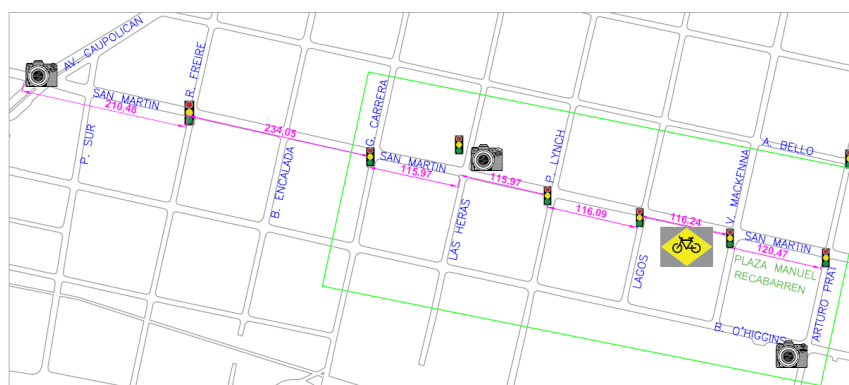


Figura 4.18: Plano de tramo de ciclovía de San Martín a estudiar.

4.6. Evaluación de nivel de servicio de sincronización actual para ciclos

Este apartado describe el escenario actual de la programación semafórica en el tramo seleccionado y ajustado posteriormente, del corredor San Martín. La información fue obtenida a partir del plan vigente para el horario de 15 a 16 horas (coincidente con horario posible para implementar), proporcionado por la UOCT. La finalidad es caracterizar el funcionamiento semafórico previo a la intervención, a modo de línea base sobre la cual se evaluarán posteriormente los beneficios de la estrategia propuesta.

Los elementos considerados en este análisis fueron:

- Velocidad de circulación de referencia: 16 km/h, determinada mediante análisis de comportamiento de ciclos.
- Duraciones actuales de luces: verde, amarilla y roja, para cada intersección del tramo.
- Desfases entre semáforos: valores reales configurados actualmente en el sistema de control del tránsito.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento semafórico actual del corredor San Martín, se construyeron diagramas espacio-tiempo que representan la distribución de las fases semafóricas en cada intersección, considerando la programación vigente en el periodo de estudio entre las 15:00 y 16:00 horas ver Anexo B.5. Este análisis permite visualizar de forma gráfica la continuidad del desplazamiento a lo largo del eje, y evaluar el comportamiento de estos dos modos respecto a la programación actual. A partir de estas representaciones se identifican las condiciones actuales de coordinación y sus implicancias sobre la movilidad vehicular y ciclista.

La Figura 4.19 representa las situaciones del escenario actual para los vehículos (izquierda) y para los ciclos (derecha). De las representaciones presentadas en la figura se tiene:

- Simulación de trayectorias vehiculares: se incorpora una trayectoria de 30 km/h en sentido del flujo de la vía vehicular, esto permite observar puntos de conflicto o sincronización entre la programación y la trayectoria. En el escenario se evidencian tramos en el que los vehículos se desplazan de forma fluida, sin embargo, dependiendo del tiempo en que ingresan a la fase verde, sea al inicio (1) a la mitad (2) o al final (3), se identifican ciertas detenciones asociadas.
- Simulación de trayectorias ciclistas: Se graficó la circulación de ciclistas a 16 km/h en ambos sentidos del corredor, considerando el mismo período de análisis del caso anterior. Aquí se evidenció una mayor fragmentación del desplazamiento, con múltiples interrupciones provocadas por el desfase a alta velocidad que se presenta entre las intersecciones. El análisis revela que el sistema actual no se encuentra alineado con la velocidad característica de usuarios de la ciclovía, generando detenciones frecuentes y disminuyendo la eficiencia del viaje.

El análisis comparativo muestra una clara diferencia en la experiencia de viaje: los automóviles pueden mantener trayectorias continuas en ciertos tramos, mientras que los ciclistas enfrentan un patrón de viaje más fragmentado y con detenciones recurrentes. Esta disparidad sugiere la necesidad de considerar, en etapas posteriores, evaluaciones que determinen la pertinencia de ajustes en la coordinación semafórica orientada al modo ciclista, sin embargo, cualquier eventual

modificación debe ser evaluada en etapas posteriores mediante análisis de costos y beneficios, a fin de determinar si dichos cambios generan un beneficio social neto para todos los usuarios del eje.

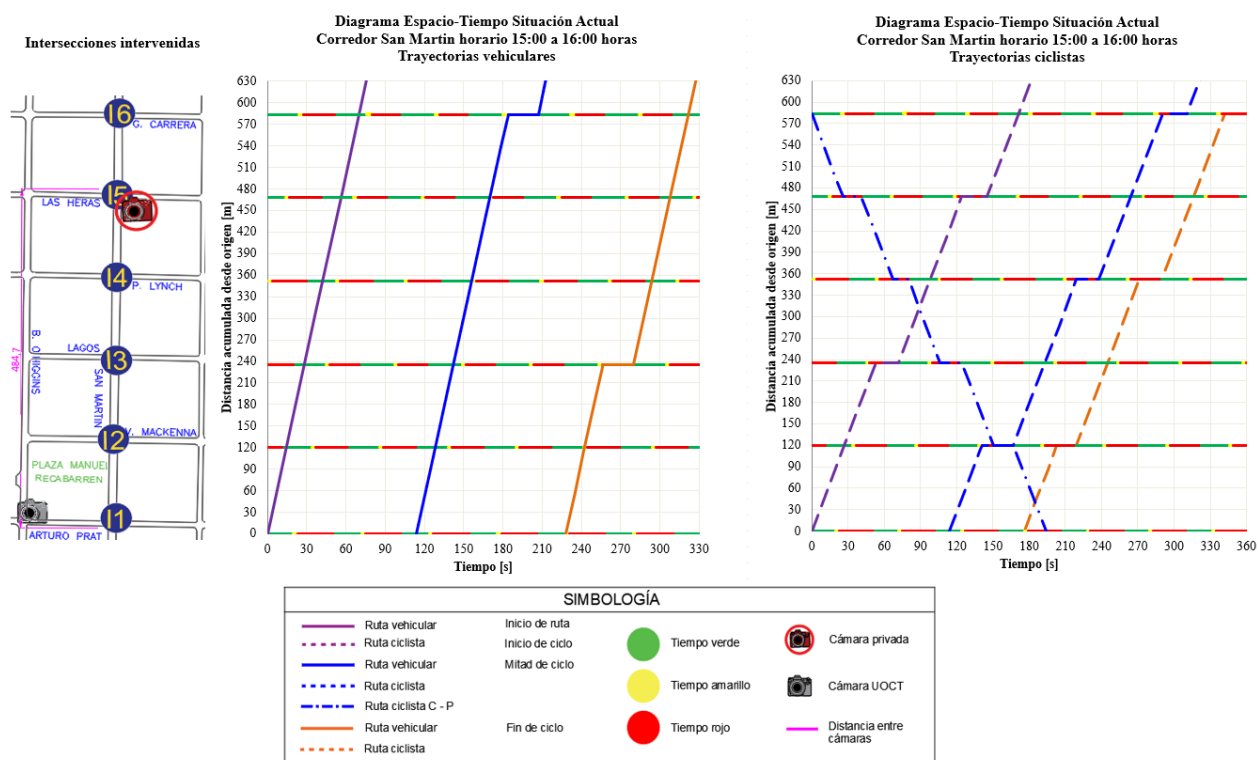


Figura 4.19 : Diagramas espacio-tiempo para el corredor San Martín (15:00 a 16:00 horas) para la situación actual. A) Situación actual para escenario vehicular (30 km/h) y B) Situación actual para escenario ciclista (16 km/h).

4.7. Evaluación de nivel de servicio de sincronización semafórica propuesta para ciclos

El escenario con desfases optimizados se elaboró a partir de la información oficial de programaciones entregada por la UOCT Araucanía, específicamente la base horaria correspondiente al tramo de 15 a 16 horas. El proceso comenzó con el envío de una solicitud formal a la UOCT el viernes 13 de julio, en la cual se requirió la entrega de las programaciones vigentes de los controladores de las intersecciones comprendidas en el tramo. La institución respondió el día 2 de julio, remitiendo los archivos con los parámetros de ciclos, fases e inicios de verde. Con base en esta información, se realizó el ajuste de desfases a nivel de inicios de verde. Posteriormente, los valores fueron convertidos en inicios de sistema, formato requerido por software Centrac, con el fin de que pudieran implementarse en los controladores semafóricos. El cambio se aplicó el 23 de julio, momento en que se cargó la nueva programación en el tramo seleccionado por un tiempo de una hora, entre 15 y 16 horas. Durante la ventana de pruebas no se registraron contingencias de tránsito excepcionales que invalidaran las mediciones, con el fin de reducir interferencias externas, se seleccionó un día con condiciones climáticas favorables para que

las interferencias por este factor fueran mínimas. Por lo tanto, las condiciones climáticas se mantuvieron estables, por lo que no fue necesario realizar ajustes adicionales en la campaña de observación.

Este apartado presenta el escenario con la sincronización semafórica ajustada, en el cual se aplican los desfases optimizados propuestos, con el objetivo de implementar una estrategia de onda verde ciclista. El tramo intervenido corresponde al corredor San Martín entre las vías transversales Prat y G. Carrera, los nuevos valores se calcularon considerando la programación base vigente para el horario de 15 a 16 horas proporcionada por la UOCT, sobre la cual se realizó el ajuste de inicios de verde y posteriormente se calcularon los inicios de sistema que son los valores requeridos por el software CENTRAC para modificar las programaciones.

Se utilizaron los siguientes parámetros:

- Velocidad de circulación de referencia: 16 km/h.
- Duraciones actuales de luces: se mantuvieron los tiempos de duración de luces verde, amarilla y roja, para cada intersección del tramo.
- Desfases entre semáforos: calculados en función de la distancia entre intersecciones y la velocidad de referencia obtenida, con el objetivo de permitir el paso continuo de ciclistas sin detenciones.

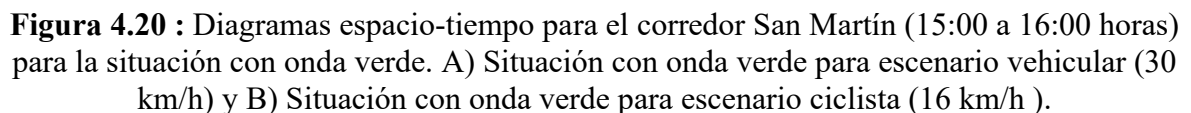
A continuación, se presenta la Tabla 4.7 con los valores programados para cada intersección considerando el plan utilizado en el horario de 15 a 16 horas para los días laborales. Con esta información, se construyó un diagrama espacio tiempo que representa gráficamente la nueva estrategia de sincronización. Este permite visualizar la coherencia de los desfases propuestos y su impacto en la continuidad del desplazamiento ciclista a lo largo del tramo seleccionado.

Tabla 4.7: Valores obtenidos para desfases de verde e inicio de sistema.

Intersección	Inicio de sistema (s)		Inicio de verde (s)	
	Fase 1	Fase 2	Fase 1	Fase 2
San Martín – Arturo Prat (1)	40 (31)	17 (8)	0 (43)	25 (16)
San Martín – V. Mackenna (2)	14 (41)	42 (17)	27 (2)	3 (30)
San Martín – Lagos (3)	41 (51)	20 (30)	1 (11)	31 (41)
San Martín – Lynch (4)	15 (9)	46 (40)	27 (21)	3 (49)
San Martín – Las Heras (5)	40 (19))	18 (49)	1 (32)	31 (10)
San Martín – G. Carrera (6)	14 (29)	48 (11)	27 (42)	5 (20)

*(): indica valores actuales.

A continuación, se presentan dos figuras representativas del escenario con sincronización propuesta, contruidos a partir de los valores presentados en la tabla anterior:



- Simulación de trayectorias vehiculares: se presentan las bandas de luz verde alineadas mediante el desfase calculado para la velocidad de 16 km/h, se incluyen trayectorias vehiculares para distintos momentos de ingreso al tramo (inicio, mitad y final de la fase verde), lo cual permite identificar zonas de paso fluido o potenciales detenciones en el nuevo escenario.
- Simulación de trayectorias ciclistas: Muestra la implementación de los desfases calculados específicamente para 16 km/h. se simulan trayectorias ciclistas en ambos sentidos del tramo intervenido, permitiendo evaluar la reducción teórica de detenciones bajo la nueva sincronización.

En síntesis, el análisis comparativo evidencia que la implementación de la sincronización semafórica adaptada a bicicletas genera beneficios directos en términos de continuidad y fluidez

para el modo ciclista, reduciendo detenciones y mejorando la regularidad de los desplazamientos. Sin embargo, estos avances se alcanzan a costa de un impacto negativo sobre el flujo vehicular del corredor, que experimenta un aumento de las detenciones y tiempos de viaje. Los resultados ponen de manifiesto la existencia de intereses contrapuestos entre los modos analizados, lo que confirma que la gestión semafórica en corredores urbanos constituye un ejercicio de balance modal: favorecer la movilidad ciclista implica resignar parte de la eficiencia del transporte motorizado. Este hallazgo no solo refuerza la relevancia de la estrategia propuesta, sino que plantea la necesidad de definir, que prioridad otorgar en la operación del sistema de tránsito según los objetivos de sostenibilidad y seguridad vial de la ciudad. El resumen de los escenarios analizados se presenta en la Tabla 4.8, mostrada a continuación:

Tabla 4.8: Comparación de los tiempos de viaje para cada situación según diagramas espacio-tiempo.

Viaje	Escenario actual Tiempo viaje (s)	Escenario propuesto Tiempo viaje (s)	Variación (s)
Vehículo 1 - inicio	70.1	156.4	+86.3
Vehículo 2 - medio	118	123.4	+5.4
Vehículo 3 - fin	93.8	191	+97.2
Ciclo 1 - inicio	171	156.4	-14.6
Ciclo 2 - medio	197	131.4	-65.6
Ciclo 3 - fin	187	131.4	-55.6

*Note: Se considera un vehículo a 30 km/h y un ciclo a 16 km/h, para los numero 1, que salen al comienzo de la fase verde vehicular de la intersección 1, para el caso del número 2 los que ingresan en la mitad de la fase verde vehicular de la intersección. Y para el caso del número 3 los que ingresan en el final de la fase verde vehicular de la intersección.

Así finalmente se concluye que la estrategia de onda verde ciclista mejora sustancialmente la experiencia de viaje para el modo ciclista, aunque puede afectar negativamente a los demás modos como el caso del motorizado. Por ello, resulta pertinente considerar la aplicación de medidas complementarias de mitigación que permitan equilibrar los intereses de los distintos modos y favorecer una convivencia modal más eficiente y sostenible.

4.8. Impacto sobre la operación del tráfico

La implementación de la estrategia de onda verde ciclista en el tramo seleccionado del corredor San Martín, se realizó el día miércoles 23 de julio entre las 15:00 y 16:00 horas, el objetivo fue mejorar la fluidez del modo ciclista y evaluar su impacto sobre el funcionamiento general del sistema de tránsito, comparando el escenario actual (14:00 – 15:00 horas) con el escenario propuesto con sincronización (15:00 – 16:00 horas).

Los resultados obtenidos fueron analizados a través de los enfoques de video y utilizando datos GPS. Ambos son presentados de forma separada.

4.8.1. Evaluación de desempeño basada en análisis de videos

Se utilizó el registro de cámaras de monitoreo para evaluar el impacto de la estrategia de onda verde ciclista, mediante una comparación entre escenarios. Las observaciones se centraron en los cruces de Av. A. Prat (UOCT) y Las Heras (privado), seleccionando por ser puntos claves dentro del tramo estudiado y por su presencia de cámaras. El análisis se realizó midiendo el comportamiento ciclista bajo ambos escenarios considerando los indicadores que se presentan en la Tabla 4.9. Para el desarrollo del análisis de medios audiovisuales se consideraron tres tipos de muestras:

- A) Resultados del comportamiento ciclistas: considerando ciclistas no informados de la velocidad de sincronización como usuarios del corredor.

Tabla 4.9: Cuantificación de los indicadores medidos en el escenario con usuarios sin información de la estrategia.

	O'Higgins			Las Heras		
Indicador	Escenario actual (N=27)	Escenario Propuesto (N=24)	Variación OV-A	Escenario actual (N=36)	Escenario propuesto (N=46)	Variación OV-A
Paradas	48%	29%	-19%	17%	15%	-2%
Cruzan semáforo en rojo	30%	21%	-9%	25%	13%	-12%
Cruzan en verde sin detenerse	15%	42%	+27%	44%	30%	-14%
Tiempo promedio de detención	100%	75%	-25%	100%	50%	-50%

La comparación de indicadores evidencia que la implementación de la onda verde ciclista generó cambios positivos en el comportamiento de los usuarios, aun cuando no contaban con información previa sobre la estrategia. En la intersección de Prat/ San Martín se observa una reducción significativa de las paradas (-19%) y en los cruces en rojo (-9), junto con un aumento sustancial de cruces en verde sin detención (+27%), lo que confirma una mejora simultánea en fluidez y seguridad. En el caso de Las Heras/San Martín, si bien la proporción de viajes continuos en verde disminuyó (-14%), se registró una reducción importante en los cruces en rojo (-12%) y del tiempo promedio de detención (-50%), lo que refuerza el efecto positivo de la estrategia sobre la seguridad y la eficiencia operativa. En conjunto, los resultados muestran que la sincronización beneficia la

circulación ciclista al reducir detenciones innecesarias y conductas de riesgo, aunque sus efectos pueden variar según la geometría y dinámica propia de cada intersección.

El tiempo de viaje entre Arturo Prat y Las Heras, se analiza separado por sentido de circulación ya que en terreno se evidencia que las distancias entre intersecciones no son uniformes completamente y que al transitar a una velocidad cercana a 16 km/h en sentido hacia el centro se debía detener en la mayoría de los cruces, mientras que en sentido hacia el poniente se realizaban al menos 2 paradas, por lo que se desea evaluar de manera desagregada para evidenciar la mejora en cada caso. Los datos obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 4.10: Tiempos de viaje en segundo entre Arturo Prat y Las Heras, medidos mediante medios audiovisuales (usuarios sin información).

	De Prat a Las Heras			De Las Heras a Prat		
Indicador	Escenario actual (N=14)	Escenario Propuesto (N=4)	Variación OV-A	Escenario actual (N=6)	Escenario propuesto (N=12)	Variación OV-A
Media	100%	93%	-7%	100%	66%	-34%
Velocidad promedio (km/h)	100%	106%	+6%	100%	160%	+60%
Mediana	100%	94%	-6%	100%	67%	-33%
Velocidad promedio (km/h)	100%	106%	+6%	100%	146%	+46%

*La velocidad ciclista se estima con la formula base, considerando una distancia entre intersecciones de 468 m y el tiempo correspondiente a la media o mediana según corresponda.

*Nota: Los valores presentados corresponden a porcentaje relativo respecto al valor del escenario actual.

El análisis relativo al escenario actual confirma que la magnitud de la mejora depende del sentido de circulación. Entre Prat y Las Heras se observan reducciones moderadas en el tiempo de viaje (-7%) y un incremento en la velocidad promedio (+6%), lo que refleja una mejora parcial en la fluidez. En cambio, en el sentido contrario los efectos son mucho más significativos, con una disminución del 34% en tiempos de viaje y un aumento en el 60% en la velocidad promedio, lo que evidencia que la onda verde corrige de manera sustantiva la condición más crítica del tramo estudiado, caracterizada inicialmente por múltiples paradas.

B) Resultados del comportamiento ciclistas: considerando ciclistas informados de la velocidad de sincronización.

Este caso presenta ciertas limitaciones metodológicas, ya que existe una variación considerable entre los tamaños muestrales de los escenarios actual y propuesto. En A. Prat, el escenario actual

cuenta con N=6 y el propuesto con N=25; en Las Heras, N=4 y N=24, respectivamente. Estas diferencias incrementan la sensibilidad de los porcentajes a pequeños cambios en el número de observaciones, afectando a la representatividad y la fiabilidad de la comparación. La diferencia aproximada de 20 usuarios entre escenarios refuerza la limitación planteada.

Para mitigar el problema y evaluar si las variaciones observadas son estadísticamente relevantes, debería incorporarse el análisis de significancia mediante la prueba exacta de Fisher, lo que permitirá determinar si los cambios responden a un patrón de azar o tienen relación con los escenarios planteados.

Tabla 4.11: Cuantificación de los indicadores medidos en el escenario usuarios con información de la estrategia.

	O'Higgins			Las Heras		
Indicador	Escenario actual (N=6)	Escenario Propuesto (N=25)	Variación OV-A	Escenario actual (N=4)	Escenario propuesto (N=24)	Variación OV-A
Paradas	0%	0	0%	0%	0%	0%
Cruzan semáforo en rojo	50%	0%	-50%	0%	0%	0%
Cruzan en verde sin detenerse	17%	56%	+39%	50%	54%	+4%
Tiempo promedio de detención	0	0	0	100%	0	-100%

Los resultados evidencian que la onda verde ciclista aplicada con ciclistas informados genera mejoras relevantes en seguridad vial y continuidad de viaje, especialmente en la intersección Prat-San Martín, donde se eliminaron los cruces en rojo y aumento de forma significativa la proporción de viajes fluidos en verde. En Las Heras-San Martín, si bien el impacto sobre los cruces en verde fue reducido, la estrategia eliminó el tiempo de espera, reforzando su aporte a la eficiencia operativa. Estos hallazgos muestran que la información entregada a los usuarios potencia los beneficios de la sincronización, aunque su efectividad varía según las características propias de cada intersección. En el caso del porcentaje de cruces en verde en Las Heras el aumento fue bajo comparado con Prat, la variación entre ambas intersecciones se explica porque Prat partía de una condición más crítica en el escenario actual, con bajo porcentaje de cruces en verde y un porcentaje de un 50% de cruces en rojo, por esto la onda verde produjo un cambio notorio. En cambio, Las Heras ya tenía un nivel alto de fluidez en el escenario actual, por lo que el impacto adicional de la sincronización fue mucho menor.

Semejante al caso de estudio anterior los tiempos de viaje de Arturo Prat a Las Heras se analizan por sentido de circulación y se indican en la tabla siguiente:

Tabla 4.12: Tiempos de viaje entre Arturo Prat y Las Heras, medidos mediante medios audiovisuales (usuarios con información).

	De Prat a Las Heras (484 m)			De Las Heras a Prat (484 m)		
Indicador	Escenario actual (N=3)	Escenario Propuesto (N=11)	Variación OV-A	Escenario actual (N=3)	Escenario propuesto (N=12)	Variación OV-A
Media	100%	88%	-12%	100%	53%	-47%
Velocidad promedio (km/h)	100%	114%	+14%	100%	188%	+88%
Mediana	100%	89%	-11%	100%	51%	-49%
Velocidad promedio (km/h)	100%	113%	+13%	100%	189%	+89%

*La velocidad ciclista se estima con la formula base, considerando una distancia entre intersecciones de 484 m y el tiempo correspondiente a la media o mediana según corresponda.

*Nota: Los valores presentados corresponden a porcentaje relativo respecto al valor del escenario actual.

El análisis relativo respecto al escenario actual evidencia mejoras diferenciadas según el sentido de circulación. Al poniente las reducciones en tiempo de viaje fueron moderadas (-12%) y la velocidad promedio aumento en torno al 14% lo que refleja un efecto positivo pero acotado de fluidez. En contraste, en el sentido oriente los resultados muestran un cambio sustantivo, con reducciones cercanas al 50% en los tiempos de viaje y aumentos superiores al 80% en la velocidad, lo que confirma que la estrategia corrige de manera significativa una condición inicial altamente desfavorable. Esta diferencia se explica por el distinto nivel de comportamiento observado en el tramo, diferenciado por sentido de circulación, siendo más evidente el beneficio allí donde el escenario previo presentaba mayores restricciones.

En definitiva, el análisis audiovisual permitió constatar que la efectividad de la onda verde ciclista no solo depende de la programación semafórica, sino también de la capacidad de los usuarios para adaptar su comportamiento al sistema. La evidencia recogida demuestra que, aun con mejoras claras en seguridad y fluidez, la plena consolidación de la estrategia requiere un proceso progresivo, donde la comunicación con los usuarios y la adaptación operativa son tan relevantes como el diseño técnico. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar la onda verde no solo como una

medida de ingeniería de tránsito, sino también como una intervención integral que articula infraestructura, gestión y cultura vial.

C) Resultados para vehículos

Para el flujo motorizado en Av. San Martín (tramo A. Prat – Las Heras, 468 m), se evaluó el efecto de la modificación de los desfases, manteniendo constantes las duraciones de fase y la prioridad vehicular. El tiempo de viaje se mide considerando el recorrido de un vehículo entre dos puntos de control. Para ello, se identifica el instante en que el usuario atraviesa la primera intersección y se registra el momento en que cruza la segunda. La diferencia entre ambos registros corresponde al tiempo total de viaje en dicho tramo. De los resultados obtenidos se calcula la media y se obtiene un valor representativo para cada escenario; finalmente se determina el porcentaje relativo al escenario actual, dando como resultados los valores que se muestran en la Tabla 4.13, donde se evidencia el aumento del tiempo de viaje y la disminución de la velocidad promedio de los móviles.

Tabla 4.13: Comparación de criterios seleccionados para medir impacto en modo motorizado, sentido único de circulación de Prat a Las Heras.

Indicador	Escenario actual	Escenario propuesto	Variación
Tiempo de viaje	100%	150%	+50%
Velocidad	100%	65%	-35%

*Valores corresponden a porcentaje relativo respecto al escenario actual.

Los resultados muestran un aumento del tiempo de viaje de un 50% y una disminución de la velocidad media de 35%. Este deterioro relativo refleja el carácter redistributivo de la medida, que prioriza la continuidad ciclista en un tramo y franja horaria determinada.

De manera comparativa, a partir del análisis del cociente entre el costo agregado vehicular y el beneficio agregado para los ciclistas, considerando los flujos observados y medidos mediante videos, para vehículos privados 964 veh/h, para microbús de 4 micros/hora y para bicicleta de 49 cic/h (24 al oriente y 25 al poniente), con tasas de ocupación de 1.5 pax/veh transporte privado y 10 pax/micro para microbús. Se calcula la razón de los valores con la siguiente formula:

$$\frac{B_{cic}}{C_{veh}} = \frac{Q_{cic} * \Delta T_{cic} * TO_{cic}}{Q_{veh} * \Delta T_{veh} * TO_{veh}}$$

Ecuación 4-1

Donde:

B_{cic} : Beneficio agregado para ciclistas (segundos ganados)

C_{veh} : Costo agregado para vehículos (segundos perdidos)

ΔT_{cic} : Reducción de tiempo ciclista en el tramo

ΔT_{veh} : Incremento promedio de tiempo de viaje vehicular en el tramo

Q_{cic} : Número de ciclistas en el tramo

Q_{veh} : Número de vehículos en el tramo

TO_{cic} : Tasa de ocupación, para las bicicletas es 1 pax/cic

TO_{veh} : Tasa de ocupación vehicular, para vehículo privado se considera 1.5 y para microbús un valor de 10 pax/h

Considerando el incremento de tiempo de viaje vehicular de 36 s y para las bicicletas con -9 s para el sentido poniente y -56 para el sentido oriente, con todos los datos obtenidos se procede al cálculo de la razón de costo beneficio de los modos estudiados, donde se obtiene un valor de -1:34, lo que permite concluir que, por cada segundo de reducción en el tiempo de viaje ciclista, el flujo motorizado aumenta en 34 segundos su tiempo de viaje. De esta forma la mejora de fluidez y seguridad para ciclistas se traduce en un costo adicional para los auto móviles, que resulta explícito y medible.

Para completar el análisis se desarrolló un cálculo orientado a estimar el punto de equilibrio modal, en cual el beneficio acumulado de los ciclistas compense la pérdida de los vehículos. El balance se plantea mediante las expresiones ya mostradas anteriormente y con los valores ya medidos. Obteniéndose un valor de 824 cic/h para equiparar la proporción de disminución y aumento de tiempos de viaje. Sin embargo, esta cifra resulta prácticamente inalcanzable en el contexto local, ya que ni siquiera considerando la demanda diaria completa del corredor se acerca a ese valor. Los detalles de los cálculos se presentan en el Anexo E.1. El resultado revela una incertidumbre estructural, si las decisiones de movilidad se apoyan únicamente en la magnitud de los flujos, las medidas de fomento a la movilidad activa tenderían a quedar en desventaja frente al transporte motorizado, perpetuando un sesgo modal. Por ello, más que depender exclusivamente de la cantidad de usuarios, la evaluación de políticas de movilidad debe incorporar criterios de equidad, sostenibilidad y seguridad vial, reconociendo que favorecer al modo ciclista responde a objetivos estratégicos en la ciudad, aunque los volúmenes de tránsito aún no alcancen los de los automóviles.

Es importante destacar que este efecto corresponde a un escenario piloto en un tramo corto y en un horario específico, sin ajustes adicionales a la programación semafórica más allá de los desfases. Por lo tanto, no implica la generación de congestión estructural ni deterioro permanente del nivel de servicio vehicular. En un esquema de control centralizado, es posible introducir ajustes horarios, modificaciones en los desfases e incluso ajustes de fases para mitigar el impacto en el modo motorizado, manteniendo a la vez los beneficios para los ciclistas. En síntesis, los resultados muestran que la OVC genera un costo modal cuantificable para los vehículos, pero gestionable en el marco de un sistema de control, y que la lógica de decisión no puede ser únicamente dependiente del flujo medido, sino que también de la visión de movilidad sostenible que la política pública busca consolidar.

D) Impacto para peatones

La implementación de la estrategia no modificó la existencia ni la duración de las fases peatonales en las intersecciones del tramo, el ajuste se limitó a desfases de coordinación entre semáforos. En consecuencia, el efecto observado sobre el modo peatonal fue neutral en términos operativos durante el piloto, ya que las condiciones de accesibilidad y condiciones del cruce se mantuvieron. Desde el punto de vista de desempeño, el análisis cualitativo de los registros en las intersecciones con registro audiovisual (Prat/SM y Las Heras/SM) no evidenció aumento de tiempos de espera anómalos, acumulación de peatones en esquinas, ni incremento de cruces en rojo respecto al escenario base. La secuencia de liberación cambió levemente por la nueva coordinación, pero sin recortar ventanas de cruce ni comprometer la seguridad de usuarios vulnerables como personas mayores, niños/as y personas de movilidad reducida.

Dado que la implementación se realizó en una franja horaria acotada y con demandas peatonales moderadas, resulta recomendable monitorear en operación algunos indicadores en horarios punta para verificar la neutralidad del efecto. Estos indicadores pueden ser: demora promedio peatonal, cumplimiento de la fase, observaciones de seguridad y conflictos. En caso de detectarse aumentos de demora o conflictos específicos, el esquema de control centralizado permite aplicar ajustes, lo que resulta útil en caso de requerir extensión de fases en esquinas más demandadas o incluso protección de viraje en cruces en los periodos críticos. En síntesis, bajo las condiciones evaluadas, el impacto peatonal es neutro, no obstante, se propone seguimiento sistemático en horas punta y de ser necesario, ajustes finos para resguardar la seguridad y comodidad del cruce peatonal en convivencia con la onda verde

4.8.2. Evaluación basada en recorridos con GPS para ciclistas con información de la estrategia

Los datos fueron procesados mediante la plataforma Strava, en Anexo E.1. se presentan los detalles gráficos extraídos de la aplicación GPS, y se resumen en la siguiente Tabla 4.14, la cual muestra los resultados obtenidos para cada sentido de circulación. Los ciclistas que participaron en este ejercicio fueron informados respecto al valor de la velocidad de sincronización, de modo que realizaron los recorridos en conocimiento previo de la estrategia implementada, ya que fueron contratados para ejecutar los desplazamientos en el día y hora definidos. De este modo se aseguró que el registro controlado de los viajes bajo las condiciones de la estrategia, lo cual permite evaluar el desempeño técnico en un escenario piloto.

Tabla 4.14: Resultados medios de los indicadores obtenidos de los viajes realizados con GPS.

	De Prat a Carrera			De Carrera a Prat		
Indicador	Escenario actual (N=)	Escenario Propuesto (N=)	Variación	Escenario actual (N=)	Escenario propuesto (N=)	Variación
Tiempo total de viaje (s)	100%	78%	-22%	100%	77%	-23%
Velocidad promedio (km/h)	100%	115%	+15%	100%	130%	+30%
Número de detenciones	100%	0	-100%	100%	0	-100%
Tiempo detenido acumulado (s)	100%	0	-100%	100%	0	-100%

Los resultados obtenidos mediante GPS se ilustran en las imágenes de Figura 4.21 a Figura 4.24, donde se comparan los perfiles de velocidad en ambos sentidos de circulación. Se observa como en el escenario con onda verde se desarrollan las trayectorias de manera más continua, con velocidad más estable y sin detenciones en las intersecciones, confirmando lo mostrado en la Tabla 4.14.

Prat a Carrera

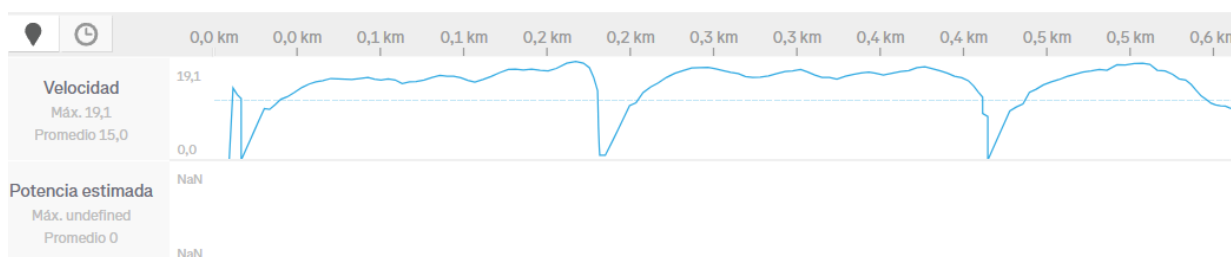


Figura 4.21: Recorrido ciclista Prat a Carrera - perfil de velocidad situación actual.

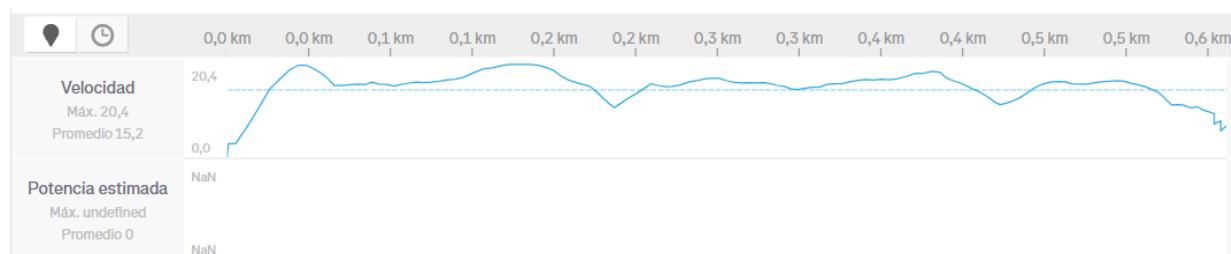


Figura 4.22: Recorrido ciclista Prat a Carrera - perfil de velocidad situación OVC.

Carrera a Prat



Figura 4.23: Recorrido ciclista Carrera a Prat - perfil de velocidad situación actual.

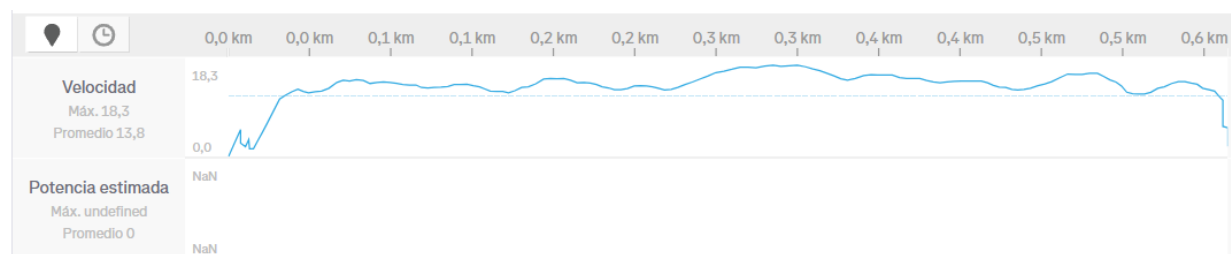


Figura 4.24: Recorrido ciclista Carrera a Prat - perfil de velocidad situación OVC.

En conjunto, los resultados muestran una mejora evidente en la eficiencia del viaje ciclista, destacando la reducción total de las detenciones y del tiempo detenido, así un aumento significativo de la velocidad promedio ciclista, la cual se aproxima al valor de referencia de 16 km/h. En general, los recorridos realizados bajo el escenario propuesto se desarrollaron de manera más fluida y continua, sin interrupciones.

No obstante, es importante reconocer que estas mediciones se llevaron a cabo en condiciones controladas, con trayectos planificados y ciclistas con conocimientos previo del valor de velocidad adoptado para la sincronización, por lo que el buen desempeño registrado no necesariamente refleja lo que experimentaría un usuario común de la ciclovía. En un escenario real, los usuarios podrían no ajustar su velocidad a la onda verde si no cuentan información clara, señalización visible o experiencia previa con este tipo de estrategia. Por lo tanto, aunque la evaluación confirma la viabilidad técnica del sistema, su efectividad en la práctica dependerá en gran medida de la adaptación de los usuarios, de la curva de aprendizaje asociada y del apoyo de medidas de comunicación y señalización que acompañen la implementación.

4.8.3. Conclusión del análisis operativo de la implementación

En síntesis, los resultados anteriores confirman que la implementación de una onda verde ciclista constituye una estrategia eficaz para mejorar la movilidad activa en el corredor estudiado. Los resultados muestran reducciones claras en detenciones, tiempos de espera, tiempos de viaje y condiciones de cruces inseguras, lo que se traduce en mayores niveles de fluidez, eficiencia y seguridad para los ciclistas. Al mismo tiempo, se verifican efectos secundarios sobre el tránsito motorizado, con incrementos en los tiempos de viaje y disminuciones en la velocidad de circulación. Estos impactos reflejan el carácter redistributivo de la medida, que favorece la movilidad ciclista priorizando un modo sostenible frente al motorizado. No obstante, el desempeño final de la estrategia no depende únicamente de la programación técnica, sino también de la adaptación de los usuarios y de la existencia de medidas complementarias que faciliten la comprensión y aprovechamiento del sistema. De este modo, la onda verde ciclista se presenta como una medida factible y coherente con los objetivos de promover la movilidad sostenible, siempre que su implementación se conciba como un proceso integral que equilibre las necesidades de los distintos modos de transporte.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación permitió evaluar la factibilidad técnica de implementar una estrategia de sincronización semafórica adaptada a la velocidad ciclista en un corredor urbano de la ciudad de Temuco. A través del levantamiento de información en terreno, el análisis de la infraestructura, la caracterización del flujo ciclista y modelación mediante diagramas espacio tiempo, se demostró que la propuesta es técnicamente viable en el tramo seleccionado del corredor San Martín. Los resultados obtenidos teóricamente y validados en terreno mediante la implementación de la estrategia evidencian una reducción en el número de paradas, en los tiempos de viaje y un aumento significativo en la proporción de cruces en verde sin detención, mejorando con ello la experiencia de desplazamiento y la eficiencia del modo ciclista, ya que adicionalmente permitió a los usuarios mantener una velocidad estable sin recurrir a aceleraciones y desaceleración.

El estudio permitió identificar criterios claves para la estrategia de onda verde, entre los cuales se tienen, la velocidad efectiva de circulación, la regularidad en las distancias entre intersecciones y la duración de los ciclos semafóricos. La velocidad de referencia utilizada fue de 16 km/h, se obtuvo mediante análisis de trayectorias reales, se validó como representativa para la muestra analizada, aunque se reconoce su sensibilidad frente a la heterogeneidad del comportamiento ciclista en contextos reales. Esto refuerza la necesidad de incorporar intervenciones complementarias como señalización visible de la velocidad, difusión de la estrategia y educación vial a fin de consolidar completamente la efectividad de la sincronización.

La selección del tramo a analizar se justificó mediante un análisis multicriterio que consideró variables como conectividad, continuidad, topografía, presencia de semáforos integrados y volumen del flujo ciclista. Si bien este último parámetro resulta ser fundamental, su análisis presenta particularidades importantes. A diferencia del tránsito motorizado, que suele formar pelotones compactos que se dispersan en bloque al recibir la luz verde, los ciclistas circulan en condiciones de flujo libre, sin una formación ordenada ni una densidad homogénea que permita definir claramente grupos de paso. En muchos casos, los usuarios de bicicleta tienden a ocupar distintos espacios de la vía, incluyendo ocasionalmente la calzada o vereda para realizar maniobras de adelantamiento o giro, lo cual dificulta el análisis tradicional basado en agrupamiento. La dinámica mencionada plantea una interrogante clave ¿Cuántos ciclistas se benefician efectivamente en una sincronización semafórica?, la ausencia de pelotones obliga a replantear los criterios de evaluación, incorporando factores complementarios que permitan equiparar las diferencias de demanda entre los modos de transporte. En este contexto, resulta necesario definir umbrales o parámetros adaptados al comportamiento del flujo ciclista, con el fin de garantizar que las estrategias de sincronización semafórica generen beneficios tangibles para una proporción significativa de usuarios. Así el tramo en estudio presentó condiciones adecuadas tanto para el análisis como para la propuesta de intervención, permitiendo validar en terreno la coherencia de los desfases calculados y sus efectos sobre los usuarios reales de la ciclovía. Mientras que para el caso de los motorizados no se pudo evaluar completamente el efecto debido a falta de instrumentos tecnológicos que permitan medir colas y entreguen una mayor cobertura de análisis que las cámaras utilizadas, ya que estas solo se enfocaban en la ciclovía en estudio.

Si bien la propuesta se centra en el diseño técnico de la Onda verde, se identificaron elementos externos que podrían condicionar su implementación, como la disponibilidad de recursos, la capacidad operativa de los sistemas de control existentes y la voluntad política para priorizar modos

de transporte sostenibles. Estos factores, si bien no fueron parte de los alcances del estudio, deben ser considerados para mejorar la efectividad de la estrategia. En definitiva, los resultados obtenidos respaldan la viabilidad técnica de la estrategia ciclista en Temuco y demuestra que su aplicabilidad puede contribuir a una movilidad urbana eficiente, segura y equitativa, buscando consolidar el rol de bicicleta como modo de transporte prioritario en determinados corredores.

Sin embargo, más allá de la validación técnica, el estudio evidenció importantes restricciones operativas y estructurales que condicionan su implementación. Actualmente, el sistema de control de tránsito de la ciudad, operado a través del software Centrac, carece de funcionalidades claves para gestionar de forma dinámica la red semafórica de acuerdo con la demanda real de los ciclos. Si bien la plataforma cuenta con funcionalidades de control adaptativo, su aplicación requiere de condiciones técnicas que no están disponibles, como la cobertura de sensores y protocolos de comunicación en tiempo real con las intersecciones. La ausencia de estas condiciones impide aprovechar al máximo las capacidades del software y limita la posibilidad de evitar los llamados horarios muertos de la onda verde, en los que no existe una demanda considerable que justifique la aplicación de los desfases. Tecnologías de detección dinámica, orientadas a monitorear la presencia de ciclistas en tiempo real permiten implementar esquemas de control más eficientes y multimodales, ajustando los ciclos semafóricos a la demanda efectiva de cada modo.

En este contexto, se sugiere que futuras investigaciones incluyan la validación práctica de la estrategia mediante pruebas piloto controladas en coordinación con la UOCT, integrando sistemas de sensorización en las ciclo vías y levantando información de los diferentes usuarios. Ello permite no solo recoger retroalimentación ciclista y de operadores, sino también ajustar adecuadamente los parámetros de diseño, segmentar por modo de transporte y evaluar con mayor precisión el impacto de una onda verde ciclista sobre la operación global de la vía.

Nomenclatura

Sigla	Significado
CROW	"Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Infra (Netherlands)" – Manual holandés de diseño y planificación de infraestructuras ciclistas.
NACTO	National Association of City Transportation Officials – Asociación de funcionarios de transporte de ciudades, autora de guías de diseño urbano y ciclista.
FHWA	Federal Highway Administration – Administración Federal de Carreteras de EE. UU., emisora de manuales y guías de diseño vial.
OV	Onda Verde
UOCT	Unidad Operativa de Control de Tránsito
SECTRA	Secretaría de Planificación de Transporte
GPS	Global Positioning System – Sistema de Posicionamiento Global
A	Situación actual
SM	San Martín
LH	Las Heras
GC	General Carrera

CAPÍTULO 6

Bibliografía

Capítulo 6. Referencias

- Andersen, T. (2013). *Green wave for cyclists (Odense)*. <http://trafficious.com/traffic-lights/green-wave-for-cyclists-odense>
- Apostola, T. (2014). A traffic signal optimization method for balancing the interests of cyclists and motorized traffic. *Repositorio TU Delft*.
<https://repository.tudelft.nl/record/uuid:lead175f-0e0e-4eba-baa7-18f31b468854>
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 73-78.
- Bialick, A. (2011). *Green wave become permanent on Valencia street*.
- CONASET. (2020). *Manual de señalización de tránsito*. Ministerio de transporte y telecomunicaciones.
- CROW. (2011). *Manual de diseño para el tráfico de bicicletas*. (2.^a ed., version en español).
- Eltit, V. (Agosto de 2011). Transporte urbano no motorizado: el potencial de la bicicleta en la ciudad de Temuco. *Revista INVI*, vol. 26, núm. 72, 153-184.
- FHWA. (2013). *Traffic signal timing manual: coordination*. U.S.: Department of Transportation.
<http://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop08024/chapter6.htm>
- Fietsberaad. (2006). *Continuous and integral: The cycling policies of Groningen and other European cycling cities*. Amsterdam: Fietsberaad.
<http://www.fietsberaad.nl/library/repository/bestanden/Publication%207%20Continuous%20and%20integral.pdf>
- Graystone, M., Mitra, R., & Hess, P. (2022). Gendered perceptions of cycling safety and on-street bicycle infrastructure: Bridging the gap. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 105, 105.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103237>
- Hoegh, N. (2007). *Green waves for cyclists in Copenhagen Denmark*.
- Litman, T. (2013). *Evaluating Benefits and Costs of Active Transportation: A Guide*. Ottawa, Ontario: Canadian Electronic Library.
- Lora, A., Galán, C., & Zamora - Díaz, R. (2024). Propuesta metodológica para la identificación de potenciales corredores verdes urbanos. Estudio de caso: Temuco, Chile. *Revista de Arquitectura*, 26(2), 189-204.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2015). *Vialidad Ciclo-inclusiva*. Santiago: Gobierno de Chile. https://www.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/150506%20MANUAL%20FINAL_red.pdf
- MTT. (2021). *Estrategia nacional de movilidad sostenible*. Santiago de Chile: Ministerio de transporte y telecomunicaciones.
- NACTO. (2024). *Coordinated signal timing (Urban Street Design Guide)*. National Association of City Transportation Officials.
- Organización Mundial de la Salud. (19 de Marzo de 2025). <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/urban-health>
- Pucher, J., & Buehler, R. (2012). *City Cycling*.
- Ríos, R., Taddia, A., Pardo, C., & LLeras, N. (2015). *Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: Guía para impulsar el uso de la bicicleta*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.18235/0006073>
- SECTRA. (2019). *Guía de composición y diseño operacional de ciclovías*. Santiago de Chile: Ministerio de transporte y telecomunicaciones.
- SECTRA. (2024). *Guía diseño vial ciclo-inclusivo*. Ministerio de transporte y telecomunicaciones.

Solutiva Consultores. (2015). “*CONSTRUCCIÓN RED DE CICLORUTAS TEMUCO - PADRE LAS CASAS*”. Concepción.

Welle, B., Liu, Q., Li, W., Adiazola-Steil, C., King, R., Sarmiento , C., & Obelheiro, M. (s.f.). *Ciudades mas seguras mediante el diseño Version 1.0*. EMBARQ.

CAPÍTULO 7

Anexos

Capítulo 7. Anexos

Anexos A. Criterios operativos y parámetros de diseño para onda verde

Anexo A.1. Sistema semafórico ciclista

6.2.5 Semáforos

En general los cruces semaforizados de una cicloruta permiten regular la circulación de los ciclistas a través de las lámparas de semáforos vehiculares y peatonales. Sin embargo, se deben instalar cabezales y lámparas especiales para los ciclistas cuando, desde la línea de parada de la ciclovía o ciclobanda, no sea posible ver al frente alguna de dichas lámparas, o cuando los ciclistas deben recibir indicaciones diferentes a las entregadas por los cabezales destinados a peatones y otros vehículos.

Los cabezales especiales dirigidos hacia los ciclistas están conformados por dos lentes, rojo y verde, con la indicación mostrada en la Figura 6.2 - 23.

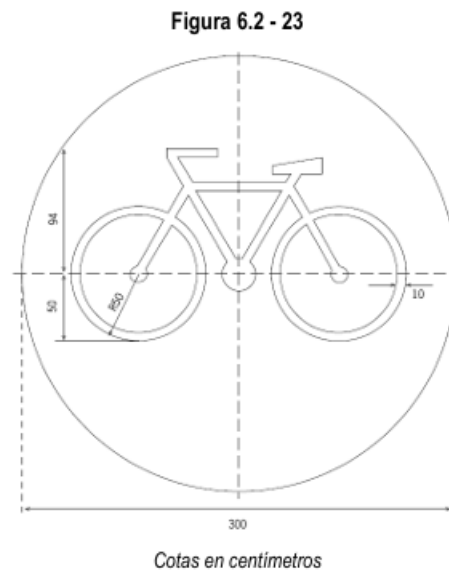


Figura A. 1: Sistema semafórico ciclistas, obtenido de Manual de señalización

Anexos B. Condiciones actuales de infraestructura y diseño semafórico

Anexo B.1. Ciclovías urbanas

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1OW3flw59Cl1XOPrlpeV_Z_VGUQTgK5n/edit?usp=sharing&ouid=112702969059274680206&rtpof=true&sd=true

Anexo B.2. Semáforos de Temuco (enero 2025)

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1DyKS_tNVKCOTGIM1PQfDfndfOgx5dEHp/edit?usp=sharing&ouid=112702969059274680206&rtpof=true&sd=true

Anexo B.3. Cámaras de video (UOCT)

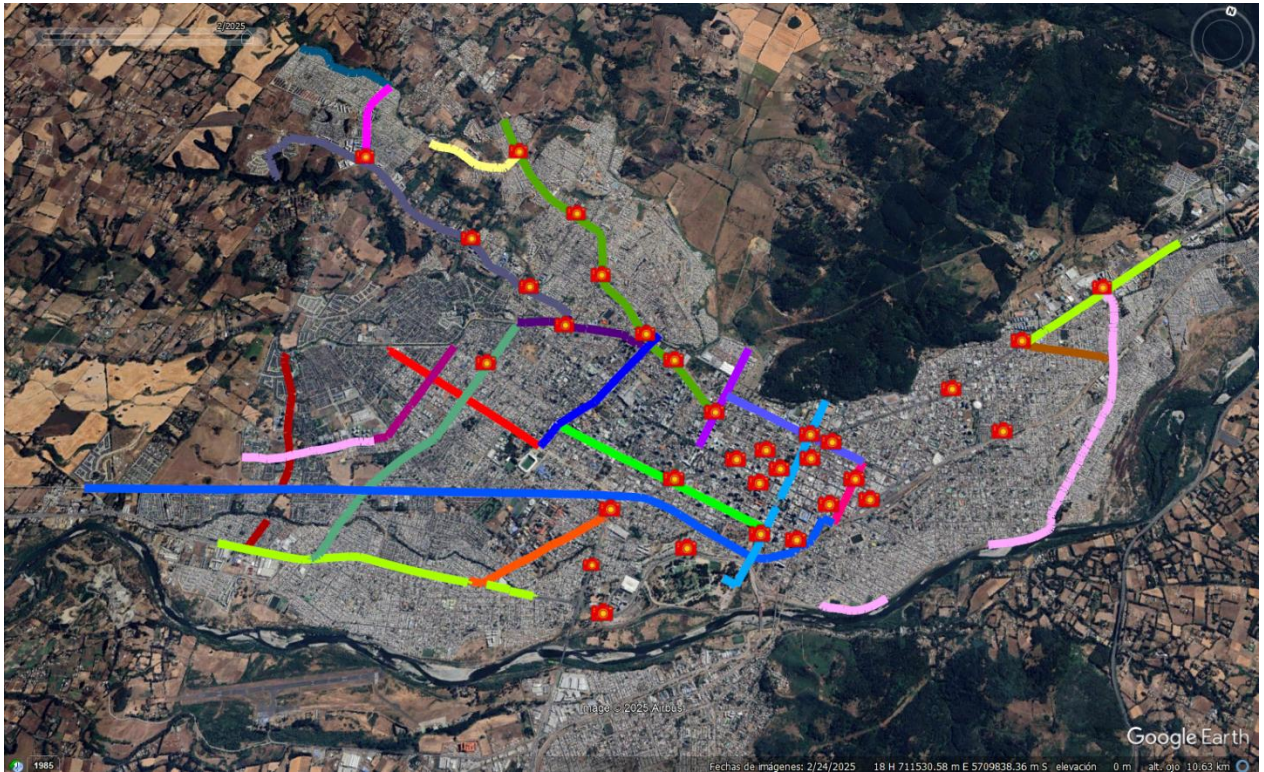


Figura B. 1: Cámaras de video gestionadas por UOCT en Temuco

Anexo B.4. Análisis de distancias entre semáforos y evaluación matriz de selección

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/15kRK9cyQeEpxTdpi9UEE97OQ7356wVbA/edit?usp=sharing&ouid=112702969059274680206&rtpof=true&sd=true>

Anexo B.5. Programaciones actuales**Tabla B. 1:** Programaciones semafóricas de las intersecciones para los diferentes periodos.

Fuente: UOCT

Periodo	Intersección	Ciclo (s)	Desfase (s)	Verde (s)	Amarillo (s)	Rojo (s)
8:00 a 9:00	A Prat /San Martín	60	0	24	3	33
	San Martín/ V Mackenna	60	11	30	3	27
	San Martín/ Lagos	60	20	33	3	24
	San Martín/ Lynch	60	30	31	3	26
	San Martín/ Las Heras	60	41	33	3	24
	San Martín/ G Carrera	60	51	30	4	26
	San Martín/ R Freire	60	11	29	3	28
	San Martín/ Caupolicán	112	40	41	3	68
	A Prat /San Martín	52	0	20	3	29
	San Martín/ V Mackenna	52	11	23	4	26
	San Martín/ Lagos	52	20	25	4	24
	San Martín/ Lynch	52	30	23	3	26
15:00 a 16:00	San Martín/ Las Heras	52	41	25	3	24
	San Martín/ G Carrera	52	51	25	3	23
	San Martín/ R Freire	48	11	23	3	21
	San Martín/ Caupolicán	96	40	43	3	50
	A Prat /San Martín	64	0	25	3	36
	San Martín/ V Mackenna	64	11	28	4	33
	San Martín/ Lagos	64	20	49	4	12
	San Martín/ Lynch	64	30	37	3	24
	San Martín/ Las Heras	64	41	37	3	24
	San Martín/ G Carrera	64	51	32	3	28
	San Martín/ R Freire	64	11	37	3	23
	San Martín/ Caupolicán	120	40	61	3	56

Anexos C. Caracterización del flujo ciclista**Anexo C.1. Análisis datos de aforos automáticos****Tabla C. 1:** Flujo medio por día obtenido mediante registro de contadores.

Ciclovía	Flujo medio diario
Pablo Neruda	654
Arturo Prat	593
Hosctetter	573
Balmaceda	523
Temuco-Labranza	522
San Martín	503
Gabriela Mistral	500
Francisco Salazar	331
Javiera Carrera	297
Luis Duran	296
Los Pablos	274
Los Creadores	132
Los Músicos	113
Inés Suarez	99
Braulio Arenas	59
Nahuelbuta	57

Anexo C.2. Análisis de datos audiovisuales

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1IYNpiw_Dz-UOxk7-VuwZwM2WD4NRE7ne/edit?usp=sharing&ouid=112702969059274680206&rtpof=true&sd=true

Anexos D. Escenario Actual – Diagrama espacio temporal**Anexo D.1. Velocidad promedio ciclista**

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/16A9vdOf2Ozr978RKkR39ZkzCUPAQZYXU/edit?usp=sharing&ouid=112702969059274680206&rtpof=true&sd=true>

Anexo D.2. Modelo Actual de programaciones y propuesta de Onda verde

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1oVhKQA_I987OPRI9VIF8eHOtl6l_2BWQ/edit?usp=sharing&ouid=112702969059274680206&rtpof=true&sd=true

Anexos E. Implementación de la propuesta de onda verde ciclista

Anexo E.1. Cálculo de equilibrio modal

Para complementar el análisis de impacto modal, se desarrolló un cálculo orientado a estimar un punto de equilibrio entre los beneficios obtenidos por ciclistas y las pérdidas asociadas a los usuarios motorizados. A diferencia de un enfoque meramente temporal, se incorporan variables de flujo de usuario y tasa de ocupación vehicular, con el fin de ponderar el efecto de cada modo en el tramo analizado. El balance se plantea mediante las siguientes expresiones:

$$B_{cic} = Q_{cic} * \Delta T_{cic} * TO_{cic}$$

Ecuación 7-1

$$C_{veh} = Q_{veh} * \Delta T_{veh} * TO_{veh}$$

Ecuación 7-2

Donde:

B_{cic} : Beneficio agregado para ciclistas (segundos ganados)

C_{veh} : Costo agregado para vehículos (segundos perdidos)

ΔT_{cic} : Reducción de tiempo ciclista en el tramo

ΔT_{veh} : Incremento promedio de tiempo de viaje vehicular en el tramo

Q_{cic} : Número de ciclistas en el tramo

Q_{veh} : Número de vehículos en el tramo

TO_{cic} : Tasa de ocupación, para las bicicletas es 1 pax/cic

TO_{veh} : Tasa de ocupación vehicular, para vehículo privado se considera 1.5 y para microbús un valor de 10 pax/h

El equilibrio modal se alcanza cuando:

$$B_{cic} = C_{veh}$$

Ecuación 7-3

Con los siguientes datos se realiza el cálculo de la proporción entre incremento de tiempo de viaje vehicular y decremento de tiempo de viaje ciclista.

$Q_{veh} = 964 \text{ veh/h}$, $Q_{cic} = 49 \text{ cic/h}$, con 25 al poniente y 24 al oriente, $\Delta T_{veh} = +36 \text{ s}$, $\Delta T_{cic} = -9 \text{ al poniente y } -56 \text{ al oriente}$, $TO_{veh} = 1.5 \text{ pax/veh para vehiculo y } 10 \text{ pax/veh para microbús}$ y $TO_{cic} = 1 \text{ pax/cic}$.

Con estos valores, la comparación inicial arroja una proporción de -1: +34

Lo que indica que un segundo de disminución el modo ciclista implica 34 segundos de aumento del modo motorizado Y al calcular el fujo ciclista para que los beneficios y costos estén equilibrados se obtiene un valor de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_{cic} = \frac{\Delta T_{veh} * (Q_{veh} * TO_{veh})}{\Delta T_{cic} * TO_{cic}}$$

Ecuación 7-4

Al resolver la formula se obtiene un valor de 823 cic/h.

Anexo E.2. Comportamiento de la velocidad en viajes realizados con y sin la estrategia

a) Escenario actual

- Prat a Carrera

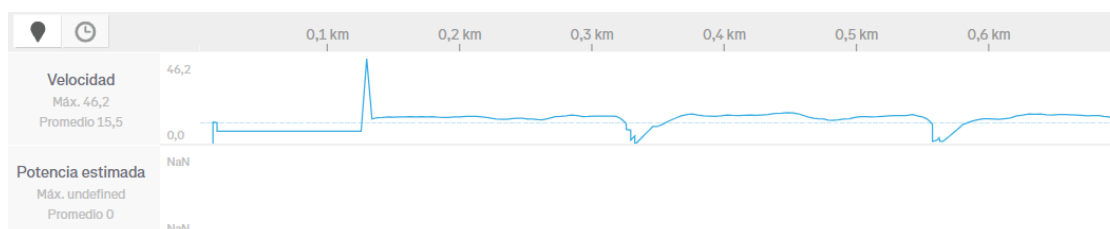


Figura E. 1: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de Prat hacia G. Carrera.

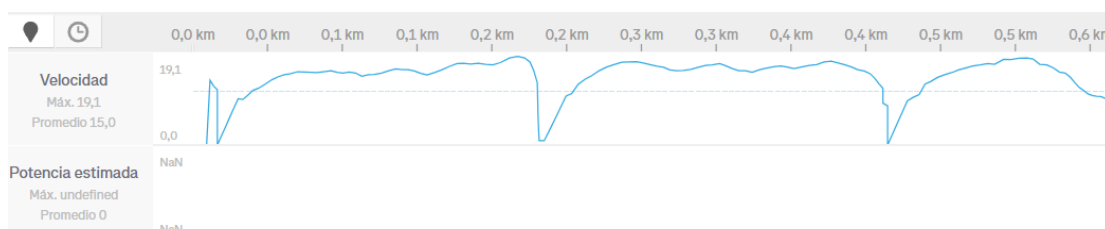


Figura E. 2: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de Prat hacia G. Carrera.

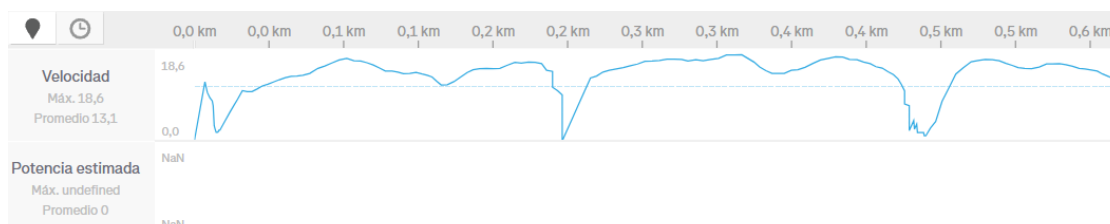


Figura E. 3: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de Prat hacia G. Carrera.

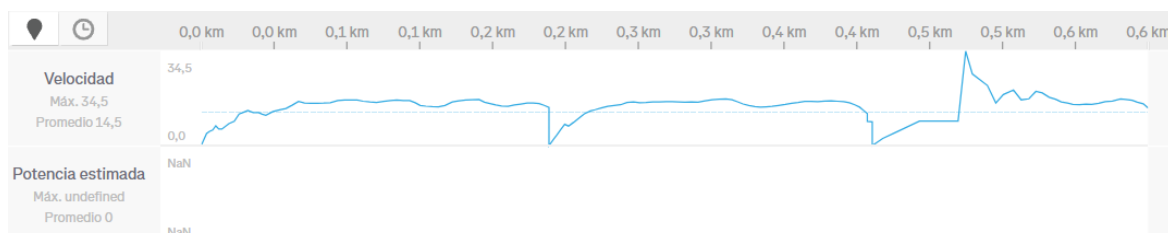


Figura E. 4: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de Prat hacia G. Carrera.

- **Carrera a Prat**

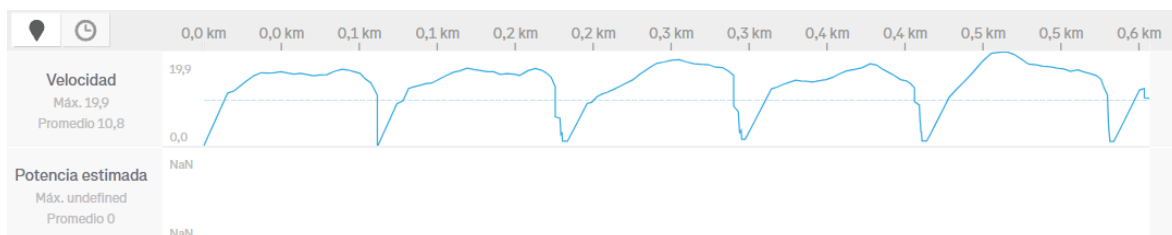


Figura E. 5: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de G. Carrera hacia Prat.

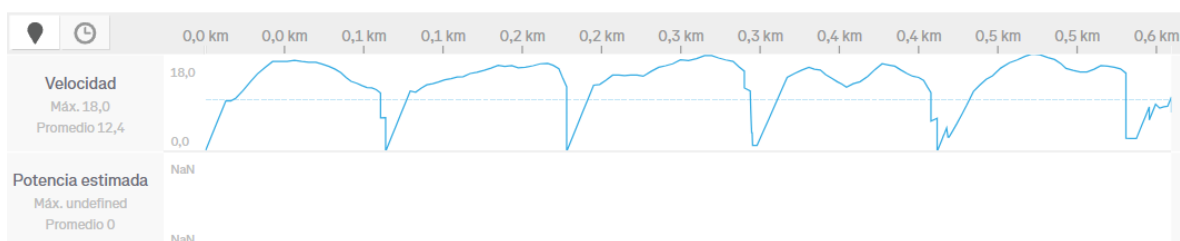


Figura E. 6: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de G. Carrera hacia Prat.

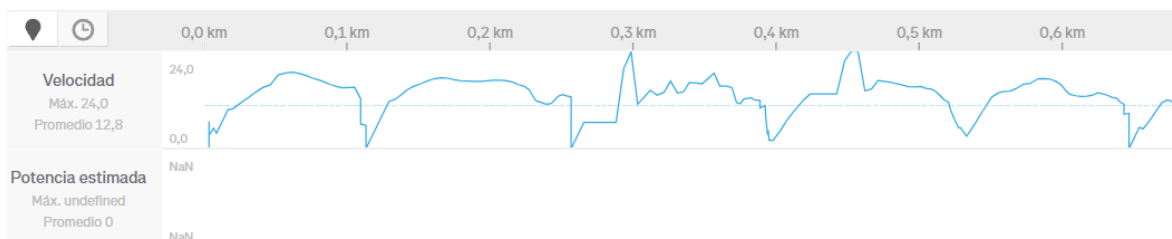


Figura E. 7: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario actual de G. Carrera hacia Prat.

b) Escenario con onda verde ciclista (OVC)

- Prat a Carrera**

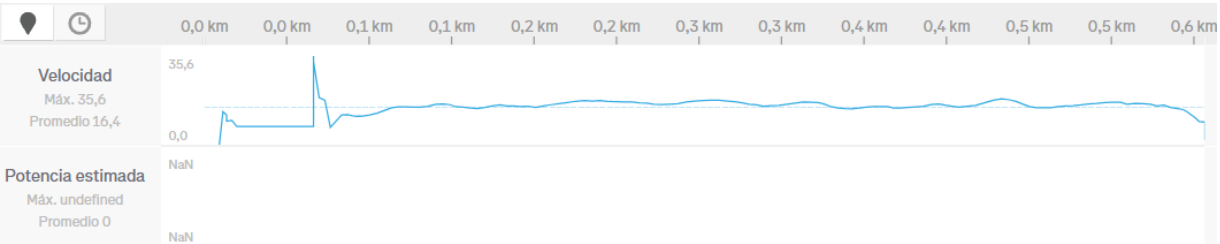


Figura E. 8: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario OVC de Prat hacia G. Carrera.



Figura E. 9: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario OVC de Prat hacia G. Carrera.

- Carrera a Prat**

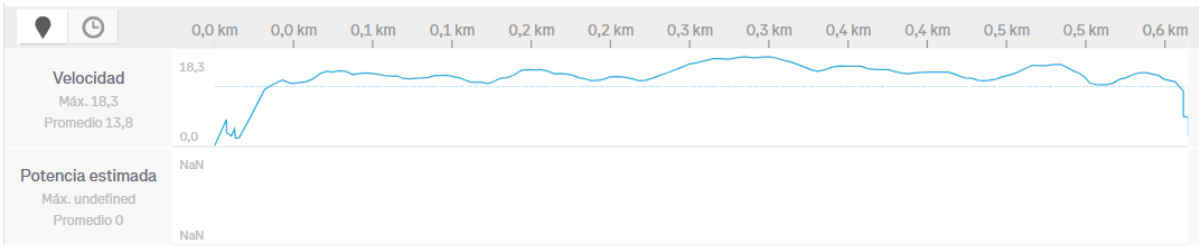


Figura E. 10: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario OVC de G. Carrera hacia Prat.

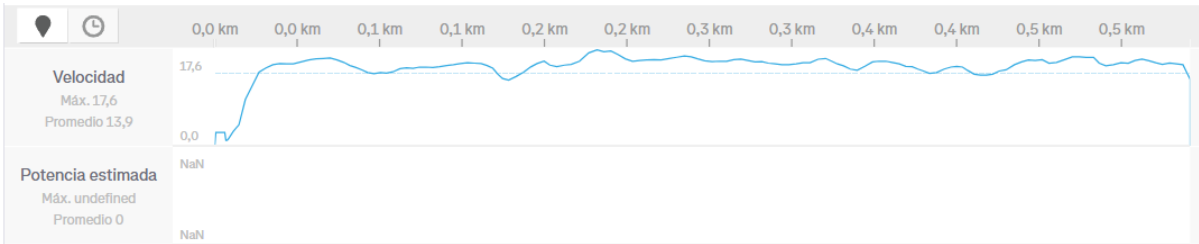


Figura E. 11: Espectro de velocidad de viaje ciclista en escenario OVC de G. Carrera hacia Prat.

Anexo E.3. Análisis de escenarios y cálculo de indicadores de desempeño

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Ldu0r1i_xDJ-tnhwFgPdFF9SzW9wxedx/edit?usp=sharing&ouid=112702969059274680206&rtpof=true&sd=true

