



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Caracterización de la maniobra de adelantamiento y el comportamiento frente al tráfico opuesto de los usuarios de vehículos de movilidad personal mediante el uso de un patinete eléctrico instrumentado con tecnología Raspberry Pi. Aplicación práctica en el distrito Algirós de la ciudad de Valencia

Presentado por

FONSECA CABRERA, ALEJANDRA SOFIA

Para la obtención del

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

Curso: 2020/2021

Fecha: Septiembre 2021

Tutor: David Llopis Castelló

Cotutor: Ana María Pérez Zuriaga



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Romualdo y Jacqueline, por dejarme volar a cumplir mis sueños y apoyarme en todo momento. Gracias por motivarme siempre a dar lo mejor de mí, a no darme por vencida y a afrontar cada reto de la vida con sabiduría, pero a la vez guiarme a reconocer mis límites. Gracias por enseñarme la disciplina que se requiere para alcanzar las metas, y a valorar que todo esfuerzo tiene sus frutos, este es uno de ellos. Recuerden siempre que cada uno de mis logros es, con todo mi amor, para ustedes.

A Keven, por ser la persona que siempre está para mí, sin importar hora ni lugar. Gracias por recordarme cada día de lo que soy capaz, por escucharme, apoyarme, aconsejarme y buscar sacarme una sonrisa cada día.

A mis tutores, a David y Ana por guiarme en este proceso y motivarme a llevarlo a cabo de la mejor manera. Gracias por ponerme a prueba a mí misma cada día, por brindarme tantos conocimientos y contribuir en mi formación profesional. A mi compañero Carlos, por todo su respaldo.

A todos mis familiares y amigos que aún en la distancia, siempre me han apoyado. A mis nuevos amigos, colegas y compañeros, y a cada una de las personas que hicieron estos dos años, una experiencia única.

-ALEJANDRA SOFÍA FONSECA CABRERA



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	14
2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1 Situación actual de la micromovilidad	15
2.2 Guías de diseño de carriles bici	18
2.2.1 España	18
2.2.2 Estados Unidos	21
2.2.3 Holanda	23
2.2.4 Dinamarca	26
2.2.5 Nueva Zelanda.....	27
2.2.6 Colombia	29
2.2.7 Perú	30
2.3 Interacción entre usuarios	31
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	35
3.1 Objetivos	35
3.2 Hipótesis.....	36
4. METODOLOGÍA	37
4.1 Planeamiento	37
4.2 Programación y sensorización.....	40
4.3 Vehículo instrumentado.....	40
4.3.1 Vehículo.....	40
4.3.2 Montaje.....	41
4.3.3 Prueba piloto.....	42
4.4 Toma de datos.....	44
4.4.1 Características de la infraestructura ciclista.....	44
4.4.2 Selección de tramos de estudio	45
4.4.3 Condiciones generales para la toma de datos.....	45
4.4.4 Tamaño muestral	46
4.4.5 Usuarios.....	46
4.5 Encuesta	47
4.6 ANÁLISIS DE DATOS.....	48

4.6.1 Reducción de datos	48
4.6.2 Análisis de resultados.....	48
5. DESARROLLO	49
5.1 Instrumentación y Sensorización	49
5.1.1 Raspberry Pi	49
5.1.2 Sensor HC-SR04	51
5.1.3 Conexiones	53
5.1.4 Programación con Python	55
5.1.5 Control de la Raspberry Pi en remoto	58
5.1.5.1 Interfaz	58
5.1.5.2 Conexión a internet.....	60
5.1.5.3 Batería portátil	60
5.1.6 Cámara VIRB.....	60
5.1.7 Vehículo instrumentado.....	61
5.1.7.1 Descripción	61
5.1.7.2 Montaje	62
5.1.7.3 Pruebas.....	64
5.2 Selección tramos de estudio	64
5.2.1 Tramos seleccionados	67
5.3 Toma de datos.....	68
5.3.1 Mediciones en campo	68
5.3.2 Encuesta	68
5.4 Reducción de datos	71
6. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.....	72
6.1 Análisis descriptivo.....	72
6.1.1 Acera bici sin separadores físicos.....	73
6.1.2 Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal.....	76
6.1.3 Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección	78
6.1.4 Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado	81
6.1.5 Carril bici en mediana peatonal.....	83
6.1.6 Comparación entre tipologías de carril	86
6.2 Análisis estadístico	89

6.2.1 Comparación de resultados según tipo de vehículo	89
6.2.1.1 Bicicletas.....	89
6.2.1.2 Patinetes eléctricos	92
6.2.2 Comparación de según tipo de carril	94
6.3 Análisis encuesta	97
6.3.1 Caracterización de los usuarios y uso de VMPs.....	98
6.3.2 Percepción de riesgo	101
6.3.2.1 Por tipología de carril	102
6.3.2.2 Por tipo de maniobra	107
6.4 Conclusiones del análisis	109
7. APLICACIÓN PRÁCTICA DISTRITO DE ALGIRÓS	113
7.1 Localización	113
7.2 Infraestructura ciclista actual	114
7.2.1 Clasificación vías ciclistas	116
7.3 Deficiencias de la red	123
7.4 Propuestas de mejora	124
7.4.1 Nuevas actuaciones.....	124
7.4.2 Rediseño.....	124
8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	126
9. REFERENCIAS.....	131
10. ANEXOS	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Gálibo libre para la circulación de un ciclista. Fuente: Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España (DGT, 2000).....	19
Figura 2 Gálibo libre para la circulación de dos ciclistas en paralelo y bidireccional. Fuente: Fuente: Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España (DGT, 2000).	20
Figura 3 Dimensiones mínimas para la operación ciclista. Fuente: AASHTO. 2012.	22
Figura 4 Dimensiones mínimas para la operación ciclista. Fuente: Adaptado de CROW, 2011.	24
Figura 5 Espacio de operación para un ciclista. Fuente: Cycle trail design guide (Via Strada Transport planning and Design 2019)	28
Figura 6 Factores a estudiar en el trabajo. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 7 Representación gráfica para la variable distancia de Distancia de separación entre usuarios. Fuente: Figura base tomada del Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España (DGT, 2000).....	39
Figura 8 Fases para el desarrollo del trabajo. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 9 Esquema de montaje del vehículo instrumentado. Fuente: Elaboración propia. .	42
Figura 10 Raspberry Pi modelo 4B y pines GPIO. Fuente: Elaboración propia. Información: Raspberry Pi ORG.	49
Figura 11 Raspberry Pi e interfaz gráfica. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 12 Sensor HC-SR04. Fuente: Tienda Tec.....	51
Figura 13 Esquema envío de pulsos sensor HC-SR04. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 14 Rango de alcance de medición del sensor HC-SR04. Fuente: Elaboración propia basado en las especificaciones técnicas.....	52
Figura 15 Esquema de conexiones sensor HC-SR04 a la Raspberry pi. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 16 Esquema de conexiones 2 sensores HC-SR04 en paralelo a la Raspberry Pi. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 17 Activación del sistema VNC en la Raspberry Pi. Fuente: Elaboración propia.	58
Figura 18 Visualización de la Raspberry Pi controlada desde un ordenador en remoto. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 19 Visualización de la Raspberry Pi controlada desde un móvil en remoto. Fuente: Elaboración propia.	59
Figura 20 Cámara GARMIN VIRB Elite para el vehículo instrumentado. Fuente: GARMIN, sitio web.....	60
Figura 21 Patinete eléctrico del proyecto, Xiaomi Mi Electric Scooter 1S. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 22 Vista lateral patinete eléctrico instrumentado. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 23 Vista frontal y posterior patinete eléctrico instrumentado. Fuente: Elaboración propia.....	63

Figura 24 Tipología de acera bici sin separadores físicos. Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 25 Tipología de acera bici sin separadores físicos próximo a todo tipo de aparcamientos (En línea y en batería). Fuente: Elaboración propia.	65
Figura 26 Tipología de carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 27 Tipología de carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección. Fuente: Elaboración propia.	66
Figura 28 Tipología de carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 29 Tipología de carril bici en mediana peatonal. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 30 Pregunta tipo de la encuesta de percepción de riesgo. Fuente: Elaboración propia.	70
Figura 31 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 1. Fuente: Elaboración propia.	74
Figura 32 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 1. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 33 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 1. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 34 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 35 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 36 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.	78
Figura 37 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 38 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 39 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 40 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.	81
Figura 41 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 42 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.	83
Figura 43 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 44 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 6. Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 45 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 6. Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 46 Diagrama de caja y bigotes para la maniobra de encuentro con bicicletas en todos los tipos de carril. Fuente: Elaboración propia.	87

Figura 47 Distribución de las muestras de maniobras de encuentro con bicicletas, según tipo de carril. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 48 Diagrama de caja y bigotes para la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos en todos los tipos de carril. Fuente: Elaboración propia.....	88
Figura 49 Distribución de las muestras de maniobras de encuentro con patinetes eléctricos, según tipo de carril. Fuente: Elaboración propia.	89
Figura 50 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con bicicletas en todos los tipos de carriles. Fuente: Statgraphics.	91
Figura 51 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos en todos los tipos de carriles. Fuente: Statgraphics...	93
Figura 52 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPs para el carril tipo 1. Fuente: Statgraphics.	95
Figura 53 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPs para el carril tipo 3. Fuente: Statgraphics	95
Figura 54 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPs para el carril tipo 4. Fuente: Statgraphics.	96
Figura 55 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPs para el carril tipo 5. Fuente: Statgraphics.	96
Figura 56 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPs para el carril tipo 6. Fuente: Statgraphics.	97
Figura 57 Histograma de frecuencia de las edades de los encuestados. Fuente: Elaboración propia.....	98
Figura 58 Reparto modal de los encuestados. Fuente: Elaboración propia.....	99
Figura 59 Distribución de la frecuencia de uso de los VMPs de los encuestados. Fuente: Elaboración propia.	100
Figura 60 Distribución de la distancia promedio recorrida en VMPS por los encuestados. Fuente: Elaboración propia.....	100
Figura 61 Distribución del motivo de viaje en VMPs de los encuestados. Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 62 Distribución de la percepción de riesgo de la maniobra de encuentro para todos los escenarios. Fuente: Elaboración propia.	108
Figura 63 Distribución de la percepción de riesgo de la maniobra de adelantamiento para todos los escenarios. Fuente: Elaboración propia.	108
Figura 64 Carril bici segregado en calzada con bolardos verticales como elemento de resguardo. Fuente: Elaboración propia Streetmix.	109
Figura 65 Carril bici segregado en calzada con taches como elemento de resguardo. Fuente: Elaboración propia Streetmix.....	110
Figura 66 Carril bici segregado en calzada con taches como elemento de resguardo a aparcamiento en línea. Fuente: Elaboración propia Streetmix.....	110
Figura 67 Sección transversal con acera bici en mediana peatonal. Fuente: Elaboración propia Streetmix.	110
Figura 68 Sección transversal con acera bici protegida con borde vegetal. Fuente: Elaboración propia Streetmix.....	111

Figura 69 Sección transversal con acera bici libre de obstáculos. Fuente: Elaboración propia Streetmix.....	111
Figura 70 Sección transversal con acera bici resguardada en mediana contigua a tráfico motorizado. Fuente: Elaboración propia Streetmix.	112
Figura 71 Localización distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia. Datos: Ayuntamiento de Valencia.....	113
Figura 72 Barrios que conforman el distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia. Datos: Ayuntamiento de Valencia.....	114
Figura 73 Infraestructura ciclista actual distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia. Datos: Ayuntamiento de Valencia.....	115
Figura 74 Estaciones de Valenbisi en el distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia. Datos: Ayuntamiento de Valencia.....	116
Figura 75 Clasificación de las vías de ciclistas. Fuente: Elaboración propia en base a los datos del Ayuntamiento de Valencia y la recopilación de los resultados de la inspección de campo.	117
Figura 76 Distribución de las vías ciclistas según tipología. Fuente: Elaboración propia en base a los datos del Ayuntamiento de Valencia y la recopilación de los resultados de la inspección de campo.....	118
Figura 77 Identificación infraestructura ciclista distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia en base a los datos del Ayuntamiento de Valencia.	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Dimensiones mínimas para el diseño de vías ciclistas. Fuente: Adaptado de AASHTO, 2012.	22
Tabla 2 Recopilación de los anchos establecidos para las distintas tipologías de vías ciclistas. Fuente: AASHTO, 2012.	23
Tabla 3 Dimensiones para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Elaboración propia en base a la información del Manual de diseño para el tráfico de bicicletas de Holanda (CROW 2011).	25
Tabla 4 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas según el manual xxx. Fuente: Elaboración propia en base la información disponible en el “Collection of Cycle Concepts” (Jensen Andresen, T., Hansen, W., Kjaergaard, E., Krag, T., Larsen, J., Lund, B. & Thost, P, 2012)	27
Tabla 5 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Adaptado de Cycle trail design guide (Via Strada Transport planning and Design, 2019)	28
Tabla 6 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Adaptado de Cycle trail design guide de Nueva Zelanda, 2019.	29
Tabla 7 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Adaptado de la guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016).	30
Tabla 8 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Elaboración propia en base a la recopilación de la información del Manual de Criterios de Diseño de	

Infraestructura Ciclo-inclusiva y Guía de Circulación del Ciclista de Perú, (Municipalidad de Lima, 2017).....	30
Tabla 9 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas según tipología. Fuente: Elaboración propia en base a la información del Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España (DGT, 2000).....	21
Tabla 10 Variables a estudiar en el trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 11 Tamaño de muestra mínimo para una distribución normal. Fuente: Elaboración propia.....	46
Tabla 12 Tramos de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	68
Tabla 13 Número de recorridos realizados en la toma de datos. Fuente: Elaboración propia.....	68
Tabla 14 Registro agrupado de la toma de datos. Fuente: Elaboración propia.....	72
Tabla 15 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 1. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 16 Variables descriptivas para maniobra de encuentro carril con patinetes eléctricos tipo 1. Fuente: Elaboración propia.....	74
Tabla 17 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.....	76
Tabla 18 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con patinetes eléctricos carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.....	77
Tabla 19 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.....	78
Tabla 20 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con patinetes eléctricos carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.....	79
Tabla 21 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.....	81
Tabla 22 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con patinetes eléctricos carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.....	82
Tabla 23 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 6. Fuente: Elaboración propia.....	83
Tabla 24 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con patinetes eléctricos carril tipo 6. Fuente: Elaboración propia.....	84
Tabla 25 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas. Fuente: Elaboración propia.....	86
Tabla 26 Variables descriptivas para maniobra de encuentro de patinetes eléctricos. Fuente: Elaboración propia.....	88
Tabla 27 Prueba Kolmogorov-Smirnov para la muestra de maniobras de encuentro con bicicletas. Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en Statgraphics.....	90
Tabla 28 Resultado prueba Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con bicicletas por tipo de carril. Fuente: Statgraphics.....	90
Tabla 29 Resultado diferencia de rangos promedio prueba Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con bicicletas por tipo de carril. Fuente: Statgraphics.....	91

Tabla 30 Prueba de normalidad para la muestra de maniobras de encuentro con patinetes eléctricos. Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en Statgraphics.	92
Tabla 31 Resultado prueba Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos por tipo de carril. Fuente: Statgraphics.	92
Tabla 32 Resultado diferencia de rangos promedio prueba Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos por tipo de carril. Fuente: Statgraphics.	93
Tabla 33 Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para la comparación en cada de carril entre el tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia en base a los resultados de Statgraphics.	94
Tabla 34 Resultados percepción de riesgo por tipología de carril. Fuente: Elaboración propia.	105
Tabla 35 Valoración numérica de los resultados de la escala Likert. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 36 Longitud de las vías ciclistas según tipología. Fuente: Elaboración propia en base a los datos del Ayuntamiento de Valencia y la recopilación de los resultados de la inspección de campo.	118
Tabla 37 Inventario infraestructura ciclista distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia.	120
Tabla 38 Ficha de caracterización No.1. Fuente: Elaboración propia en base a los datos recolectados en la inspección de campo.	121
Tabla 39 Ficha de caracterización No.2. Fuente: Elaboración propia en base a los datos recolectados en la inspección de campo.	122

RESUMEN

Con el paso de los años, el transporte se ha convertido en uno de los sectores que mayor contribución hace a la contaminación ambiental, y por ende al cambio climático. Por ello, las ciudades se han enfocado a modificar los sistemas de movilidad buscando alternativas más sostenibles. La micromovilidad es una de las más recientes ramas de estudio con las cuales se quiere mitigar dicho efecto negativo; esta se refiere al uso de vehículos de movilidad personal (VMP) como bicicletas, bicicletas eléctricas, patinetes eléctricos, que reemplazan total o parcialmente los viajes en coches particulares, y a su vez, son una solución a los problemas de la primera y la última milla del transporte público. Para favorecer el uso de estos modos, ingenieros y planificadores urbanos han enfocado sus esfuerzos en proveer los elementos necesarios para garantizar la circulación cómoda y segura. Sin embargo, debido a la rápida acogida, constante evolución y adaptación a la infraestructura existente, son pocas las evaluaciones que se han realizado para verificar que las medidas implementadas son adecuadas. Por esta razón, el presente Trabajo de Fin de Máster estudia las maniobras de encuentro y adelantamiento que ocurren entre los usuarios de VMPs durante su circulación, mediante un patinete instrumentado capaz de registrar cuantitativamente tales movimientos, en distintas tipologías de carriles para ciclistas. En paralelo, se realiza la valoración cualitativa frente a la ocurrencia de estas maniobras por medio de encuestas a los usuarios en la ciudad de Valencia, España. Como resultado, se identifica que las tipologías de infraestructura ciclista segregada causan que disminuya la distancia lateral de separación entre usuarios ante la ocurrencia del encuentro. Por lo tanto, el ancho de la sección transversal debe ser ampliada para mayor comodidad y seguridad de los mismos, ya que, a la vez, es el tipo de carril preferido. Además, no se observa variabilidad significativa entre el comportamiento de los conductores bicicletas y patinetes eléctricos, y no se ve influenciado por la presencia del sistema móvil de mediciones.

Palabras clave: Micromovilidad, bicicletas, patinetes eléctricos, infraestructura ciclista, adelantamiento, encuentro.

ABSTRACT

Over the years, the transport sector has become one of the most significant contributors to the environmental pollution, and thus to climate change. For this reason, cities started to modify their mobility systems looking for more sustainable alternatives. Micromobility is one of the most recent study fields, which is expected to mitigate this negative impact. This concept is referred to the use Personal Mobility Vehicles (PMV) such as bicycles, electric bicycles, scooters and others, which have started to replace the trips made with private vehicles and have also been helpful to fulfill public transportation's first and last mile problem. To encourage the usage of these modes, engineers and urban planners have focused their efforts on providing all the required elements to ensure a safe and comfortable driving. However, due to the rapid acceptance, constant evolution and adaptation to existing infrastructure, few evaluations have been done in order to verify whether the measures that have been implemented are appropriate. For this reason, this Master's Thesis studies the encounter and overtaking maneuvers that occur between VMP users during their driving, by means of an instrumented scooter that quantitatively records such movements, in different types bike lanes. In parallel, a qualitative assessment is carried out against the occurrence of these maneuvers through online surveys in the city of Valencia, Spain. As a result, it is identified that segregate cyclist infrastructure reduces the lateral separation between users during the meeting maneuvers. Therefore, width from the cross section should be increased, in order to provide more safety and comfort, since it is also the preferred lane type. In addition, it is not observed a significant difference between bike and scooter drivers' behavior, and it is not influenced by the presence of the moveable measurement system.

Keywords: Micromobility, bikes, e-bikes, e-scooters, cyclist infrastructure, overtaking maneuver, meeting maneuver.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el transporte ha sido reconocido como una de las actividades que mayor influencia tiene en la contaminación del medio ambiente y, consecuentemente, con el cambio climático. Por ello, actualmente se están tomando medidas para promover la movilidad sostenible. En el marco de este proceso, se ha introducido el concepto de “Micromovilidad”, el cual se refiere mayoritariamente al uso de vehículos de movilidad personal (VMPs) como bicicletas, bicicletas eléctricas, patinetes eléctricos, patinetes, monociclos, entre otros, cuyo uso apoya la multimodalidad al combinarse con el transporte público y contribuye a la sustitución total o parcial del uso de coches particulares.

Con el fin de favorecer la micromovilidad, desde la ingeniería civil se ha implementado la construcción de infraestructura dedicada, que antiguamente solía ser exclusiva para bicicletas. Sin embargo, ante el auge de otros modos, las entidades responsables en distintos países han propuesto la circulación conjunta de los vehículos de movilidad personal. Además, los nuevos sistemas de movilidad compartida de bicicletas y patinetes eléctricos, han aumentado la demanda del uso de los carriles exclusivos.

Como resultado de estos factores, ha surgido la necesidad de evaluar las condiciones de la infraestructura existente, con el fin de determinar si son adecuadas para la circulación integrada, cómoda y segura de los flujos actuales y futuros de estos modos. Considerando las ventajas o desventajas que ofrecen las distintas tipologías según la sección transversal, bordes, pavimento, entorno, entre otras características.

Por esta razón, en el presente Trabajo de Fin de Máster se lleva a cabo investigación de la circulación los usuarios de VMP. Específicamente se estudiará la maniobra de adelantamiento, que se define como la acción de sobrepasar a un usuario que circula en el mismo sentido de circulación, y la maniobra de encuentro establecida como el de cruce con otros usuarios que circulan en sentido opuesto. El estudio se llevará a cabo a través de la implementación de un vehículo instrumentado con tecnologías portables para la medición y almacenamiento de datos, en la ciudad de Valencia, España, donde se cuenta con una cobertura de infraestructura ciclista con distintas tipologías de carriles, y los patinetes eléctricos y bicicletas circulan en conjunto sobre esta.

El presente documento se compone de la revisión del estado del arte con respecto a las guías de diseño para la infraestructura ciclista y estudios realizados para evaluar el comportamiento de los usuarios de VMPs, seguido por el planteamiento de los objetivos a alcanzar e hipótesis a comprobar, la metodología a seguir, la descripción del desarrollo del proyecto en las etapas de programación, instrumentación, delimitación del ámbito de estudio y toma de datos. Finalmente, se presenta el análisis de los resultados obtenidos y las conclusiones y recomendaciones a las que se llega con la investigación, con el objetivo de que sean aplicadas para futuras actuaciones en beneficio de la micromovilidad.

2. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se presenta la revisión de una visión general de la situación actual de la micromovilidad, el uso de los vehículos de movilidad personal (VPM) y todos los aspectos relacionados y las problemáticas encontradas actualmente en esta rama. Seguido se presenta una recopilación de las guías de diseño de infraestructura ciclista, con el fin de identificar los criterios bajo los cuales se han desarrollado, y el enfoque que tienen para garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios. Por último, se presenta la recopilación de los estudios llevados a cabo para evaluar el comportamiento de los conductores de VPMs, y reconocer cuales factores influyen en ellos, enfocado a la metodología que se ha implementado.

2.1 Situación actual de la micromovilidad

Hoy en día, el mundo en general ha reorientado el desarrollo y la evolución hacia alternativas sostenibles en todos los sectores productivos. Desde siempre, se ha conocido que el transporte es una de actividades que genera impactos negativos en el medio ambiente. De hecho, a nivel mundial las ciudades están lidiando con las externalidades negativas causadas por los viajes en coche (Oeschger et al., 2020) y los gobiernos se encuentran en búsqueda de promover modos de transporte que sean más amigables con el medio ambiente.

Para reducir el uso de los coches, se debe combinar de manera inteligente políticas que promuevan un comportamiento sostenible con las alternativas de transporte adecuadas (Holm Møller et al., 2019). Es aquí donde toma mayor importancia el papel del nuevo concepto llamado “Micromovilidad”, el cual, hace referencia a vehículos con una masa no superior a 350 kg y con una velocidad de diseño no mayor a 45 km/h. Según lo establecido en el informe “SafeMicromobility” (ITF, 2020) , dentro de esta clasificación entran las bicicletas, bicicletas eléctricas, patinetes eléctricos, patinetes, monociclos y vehículos eléctricos de cuatro ruedas, entre otros; aunque esta lista de vehículos está continuamente evolucionando (Oeschger et al., 2020).

Todos estos nuevos modos de transporte que entran en esta categoría, están contribuyendo a generar un cambio en el sistema del transporte urbano, comenzando con la solución a los problemas de primera y última milla del transporte público y mejorando la accesibilidad (Holm Møller et al., 2019), lo que conlleva a promover cambios modales significativos (Oeschger et al., 2020), que es considerado como el objetivo principal para disminuir el uso de los vehículos motorizados dentro de las áreas urbanas.

Sin embargo, el crecimiento exponencial que ha tenido esta rama, a su vez, ha empezado a causar problemas, debido a la falta de regulaciones y consideraciones técnicas que integren adecuadamente estos modos. El modo de transporte predominante dentro de lo que se considera micromovilidad es la bicicletas privada, que han sido utilizadas como modo de

transporte desde hace mucho tiempo (Oeschger et al., 2020) debido principalmente a que ya existen facilidades que han contribuido a promover y aumentar su uso. A este le sigue el patinete eléctrico, que está sufriendo un incremento significativo en los últimos años.

Los patinetes eléctricos son uno de tipos de los novedosos “micro vehículos”, que han aumentado su uso a nivel mundial (Ma et al., 2021), bien sea privados o públicos. Pero, el aumento significativo de su comercialización ha surgido luego de la introducción del primer modelo de rentas para transporte compartido de estos, que sucedió en San Francisco California en el año 2017. Desde entonces se han proliferado rápidamente como una alternativa de transporte fácil y económica (Trivedi et al., 2019) (Gössling, 2020) y por ello han llegado a muchas otras ciudades del mundo como Madrid, Milán, Bogotá, Roma, Londres.

Estos vehículos de movilidad personal alcanzan velocidades iguales y mayores que las bicicletas, están conformados por un motor eléctrico como fuente de alimentación y requieren el mismo o menos espacio que los ciclos para circular y estacionarse (Gössling, 2020). Además, (Ma et al., 2021) establece que ha habido una aceptación de este modo en los distintos grupos poblacionales. El hecho de ser vehículos sencillos de conducir, de adquirir o alquilar, y ser acogidos por muchos usuarios explicaría el “éxito” que han tenido a nivel mundial. No obstante, a partir de esta situación han comenzado a derivarse nuevos problemas en la movilidad. Esto no es un fenómeno aislado puesto que la introducción de un nuevo modo de transporte conlleva a la generación nuevos tipos de accidentes, incluyendo algunos debido a conflictos entre usuarios y regulaciones que no son claras (Lo et al., 2020).

Dentro de las principales incertidumbres que se tiene sobre el uso de los patinetes eléctricos en el motivo de viaje para el que son utilizados (Gössling, 2020), se he identificado que son considerados perfectos para cubrir recorridos de corta distancia, en Estados Unidos por ejemplo, se ha reconocido que son muy frecuentes viajes recreacionales y de ocio (Lo et al., 2020), pero a nivel general no se ha logrado establecer si se está generando una demanda adicional al transporte o si se está reemplazando otro tipo de viajes. De ser la segunda situación, se aparecería la necesidad de ampliar a futuro las vías donde circulen estos vehículos, en el caso tal de que deje de ser un modo netamente recreativo (Haworth et al., 2021), y sea realmente utilizado como un sistema de transporte.

Una segunda consideración frente al uso de modo, es el incremento del número de accidentes que involucran a los patinetes eléctricos. (Haworth et al., 2021) establecen que los reportes de emergencias relacionados con lesiones y heridas de los conductores de estos vehículos y de los peatones han aumentado. Aunque los datos a nivel mundial de los patrones de las heridas debido al uso de los patinetes son diversos, en países como Nueva Zelanda y Estados Unidos ya se han comenzado a identificar con mayor claridad esta situación (Störmann et al., 2020), se resaltan estos países puesto que son aquellos donde la inclusión de los patinetes eléctricos y servicios compartidos de estos, superan ya los 3 años.

En tercer lugar, se encuentran los problemas de interacción con los otros tipos de usuarios de la vía, los peatones y los vehículos motorizados. Esta situación se deriva de una premisa en particular, aun no se tiene claro cuál es el lugar adecuado para que circulen los patinetes eléctricos. A diferencia de otros modos de transporte, que, normalmente tienen bien planeados los itinerarios y viales, el rápido crecimiento del uso de los patinetes eléctricos ha hecho que sean típicamente ubicados para compartir el derecho de vía con las infraestructuras existentes para peatones, ciclistas y/o vehículos motorizados, sin la suficiente determinación técnica (Ma et al., 2021).

En Alemania, los e-scooter son equivalentes a las bicicletas en términos de las leyes de tráfico, y por ello, el uso de las aceras para estos está oficialmente prohibido (Störmann et al., 2020), en España por la ley tienen permitido circular sobre la acera, en Downtown Brisbane, Australia, los patinetes eléctricos deben circular por la acera mientras que las bicicletas pueden circular por la acera o por la calzada vial (Haworth et al., 2021). En Nueva Zelanda no pueden circular por los carriles para bicicletas, pero pueden ser utilizados en las aceras de manera cuidadosa y a velocidad que no generen un riesgo para los peatones y también pueden circular en vías para vehículos motorizados (Lo et al., 2020). Cada país, estado, comunidad, o división territorial, establece su propia directriz.

Por esta razón, se ha vuelto frecuente ver que estos vehículos circulan en áreas que no son apropiadas para su uso, como por ejemplo aceras muy estrechas, en vías con pavimento en condiciones no aceptables (Ma et al., 2021), sobre vías de altos volúmenes de tráfico motorizado, entre otras. Asimismo, se ha creado una interferencia entre los patinetes eléctricos y el entorno a su alrededor (Ma et al., 2021) y la competencia por el espacio entre los peatones, ciclistas y coches (Gössling, 2020).

Esta situación es derivada de la ausencia de regulaciones, o falta de experiencia de la aplicabilidad de estas, que parte nuevamente del crecimiento exponencial que ha tenido este nuevo modo de transporte, formándose así un ciclo del cual, si no se toman medidas técnicas correspondientes, no se podrán solucionar los problemas identificados.

Frente a las problemáticas identificadas y las propuestas de la creación de vías dedicadas a la micromovilidad, que pueden ser fácilmente implementadas en muchas ciudades (Gössling, 2020), se hace necesario realizar una revisión de las características actuales de la infraestructura existente utilizada para circulación en conjunto de estos modos, correspondiente principalmente a las vías ciclistas dedicadas.

2.2 Guías de diseño de carriles bici

Considerando la contextualización presentada, si bien se busca promover el uso de modos de transporte sostenibles y favorecer sobre todo la micromovilidad, se hace necesario revisar si la infraestructura actual es lo suficientemente adecuada para que la sociedad haga ese cambio. Más aun, considerando que la llegada de los sistemas compartidos para ambos tipos de vehículos –bicicleta y patinete eléctrico–, también han generado un aumento en la demanda del uso de la infraestructura.

Así como las vías para vehículos motorizados, bien sea autopistas, carreteras o vías locales urbanas y rurales, cuentan con especificaciones técnicas para el diseño geométrico que responden a unos estándares definidos para circulación de vehículos, la infraestructura para los Vehículos de Movilidad Personal (VMP) también debería seguir un manual o guía de diseño que cubra unos requisitos mínimos que garanticen una circulación segura y cómoda de estos modos de transporte.

Por ello, a nivel mundial existe un gran número de guías de diseño para la infraestructura ciclista, dados por países, estados o comunidades según la división política de cada uno. Principalmente, el diseño se ha enfocado en vías exclusivas para bicicletas puesto que ha sido el modo de micro movilidad más antiguo, y en estos se establecen los lineamientos para garantizar la circulación cómoda, segura y protegida del tráfico motorizado, y también criterios de trazados que ofrezcan cobertura y conectividad.

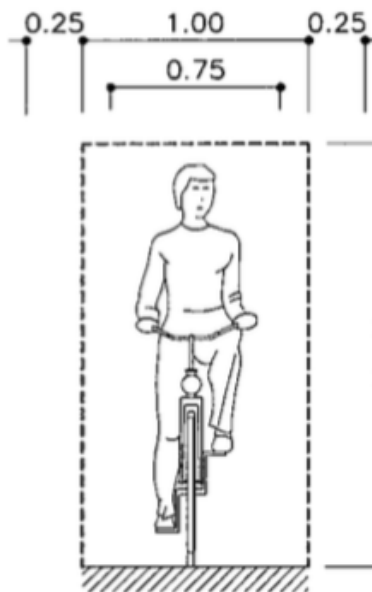
Sin embargo, cada manual cuenta con sus propias consideraciones, indicaciones y han sido elaborados en base a distintos tipos de información, bien sea estudios técnicos, recopilación de antecedentes o simplemente referencias de otros. Tras la revisión de una serie de guías de diseño vigentes, se han encontrado los criterios que utilizan algunas de estas, para la definición técnica de la configuración física de los carriles de la infraestructura ciclista. A continuación, se describen.

2.2.1 España

Por último, el Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España, basa sus criterios de diseño principalmente en lograr el uso potencial de la infraestructura, es decir, que logre unir muchos puntos de orígenes y destinos, tener muchos puntos de accesibilidad, evitar las interferencias con el tráfico motorizado, evitar fuertes rampas o pendientes, ofrecer una buena calidad del firme y permitir la circulación de los distintos tipos de usuarios (DGT, 2000).

Además de estas consideraciones para el trazado de las vías, también determina dimensiones mínimas para el conjunto “bicicleta-ciclista”, tal como se ha presentado en la mayoría de las guías anteriores, y esta corresponde a una anchura de 0,75 m (DGT, 2000).

Esta medida mínima se aumenta para contrarrestar “el efecto del movimiento serpenteante producido como consecuencia de la necesidad de corregir la inestabilidad del vehículo mediante cambios de la trayectoria” (DGT, 2000). Por ello, el ancho mínimo se fija en 1,00 m, pero en el diseño de un carril bici recomienda dar un resguardo de 0,25 m hacia ambos lados con el fin de proporcionar seguridad ante posibles movimientos laterales, paradas o puestas en marcha. En base a esto, para ofrecer condiciones adecuadas de circulación, considera que el ancho estricto necesario en carriles bici unidireccionales es de 1,50 m (DGT, 2000). Estas dimensiones se muestran en la Figura 1.



Gálibo de un ciclista

Figura 1 Gálibo libre para la circulación de un ciclista. Fuente: Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España (DGT, 2000).

También establece que en condiciones normales de circulación, para velocidades normales –entre 15 km/h y 30 km/h– y con una capa de rodadura adecuada, la anchura operativa ocupada por un ciclista en marcha es de 1,00 m (DGT, 2000). Ahora bien, para la circulación en paralelo en los carriles bidireccionales, el espacio mínimo necesario será sencillamente el doble del requerimiento de un usuario en marcha, con un resguardo de protección de 0,25 m a ambos lados con el fin de brindar seguridad ante la ocurrencia de posibles movimientos. Por tanto, el espacio requerido determinado es de 2,50 m (DGT, 2000). El esquema para estas dimensiones se muestra en la Figura 2.

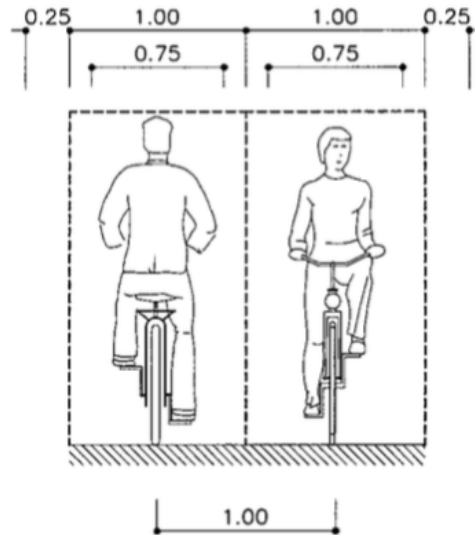


Figura 2 Gálibo libre para la circulación de dos ciclistas en paralelo y bidireccional. Fuente: Fuente: Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España (DGT, 2000).

Adicionalmente, la distancia de resguardo puede aumentar en función de la presencia de obstáculos laterales (DGT, 2000). Las consideraciones son las siguientes:

- Si no hay obstáculos laterales o si la altura de estos es menor a 5 cm, el resguardo se mantiene en 0,25 m.
- Si existen bordillos con altura superior a 5 cm, el resguardo debe ser de 0,50 m, por lo que la sección transversal en total es de 3,00 m.
- Si los obstáculos laterales son elementos altos, como farolas, árboles, paredes, el resguardo deberá estar comprendido entre 0,50 m y 1,00 m.
- Si el carril bici discurre al lado de una línea de aparcamientos, el resguardo debe ser de 0,80 m de manera que permita la apertura de las puertas de los coches sin afectar al ciclista.

Una última consideración de esta guía es que mantiene los criterios de diseño de otras guías al establecer anchos mínimos según la tipología del carril bici. En este caso las consideraciones se basan en el entorno de la vía y no en la interacción entre usuarios circulando porque ya ha sido cubierto en el ancho de operación (Tabla 1).

Tipo	Ancho
Carril bici segregado Unidireccional	Mínimo 2,0 m y nunca por debajo de 1,5 m.
Carril bici segregado Bidireccional	2,5- 3,00 m, si hay mayor flujo ciclistas puede aumentarse
Carril bici adyacente a una vía unidireccional	1,7-2,0 m cuando el sentido de circulación del tráfico motorizado y de la bici coincide
Carril bici bidireccional adyacente a una vía	2,5 m, no superior
Carril bici adyacente a una vía unidireccional-sentido de circulación contrario	2,0-2,5 m
Circulación ciclista en vías para tráfico motorizado	2,25-2,6 m, con el fin de disminuir la intensidad de tráfico
Circulación ciclista en carriles bus	4,00-4,25 m
Circulación ciclista en accesos peatonales unidireccional	1,75 m- 2,50 m circulación cómoda y posibilidad de adelantamientos
Circulación ciclista en accesos peatonales bidireccional	2,75 m-3,50 m

Tabla 1 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas según tipología. Fuente: Elaboración propia en base a la información del Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España (DGT, 2000).

En conclusión, todas estas guías, manuales de diseño o reglamentos, si bien presentan características comunes en los criterios para la selección del ancho óptimo para la vía ciclista, tales como el tipo de usuario, fijar una distancia mínima requerida de operación, el tipo de vía, las condiciones del entorno del carril bici o la interacción entre usuarios circulando, difieren en los valores numéricos establecidos, puesto que cada una usa sus propias definiciones, estudios bases o recopilación de antecedentes.

2.2.2 Estados Unidos

En primer lugar, el manual de diseño “Guide for the Development of bicycle Facilities” elaborado por la American Association of State Highways and Transportation (AASHTO) en su versión más reciente del 2012, hace un análisis integral de los ciclistas con el fin de identificar los factores que influyen en el comportamiento natural del ciclista para, en base a estos, definir el diseño de la infraestructura.

Uno de los factores que influyen en el diseño es el tipo de usuario, puesto que para distintas edades puede que un grupo de la población requiera consideraciones específicas en el diseño de las vías ciclistas. Además, el motivo de viaje principalmente se divide en dos: el uso recreativo y el uso utilitarista; y puede presentarse la mezcla de ambos en un mismo trayecto. Este aspecto es uno de los más importantes puesto que dependiendo del tipo se derivan características como la longitud del recorrido, el tipo de ruta, la frecuencia y los días de ocurrencia de los viajes. Sin embargo, a pesar de la variabilidad de todas estas características, las vías ciclistas deben ser diseñadas de tal forma que se favorezcan todo tipo de viajes (AASHTO, 2012).

Posteriormente, define un vehículo tipo a partir del cual se establecen las primeras dimensiones físicas críticas de diseño (Tabla 2) porque, así como ocurre con los vehículos motorizados, también existen distintos tipos de bicicletas y no es posible diseñar para cada una de estas (AASHTO, 2012).

Característica	Medida (m)
Dimensión física	0,75
Ancho mínimo	1,2
Ancho "preferido" de operación	1,5

Tabla 2 Dimensiones mínimas para el diseño de vías ciclistas. Fuente: Adaptado de AASHTO, 2012.

Según la Tabla 2, la dimensión física corresponde al ancho frontal de la bicicleta, que incluye el manillar y la separación de los brazos que se produce al conducir. En base a esta, fija dos anchos límite de operación para un usuario circulando en una sola dirección. Esta medida es considerada suficiente para cubrir los efectos del pedaleo, y es mayor al ancho físico que ocupa la bicicleta con el objetivo de contrarrestar el movimiento lateral que se produce durante la circulación que varía según la velocidad, el viento y la eficiencia del ciclista (AASHTO, 2012). En la Figura 3, se presentan dichas medidas.

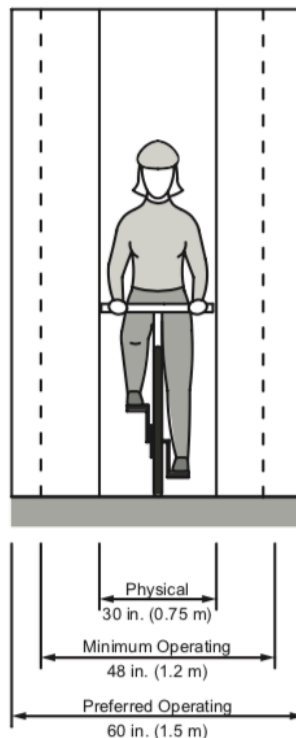


Figura 3 Dimensiones mínimas para la operación ciclista. Fuente: AASHTO. 2012.

También considera que, en situaciones específicas se puede requerir un ancho operacional mayor, según los distintos tipos de vías ciclistas, pero bajo ninguna circunstancia se justifican diseños cuyo ancho se encuentre por debajo del mínimo establecido, salvo en casos

particulares que el mínimo pasa a ser 1,2 m (AASHTO, 2012). A continuación, en la Tabla 3 se presenta una recopilación de las medidas establecidas con las consideraciones que ha fijado la guía para justificarlas.

ANCHOS SUGERIDOS SEGÚN TIPO DE VÍA CICLISTA		
Tipo de carril	Ancho (m)	Consideración
Vía compartida con tráfico motorizado	1,5	Mínimo fijado
	1,8-2,1	Ubicación adyacente a estacionamientos con alto flujo, proveer mayor espacio de operación
	1,8-2,4	No hay estacionamientos y el uso de las vías ciclistas es alto. Permite la circulación de 2 usuarios en paralelo y permite el adelantamiento.
	Mayor a 1,5	Vía que discurre en una calzada cuya velocidad de los vehículos motorizados es mayor de 70 km/h y tiene alto volumen de tráfico, o tráfico de vehículos pesados.
	2,1-2,4	Vía de uso compartido para estacionamientos en línea y carril bici.
	3,7-4	Vía de uso compartido para estacionamientos en línea y carril bici, pero la demarcación no es utilizada.
Vía compartida con peatones, separada de la calzada de vehículos motorizados	1,5	Mínimo fijado
	3,0	Ancho mínimo para una vía bidireccional
	3,0-4,3	Vías ciclistas de alto uso y/o presenta distintos tipos de usuarios.
	3,4-4,2	El flujo de peatones es elevado (más del 30% del volumen total de usuarios), para más de 300 usuarios en hora punta. Favorece la circulación ciclista de manera que puedan adelantarse entre sí o puedan mantener una distancia de separación cuando se produce el encuentro de usuarios que circulen en direcciones opuestas.
	Menor a 2,4	Situaciones excepcionales

Tabla 3 Recopilación de los anchos establecidos para las distintas tipologías de vías ciclistas. Fuente: AASHTO, 2012.

Tras esta recopilación, se observa que el ancho es determinado, principalmente, en base a la distancia mínima de operación de un usuario, a las condiciones del entorno de la vía ciclistas y solo en algunos casos se considera la distancia prudente para la interacción entre ciclistas sobre la infraestructura.

2.2.3 Holanda

Por su parte, el Manual de diseño para el tráfico de bicicletas de Holanda, elaborado por la organización sin ánimo de lucro CROW, busca establecer las bases para un diseño de vías ciclistas funcional, pero que a su vez sea “ciclo amigable”. Los principales requisitos que deben cubrir las vías según esta referencia son: ser coherente, ser atractiva, ser segura, ser directa y ser cómoda (CROW, 2011).

En esta guía, se repite la consideración del manual de la AASHTO de establecer unas dimensiones mínimas para una bicicleta tipo, pero que en este caso vienen fijadas por el marco reglamentario de Holanda, el cual establece que una bicicleta no puede ser más ancha que 0,75 m, con o sin equipaje, y un triciclo no debe exceder un ancho de 1,50 m, sin limitaciones de longitud (CROW, 2011).

En base a estas dimensiones físicas de la bicicleta e incluyendo también las consideraciones de operación del usuario –estabilidad y el balanceo– fija una sección libre requerida para la circulación. La medida mínima puede variar (siempre aumentando) según los obstáculos laterales que se pueden presentar en la infraestructura. Estas se presentan en la Figura 4.

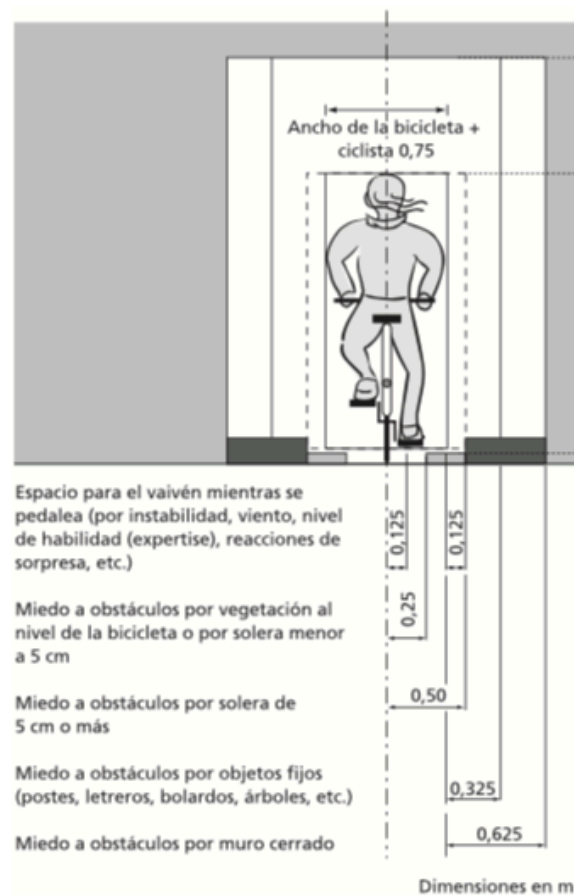


Figura 4 Dimensiones mínimas para la operación ciclista. Fuente: Adaptado de CROW, 2011.

Posteriormente, al igual que el manual propuesto por la AASHTO, determina los anchos mínimos requeridos según los distintos tipos de vías ciclistas. La recopilación de estos, se presentan en la Tabla 4.

Ciclovía apartada			
Volumen horario máximo bidireccional		Ancho vía (m)	
0-50		2,00	
50-150		2,50	
>50		3,50	
Vía ciclo motor apartada			
Volumen horario máximo bidireccional		Ancho vía (m)	
0-50		2,00	
50-150		3,00	
>50		4,00	
Pista para tráfico mixto			
Combinaciones		Ancho vía (m)	
Auto-bicicleta bajo volumen		3,85	
Auto/auto		4,60	
Auto/bicicleta/bicicleta		4,85	
Auto/bicicleta		3,50 + 2 x 0,50 m pavimento berma	
Auto/bicicleta/bicicleta		4,00 + 2 x 0,75 m pavimento berma	
Pista para tráfico mixto con tráfico unidireccional parcial y ciclo bandas en el sentido contrario			
Tipo		Ancho vía (m)	
Pista (Vehículos motorizados)		>= 3,50	
Ciclo banda		1,50-2,00	
Ciclo calle con ciclistas al costado			
Tipo		Ancho vía (m)	
Pista (Vehículos motorizados)		Máximo 3,50m	
Ciclo banda		2,00 m	
Ciclo calle con perfil mixto			
Tipo		Ancho vía (m)	
Pista (Vehículos motorizados)		4,50m	
Ciclo banda con dos cauces para el tráfico motorizado (Uno a cada lado de la calzada)			
Tipo		Ancho vía (m)	
Ciclo banda marcado con línea continua		2,00 m – 2,50 m	
Ciclo banda marcado con línea de puntos		1,50 m - 2,00 m	
Ciclo banda con un cauce para tráfico motorizado (A un solo lado de la calzada)			
Tipo		Ancho vía (m)	
Ciclo banda marcado con línea de puntos		1,50 m - 2,00 m	
Ciclo vía segregada			
Volumen horario máximo unidireccional	Ancho vía (m) unidireccional	Volumen horario máximo bidireccional	Ancho vía (m) bidireccional
0-150	2,00	0-50	2,00
150-750	3,00 (2,50)	50-150	2,50
>750	4,00 (3,50)	>150	3,50
Vía ciclo motor segregada			
Volumen horario máximo unidireccional	Ancho vía (m) unidireccional	Volumen horario máximo bidireccional	Ancho vía (m) bidireccional
0-150	2,00	0-50	2,50
75-375	3,00	50-150	3,00
>375	4,00	>150	4,00

Tabla 4 Dimensiones para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Elaboración propia en base a la información del Manual de diseño para el tráfico de bicicletas de Holanda (CROW 2011).

En base a esta recopilación, se identifica que el manual considera factores del entorno de la infraestructura y también el volumen de tráfico ciclista, que deriva la posible interacción entre usuarios que se puede producir en esta. Además, ha considerado la percepción de los usuarios para la determinación de dichas medidas, puesto que, en base a los estudios realizados, reconoce que para ellos el ancho está relacionado directamente con la comodidad y con la percepción de la seguridad. Por último, se ha basado en registros de siniestralidad –en términos del número de accidentes por kilómetro viajado en bicicleta– donde establecen que carriles bici estrechos (menos de 1,2 m de ancho) son entre dos y tres veces más peligrosos que los carriles más anchos (CROW, 2011).

2.2.4 Dinamarca

Por otro lado, el “Collection of Cycle Concepts”, elaborado por la asociación de ciclismo de Dinamarca, tiene como objetivo principal ser una fuente de inspiración y motivación para crear más infraestructuras para los ciclistas y que sean seguras, tanto en Dinamarca como en el resto del mundo. Esta guía busca favorecer el transporte sostenible en el futuro y, para ello, considera que el ciclismo debe desarrollar un papel importante, siendo la infraestructura diseñada para obtener un beneficio máximo (Jensen Andresen, T., Hansen, W., Kjaergaard, E., Krag, T., Larsen, J., Lund, B. & Thost, P, 2012).

A diferencia de las guías anteriores, en esta guía el ancho para la infraestructura ciclista se define, en primera instancia, en función de la capacidad que puede admitir una sección transversal. La medida mínima propuesta se fija en 2,0 m de ancho teórico, pero se recomienda que sea 2,2 m para una vía de dos carriles (Jensen Andresen, T., Hansen, W., Kjaergaard, E., Krag, T., Larsen, J., Lund, B. & Thost, P, 2012).

Sin embargo, posteriormente establece que el cálculo solo numérico en función de la capacidad no es suficiente, puesto que es necesario que la infraestructura cuente con espacio suficiente para que dos usuarios que circulen en sentidos opuestos se encuentren sin dificultades, y que también puedan adelantarse entre sí aquellos que vayan en la misma dirección. El ancho óptimo para esta consideración es de 3,0 m según la estrategia de ciclismo de Copenhague de 2011-2025 (Jensen Andresen, T., Hansen, W., Kjaergaard, E., Krag, T., Larsen, J., Lund, B. & Thost, P, 2012).

Otra consideración incluida en esta guía es el aumento del tráfico de ciclistas y el las bicicletas de carga, que ocupan más espacio que una bicicleta tradicional. En base a esto, determina que 2,2 m es el ancho recomendado para carriles unidireccionales con el fin de permitir el adelantamiento y hasta 3,0 m si hay dos tipos de vehículos que circulan en un mismo tramo (Jensen Andresen, T., Hansen, W., Kjaergaard, E., Krag, T., Larsen, J., Lund, B. & Thost, P, 2012). Finalmente, como en los manuales anteriores, también define anchos sugeridos en función de la tipología de carril y las consideraciones bajo las cuales establece esta medida. Todo ello se presenta en la Tabla 5.

Tipo de vía	Ancho	Consideración
Carril unidireccional segregado	Sugerido 2,2 m	Permite el adelantamiento seguro, además considera la presencia de las bicis de carga
	Mínimo 1,7 m	
	Recomendación mínimo 2 m	
Carril bidireccional sobre la vía	3,0 m	Para vías primarias con bordes de protección
Carril bidireccional segregado	3,0 m	Permitir el adelantamiento de manera segura y puede ampliarse para el paso de peatones
	2,5 m	Si el área peatonal es independiente

Tabla 5 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas según el manual xxx. Fuente: Elaboración propia en base la información disponible en el "Collection of Cycle Concepts" (Jensen Andresen, T., Hansen, W., Kjaergaard, E., Krag, T., Larsen, J., Lund, B. & Thost, P, 2012

Esta guía ha establecido los parámetros de diseño en estudios que han demostrado que el número de accidentes disminuye cuando el ancho del carril aumenta y ha determinado que el ancho de la infraestructura es un elemento crucial para el confort y la funcionalidad (Jensen Andresen, T., Hansen, W., Kjaergaard, E., Krag, T., Larsen, J., Lund, B. & Thost, P, 2012).

2.2.5 Nueva Zelanda

Por otro lado, la guía "Cycle trail design guide" de Nueva Zelanda repite las consideraciones tomadas por la AASHTO y por CROW, definiendo en primer lugar el espacio mínimo de operación requerido para el pedaleo de un vehículo tipo. No obstante, toma como referencia la longitud del manillar de la bicicleta, puesto que es la mayor en vista frontal y, por tanto, es la zona más propensa a alcanzar obstáculos laterales (Via Strada Transport Planning and Design, 2019).

Igualmente, establece que es necesario un espacio libre disponible para mitigar el balanceo que se produce durante la circulación, que varía según el grado de experiencia del usuario, y también para evitar que el ciclista piense todo el tiempo en no salirse de la vía (Via Strada Transport Planning and Design, 2019). Estos requerimientos pueden denominarse también requisitos de operación, tal como se han sido referidos en los manuales anteriores.

Teniendo en cuenta estos aspectos, la guía determina las distancias mínimas de operación, presentadas en la Figura 5. En esta se observa que el ancho mínimo esperado para una adecuada circulación es de 1,00 m, para cubrir la distancia de movimiento lateral de la zona de pedaleo y la zona del manillar (Via Strada Transport Planning and Design, 2019), por lo que se encuentra 50 cm por debajo de los fijados en las guías previamente mencionadas.

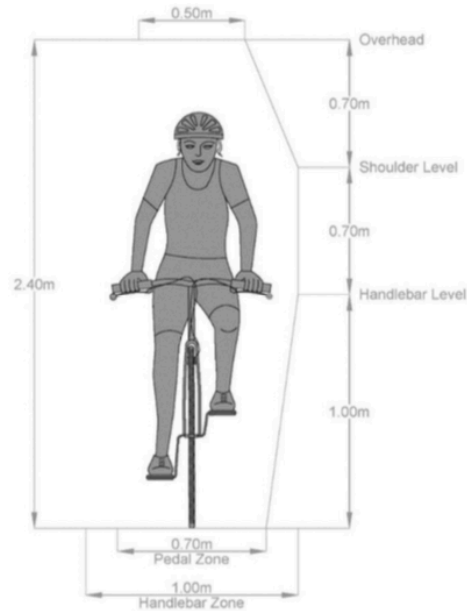


Figura 5 Espacio de operación para un ciclista. Fuente: *Cycle trail design guide (Via Strada Transport planning and Design 2019)*

Partiendo de esta base, el manual define anchos mínimos para 2 tipo de vías ciclistas: (i) segregadas y (ii) sobre calzada. Pero su criterio se basa en el sistema de clasificación de senderos de la Asociación Internacional de Bicicleta de Montaña y la guía del departamento de conservación y bicicleta de montaña. Esta clasificación se basa en el tipo de usuario, según las habilidades de este y las preferencias que tendría para determinada vía ciclista (Via Strada Transport Planning and Design, 2019). El resumen de esta información se presenta en la Tabla 6 y en la Tabla 7.

Grado del usuario	Unidireccional	Bidireccional
1 Easiest	1,2-1,5 m	2,5- 4,0 m
2 Easy	0,9-1,5 m	2,2 m
3 Intermediate	0,9, mínimo 0,6	-
4 Advanced	0,6 en pendientes, 0,3 terreno plano	-
5 Expert	0,25 mínimo, promedio 0,4	-
6 Extreme	0,1	-

Tabla 6 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: *Adaptado de Cycle trail design guide (Via Strada Transport planning and Design, 2019)*

Grado	Ancho mínimo de la calzada adyacente	Límite de velocidad		
		50 km/h	70-80 km/h	100 km/h
		3,0 m	3,3 m	3,5 m
1 y 2	Mínimo	1,6 m	1,9 m	2,5 m
	Rango tolerable	1,2 – 2,2 m	1,6 m	2,0-2,5 m
3 y 4	Mínimo	1,2 m	1,5 m	2,0 m
	Rango tolerable	1,0 – 1,5 m	1,0 – 1,7 m	1,0-2,0 m
5 y 6 Estrecha (tráfico diario promedio de 2000-10000)	Mínimo	1,0 m	1,2 m	1,5 m
	Rango tolerable	0,6-1,0 m	0,6-1,5 m	0,6-1,8 m
5 y 6 Intermedia (tráfico diario promedio de 5000-15000)	Mínimo	1,2 m	1,5 m	1,8 m
	Rango tolerable	1,0-1,5 m	1,0-1,8 m	1,0- 1,2 m
5 y 6 Amplia (tráfico diario promedio de 8000-30000)	Mínimo	1,5 m	1,8 m	2,0 m
	Rango tolerable	1,2-2,0 m	1,5-2,0	1,5-2,2m

Tabla 7 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Adaptado de Cycle trail design guide de Nueva Zelanda, 2019.

2.2.6 Colombia

De modo similar, la guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas tiene como principal consideración que las dimensiones fijadas para el diseño de vías ciclistas “Permitan el tránsito seguro y cómodo de bicicletas como las maniobras de adelantamiento, encuentro, parada, etc.” (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016).

Esta guía considera un ancho físico de la bicicleta de 0,7 m y un ancho operativo de 1,0 m que incluye el espacio de circulación para los requisitos necesarios de los ciclistas que les permite guardar el equilibrio. Adicionalmente, añade un espacio de seguridad o de maniobra de 0,2 m a cada lado (puede ser de 0,1 m en espacio limitados) (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016). Por lo tanto, el “ancho de operación” comparable con las referencias anteriores es de 1,4 m o 1,2 cuando el espacio es limitado.

También, deja abierta la posibilidad de la posible ampliación de esos espacios de circulación en función de las características del usuario (edad, condición física), del entorno (inclinación longitudinal del carril) o del contexto (viento) (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016), consideraciones que se han tenido en cuenta igualmente en los manuales anteriores.

Por último, incluye la posibilidad de la circulación combinada de bicicletas y triciclos, que son vehículos de uso común en el país, especialmente en las zonas rurales (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016). La Tabla 8 presenta las dimensiones mínimas fijadas en esta guía.

Condición		1 sentido de circulación (m)	1 sentido de circulación más adelantamiento (m)	2 sentidos de circulación (m)
Sin circulación de triciclos	Mínima	1,40	1,60	2,20
	Recomendable	1,60	2,00	2,60
Con circulación de triciclos	Mínima	1,50	2,10	2,70
	Recomendable	1,70	2,30	3,20

Tabla 8 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Adaptado de la guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016).

Los fundamentos de esta guía se han basado en la investigación propia realizada por la unidad de movilidad urbana sostenible, adscrita al ministerio de transporte. Los estudios se realizaron en conjunto con usuarios, funcionarios y expertos a nivel nacional, y teniendo en cuenta información existente acerca de la infraestructura ciclista.

2.2.7 Perú

Otra referencia interesante es el Manual de Criterios de Diseño de Infraestructura Ciclo-inclusiva y Guía de Circulación del Ciclista de Perú, que se ha basado en la normativa propia de carreteras y en normativas existentes sobre vías ciclistas principalmente enfocadas a recomendaciones al usuario. Este manual establece las dimensiones recomendadas únicamente en función de la direccionalidad de la circulación. Estas dimensiones aplican para todo tipo de vías ciclistas. No obstante, establece que estas medidas consideran una distancia suficiente para permitir el adelantamiento entre usuarios, el incremento del volumen de ciclistas durante la hora pico y la circulación de otro tipo de vehículos como triciclos (Municipalidad de Lima, 2017). La recopilación de estas recomendaciones se presenta en la Tabla 9.

Ancho	Ciclo carril	Ciclo vía unidireccional	Ciclo vía unidireccional con sobrepaso	Ciclo vía bidireccional
Mínimo (sin incluir resguardo)	1,40 m	1,60 m	2,00 m	2,80 m
Recomendado	1,80 m	2,00 m	2,40 m	3,20 m

Tabla 9 Dimensiones mínimas para el ancho de las vías ciclistas. Fuente: Elaboración propia en base a la recopilación de la información del Manual de Criterios de Diseño de Infraestructura Ciclo-inclusiva y Guía de Circulación del Ciclista de Perú, (Municipalidad de Lima, 2017).

2.3 Interacción entre usuarios

Por otro lado, se han comenzado a realizar investigaciones relacionadas con la infraestructura y la interacción de los usuarios de VMPs entre ellos mismo y con los otros agentes de la vía, con el fin de identificar y definir los conflictos que se producen, las causas y efectos, para poder buscar la solución a estos. A continuación, se describen brevemente, con énfasis a la metodología implementada para la evaluación de las distintas variables relacionadas con la circulación de estos modos.

Dentro de los primero estudios desarrollados, Walker (2007) investigó sobre el fenómeno del adelantamiento de los vehículos motorizados a ciclistas en entornos rurales. Para ello realizó un experimento naturalístico utilizando una bicicleta instrumentada para recolectar datos directamente en el momento que ocurría la maniobra. En su estudio buscó determinar los efectos de la posición de la circulación, el uso del caso, y el género aparente de conductores.

El sistema instrumentado consistió en una bicicleta híbrida de montaña a la cual se le ancló un sensor ultrasónico de tipo Massa M-5000, una cámara de video ubicada sobre el manillar y un ordenador que recibía y almacenaba los registros medidos por el sensor y las grabaciones en directo. En este estudio se registraron 2355 maniobras, con las cuales se concluyó que entre más lejos se encontrara el ciclista del borde de la carretera, más cerca pasaba el coche que lo adelantaba. Adicionalmente, se identificó que el uso del casco conduce a que los coches pasen aún más cerca de los ciclistas.

Continuando con esta línea de investigación, Chapman y Noyce (2012) estudiaron las maniobras de adelantamiento de vehículos motorizados a ciclistas en carretera rurales, igualmente con una bicicleta de carretera instrumentada, siguiendo el sistema que los mismos autores desarrollaron en 2010. Este consistió en el conjunto de dos cámaras de vídeo ubicados en la parte delantera y posterior de la bicicleta, un sensor lateral ultrasónico de distancia (Maxbotix L V -EZ1), un GPS y un contenedor, en el cual, se encontraba el ordenador donde se almacenaban los registros.

Como resultado de esta investigación se obtuvieron 1151 maniobras, con las cuales se determinó que los vehículos motorizados, contrario a la percepción de los ciclistas, dejaban el espacio lateral suficiente al momento de adelantarlos, incluso más de lo requerido. Adicionalmente, indicaron que la presencia de bermas reduce la violación al espacio de ciclista con una ratio de 4-6 veces inferior a lo que ocurre frente la ausencia de esta.

De manera similar a los estudios anteriores, Llorca et al. (2017) también investigaron sobre la maniobra de adelantamiento de vehículos motorizados en carreteras. En este caso igualmente se implementó un sistema de bicicleta instrumentada, pero a diferencia de los estudios anteriores, se montaron 2 tipos distintos de vehículos y se incluyó la evaluación de la percepción general del riesgo de conductor de la bicicleta al momento de ser adelantado.

Ambas bicicletas, una de carrera y una de montaña, se instrumentaron con radares láser para determinar la velocidad del vehículo que adelantaba al ciclista y medir la distancia lateral a la que ocurría la maniobra. Tres cámaras de vídeo en posición frontal, lateral y posterior, para tener una visión general del suceso, y un GPS para geo localizar todo el recorrido. Los datos fueron almacenados en un ordenador al cual estaban conectados los dispositivos mencionados, ubicado dentro de una caja anclada a la bicicleta. El sistema funcionó con una fuente de alimentación portátil.

Como resultado del estudio, se concluyó que existe una relación entre el tipo de vehículo que adelanta al ciclista, la velocidad a la que circula y la distancia a la que se produce la maniobra. Se determinó que requiere una distancia suficiente mayor a 1,5 m para proteger a los ciclistas frente a la interacción con el tráfico motorizado en carreteras y se debe proveer bermas adecuadas. También, se recomendó contar con una muestra más grande de ciclistas con el fin de evaluar mejor la percepción del riesgo.

No obstante, también se han desarrollado estudios en el área urbana relacionados a la maniobra de adelantamiento de vehículos motorizados a ciclistas. Love et al. (2012) investigaron la relación de la distancia a la que ocurría estas maniobras, y la tipología de la infraestructura, y el ancho de la calzada. La metodología implementada en este análisis fueron únicamente cámaras de video ancladas a las bicicletas del estudio. La muestra correspondiente fueron 5 ciclistas, y 586 maniobras fueron registradas. Como resultado se obtuvo que la distancia de resguardo del área de estudio fijada en 1 m, no era cumplida por los vehículos motorizados, y por ende se afectaba la seguridad de los ciclistas. El estudio sugiere la construcción de infraestructura ciclista exclusiva.

Adicionalmente, en el entorno urbano se empezó a considerar la evaluación interacción de otros usuarios de VMPs, no solo bicicletas como en el caso del área rural. Haworth et al. (2021) elaboraron un estudio en el cual, contabilizaron el uso de los patinetes eléctricos (privados y públicos) y de las bicicletas, en carriles segregados, en aceras y sobre las vías para motorizados con el fin de observar la interacción que se producía con los demás usuarios. Como resultado identificaron que los peatones perciben riesgo de los patinetes eléctricos y de las bicicletas cuando están en la acera, pero también los usuarios de los micro vehículos consideran más inseguro conducir sobre la calzada para motorizados, especialmente las mujeres y los conductores con menos experiencia.

Por su parte, Garcia et al. (2015) identificaron la ausencia de bases científicas para la selección del ancho de los carriles para ciclistas urbanas de las normativas actuales. Asimismo, no existían muchos estudios previos que analizarán la interacción de los ciclistas en la infraestructura existente. Por ello, desarrollaron una investigación enfocada a la maniobra encuentro entre usuarios en los carriles bidireccionales, seleccionando tramos de estudio donde variaba el ancho y las condiciones de borde de estos.

La metodología seguida por los autores se corresponde con aquellas implementadas en el entorno rural, la instrumentación de una bicicleta. Dicho vehículo fue montado con cuatro cámaras de vídeo, un GPS, dos radares láser T100 laterales con los que se midió la distancia del encuentro y la velocidad relativa del usuario al momento de su ocurrencia, y dos radares láser S200 ubicados en la parte delantera y trasera de la bicicleta. Y por último un ordenador portátil, al cual todos los dispositivos transferían los datos medidos.

Derivado de este estudio se determinó que existe una relación entre la geometría del carril y las características de la maniobra de encuentro. La existencia de obstáculos laterales modifica la trayectoria de los conductores, y la reacción de ellos mismos ante la ocurrencia de la maniobra de encuentro varía en función de la tipología del carril. Con esta evaluación, es posible establecer guías a futuro para determinar el ancho mínimo de la infraestructura, que garantice la seguridad y comodidad durante la circulación.

En otra investigación desarrollada en ámbito urbano, Ma et al. (2021) evaluaron las interacciones que se producen en la infraestructura ciclista, en las aceras o en las vías para vehículos motorizados, siguiendo con la metodología de sistemas móviles de sensorización para la recolección de datos naturalístico durante la circulación. Sin embargo, el mayor factor diferencial de este estudio frente a los previos, es que en este caso el vehículo instrumentado fue un patinete eléctrico.

Este sistema móvil, consistió en un set de bajo costo compuesto un sensor inercial IMU que combina un acelerómetro y giroscopio de tres ejes cada uno, un sensor de tipo Lidar, un GPS y una cámara de vídeo. Todos estos dispositivos se conectaron y programaron con una placa Raspberry Pi con la cual se llevó a cabo el almacenamiento y procesamiento de datos. Y la fuente de alimentación fue una batería portátil.

El análisis principal del estudio se basó la medición de las vibraciones que recibe un patinete eléctrico en distintos tipos de pavimentos y dejó a un lado la investigación de la interacción con obstáculos y otros usuarios. Sin embargo, es uno de los primeros análisis que busca identificar los posibles factores de riesgos que se asocian a la infraestructura, para buscar medidas que ayuden a dar las condiciones de operación segura a este tipo de vehículos.

Adicionalmente, se han encontrado investigaciones relacionadas con otras características de la infraestructura viaria, basados en sistemas de sensorización. Uno de estos fue desarrollado por Ho et al., 2020 quienes monitorearon las vibraciones resultantes de las condiciones del pavimento mediante un coche instrumentado. Los dispositivos utilizados en este estudio fueron acelerómetros con giroscopio y manómetro, una placa de arduino MKR1000, GPS, una batería portátil, una cámara de vídeo y conexión wifi. Los datos medidos fueron transmitidos por medio de la conexión wifi a un ordenador portátil. Este sistema se desarrolló con el fin obtener un método con relación costo-efectividad adecuada.

Por último, este mismo tipo de metodología se ha implementado en otros campos de estudio. En este sentido, Loyola Samraj et al. (2020) desarrollaron un sistema con una placa de Arduino. Con este dispositivo se programó un acelerómetro MPU6050, un GPS, un sensor inductivo de proximidad y junto con la memoria de almacenamiento SD, pantalla y batería portátil, se obtuvo un sistema para almacenar información en tiempo real durante las carreras de coches todo terreno, con una relación costo- beneficio adecuada.

Como resultado de esta revisión de antecedentes relacionados con el uso de los VMPs y la infraestructura ciclista, en el presente Trabajo de Fin de Máster se proponer analizar otras maniobras de circulación, recurrentes en infraestructura ciclista, y su relación con las características geométricas, iteración de los usuarios y seguridad de los mismos. Igualmente, se buscará incluir la evaluación de la influencia de los nuevos modos emergentes. Con el fin último de contribuir en investigaciones ante la ausencia de estudios que aborden estos temas.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Final de Máster es caracterizar las maniobras de adelantamiento y encuentro entre usuarios de Vehículos de Movilidad Personal (VPMs) que se producen durante la circulación. Para ello, se propone el diseño de un patinete eléctrico instrumentado que será empleado para realizar tomas de datos naturalísticas en distintas tipologías de infraestructura ciclista urbana en la ciudad de Valencia.

Para conseguir este objetivo principal, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Revisar las normativas de diseño de carriles bici existentes con el fin de identificar las distintas tipologías de infraestructura ciclista urbana.
- Investigar sobre la metodología implementada en estudios previos relacionados con la evaluación de las maniobras de circulación de los usuarios de VPMs.
- Diseñar un patinete eléctrico instrumentado con el cual sea posible caracterizar las maniobras de circulación de los usuarios de VPMs mediante una toma de datos naturalística.
- Determinar de las condiciones actuales de la infraestructura ciclista en el ámbito de estudio.
- Medir la distancia lateral de separación y la velocidad a las que se producen las maniobras de adelantamiento entre usuarios de VPMs con el sistema instrumentado.
- Determinar las variaciones de la distancia lateral y velocidad con las que se producen las maniobras de encuentro con tráfico opuesto entre usuarios de VPMs con el sistema instrumentado.
- Identificar los factores que influyen en la ejecución de las maniobras de adelantamiento y encuentro entre usuarios de VPMs.
- Analizar la influencia de las condiciones de la sección transversal de los carriles bici sobre las maniobras de adelantamiento y encuentro.
- Analizar la percepción de la seguridad y comodidad de los usuarios de VPMs en las distintas tipologías de infraestructura ciclista mediante el desarrollo de una encuesta online.
- Establecer recomendaciones para la mejora de la infraestructura ciclista desde el punto de vista de la seguridad de los usuarios.

3.2 Hipótesis

Para justificar esta investigación, se plantean las siguientes hipótesis:

H1. La configuración de la infraestructura ciclista influye en el comportamiento de usuarios de VMPs durante la circulación. Por tanto, la presencia de bordillo físico o vegetal conduce a una disminución de la distancia lateral que guardan entre sí los usuarios de VMPs.

H2. La tipología de los bordillos físicos que delimitan la infraestructura ciclista, influye en el comportamiento de los usuarios. La distancia lateral que guardan entre sí los usuarios de VMPs.

H3. Según el tipo de VPM, cambia la distancia a la que ocurren las maniobras de adelantamiento y encuentro. Ante la interacción con conductores de patinetes eléctricos, la separación entre usuarios es menor.

H4. La configuración de la infraestructura ciclista influye en el número de adelantamientos que se producen durante la circulación. Cuando los carriles están delimitados se presenta menor registro de este tipo de maniobra.

H5. La percepción de riesgo de los usuarios es baja en los tipos de carril bici de acera.

H6. La percepción de riesgo de los usuarios es alta en los tipos de carril bici que cuentan con bordillos y separadores.

H7. La presencia de obstáculos en el entorno de la infraestructura la ciclista aumenta la percepción de riesgo del usuario.

H8. La maniobra de adelantamiento es considerada más riesgosa que la de encuentro, independientemente de la tipología de carril.

4. METODOLOGÍA

4.1 Planeamiento

Este Trabajo tiene como principal objetivo analizar el comportamiento de los usuarios de la infraestructura ciclista a partir de la caracterización de las maniobras de adelantamiento y encuentro de los usuarios, siendo estos movimientos los más realizados durante la circulación habitual. Con el fin de verificar si las disposiciones actuales de las vías ciclistas de Valencia son adecuadas desde el punto de vista geométrico, se propone el estudio de los siguientes factores relacionados con la micromovilidad: (i) infraestructura disponible; (ii) operación; (iii) percepción del usuario; y (iv) interacción entre usuarios (Figura 6).

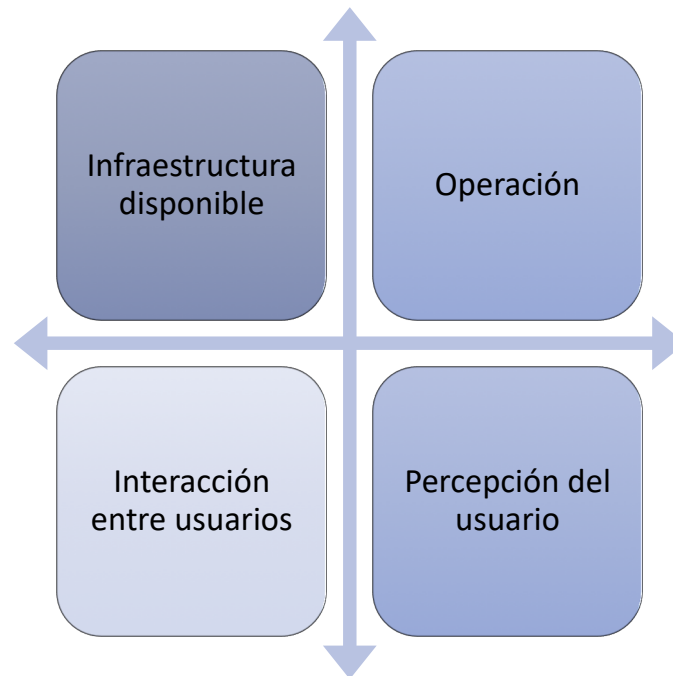


Figura 6 Factores a estudiar en el trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Para cada uno de estos factores se ha definido una serie de variables específicas que se consideran importantes para lograr un análisis integral del fenómeno a estudiar (Tabla 10).

Variable global	Variable específica
Infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> • Tipología del itinerario ciclista. • Sección transversal. • Separación lateral: Separadores ante otros usuarios de la vía (peatones, vehículos motorizados). • Obstáculos laterales: Como aparcamiento en línea de coches, árboles, equipamientos. • Tipo de pavimento.
Operación	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de circulación.
Interacción entre usuarios	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia de separación lateral entre usuarios cuando se produce un encuentro. • Distancia de separación lateral entre usuarios cuando se produce un adelantamiento. • Velocidad con la que ocurren las maniobras.
Percepción del usuario	<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad. • Comodidad • Entorno.

Tabla 10 Variables a estudiar en el trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Para medir estas variables se requieren tres tipos de tomas de datos. En primer lugar, es necesario realizar una toma de datos georreferenciada para crear una base de datos de fotos y vídeos con los que sea posible identificar las variables planteadas. Paralelamente, es necesario el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para elaborar mapas donde se plasmen los resultados de las inspecciones.

En segundo lugar, es necesaria la implementación de tecnologías portátiles con el fin de realizar mediciones y obtener registros sobre la operación y la interacción de los usuarios. Esta información debe obtenerse directamente en condiciones de circulación normal sobre la infraestructura ciclista. Por lo tanto, se propone el uso de un Vehículo de Movilidad Personal al cual se le instalen dichas tecnologías; y sea conducido por un usuario estándar que realice mediciones en distintas secciones de la infraestructura ciclista en una zona de estudio específica.

Con los sensores con los que se implemente este vehículo se realizará la medición de la variable específica “Distancia lateral” de separación entre usuarios cuando se produzcan ambas maniobras. Esta comprende exactamente la distancia comprendida desde la posición del sensor, hasta la posición donde ocurra el rebote de la medición, en el otro usuario. Las flechas rojas de la Figura 7 indican gráficamente a que se refiere esta medida.

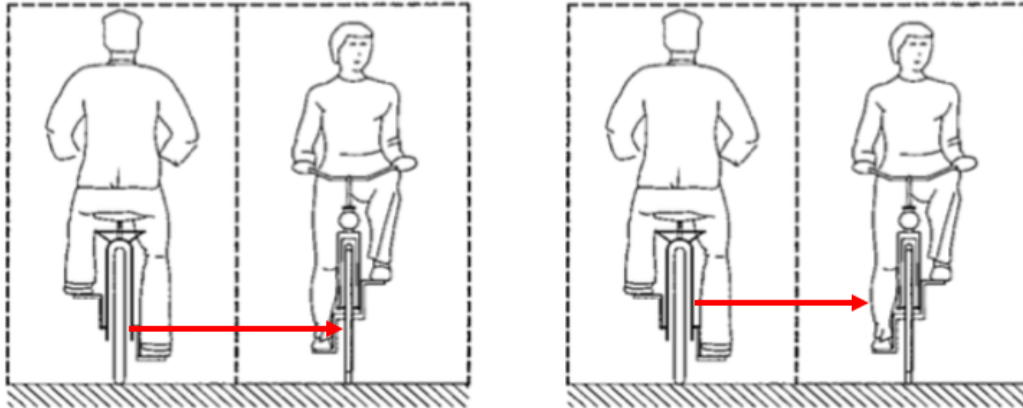


Figura 7 Representación gráfica para la variable distancia de separación entre usuarios. Fuente: Figura base tomada del Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, señalización, balizamiento, conservación y mantenimiento del carril bici de España (DGT, 2000).

Por último, es necesario caracterizar la percepción de los usuarios, para lo que se propone la elaboración de una encuesta online.

En base a estos requerimientos, se han definido 5 fases para el desarrollo del proyecto: (i) Programación y sensorización; (ii) Vehículo instrumentado; (iii) Elaboración de encuesta; (iv) Toma de datos; y (v) Análisis de resultados (Figura 8). En las siguientes secciones se describe el proceso a desarrollar en cada una de estas etapas.

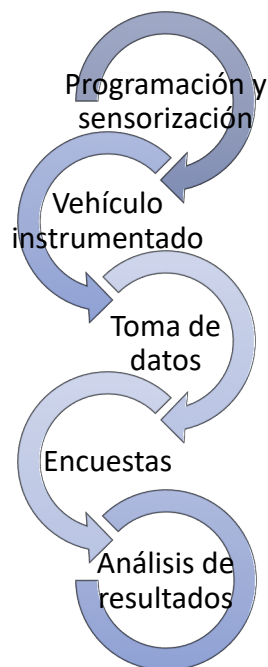


Figura 8 Fases para el desarrollo del trabajo. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Programación y sensorización

El objetivo principal de esta fase es desarrollar un sistema portátil de alto rendimiento con el que sea posible obtener los datos necesarios para el desarrollo del Trabajo. Durante esta primera fase, se realizará la programación de los dispositivos con los cuales se realizarán las mediciones para las variables específicas de la operación y la interacción entre usuarios.

Actualmente, existen distintos tipos de dispositivos portátiles con amplia funcionalidad a proyectos de ingeniería, con los cuales es posible desarrollar proyectos innovadores, prácticos y con resultados totalmente adecuados. En este trabajo se va a utilizar una placa portátil Raspberry Pi como ordenador portátil principal con el cual será posible conectar y programar distintos tipos de sensores para realizar la toma de datos.

El tipo de sensores a utilizar son aquellos de tipo ultrasónico, que son comúnmente utilizados en el mercado para medir distancias. Se colocará la cantidad de dispositivos que sean necesarios y serán programados con Python. Con estos se recolectarán los datos en bruto del proyecto y, posteriormente en la fase de análisis de datos, se realizarán los ajustes y cálculos correspondientes.

Adicionalmente, se requiere una cámara de video para registrar el comportamiento y las reacciones de los usuarios con el objetivo de compararlos posteriormente con los datos obtenidos mediante los sensores. También es necesario un GPS para georreferenciar todo el proceso de la toma de datos. Estos equipos puede ser otros dispositivos específicos conectados a la Raspberry Pi o como alternativa instalarlos de manera independiente, siempre y cuando durante la fase de toma de datos se encuentren todos sincronizados.

4.3 Vehículo instrumentado

Una vez definidos y programados los distintos sensores, el proceso siguiente es definir el vehículo al cual serán instalados y con el que se circulará en la toma de datos, a partir de ahora denominado “Vehículo instrumentado”. Posteriormente, se deben establecer las conexiones y ubicaciones de los dispositivos sobre este. A continuación, se describe el proceso a seguir.

4.3.1 Vehículo

El vehículo instrumentado debe tener permitido circular sobre la infraestructura ciclista, es decir, cumplir con el reglamento de circulación y el reglamento general de vehículos. En este sentido, la ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial del Ministerio del Interior (2015) determina que los ciclos son aquellos que tienen permitido esta condición, definidos como: “vehículo provisto de al menos 2 ruedas y propulsado exclusivamente por la energía muscular de la persona o personas que están sobre este”.

Sin embargo, la última actualización del reglamento General de Circulación, y del Reglamento General de Vehículos de 2020 incluye la definición de “Vehículo de Movilidad Personal” (VPM) como “Vehículo de una o más ruedas dotado de una única plaza y propulsado exclusivamente por motores eléctricos que pueden proporcionar al vehículo una velocidad máxima por diseño comprendida entre 6 y 25 km/h. Solo pueden estar equipados con un asiento o sillín si están dotados de sistema de auto equilibrado”. A su vez, al ser definido como vehículo, tiene prohibida la circulación sobre aceras y zonas peatonales, pero puede utilizar las vías ciclistas y ciclo calles sin exceder los 25km/h, y las calzadas viales

Bajo estas condiciones se presentan 2 alternativas para seleccionar el tipo de vehículo, bicicleta de uso particular o patinete eléctrico. Mientras que ya se han realizado investigaciones que han implementado la primera opción, poco o nada se conoce en cuanto a la operación y comportamiento de la segunda alternativa. Además, los patinetes eléctricos son vehículos que han crecido en el reparto modal de la movilidad, al ser este un VPM que ofrece ventajas operativas, económicas y ambientales. Sin embargo, debido a su reciente impacto, aún no se ha obtenido información sobre la circulación de estos en conjunto con la bicicleta tradicional, siendo así esta una oportunidad para investigar sobre el tema. Por esta razón, se establece como vehículo instrumentado para este proyecto un patinete eléctrico, con el cual es posible cumplir los objetivos planteados y, adicionalmente, cubrir la consideración de los nuevos modos de VPMs.

4.3.2 Montaje

Una vez programados los dispositivos de sensorización, el paso siguiente es instalarlos directamente sobre el patinete eléctrico. La principal premisa para este proceso es lograr que todos los usuarios con los cuales interactúe el vehículo instrumentado, mantengan una operación normal, puesto que la literatura ha identificado que cuando las personas encuentran una característica distinta en el entorno varían su comportamiento. Por lo tanto, el objetivo es acoplar todos los elementos de manera que su percepción sea la más mínima posible.

Para el montaje deben considerarse todos los requerimientos de la placa portátil para funcionar en remoto, al mismo tiempo que se deben hacer todas las conexiones necesarias de los sensores ultrasónicos para ubicarlos tal como se presenta en el esquema propuesto en la Figura 9.



Figura 9 Esquema de montaje del vehículo instrumentado. Fuente: Elaboración propia.

Este esquema se propone basado en las variables que se desean (Tabla 10), de manera que los sensores ultrasónicos ubicados en la parte delantera y posterior y en los laterales del patinete puedan medir distancias para distintas maniobras de circulación y, posteriormente, filtrar los datos obtenidos para las condiciones específicas del estudio. También se presenta la ubicación de la cámara de vídeo sobre el manillar del patinete de manera que se pueda tener una visión global tanto de los usuarios como de la infraestructura durante la toma de datos; y la ubicación de la placa portátil donde afecten en menor instancia la posición del conductor y sin que requieran un elemento adicional para instalarlos sobre el vehículo.

4.3.3 Prueba piloto

Previo a la toma oficial de datos, se debe realizar una serie de pruebas con el objetivo de verificar que todos los dispositivos funcionan de manera correcta y revisar que los datos recolectados sean válidos. Para ello, se propone realizar 3 recorridos de prueba en zonas escogidas al azar, en las cuales sea posible encontrar una afluencia de usuarios significativa. Estas pruebas deben registrarse, identificando claramente la localización, el tipo de infraestructura ciclista, la sección transversal, un registro fotográfico y la hora y día en que se realice.

Al confirmar que los datos que se obtienen en la medición de las pruebas son válidos para el estudio, se iniciará la fase definitiva de la toma de datos. Si los registros obtenidos en la fase de prueba son correctos y se realizan dentro del área de trabajo, también serán incluidos en la fase de análisis.

En caso contrario, se deberá identificar cual es la causa del error, puesto que debido a la naturaleza del sistema este puede provenir de distintas fuentes, estos son:

- Error de programación.
- Error de almacenamiento de datos.
- Error de conexiones.
- Error del sistema operativo.
- Error de medición.
- Otros.

Una vez identificado, se realizarán los cambios correspondientes para solucionarlo. Las medidas de corrección a ejecutar dependerán del origen del fallo. Por lo tanto, si es error de programación deberá modificarse el código de la toma de datos; si es de almacenamiento cambiar la capacidad del dispositivo; si es un fallo en las conexiones se deberá revisar el cableado y otros elementos; si es de medición se deberá revisar los dispositivos ultrasónicos; entre las opciones más destacadas de ajuste.

Finalizadas las modificaciones se retomaría con la fase de prueba, este procedimiento debe realizarse las veces que sean necesarias hasta obtener el funcionamiento al 100% del sistema, de manera que tome datos correctamente y los almacene, durante el tiempo que sea necesario.

4.4 Toma de datos

Tras el montaje definitivo del vehículo instrumentado, la medición de las variables fijadas en la sección 4.1 será realizada a través del recorrido continuo y geo localizado de los tramos seleccionados sobre la infraestructura ciclista en la zona de estudio a seleccionar. Para ello, en esta fase de toma de datos se hace necesaria la definición de los siguientes criterios:

- Características de la infraestructura ciclista.
- Selección de tramos de estudio.
- Condiciones generales para la toma de datos.
- Usuarios.
- Encuesta.

4.4.1 Características de la infraestructura ciclista

En primer lugar, se delimitará el área de estudio a un distrito de la ciudad de València. El objetivo es localizar un distrito que contenga diversas tipologías de vías ciclistas y, además, haya un importante volumen de usuarios con el fin de poder analizar la interacción entre ellos. Una vez seleccionado se elaborará un plano en el cual se indique la localización de este.

Seguido, se realizará un segundo plano donde se localice la infraestructura ciclista que se encuentre actualmente en el área de estudio. También se incluirá en esta sección cualquier otra característica relevante relacionada con la infraestructura ciclista que se encuentre. Este proceso se llevará a cabo con el uso de sistemas de información geográfica (SIG), con el software QGIS, y la información disponible en datos abiertos del Ayuntamiento de Valencia.

En tercer lugar, se realizará una inspección de las vías ciclistas identificadas en el área de estudio con el fin de clasificarlas según la normativa vigente. Con esta información se realizará un registro en el cual se consolide toda la información encontrada y de esta manera tener localizados cada tipo de vía ciclista dentro del distrito, junto con sus características físicas y geométricas.

4.4.2 Selección de tramos de estudio

Posteriormente, se seleccionarán y describirán los tramos específicos en los cuales se realizará la toma de datos. Estos serán escogidos con el fin de obtener una muestra representativa, teniendo en cuenta las maniobras que se quieren analizar:

- ⇒ Adelantamiento: Maniobra para sobrepasar a un usuario que circula en el mismo sentido de circulación.
- ⇒ Encuentro: Maniobra de cruce con otros usuarios que circulan en sentido opuesto.

Las preferencias para determinar estos tramos son las siguientes:

- Tramos rectos
- Carriles bidireccionales
- Evitar carriles que presenten interrupciones

Una vez seleccionados los tramos de estudio, se establecerá un identificador (ID) a cada uno de ellos con una descripción de las condiciones geométricas y direccionales, adjuntando también una imagen. De esta manera, será posible clasificar los datos registrados en cada tramo específico para su posterior análisis. Adicionalmente, se realizará un mapa en el cual se indiquen los tramos seleccionados con su respectivo ID.

4.4.3 Condiciones generales para la toma de datos

Con el fin de caracterizar el comportamiento habitual de los usuarios, la toma de datos deberá realizarse bajo condiciones favorables de meteorología. En principio, las pruebas a realizar se han programado para el mes de junio de 2021 y la recolección de datos definitivos para junio y principios de julio 2021.

La toma de datos se realizará durante días laborales –de lunes a viernes– en horario de mañana o tarde, durante las horas punta de ingreso y salida de trabajos, universidades o escuelas con el fin de favorecer la interacción entre los usuarios que circulan sobre la infraestructura. No obstante, también podrán realizarse varias tomas de datos en otras franjas horarias del día y fines de semana.

4.4.4 Tamaño muestral

Para tener un referente del número mínimo de observaciones a recolectar, se hace una estimación del tamaño muestral asumiendo que los datos siguen una distribución normal, aplicando la siguiente ecuación:

$$n \geq \frac{z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

Ecuación 1 Estimación tamaño mínimo de muestra para una distribución normal. Fuente:

Donde n es el tamaño de muestra mínimo requerido, σ la desviación estándar y e el error asociado. En este caso se establece un nivel del 95% de confianza, lo que corresponde al parámetro Z de 1,96 y se asume un error aceptable de 5 cm. Con esto y variando los valores para la desviación estándar, se determina el número de datos mínimo. El resultado de este cálculo se presenta en la Tabla 11.

Error asumido (cm)	Desviación asumida (cm)							
	5	10	15	17	20	25	30	35
2	24	96	216	278	384	600	864	1176
5	4	15	35	44	61	96	138	188
8	2	6	14	17	24	38	54	74

Tabla 11 Tamaño de muestra mínimo para una distribución normal. Fuente: Elaboración propia.

4.4.5 Usuarios

Durante la toma de datos también se realizará una clasificación de los usuarios según el tipo de vehículo que conducen. Este proceso se llevará a cabo al contrastar los registros de los sensores ultrasónicos con el video de la grabación de la toma de datos. La clasificación será la siguiente:

- Bicicleta particular.
- Bicicleta eléctrica.
- Bicicleta pública (Valenbisi).
- Monociclo, incluyendo todos sus derivados.
- Triciclos.
- Patinete eléctrico.

4.5 Encuesta

El objetivo principal de desarrollar encuestas en paralelo a la toma de datos con el vehículo instrumentado es obtener información primaria de los usuarios con respecto a su percepción de las condiciones de la infraestructura ciclista. Con estas, se espera conocer la opinión sobre aspectos como la seguridad, comodidad, entorno y sensación de los riesgos percibidos por los principales actores de este estudio. Para ello, se propone la elaboración de una encuesta con 2 etapas.

La primera etapa de la encuesta tiene como objetivo identificar el tipo de usuario, según:

- Características sociodemográficas: edad, sexo y ocupación.
- Modo de transporte habitual.
- Experiencia: Número de viajes por día, motivo de viaje, longitud de los recorridos.

Por otra parte, la segunda etapa estará orientada a los objetivos del estudio, tratando de obtener información a partir de los siguientes criterios:

- Evaluación sobre las condiciones de la infraestructura ciclista.
- Evaluación sobre las condiciones de borde de los carriles.
- Evaluación sobre el entorno en general.
- Sensación de comodidad y confort sobre la infraestructura ciclista.
- Percepción sobre el riesgo, al interactuar con otros usuarios (motorizados y peatones incluidos).

El tipo de pregunta será de tal forma que permita recolectar la información requerida de manera directa. Las principales metodologías a aplicar serán las escalas, de tipo numérico, redactado, Likert y de frecuencias, entre las más destacadas. También deben ser preguntas sencillas, cortas y de fácil comprensión para el usuario para evitar confusiones al momento de responder. Asimismo, se podrá colocar un apoyo fotográfico y descriptivo que permita resolver las posibles dudas que puedan surgirle a los encuestados y evitar así respuestas incorrectas que podrían afectar a las conclusiones del estudio.

La encuesta se realizará de manera online, en lugar de presencial durante la toma de datos, puesto que con esta alternativa se espera obtener mayor cantidad de resultados ya que los usuarios están más dispuestos a responder un cuestionario que se encuentre disponible a cualquier hora del día y pueda realizarse desde cualquier lugar.

Una vez finalizada toda la etapa de toma de datos, se procederá a hacer el análisis de las respuestas, estandarización, organización y filtrado de datos, de manera que estos se encuentren en un formato que puedan integrarse con los registros capturados por los sensores y hacer el análisis global del trabajo.

4.6 ANÁLISIS DE DATOS

4.6.1 Reducción de datos

Una vez finalizada la toma de datos, el primer paso previo al análisis es la reducción del registro almacenado, ya que, los sensores realizan mediciones continuas. Para poder identificar las maniobras y las distancias a las que éstas ocurren, será necesario visualizar el vídeo de cada recorrido y contrastarlo con el archivo resultante con las mediciones obtenidas con los sensores en cada trayecto. Al sincronizar los tiempos de ambos dispositivos, se registrará el tipo de maniobra, el usuario que la realiza y la distancia a la que se produce.

Este proceso se realizará para cada uno de los recorridos que se realice en la recolección de datos, para finalmente obtener el listado de maniobras que incluya para cada una: Tipo, tipología del carril bici, usuario, distancia y tiempo en el que ocurre y la velocidad correspondiente.

4.6.2 Análisis de resultados

Una vez los datos se encuentran consolidados y organizados, se procederá a hacer el análisis de los resultados. Primero se contabilizarán todas las maniobras y así se obtendrá la distribución de la ocurrencia de estas y de aquí en adelante se estudiará cada una de estas de manera independiente.

El segundo paso, comprende el análisis descriptivo y estadístico correspondiente, para la variable en cuestión la distancia a la que ocurre el adelantamiento y encuentro entre usuarios. El primero consiste en la descripción, tal como su nombre lo indica, con los parámetros estadísticos, media, mediana, coeficiente de varianza, máximos, mínimos, entre los más destacados, junto con el análisis de la distribución de los datos obtenidos. Este proceso se realizará para cada tipo de carril, estudiando cada tipo de maniobra, para los distintos vehículos que se encuentren en el registro.

Por otro lado, con el análisis estadístico, será posible comparar las distintas muestras obtenidas y de esta manera identificar si, estas difieren significativamente unas de otras, considerando el tipo de carril y el tipo de vehículo de ocurrencia de las maniobras. Para ello, se realizarán pruebas de hipótesis de varianza y medias con las cuales será posible determinar con criterio estadístico la suposición planteada, e identificar las diferencias encontradas.

Por último, se llevará a cabo la interpretación de los resultados de la encuesta con la cual se obtendrá información general sobre los usuarios de VMPS, y lo más importante, la percepción de riesgo de ellos referente a las maniobras en estudio en los distintos tipos de carriles. Al integrar estos resultados cualitativos, con los cuantitativos estadísticos anteriores, será posible obtener la visión de la realidad sobre la infraestructura ciclista, y con ello establecer conclusiones y recomendaciones.

5. DESARROLLO

Como se ha descrito previamente, la realización de este proyecto se lleva a cabo con la instrumentación de un patinete eléctrico, con la tecnología Raspberry Pi y sensores asociados programados, para tomar datos sobre las maniobras de adelantamiento y encuentro de usuarios en las vías ciclistas, en itinerarios seleccionados bajo criterios establecidos. El procedimiento seguido se describe en los siguientes epígrafes.

5.1 Instrumentación y Sensorización

5.1.1 Raspberry Pi

La tecnología Raspberry Pi es un sistema relativamente nuevo que ha sido desarrollado por la Raspberry Pi Foundation en el Reino Unido. Específicamente, se trata de un ordenador de placa reducida o placa única, de bajo costo y con alto potencial en el desarrollo de distintos tipos de proyectos de ingeniería, ya que puede adaptarse a muchos tipos de situaciones distintas. Además de la placa, para su funcionamiento como ordenador se requieren los siguientes elementos adicionales: pantalla, ratón, teclado, memoria SD y fuente de alimentación. La conexión a la red puede realizarse a través de wifi o directamente mediante conexión con cable ethernet.

En este proyecto se ha utilizado la Raspberry Pi4 modelo B, la cual cuenta 4 puertos USB, 2 conexiones micro HDMI, un puerto de conexión a ethernet, conexión para la pi camera, conexión a la corriente eléctrica y 24 pines GPIO. Estos últimos componen la pieza más importante puesto que en ellos se conectan los sensores con los cuales se realizará la toma de datos. La Figura 10 presenta la imagen esquemática de los componentes de la placa.

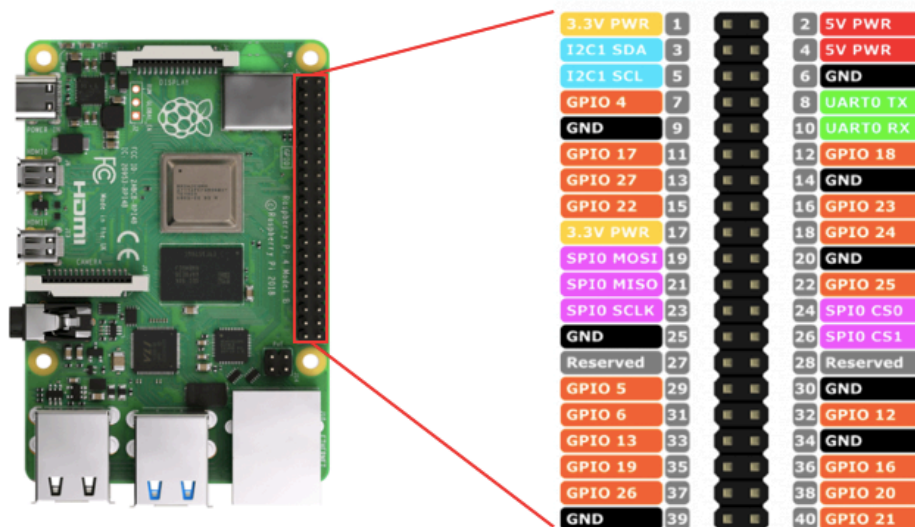


Figura 10 Raspberry Pi modelo 4B y pines GPIO. Fuente: Elaboración propia. Información: Raspberry Pi ORG.

La placa funciona con el software de Linux Raspbian, el cual ha sido instalado en la memoria Micro SD, e incluye los programas necesarios para trabajar en cualquier ámbito. En este caso el programa más relevante es Thonny Python 3 con el que se realiza toda la programación de los sensores. Adicionalmente, también se ha utilizado el paquete de Libre Office para el almacenamiento y tratamiento de datos.

Posteriormente, se conectan los demás elementos del hardware para obtener un ordenador funcional estándar. Por último, se configura el sistema una vez inicializado y se personaliza para los requisitos de este trabajo. En la Figura 11 se presenta la placa y la interfaz gráfica de funcionamiento.

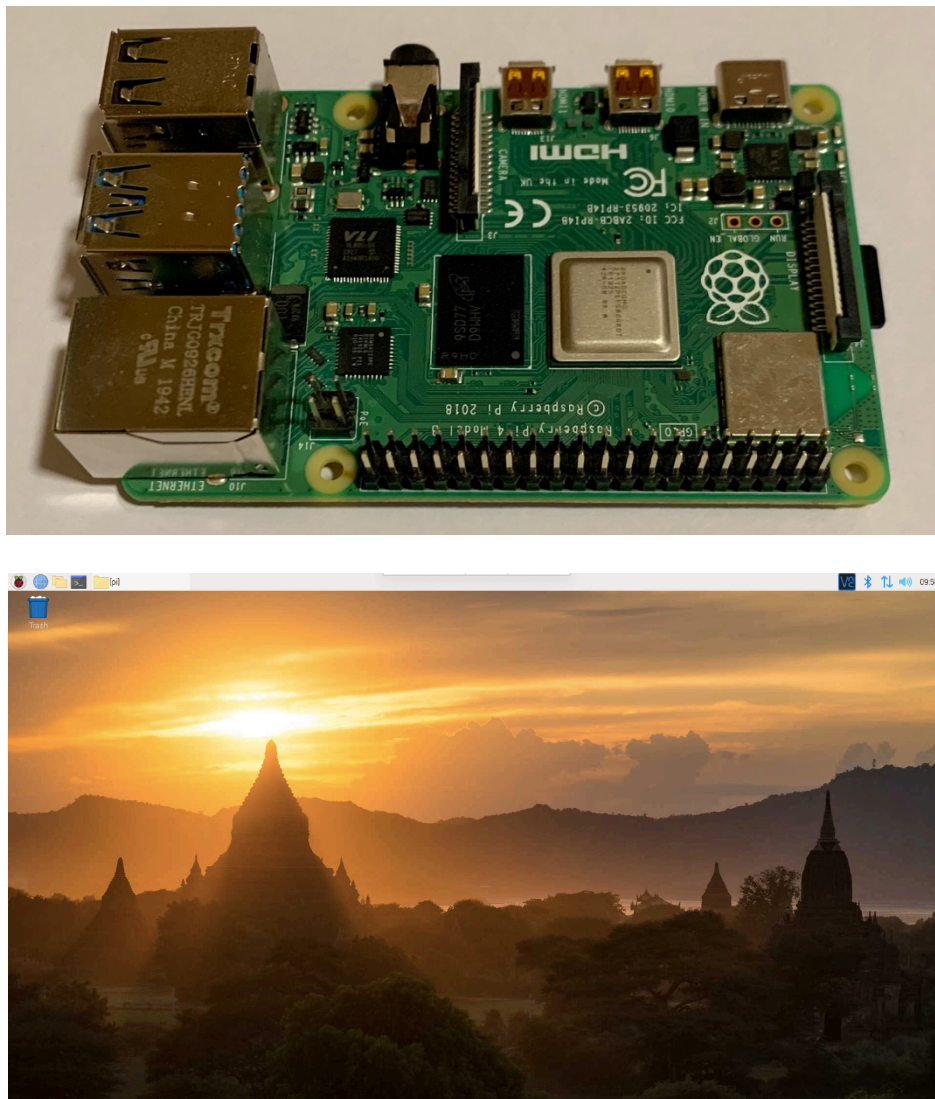


Figura 11 Raspberry Pi e interfaz gráfica. Fuente: Elaboración propia.

Acabado este proceso, la Raspberry Pi se encuentra lista para utilizarse como se requiera. Cabe resaltar que es de vital importancia mantener el software actualizado a medida que se desarrollan las actividades con el fin de evitar problemas en la ejecución de los programas. Además, cada elemento que se conecta a la placa tiene un comportamiento único, por lo que es necesario seguir los requisitos específicos de cada uno de estos para obtener un correcto funcionamiento del sistema.

5.1.2 Sensor HC-SR04

El sensor ultrasónico HC-SR04 (Figura 12) es un dispositivo electrónico cuyo funcionamiento se basa en la emisión y recepción de pulsos ultrasónicos a partir de los cuales se mide el tiempo de envío y de recepción del pulso. Disponiendo de estos tiempos y conociendo la velocidad estándar del sonido es posible calcular la distancia a la que se encuentra un determinado objeto.

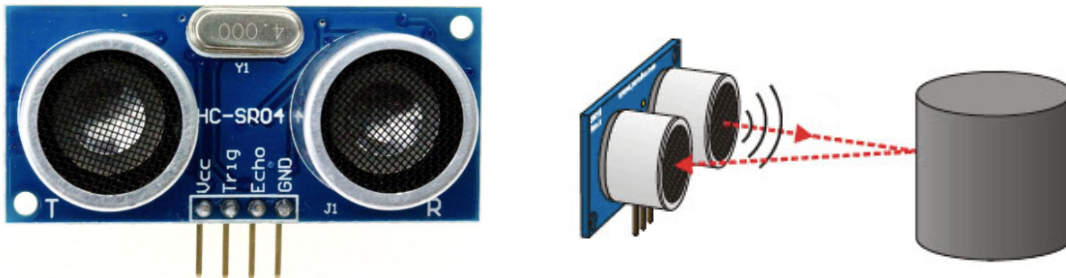


Figura 12 Sensor HC-SR04. Fuente: Tienda Tec.

El dispositivo funciona con un voltaje de 5 V y cuenta con un rango de medición de distancias de 4 cm a 450 cm. Su funcionamiento consiste en el envío de un pulso de 8 ciclos de 40 kHz tras recibir una señal de disparo de, al menos, 10 μ s. Si detecta un eco en el ciclo, el sensor devuelve un pulso con duración en μ s proporcional al tiempo que tarda en recibir la señal del eco. El esquema de su funcionamiento se muestra en la Figura 13.

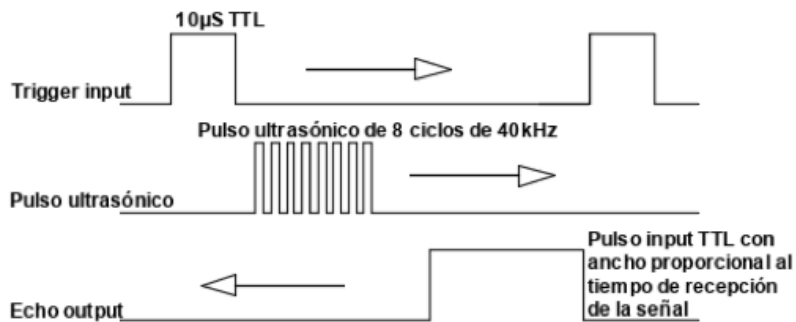


Figura 13 Esquema envío de pulsos sensor HC-SR04. Fuente: Elaboración propia.

Con la duración del pulso y atendiendo a la relación velocidad-distancia-tiempo, se obtiene la distancia a la que se encuentra un objeto (Ecuación 2).

$$Vs = 343 \frac{m}{s} = \frac{1 \text{ cm}}{29.2 \mu s}$$

$$\text{Distancia (cm)} = \frac{\text{Tiempo}(\mu s) * 1 \text{ cm}}{29.2 \mu s * 2}$$

$$\text{Distancia (cm)} = \frac{\text{Tiempo}(\mu s) * 1 \text{ cm}}{58.4 \mu s}$$

Ecuación 2 Cálculo de distancias.

Otra consideración es la apertura del pulso ultrasónico, de 15°, que se refiere al ángulo del vértice del cono de cobertura para la medición. De este modo, el rango de detección es mayor a medida que aumenta la distancia horizontal (Figura 14). Por lo tanto, el pulso ultrasónico puede rebotar en cualquier objeto que se encuentre dentro de dicho alcance.

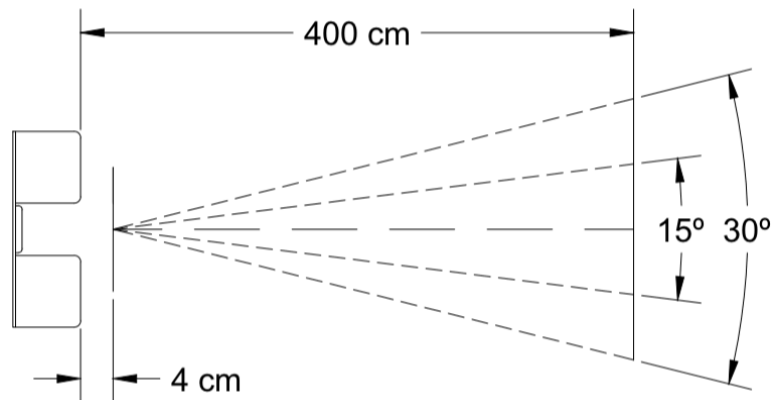


Figura 14 Rango de alcance de medición del sensor HC-SR04. Fuente: Elaboración propia basado en las especificaciones técnicas

Otro aspecto a considerar es la posición de un objeto con respecto al sensor, puesto que este necesita que el pulso ultrasónico rebote y vuelva dentro del rango que pueda recibirlo. El dispositivo tiene alto grado de precisión en las mediciones, pero no cubre la inclinación de los objetos. En el caso de que haya cierta inclinación y el pulso ultrasónico de vuelta no pueda ser captado por el sensor, no es posible obtener la distancia correcta a la que se encuentra.

El sensor es la base para el desarrollo del trabajo puesto que con este es posible medir la mayoría de las variables en cuestión. Además, este dispositivo ofrece importantes ventajas frente a otros de la misma tecnología, las cuales se enumeran a continuación:

- Pequeño y ligero, lo que facilita su ubicación.
- Alto grado de precisión en las mediciones (0,3 cm).
- Rango de medición amplio.
- Punto ciego bajo (4 cm).
- Programación sencilla.
- Alta disponibilidad en el mercado.

En definitiva, se trata de un sensor con una relación costo beneficio significativa.

Concretamente, para este estudio se utilizarán 2 dispositivos de este tipo, conectados a la Raspberry Pi y programados con Python. Con estos, se medirá la separación lateral entre usuarios durante la ocurrencia de las maniobras en cuestión y la distancia a los bordes de la infraestructura (si los hay). Igualmente, con el código con el que se programan, será posible posteriormente calcular la velocidad relativa de los usuarios, en función del tiempo que tarden las mediciones y la distancia entre los sensores, una vez se encuentren ubicados y fijados sobre el vehículo.

5.1.3 Conexiones

Para conectar el sensor a la Raspberry Pi se requiere 4 conexiones, todas ellas a través de los pines GPIO de la placa: Voltaje (5 V), Ground, TRIGGER (Emisor de ultrasonido) y ECHO (Receptor de ultrasonido).

Sin embargo, como el dispositivo necesita para funcionar 5 voltios de voltaje, también retorna este mismo voltaje a la Raspberry Pi, lo que podría causar daño al pin GPIO. Para evitar este inconveniente, debe diseñarse un circuito con resistencias que mitiguen este voltaje. En primer lugar, se coloca una resistencia de 2 k Ω entre las conexiones del pin Ground y el pin Echo como barrera de protección en caso de que se produzca un error de programación con el pin Echo, para que sea llevado a tierra en lugar de llegar al pin y afectarlo.

Por otro lado, el voltaje que debe transmitir el sensor a la Raspberry Pi debe ser de 3,3 V. En otras palabras, el voltaje inicial debe reducirse a este valor. Para determinar la resistencia necesaria se realiza el cálculo que se muestra en la Ecuación 3.

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$3.3 = 5 \frac{2000}{R_1 + 2000}$$

$$3.3(R_1 + 2000) = 5(2000)$$

$$R1 = \frac{10000 - 6600}{3,3}$$

$$R1 = 1030\Omega$$

Tomando una resistencia de 1 k Ω :

$$V_{out} = 5 \frac{2000}{1000 + 2000}$$

$$V_{out} = 3,33 V$$

Ecuación 3 Cálculo de resistencia.

Como resultado, es necesario disponer de una resistencia de 1 k Ω entre la conexión del pin Echo a la Raspberry Pi (Figura 15).

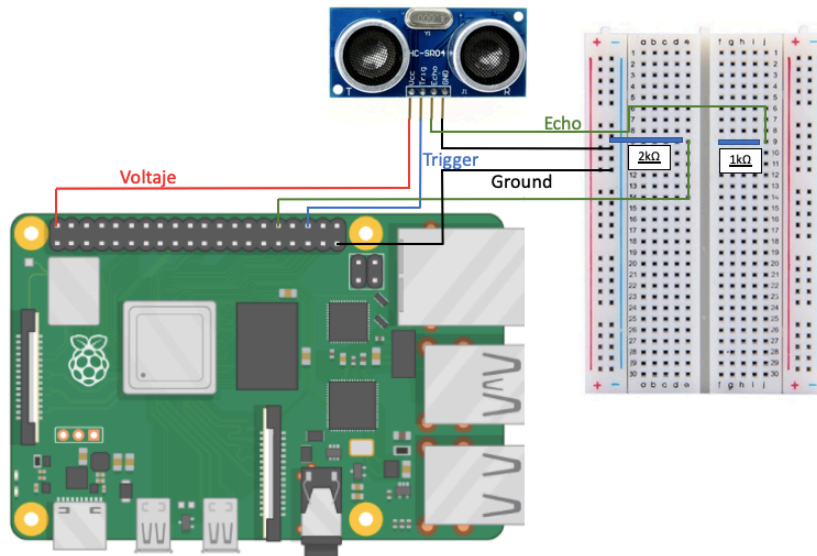


Figura 15 Esquema de conexiones sensor HC-SR04 a la Raspberry pi. Fuente: Elaboración propia.

Como, la placa cuenta con dos pines GPIO con voltaje de 5 voltios, por lo que para conectar los 2 sensores a la Raspberry Pi es necesario montar un circuito en paralelo para garantizar que todos los dispositivos reciben el voltaje necesario para su funcionamiento ($V_1=V_2=V_3=V_n$), o conectar independientemente el segundo sensor al otro pin 5V. Las resistencias y pines Echo y Trigger necesarios son las mismas para cada sensor. El esquema de conexiones para ambos sensores se presenta en la Figura 16.

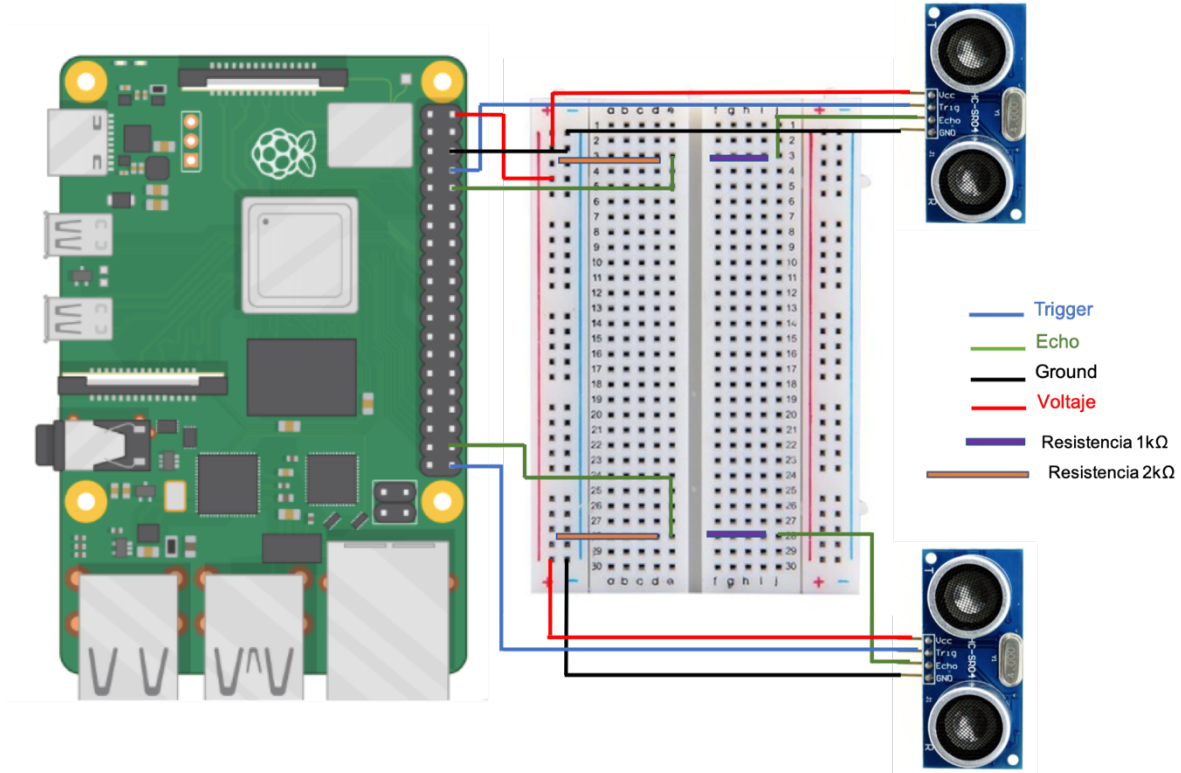


Figura 16 Esquema de conexiones 2 sensores HC-SR04 en paralelo a la Raspberry Pi. Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 Programación con Python

La programación de los de los sensores se lleva a cabo con Thonny Python 3 instalado en la Raspberry Pi. El objetivo principal del código es hacer que ambos los sensores tomen mediciones a la vez y almacenar los registros de las distancias y tiempos medidos en un archivo CSV para su posterior filtrado y análisis.

En primer lugar, se importan las librerías GPIO, time y PANDAS, cuyas funciones son activar los pines GPIO de la placa, obtener mediciones de tiempo y crear y escribir en el archivo de texto CSV, respectivamente.

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time
import csv
import pandas as pd
from datetime import datetime
#import XlsWriter
# d = "d"
```

En segundo lugar, se programan los pines GPIO como output para Trigger y como input para Echo. Para ello se tiene en cuenta el número de la posición en la cual se encuentran conectados cada uno de los sensores a la Raspberry Pi, siguiendo el esquema de la Figura 10 y se inicia el conteo del tiempo.

```
GPIO.setwarnings(False)#deshabilita las advertencias

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
trigger_pin=[21,12] #(esto lo escojo yo)
echo_pin=[13,17] #(esto lo escojo yo)

for j in range (2):
    GPIO.setup(trigger_pin[j],GPIO.OUT)
    GPIO.setup(echo_pin[j],GPIO.IN)
    print (j, "trigger: ",trigger_pin[j], "echo:", echo_pin[j])

init_time=time.time()
```

Después, se crea la función con la cual los sensores serán activados para tomar las mediciones de distancia. Esta función activa el envío del pulso requerido de 10 μ S, fijado en este caso para 100 μ S, y mide el tiempo en que el pin “Echo” ha estado recibiendo el pulso que ha rebotado en algún objeto. A partir de este tiempo se calcula la distancia con la **Ecuación 1** descrita previamente. La función devuelve la distancia, el tiempo inicial y final de la medición del pin Echo y la diferencia entre estos.

```
def get_distance(trigger_pin,echo_pin):

    start=0
    end=0

    GPIO.output(trigger_pin, True)
    time.sleep(0.0001)
    GPIO.output(trigger_pin, False)

    while GPIO.input(echo_pin) == False:
        start=time.time()

    while GPIO.input(echo_pin) == True:
        end =time.time()

    sig_time = end-start

    distance_cm = sig_time/0.000058
    #condiciona rango de distancia
    #if distance_cm>=1 and distance_cm <=450: #filtrado de datos
    #print(distance_cm, start, end, sig_time)
    #thewriter.writerow([distance_cm, start, end, sig_time])
    #file.write.writerow(str(distance_cm)+chr(10))

    return (distance_cm,start,end,sig_time)
```

Continuando, se crean los “Dataframes” que almacenan los registros resultantes de la función.

```
#create dataframes to save data collection

df_sensor_1 = pd.DataFrame(columns=['Distance_1', 'Start_1', 'End_1', 'Sig_time_1'])
df_sensor_2 = pd.DataFrame(columns=['Distance_2', 'Start_2', 'End_2', 'Sig_time_2'])
```

Posteriormente, se programa el bucle con el cual los sensores toman mediciones a la par y se va almacenando este registro. Con la programación se ha establecido que el envío de los pulsos sea con un intervalo de tiempo constante, garantizando un tiempo mínimo de reposo entre un disparo y otro de 100 ms.

```
#time data collection
t = 6000
e = 0
now = datetime.now()
file = 'output_'+now.strftime('%Y_%m_%d_%H_%M')+'.csv'
for i in range(t):
    try:
        [a1,b1,c1,d1]= get_distance(trigger_pin[0],echo_pin[0])
        df_sensor_1.loc[i]=[a1,b1,c1,d1]

        [a2,b2,c2,d2]= get_distance(trigger_pin[1],echo_pin[1])
        df_sensor_2.loc[i]=[a2,b2,c2,d2]

        time.sleep(0.1)#-(finish2-start2)) #desfase igual

    if (i+1)/10 == (i+1)//10:
        df_sensors = pd.concat([df_sensor_1, df_sensor_2], axis=1)
        df_sensors.to_csv(file)
        print(i+1, 'iterations saved.')
```

Finalmente, en caso de que se presente un error de programación o durante la ejecución, el código enviará un mensaje de error.

```
except:
    e+=1
    print('Error', e, '----> iteration', i+1)
print('Data collection finished and saved in', file, '\nErrores:', e)
```

El código asociado se encuentra en el Anexo I.

5.1.5 Control de la Raspberry Pi en remoto

5.1.5.1 Interfaz

Teniendo en cuenta que la toma de datos se realiza en campo, es necesario trabajar con el ordenador Raspberry Pi como si se tratase de un sistema portátil. Para ello, la fuente de alimentación pasa a ser un batería portátil y los dispositivos pantalla, ratón y teclado se retiran.

La Raspberry será controlada en remoto desde un ordenador o móvil –controlador– por medio de la aplicación Virtual Network Computig (VNC) cuya única condición para que funcione adecuadamente es que la placa esté conectada a una red de internet. Este sistema viene incluido en el software instalado como VNC connect, que es el formato necesario para el dispositivo que va a ser controlado y que debe ser activado en las configuraciones del sistema (Figura 17).

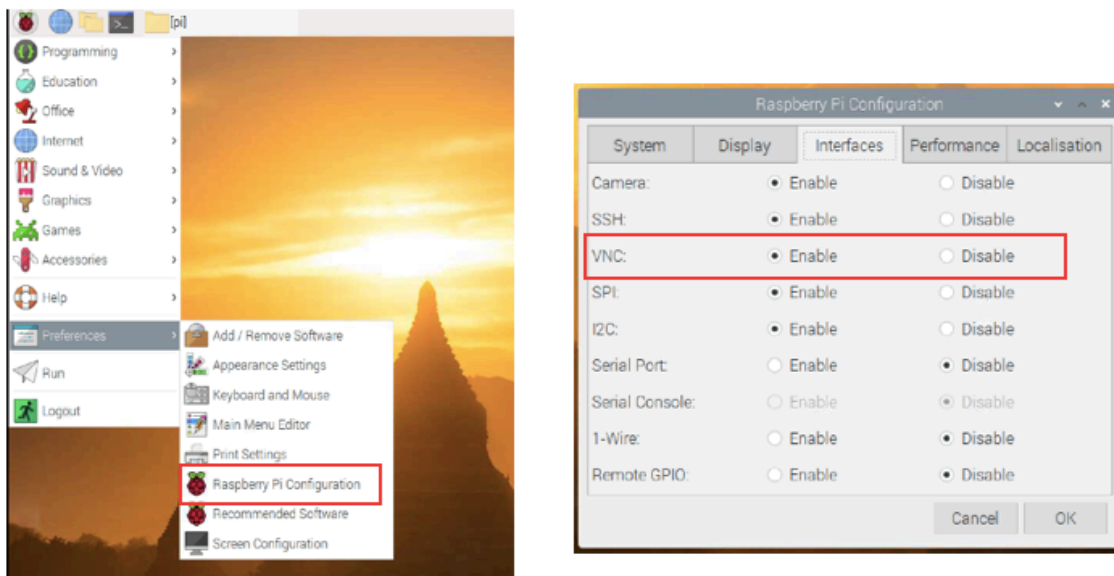


Figura 17 Activación del sistema VNC en la Raspberry Pi. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el software VNC Viewer debe instalarse en el dispositivo controlador seleccionado para este fin. Ahora bien, si ambos dispositivos se encuentran conectados a la misma red wifi, la dirección IP de la Raspberry Pi es lo único que se requiere para hacer la conexión entre equipos; si no es así, se requiere la conexión a través de “VNC Cloud” con una cuenta que asocia a ambos dispositivos. Una vez se realiza la conexión, la Raspberry es controlada remotamente y es posible realizar la toma de datos inicializando el código de Python. La Figura 18 muestra la visualización de la interfaz desde otro ordenador y la Figura 19 desde un móvil.

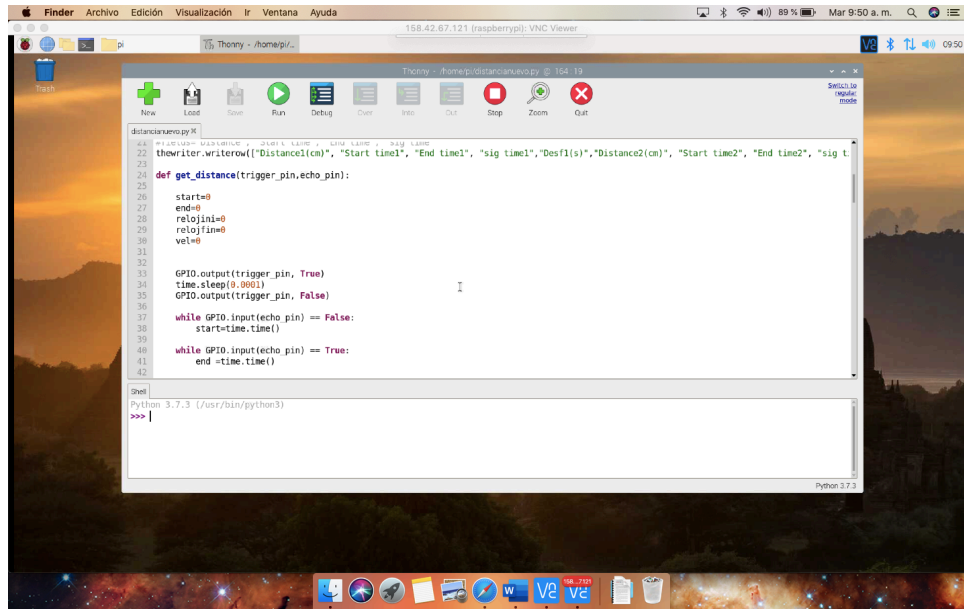


Figura 18 Visualización de la Raspberry Pi controlada desde un ordenador en remoto. Fuente: Elaboración propia.

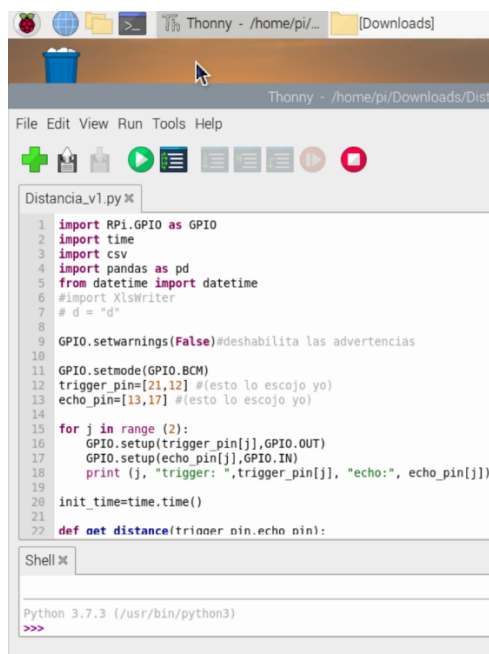


Figura 19 Visualización de la Raspberry Pi controlada desde un móvil en remoto. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, se la decidido utilizar un móvil como dispositivo controlador, puesto que es más cómodo de cargar durante la toma de datos. Así que, con la aplicación VNC Viewer instalada en este, se manejará la Raspberry Pi. También, la conexión se realizará por medio de "VNC Cloud", ya que, al estar en espacios en el exterior, la placa requiere conexión a wifi, mientras que el móvil funciona con los datos del operador.

La ventaja que ofrece este método, es que, en cualquier móvil puede instalarse dicha aplicación, iniciar sesión en la cuenta de "VNC Cloud" correspondiente a la que ya está asociada la Raspberry Pi, y controlarla como un ordenador normal.

5.1.5.2 Conexión a internet

La conexión a la red necesaria para el funcionamiento del sistema descrito en el inciso anterior se realizará por medio de un móvil que funcionará como punto acceso a internet, ya que es más sencillo de llevar durante la toma de datos. La Raspberry Pi se programa desde la terminal para conectarse al dispositivo en cuestión.

Este procedimiento debe realizarse una sola vez para cada móvil que se desee utilizar como punto de acceso. En este caso en particular, el -móvil controlador- es el mismo que le brinda la conexión a internet a la Raspberry Pi.

5.1.5.3 Batería portátil

Por último, la batería portátil reemplaza la conexión directa a la corriente, para que la Raspberry Pi pueda funcionar de manera portable. En este caso, se utilizará un dispositivo que suple el voltaje requerido de 5 V.

5.1.6 Cámara VIRB

Previamente también se había mencionado la propuesta de colocar una cámara de video sobre el vehículo instrumentado. Finalmente se decidió utilizar una cámara GARMIN VIRB Elite (Figura 20), con la cual se registrarán todas las interacciones con los usuarios que se produzcan durante la toma de datos.



Figura 20 Cámara GARMIN VIRB Elite para el vehículo instrumentado. Fuente: GARMIN, sitio web.

La cámara presenta las siguientes características (Garmín Ltd., s. f.):

- Grabación de vídeos en HD 1080p.
- Pantalla a color de alta resolución con la cual es posible observar el rango de la imagen durante la grabación.
- Sensores adicionales: Acelerómetro y GPS.

- Batería de ion de litio recargable e intercambiable que cubre hasta 3 horas de grabación.
- Tamaño pequeño y peso ligero.
- Configuración sencilla para los requisitos de cada usuario.
- Soportes adicionales para su fijación.

Específicamente para la toma de datos, el dispositivo será configurado para grabar de manera geo-localizada. La cámara deberá encenderse previamente al inicio de la ejecución del código de los sensores ultrasónicos, y al finalizar solo es necesario apagarlo sin realizar ningún ajuste. Los únicos requisitos que tiene para su funcionamiento es contar con batería y memoria suficiente. Una vez finalizada la grabación, los videos deben ser transferidos a un ordenador para realizar la revisión del registro. La cámara estará ubicada directamente sobre el manillar del patinete, colocada con el soporte propio de esta.

5.1.7 Vehículo instrumentado

5.1.7.1 Descripción

El vehículo seleccionado para ser instrumentado y realizar la toma de datos es un patinete eléctrico Xiaomi Mi scooter 1S (Figura 21), el cual cuenta con nuevas tecnologías enfocadas al confort y la seguridad de la conducción y optimización de la carga (Xiaomi, 2020).



Figura 21 Patinete eléctrico del proyecto, Xiaomi Mi Electric Scooter 1S. Fuente: Elaboración propia.

Este tipo de patinete alcanza velocidades de hasta 25 km/h y cuenta con una batería de litio que ofrece un rendimiento seguro y duradero para un alcance de 30 km en una carga completa. Además, cuenta con un sistema de recuperación de energía que transforma la energía cinética en eléctrica. Cuenta con reflectores laterales, frontales y traseros, y con luz trasera y delantera para la conducción nocturna y el frenado. Sus neumáticos son de 8,5 pulgadas para ofrecer mayor comodidad en distintos tipos de pavimentos y tiene un sistema de doble freno –delantero y trasero– con el objetivo de acortar la distancia de frenado (Xiaomi, 2020).

El patinete tiene 3 modos de operación asociados a distintas velocidades, lo que permite al usuario adaptarse al entorno de circulación (Xiaomi, 2020):

- Peatonal: 0-5 km/h
- Estándar: 0-15 km/h
- Deportivo: 0-25 km/h

Por último, cuenta con tecnología Bluetooth y acceso a la aplicación “MI home” a través de la cual se puede revisar información sobre el recorrido realizado, kilometraje recorrido y velocidades de circulación, de manera que será posible contar con esta información complementaria en el desarrollo de la toma de datos.

5.1.7.2 Montaje

En esta última fase, se realiza el montaje definitivo del vehículo instrumentado, que consiste en ensamblar todos los dispositivos necesarios para el adecuado funcionamiento sobre el patinete.

En primer lugar, se ubicó la cámara VIRB de video sobre el manillar del vehículo, con un soporte incluido con esta. En esta posición se tiene la visión de frontal del recorrido que se realiza en la toma de datos, siendo posible tener registrado todo lo que ocurre en la infraestructura durante este tiempo.

Seguido, se determinó la posición de los sensores, ya que estos debían estar al menos 50 cm por arriba del suelo, para que el pulso ultrasónico no rebotara en el pavimento, y así mismo, separados esta misma distancia entre ellos para evitar el solape de mediciones. Para ello, se colocaron 2 soportes de asiento sobre el patinete ya que es una estructura existente diseñada para este.

Para cumplir con lo establecido en el inciso 4.3.2 Montaje, se colocó un sensor ultrasónico en la parte delantera del patinete, que requirió una pieza adicional al soporte mencionado para que su ubicación fuese totalmente fija al frente del vehículo y que no fuese afectado por el movimiento del manillar.

El segundo sensor se ubicó en la parte posterior con el segundo soporte, pero este fue colocado dentro de una caja metálica. Ambos dispositivos fueron ubicados apuntando hacia el lateral izquierdo del patinete puesto que, la circulación sobre la infraestructura ciclista siempre se realiza sobre la derecha, por lo tanto, las maniobras de adelantamiento y encuentro se producen a la izquierda del conductor.

Por último, la Raspberry Pi también fue fijada dentro de la caja metálica en la parte posterior del patinete, junto con todo el cableado correspondiente, y la batería portátil ubicada justo

debajo de esta. El vehículo instrumentado montado se presenta en la Figura 22 y la Figura 23 continuación.



Figura 22 Vista lateral patinete eléctrico instrumentado. Fuente: Elaboración propia.



Figura 23 Vista frontal y posterior patinete eléctrico instrumentado. Fuente: Elaboración propia.

Con este montaje se cumple con los requisitos técnicos de los sensores, se cuenta con todos los dispositivos en posición y conectados correctamente, y a su vez, es un vehículo que permitirá la recolección de datos de manera cuasi naturalística, ya que se puede circular en el patinete naturalmente sin ser identificado significativamente, por lo tanto, los conductores no cambiarán su comportamiento al observar el vehículo instrumentado.

5.1.7.3 Pruebas

Una vez finalizado el montaje, se realizaron los primeros recorridos de prueba con el fin de verificar si los dispositivos funcionaban de manera adecuada. Este procedimiento se llevó a cabo dentro de las instalaciones de la UPV inicialmente, y luego en campo, en la infraestructura ciclista de la avenida Los Naranjos y la Avenida Blasco Ibáñez, que comprenden dos tipos de tipologías distintas.

Durante estas pruebas se identificó la necesidad de realizar ajustes en el código que controla a los sensores que toman las mediciones, para optimizar el procesamiento de la Raspberry Pi en el almacenamiento de datos, incluidos en el código definitivo que se presentó en el inciso 5.1.4 Programación con Python.

También se realizaron ajustes relacionados con el anclaje de los elementos, específicamente la batería que alimenta la Raspberry Pi, puesto que fue necesario añadirle una atadura adicional para evitar que esta se desconectara en medio de los recorridos y dejara sin fuente de alimentación al sistema portable completo.

Por último, se identificó el factor clave de sincronización de los sensores con la cámara, así que cada vez que se iniciara un recorrido, se establecía una claqueta en el video con el cual se indicaría en que tiempo se inició la toma de datos de los sensores. De esta manera, al momento de realizar la recopilación de la información, sería posible identificar las maniobras en el vídeo y en la medición sincronizadamente.

5.2 Selección tramos de estudio

Considerando los criterios establecidos en la sección

4.4.2 Selección de tramos de estudio. Se seleccionaron las siguientes tipologías de carril bici para cubrir en distintos tamos de estudio.

⇒ Tipo 1: Tipología de acera bici sin separadores físicos (Figura 24).

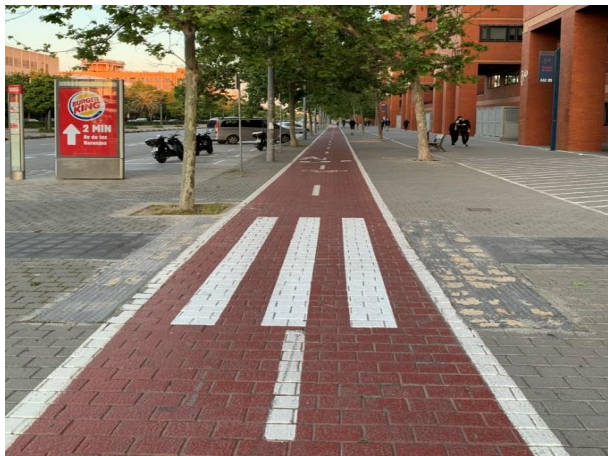


Figura 24 Tipología de acera bici sin separadores físicos. Fuente: Elaboración propia.

⇒ Tipo 2: Tipología de acera bici sin separadores físicos próximo a de aparcamientos (Figura 25).



Figura 25 Tipología de acera bici sin separadores físicos próximo a todo tipo de aparcamientos (En línea y en batería). Fuente: Elaboración propia.

⇒ Tipo 3: Tipología de carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal (Figura 26).



Figura 26 Tipología de carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal. Fuente: Elaboración propia.

⇒ Tipo 4: Tipología de carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección (Figura 27).



Figura 27 Tipología de carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección. Fuente: Elaboración propia.

⇒ Tipo 5: Tipología de carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado (Figura 28).



Figura 28 Tipología de carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado. Fuente: Elaboración propia.

⇒ Tipo 6: Tipología de carril bici en mediana peatonal (Figura 29).



Figura 29 Tipología de carril bici en mediana peatonal. Fuente: Elaboración propia.

5.2.1 Tramos seleccionados

Respondiendo a esta clasificación anterior, los tramos de estudio seleccionados para la recolección de datos se enlistan en la Tabla 12 a continuación.

Tipo	Localización	Ancho carril (m)	Bordes	Pavimento
1	Avenida los Naranjos	2,0	Sin bordes	Adoquín
2	Calle Músico Ginés	2,0	Sin bordes	Baldosas
3	Avenida Los Naranjos	2,0	Bordillo vegetal	Hormigón
	Avenida Blasco Ibáñez	2,0		
4	Calle Colón	2,0	Bordillo de hormigón discontinuo	Asfalto
	Calle de Guillem de Castro	2,0		
5	Calle Doctor Manuel Candela	2,0	Sin bordes	Hormigón
6	Avenida Blasco Ibáñez	2,0	Sin bordes	Baldosas

Tabla 12 Tramos de estudio. Fuente: Elaboración propia.

En estos tramos se incluye la variabilidad en los bordes, en los tipos de bordillo, en el tipo pavimentos, pero se mantiene en el ancho de la infraestructura. Además, todos estos son de tipo bidireccional, dado el objetivo principal del estudio.

5.3 Toma de datos

5.3.1 Mediciones en campo

Finalmente, la toma de datos se llevó a cabo entre el 25 de junio de 2021 hasta el 15 de julio del 2021, en los tramos asignados en la sección 5.2.1 Tramos seleccionados. Durante la mañana entre las 8:00 y 8:30 horas, pero la gran mayoría de datos se recolectaron durante las horas de la tarde entre las 17:00 y las 21:30, de lunes a viernes, alternando entre los distintos tipos de carril bici seleccionados.

En la Tabla 13, se presenta el número de recorridos realizados para cada tramo de estudio.

Tipo	Número de recorridos realizados
1. Acera bici sin separadores físicos	15
2. Acera bici sin separadores físicos próximo a aparcamientos	1
3. Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal	22
4. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección	5
5. Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado	12
6. Carril bici en mediana peatonal	19
Total	74

Tabla 13 Número de recorridos realizados en la toma de datos. Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Encuesta

Tal como se había planteado en la metodología, la encuesta se llevó a cabo de manera virtual, con el objetivo de recopilar información sobre la percepción del riesgo de los usuarios de la infraestructura ciclista. El formulario definitivo quedó comprendido en 2 secciones. En la primera se realiza una caracterización del usuario, clasificándolo en rangos de edades, sexo, tipo de vehículo de movilidad personal, frecuencia de viajes, motivo de viaje y la distancia recorrida en promedio.

Y en la segunda se entró en el detalle de conocer la percepción de riesgo de los usuarios definiendo las maniobras de interés:

⇒ Adelantamiento: Maniobra para sobrepasar a un usuario que circula en el mismo sentido de circulación.

⇒ Encuentro: Maniobra de cruce con otros usuarios que circulan en sentido opuesto.

Para ello, se plasmaron imágenes de vías ciclistas del distrito de Algirós con una breve descripción de su configuración, planteando 11 escenarios en total. Para cada imagen, a través de una escala Likert, se le solicitó al usuario determinar el nivel de riesgo que podría percibir en una maniobra de adelantamiento y durante el encuentro con otros usuarios. La escala de valoración utilizada fue la siguiente:

- 1 - No siento riesgo
- 2 - Riesgo bajo
- 3 - Riesgo medio
- 4 - Riesgo alto
- 5 - Riesgo muy alto
- NS/NC- No sabe/No contesta

En la Figura 30 se presenta la formulación tipo para estas preguntas.

Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal *



	1	2	3	4	5	NS/NC
Adelantamiento	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Encuentro	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figura 30 Pregunta tipo de la encuesta de percepción de riesgo. Fuente: Elaboración propia.

Para la recolección de la información, el cuestionario fue compartido entre estudiantes, trabajadores, por contacto personal, institucional y por redes de la Universitat Politècnica de València con el fin de obtener respuestas de todo tipo de usuarios, de todas las edades, ocupaciones y usuarios de todo tipo de VMP. La encuesta estuvo disponible por 35 días y en total se obtuvieron 120 respuestas. El formulario completo se encuentra en el Anexo II y los resultados obtenidos se presentan en el 6.3 Análisis encuesta.

5.4 Reducción de datos

Las mediciones realizadas por el sensor ultrasónico, fueron almacenadas en un archivo CSV como se describió en el inciso 5.1.4 Programación con Python. Una vez obtenido cada uno de estos registros, el filtrado de la información se realizó con 2 herramientas, Microsoft Excel con la que se ordenaron los registros obtenidos en formato CSV, haciendo la clasificación por fecha de la toma de datos, duración, y localización y la aplicación Garmín Virb Edit, propia de la cámara con la que se grabó la toma de datos, con la cual se realizó la visualización de los videos.

Los archivos fueron sincronizados por la hora y fecha del nombre bajo el cual se almacenaron, a su vez, durante la toma de datos se sincronizaron los tiempos de los sensores y del vídeo con una claqueta. De esta manera, al contrastar ambos registros a la vez, con los tiempos, fue posible relacionar las distancias medidas con los sensores ultrasónicos con la maniobra que se observaba en el vídeo, el tipo de VMP del usuario y la velocidad propia. También se estableció el tipo de carril del registro.

Este procedimiento se llevó a cabo para los 74 registros de la toma de datos, con el que finalmente se obtuvo el registro consolidado de todas contabilizadas clasificadas según tipo, usuario, tipología de carril bici, velocidad del usuario y distancia a la que ocurre. Finalmente, se contabilizaron 780 maniobras.

6. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En este apartado se presenta el análisis estadístico realizado para estudiar la variable dependiente “distancia lateral” de separación entre usuarios, que se refiere a la distancia comprendida desde la posición del sensor en el vehículo instrumentado hasta la posición donde ocurre el rebote del pulso ultrasónico de la medición, en el otro usuario, durante la ocurrencia de la maniobra de encuentro (Figura 7). Para ello, se subdivide el proceso en tres etapas:

1. Análisis descriptivo de los datos obtenidos con el vehículo instrumentado en función del tipo de carril y tipo de vehículo.
2. Análisis estadístico de los datos de los obtenidos con el vehículo instrumentado en función del tipo de carril y tipo de vehículo.
3. Análisis cualitativo de las respuestas de la encuesta de percepción de riesgo de los usuarios.

A continuación, se presentan los resultados.

6.1 Análisis descriptivo

Tras finalizar el proceso de reducción de datos, se contabilizó el número de maniobras de adelantamiento y encuentro registradas para cada recorrido de la recolección de datos en campo, agrupados según la tipología de carril bici (Tabla 14).

Tipo de carril	Encuentro		Adelantamiento		Total
	Bicicleta	Patinete eléctrico	Bicicleta	Patinete eléctrico	
1. Acera bici sin separadores físicos	136	35	4	4	179
3. Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal	100	32	8	4	144
4. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección	71	29	3	5	108
5. Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado	112	60	7	7	186
6. Carril bici en mediana peatonal	117	36	6	3	162
Total	536	192	28	23	779

Tabla 14 Registro agrupado de la toma de datos. Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, se puede observar el predominio de la maniobra de encuentro frente a la maniobra de adelantamiento en todas las tipologías de carriles bici seleccionadas. La distribución de estos responde a un 93% vs. 7%, respectivamente. Por esta razón, no se realiza el análisis de la maniobra de adelantamiento.

Además, el tipo de infraestructura donde se obtuvo el mayor registro fue en el carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado (Tipo 5), que igualmente contó con el mayor número de encuentros y adelantamientos. Para revisar en detalle los resultados para cada tipología de carril, se realiza en detalle el análisis descriptivo de cada uno de estos.

6.1.1 Acera bici sin separadores físicos

Para el carril de tipo acera bici sin separadores físicos (Tipo 1), se registraron 136 maniobras de encuentro con bicicletas y 35 con patinetes eléctricos. Mientras que el número de adelantamientos contabilizados durante la toma de datos fue de solo 8, con un registro de 4 por cada tipo de vehículo. En la Tabla 15 se encuentran plasmados las variables principales obtenidas de la muestra de encuentro con bicicletas.

Maniobra de encuentro carril bici tipo 1	
Tipo de VMP	Bicicleta
Media (cm)	101,3
Mediana (cm)	93,31
Desviación (cm)	28,12
Mínimo (cm)	55,75
Máximo (cm)	213,34
Rango (cm)	157,58
Número de maniobras	136

Tabla 15 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 1. Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, la Figura 31 muestra la distribución de los valores de distancia lateral observados. Como se puede observar, la mayoría de estos ocurrieron a una separación comprendida entre los 80 y 95 cm. El histograma formado sigue una forma quasi acampanada, sesgada ligeramente hacia la izquierda, con un menor registro a medida que aumentan los valores, describiendo una distribución con asimetría positiva.

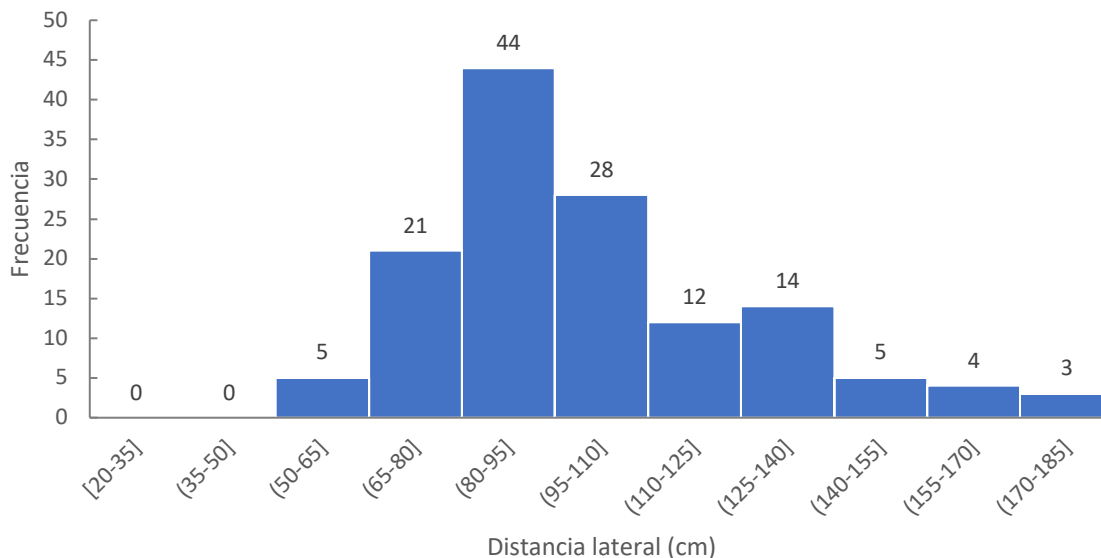


Figura 31 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 1.
Fuente: Elaboración propia.

En contraste a las bicicletas, el número de maniobras de encuentro con patinetes eléctricos fue mucho menor, 35 en total. En la Tabla 16 se presentan las variables descriptivas obtenidas para esta muestra.

Maniobra de encuentro carril bici tipo 1	
Tipo de VMP	Patinete eléctrico
Media (cm)	105,40
Mediana (cm)	98,15
Desviación (cm)	30,58
Mínimo (cm)	68,35
Máximo (cm)	197,22
Rango (cm)	128,87
Número de maniobras	35

Tabla 16 Variables descriptivas para maniobra de encuentro carril con patinetes eléctricos tipo 1. Fuente: Elaboración propia.

El histograma relativo de la distancia lateral a la que se produjeron estas maniobras presenta una distribución que podría tener forma acampanada, pero debido al número de registros no logra formarse. En este caso la mayoría de encuentro sucedieron a una distancia comprendida entre los 80 y 110 cm, encontrando dos datos extremos superiores a los 185 cm (Figura 32).

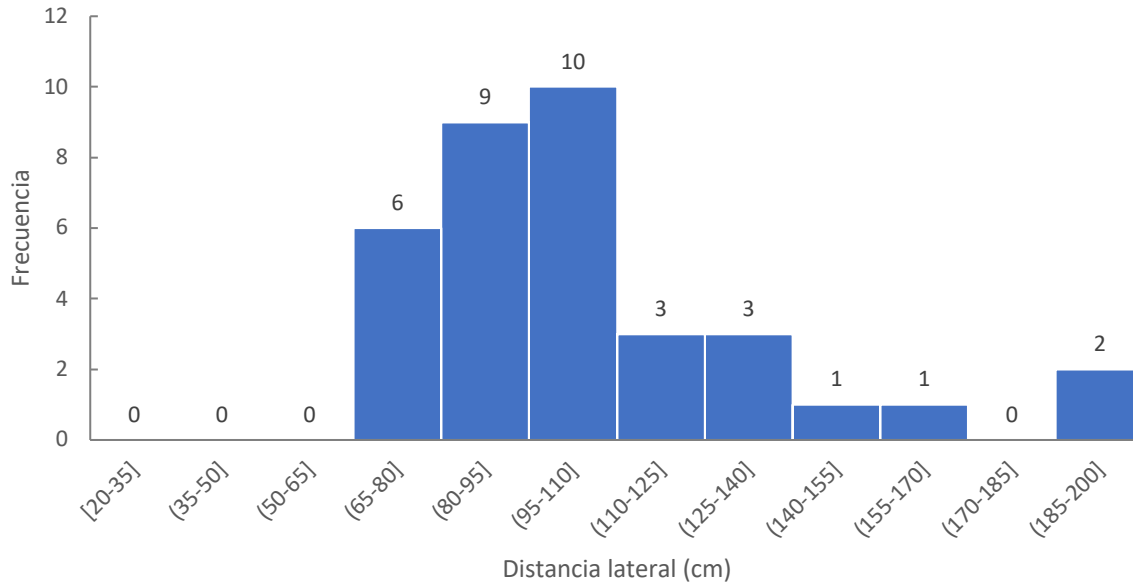


Figura 32 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 1. Fuente: Elaboración propia.

Por último, al realizar el diagrama de cajas y bigotes de cada muestra se puede observar cierta similitud entre los valores medios (Figura 33). No obstante, los patinetes eléctricos presentan un menor rango intercuartílico, seguramente debido al menor número de registros obtenidos. También se identifica que pocos datos se encuentran fuera de los límites máximos y mínimos.

Figura 33 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 1. Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal

En este tipo de carril (Tipo 3) se identificaron en total 144 maniobras, de las cuales 132 fueron encuentros (92%) y 12 adelantamientos (8%). De este registro, 100 encuentros se corresponden a bicicletas, presentándose en la Tabla 17 las variables que caracterizan esta muestra.

Maniobra de encuentro carril bici tipo 3	
Tipo de VMP	Bicicleta
Media (cm)	83,72
Mediana (cm)	81,76
Desviación (cm)	22,21
Mínimo (cm)	28,7
Máximo (cm)	159,17
Rango (cm)	130,47
Número de maniobras	100

Tabla 17 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.

La distribución de las distancias laterales correspondientes a los usuarios de este tipo de vehículo se presenta en la Figura 34. En este sentido, se observa frecuencias bajas hacia los extremos y altas hacia el medio. Entre los rangos de 63 a 80 cm y 80 a 97 cm se concentran más de la mitad de los datos, presentando de nuevo una distribución ligeramente asimétrica positiva.

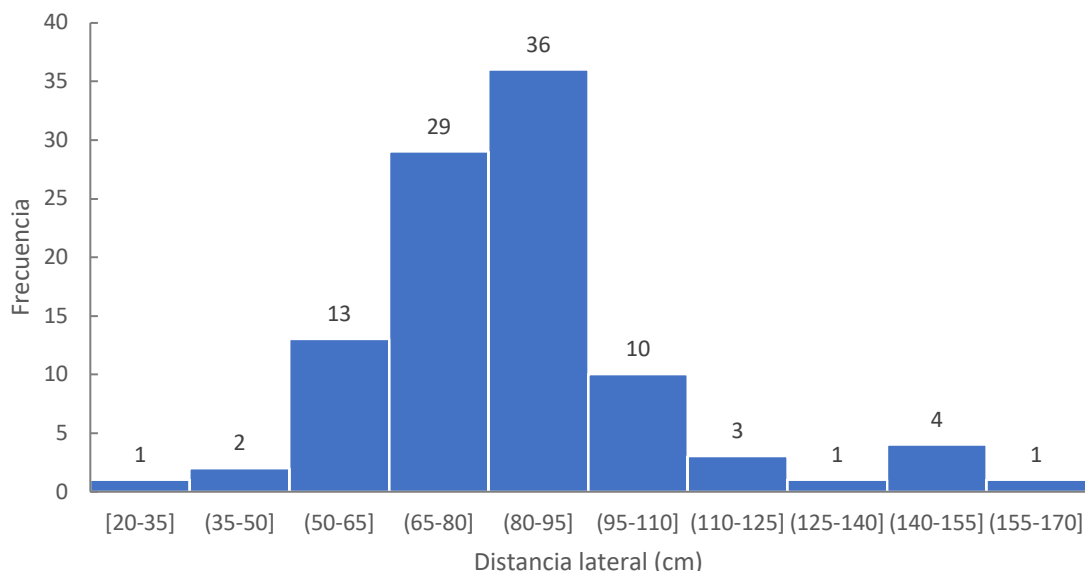


Figura 34 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el número de encuentros que se produjo con patinetes eléctricos fue solo de 32, con una media similar a la de las bicicletas de 83,24 cm y una desviación de 17,8 cm (Tabla 18). A pesar del reducido número de datos, se observa una distribución de forma casi acampanada, donde la mayoría de los adelantamientos ocurrieron a una distancia comprendida entre los 65 y 95 cm, con una tendencia asimétrica negativa (Figura 35).

Maniobra de encuentro carril bici tipo 3	
Tipo de VMP	Patinete eléctrico
Media (cm)	83,24
Mediana (cm)	84,78
Desviación (cm)	17,8
Mínimo (cm)	40,46
Máximo (cm)	118,35
Rango (cm)	77,88
Número de maniobras	32

Tabla 18 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con patinetes eléctricos carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.

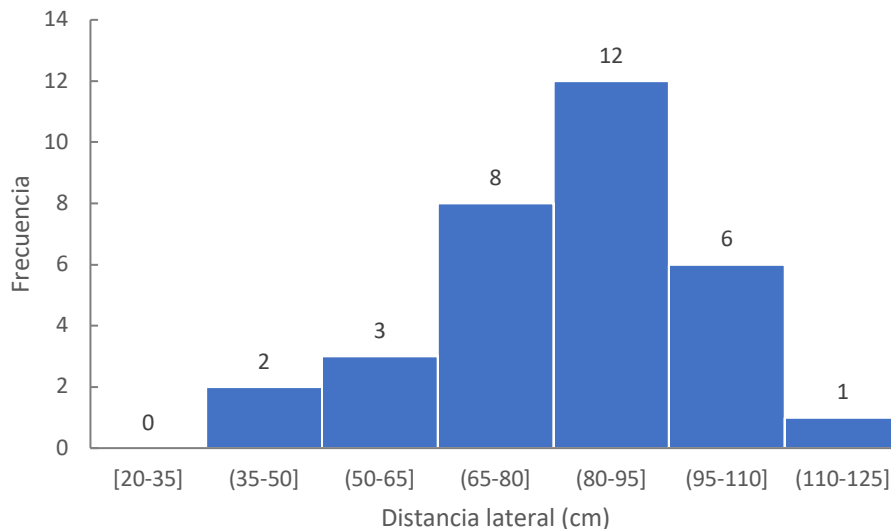


Figura 35 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.

Por último, al realizar el diagrama de cajas y bigotes para ambos tipos de vehículos, se aprecia que el valor de las medianas es cercano y los límites de los bigotes también, es decir, similar rango intercuartílico. Sin embargo, para el registro de las bicicletas se encontró mayor cantidad de valores por encima del límite superior (Figura 36).

Figura 36 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 3. Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección

Esta tipología de carril (Tipo 4) presenta una proporción similar de ocurrencia de maniobras de encuentro y adelantamiento que en dos tipos de infraestructura ciclista anteriores. En este caso concreto se observaron 100 maniobras de encuentro y 8 de adelantamiento. De los registros de encuentro, 71 fueron con usuarios de bicicletas y 29 con patinetes eléctricos. La Tabla 19 y la Tabla 20 presentan los parámetros estadísticos descriptivos de cada una de las muestras.

Maniobra de encuentro carril bici tipo 4	
Tipo de VMP	Bicicleta
Media (cm)	76,11
Mediana (cm)	74,2
Desviación (cm)	18,18
Mínimo (cm)	38,03
Máximo (cm)	135,73
Rango (cm)	97,7
Número de maniobras	71

Tabla 19 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.

Maniobra de encuentro carril bici tipo 4	
Tipo de VMP	Patinete eléctrico
Media (cm)	77,03
Mediana (cm)	76,19
Desviación (cm)	19,65
Mínimo (cm)	38,15
Máximo (cm)	116,04
Rango (cm)	77,89
Número de maniobras	29

Tabla 20 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con patinetes eléctricos carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la distribución de los datos, para la muestra de encuentros con bicicletas se observan registros acumulados en el centro del histograma donde se contabilizan 54 de los 71 datos, y únicamente se encontró un valor extremo superior a los 125 cm (Figura 37).

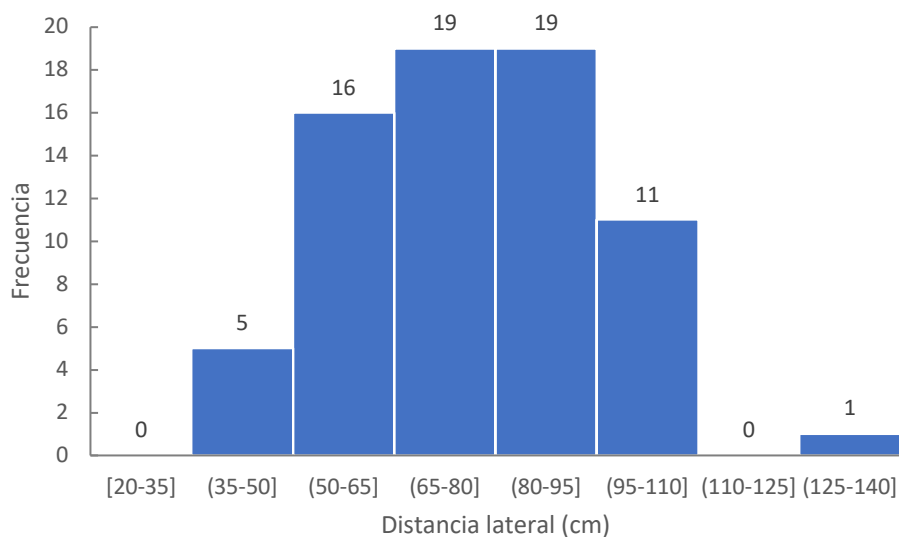


Figura 37 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.

Algo similar sucede con la distribución de la muestra para los patinetes eléctricos (Figura 38), donde se presenta un comportamiento con poca variabilidad y los registros se distribuyen casi que equitativamente entre las clases. Este comportamiento podría deberse al reducido número de observaciones para este tipo de usuario.

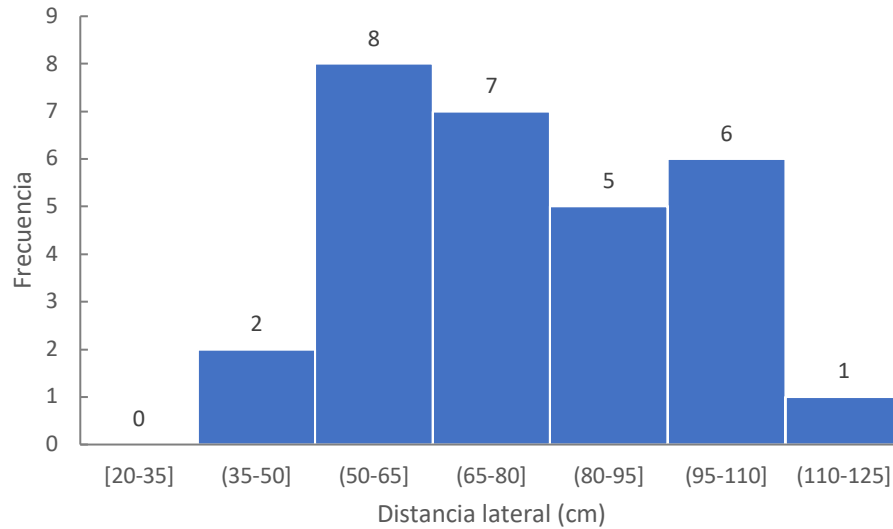


Figura 38 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.

Por último, al representar el diagrama de cajas y bigotes para ambos tipos de vehículos (Figura 39), se observa que la mediana y el límite inferior tienen valores similares, pero los límites superiores sí difieren. Para el caso de las bicicletas se observa un dato por fuera del límite superior que ya había sido detectado en el propio histograma, mientras que todos los registros de los patinetes se encuentran dentro de los bigotes, sin presentar valores extremos.

Figura 39 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 4. Fuente: Elaboración propia.

6.1.4 Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado

En este tipo de carril (Tipo 5) se identificaron 172 maniobras de encuentro frente a 14 de adelantamientos, siendo este el carril en el que se obtuvo la mayor muestra de este segundo tipo. Aun así, la distribución de estas fue extremadamente desigual.

Del total de maniobras de encuentro, 112 fueron realizadas por bicicletas, cuyas variables descriptivas para se presentan en la Tabla 21. La distribución de esta presenta una forma acampanada, con tendencia simétrica, donde más del 50% de los datos se concentran entre los 80 y 110 cm (Figura 40).

Maniobra de encuentro carril bici tipo 5	
Tipo de VMP	Bicicleta
Media (cm)	102,8
Mediana (cm)	98,61
Desviación (cm)	26,46
Mínimo (cm)	51,37
Máximo (cm)	176,73
Rango (cm)	125,36
Número de maniobras	112

Tabla 21 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.

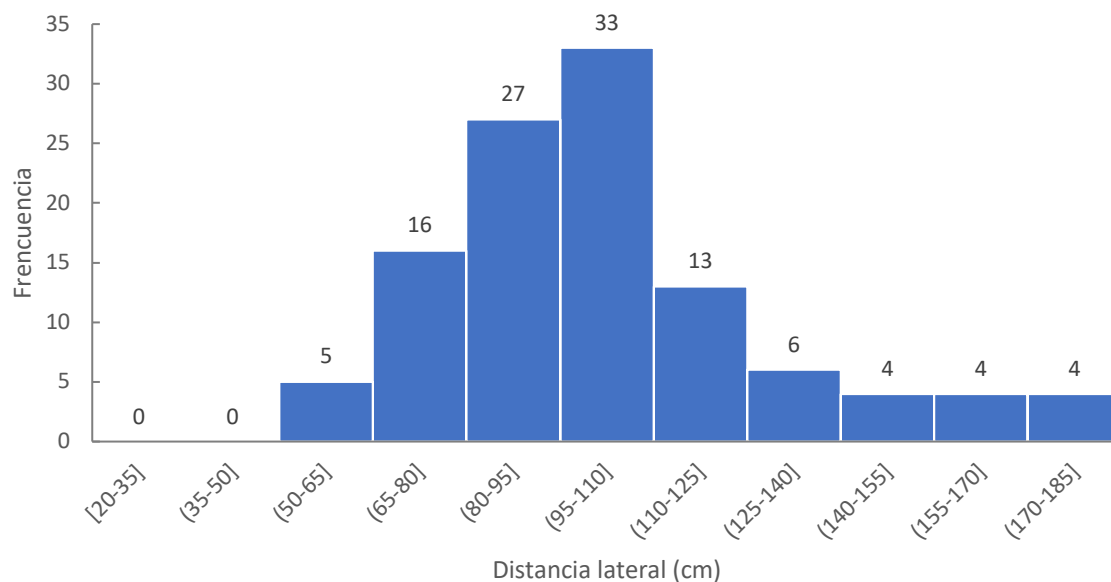


Figura 40 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.

En contraste, las maniobras contabilizadas para el encuentro con patinetes eléctricos fueron solo 60. Sin embargo, en este tipo de carril se obtuvo el mayor número de observaciones para este vehículo. Los parámetros obtenidos se presentan en la Tabla 22. Esta muestra conduce a un histograma de frecuencias sin forma determinada, con algunos valores constantes entre clases, a excepción del rango de 95 a 110 cm, donde se concentra un tercio de las observaciones (Figura 41).

Maniobra de encuentro carril bici tipo 5	
Tipo de VMP	Patinete eléctrico
Media (cm)	109,9
Mediana (cm)	100,61
Desviación (cm)	34,13
Mínimo (cm)	23,41
Máximo (cm)	181,86
Rango (cm)	158,44
Número de maniobras	60

Tabla 22 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con patinetes eléctricos carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.

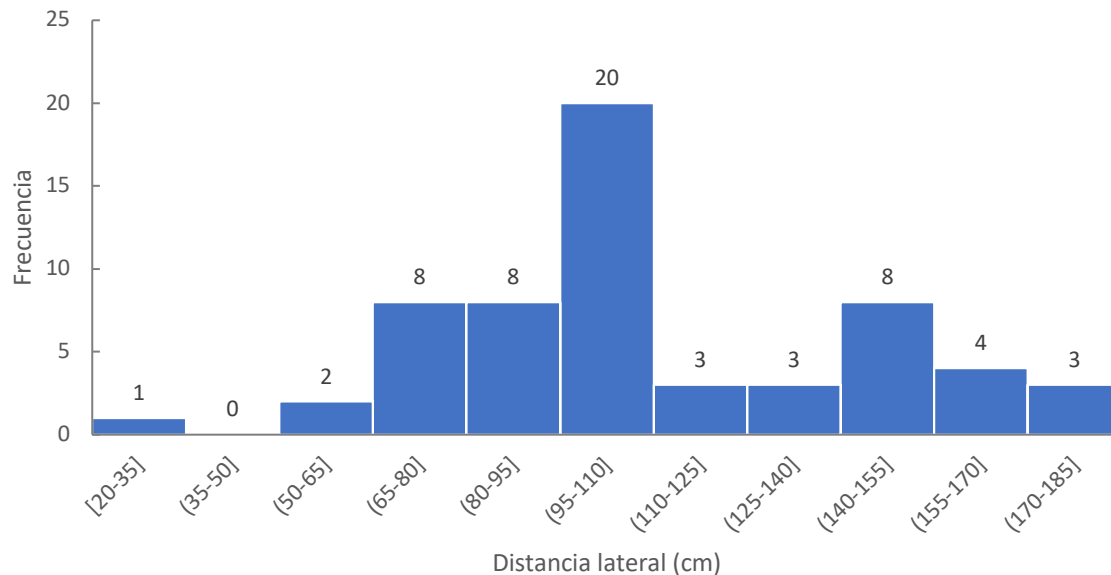


Figura 41 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.

Por último, la Figura 42 presenta el diagrama de caja y bigotes para ambos tipos de vehículos según los resultados obtenidos en el carril Tipo 5. En esta se observa como la mediana es similar, sin embargo, los límites difieren completamente debido a la variación del rango intercuartílico, siendo este mayor para la muestra de patinetes eléctricos. Además, se identifica que la muestra de datos de bicicletas cuenta con valores extremos por fuera del límite superior, a diferencia del otro conjunto de datos.

Figura 42 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 5. Fuente: Elaboración propia.

6.1.5 Carril bici en mediana peatonal

En la última tipología de carril analizada (Tipo 6) se obtuvo un registro de 153 maniobras de encuentro y solo 9 de adelantamientos, equivalente a una proporción 94-6%, respectivamente. De las 153 maniobras de encuentro, 117 se corresponden con usuarios de bicicletas. Esta muestra presentó una distancia lateral media de 107,32 cm y una desviación de 27,15 cm (Tabla 23).

Maniobra de encuentro carril bici tipo 6	
Tipo de VMP	Bicicleta
Media (cm)	107,32
Mediana (cm)	99,96
Desviación (cm)	27,15
Mínimo (cm)	61,49
Máximo (cm)	175,71
Rango (cm)	114,21
Número de maniobras	117

Tabla 23 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas carril tipo 6. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 43 muestra el histograma de frecuencias relativo a las distancias laterales observadas. En esta se identifica una tendencia de asimetría positiva, donde la mayoría de los datos se encuentran en el intervalo entre 80 y 95 cm y 95-110 cm.

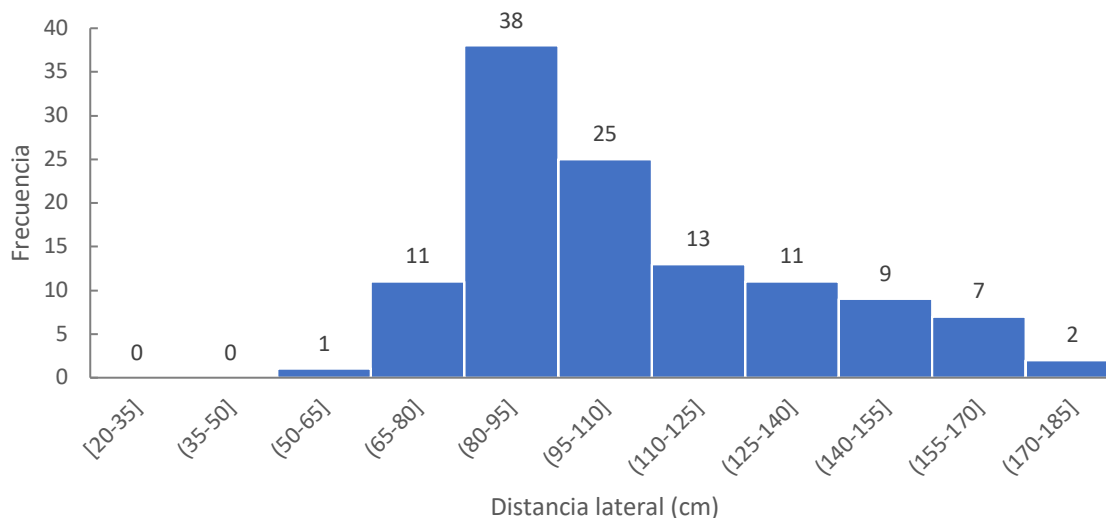


Figura 43 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con bicicletas en el carril tipo 4.
Fuente: Elaboración propia.

El resto de las maniobras de encuentro (36) se corresponden con patinetes eléctricos cuyas variables estadísticas descriptivas se presenta en la Tabla 24. Con respecto al histograma descrito por esta variable (Figura 44), al no disponer de un registro de datos amplio, no fue posible observar una distribución clara. En este sentido, solo se identificó que la mayoría de maniobras ocurren en el intervalo de distancias laterales entre 80 a 110 cm, y disminuye la frecuencia a medida que aumenta la variable en cuestión.

Maniobra de encuentro carril bici tipo 6	
Tipo de VMP	Patinete eléctrico
Media (cm)	107,87
Mediana (cm)	96,44
Desviación (cm)	31,92
Mínimo (cm)	53,35
Máximo (cm)	172,95
Rango (cm)	119,59
Número de maniobras	36

Tabla 24 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con patinetes eléctricos carril tipo 6. Fuente: Elaboración propia.

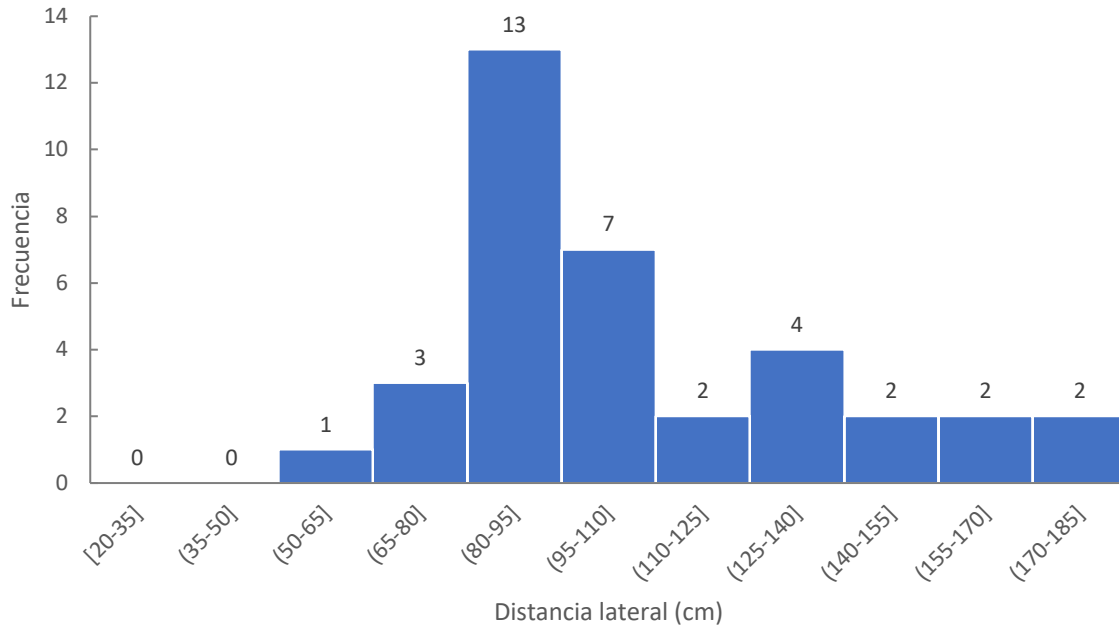


Figura 44 Histograma de frecuencias de la distancia a la que ocurren los encuentros con patinetes eléctricos en el carril tipo 6. Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, al realizar el diagrama de cajas y bigotes de ambas muestras en este tipo de carril (Figura 45) se observa que las medianas y los límites superiores tienen valores similares, encontrándose todos los datos dentro de los límites inferior y superior, es decir, sin que se presenten valores extremos.

Figura 45 Diagrama de cajas y bigotes para la distancia de encuentro según tipo de VMP para el carril tipo 6. Fuente: Elaboración propia.

6.1.6 Comparación entre tipologías de carril

En forma de resumen, la Tabla 25 presenta la media, desviación y coeficiente de variación para la distancia lateral a la que ocurren las maniobras de encuentro con bicicletas. A priori, se observa que los carriles tipo 1, 5, y 6 presentan parámetros estadísticos similares, lo que puede estar asociado a las características físicas de estos carriles, caracterizados por la ausencia de bordillos físicos. Por otro lado, los carriles tipo 3 y 4 también presentan valores similares, siendo estos caracterizados por la presencia de bordillo físico.

Esto se ve reflejado en el valor medio, donde en los carriles tipo 1, 5 y 6 está ligeramente por encima de los 100 cm mientras que para el tipo 3 y 4 está alrededor de los 80 cm, una variación de 20 cm aproximadamente entre estos. Cabe resultar ante el resultado de estos valores, que todos los carriles presentan en el mismo ancho, por lo tanto, existe un factor diferencial entre estos que produce esta disminución, el bordillo físico.

Para confirmar esta observación, posteriormente se realizará el análisis estadístico correspondiente para verificar o refutar esta suposición. Por último, también se identifica que la dispersión de estas muestras es similar, considerando los valores del coeficiente de varianza obtenidos.

Bicicletas				
Tipo de carril	Media (cm)	Mediana (cm)	Desviación (cm)	Coeficiente de variación
1	101,31	93,31	28,13	0,28
3	83,05	81,76	20,58	0,25
4	76,11	74,2	18,19	0,24
5	102,80	98,61	26,47	0,26
6	107,32	99,96	27,16	0,25

Tabla 25 Variables descriptivas para maniobra de encuentro con bicicletas. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 46 muestra el diagrama de cajas y bigotes de todos los datos diferenciados por tipo de carril para el encuentro producido con bicicletas. En este sentido, se observa que las medianas, rangos intercuartílicos y límites inferiores e inferiores difieren entre las distintas tipologías de carril. En los carriles tipo 1, 5 y 6 la mediana presentó valores comprendidos entre los 92 a 100 cm, mientras que para el tipo 3 y tipo 5 estos fueron de 81,76 cm y 74,2 cm respectivamente, siendo inferiores a los demás. También, Para los carriles tipo 1, 3 y 5 se cuenta con varios datos atípicos fuera de los límites, mientras que para los tipos 4 y 6 prácticamente toda la muestra se encuentra dentro de los límites.

■ Tipo 1 ■ Tipo 3 ■ Tipo 4 ■ Tipo 5

250

Figura 46 Diagrama de caja y bigotes para la maniobra de encuentro con bicicletas en todos los tipos de carril. Fuente: Elaboración propia.

Además, se representaron conjuntamente las distribuciones de densidad resultantes para cada tipo de infraestructura ciclista (Figura 47). En base a la forma que toman las curvas formadas, se denota cómo las observaciones del carril bici tipo 1 y tipo 3 asemejan a una distribución normal.

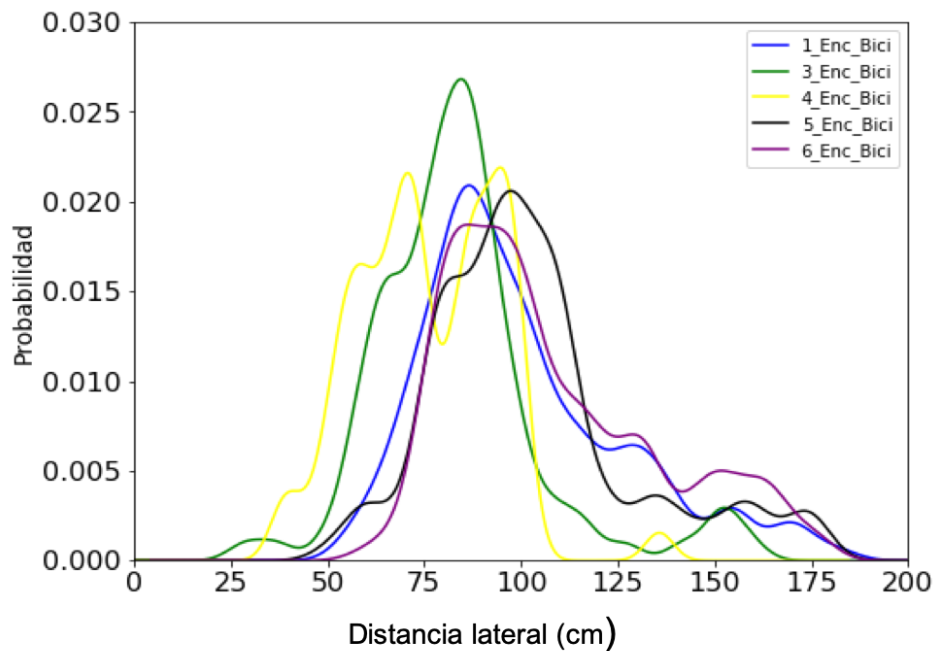


Figura 47 Distribución de las muestras de maniobras de encuentro con bicicletas, según tipo de carril. Fuente: Elaboración propia.

La misma síntesis se ha realizado para las observaciones de encuentro con patinetes eléctricos, obteniéndose los mismos resultados que para las bicicletas. Concretamente, se observan dos familias de tipología de carril: con bordillo físico (Tipo 3 y tipo 4) y sin bordillo físico (Tipo 1, 5 y 6). Las tipologías que pertenecen a cada familia presentan valores similares de distancia lateral media y desviación (Tabla 26). Mientras que en los carriles bici que carecen de bordillo físico se observan distancias laterales medias entre 105 y 110 cm, la presencia de bordillo conduce a una disminución de esta distancia en torno a 25 cm, observando valores medios alrededor de 80 cm.

Patinete eléctrico				
Tipo de carril	Media (cm)	Mediana (cm)	Desviación (cm)	Coefficiente de variación
1	105,41	98,15	30,59	0,29
3	83,24	84,78	17,81	0,21
4	77,03	76,19	19,66	0,26
5	109,91	100,61	34,14	0,31
6	107,87	96,44	31,92	0,30

Tabla 26 Variables descriptivas para maniobra de encuentro de patinetes eléctricos. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 48 presenta el diagrama de caja y bigotes para las 6 tipologías de carril con respecto a la distancia lateral observada durante la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos. En esta gráfica se observa que las medianas de los carriles tipos 1, 5 y 6 se encuentra alrededor de los 95 y 100 cm, mientras que el tipo 3 presentó un valor de 84,78 cm y el tipo 4 de 76,19 cm. Los límites difieren entre sí, pero en general los datos de cada muestra se encuentran dentro de los límites inferior y superior, a excepción del carril bici tipo 1, donde se observan varios datos atípicos.

Figura 48 Diagrama de caja y bigotes para la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos en todos los tipos de carril. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se presenta también el ajuste de las distribuciones de densidad de las muestras (Figura 49). Debido principalmente al tamaño de muestra para la maniobra de encuentro con este tipo de vehículo es especialmente complicado identificar una tendencia general.

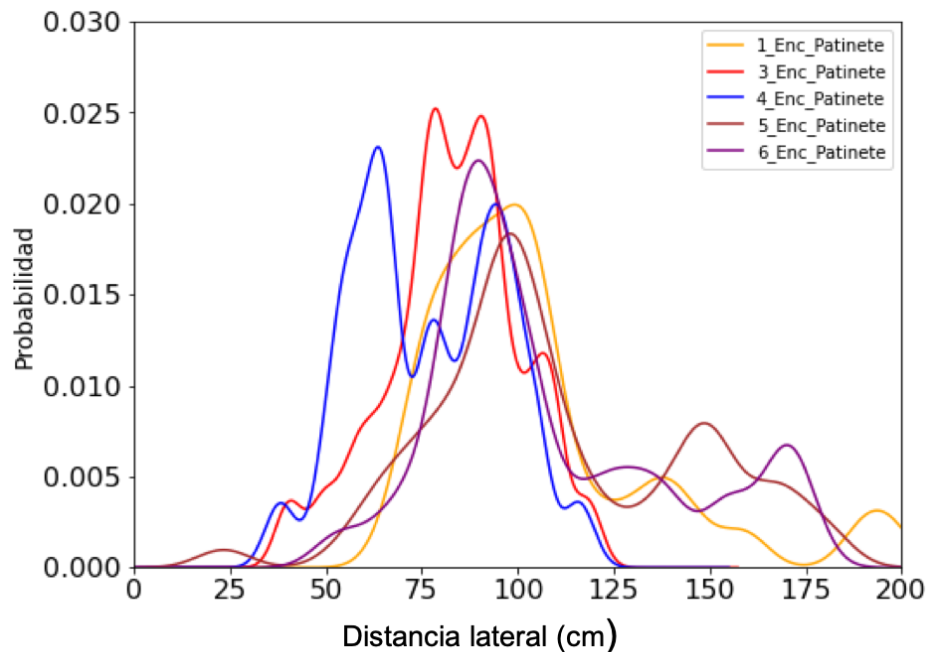


Figura 49 Distribución de las muestras de maniobras de encuentro con patinetes eléctricos, según tipo de carril. Fuente: Elaboración propia.

6.2 Análisis estadístico

En este apartado se realiza el análisis estadístico de las observaciones obtenidas durante la recolección de datos en campo. Concretamente, se evalúa la suposición de normalidad de los resultados y se realizan pruebas de hipótesis para identificar si existe o no diferencias estadísticamente significativas entre las muestras obtenidas. Para ello, se realizan dos tipos de comparaciones de los datos, según tipología de carril y según tipo de vehículo. La herramienta ofimática utilizada para este análisis fue Statgraphics Centurion XVIII.

6.2.1 Comparación de resultados según tipo de vehículo

6.2.1.1 Bicicletas

En primer lugar, se comprobó, para cada una de las muestras de los encuentros con bicicletas, la normalidad de las distribuciones de los datos observados. Para ello se consideró la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Esta establece como hipótesis nula (H_0) que los datos se distribuyen según una normal, si el P-valor que se obtiene es menor a 0,05 se rechaza H_0 con un nivel de confianza del 95%. Los resultados alcanzados se presentan en la Tabla 27.

Tipo	P-valor	Ajuste normal
1. Acera bici sin separadores físicos	0,0355482	No
3. Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal	0,0470537	No
4. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección	0,652539	Si
5. Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado	0,0150813	No
6. Carril bici en mediana peatonal	0,0113474	No

Tabla 27 Prueba Kolmogorov-Smirnov para la muestra de maniobras de encuentro con bicicletas. Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en Statgraphics.

De estos resultados se obtiene que, la única muestra que sigue una distribución normal para los datos de distancia lateral en la maniobra de encuentro con bicicletas fue la obtenida para la tipología de carril 4, Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección. Los demás datos no cumplen este supuesto.

Finalizada esta comprobación de normalidad, se procedió a realizar una prueba de hipótesis para comparar las muestras entre sí y así identificar si existen diferencias estadísticas significativas entre los resultados obtenidos para cada tipo de infraestructura ciclista. considerando los resultados del ajuste de normalidad, el test estadístico seleccionado para este análisis fue la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis.

Este tipo de prueba trata de comparar las medianas de cada conjunto de datos, haciendo todas las combinaciones posibles para contrastarlos entre sí. Este cálculo arrojó un P-valor de 0, menor que 0,05 (Tabla 28), lo cual indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las muestras con un nivel de confianza del 95%.

Tipo	Tamaño Muestra	Rango Promedio	Estadístico	Valor-P
1	136	293,919	117,191	0
3	94	168,644		
4	71	149,923		
5	112	314,933		
6	117	333,098		

Tabla 28 Resultado prueba Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con bicicletas por tipo de carril. Fuente: Statgraphics.

Adicionalmente, se llevó a cabo una comparación entre los rangos promedios obtenidos en la prueba Kruskal-Wallis para cada muestra con el fin de identificar las diferencias estadísticas significativas entre parejas de tipos de infraestructura ciclista, para el mismo nivel de confianza de 95%. La Tabla 29 y la Figura 50 muestran los resultados de este análisis, confirmándose los resultados obtenidos del análisis descriptivo, es decir, existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos tipos de carriles con bordillo físico (tipo 3 y 4) con aquellos que carecen de este (tipo 1, 5 y 6).

* indica una diferencia significativa.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 3	*	125,276	57,6599
1 - 4	*	143,997	62,9404
1 - 5		-21,0139	54,8517
1 - 6		-39,1792	54,2052
3 - 4		18,7211	67,5915
3 - 5	*	-146,289	60,1317
3 - 6	*	-164,455	59,5425
4 - 5	*	-165,011	65,2124
4 - 6	*	-183,176	64,6695
5 - 6		-18,1653	56,8275

Tabla 29 Resultado diferencia de rangos promedio prueba Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con bicicletas por tipo de carril. Fuente: Statgraphics.

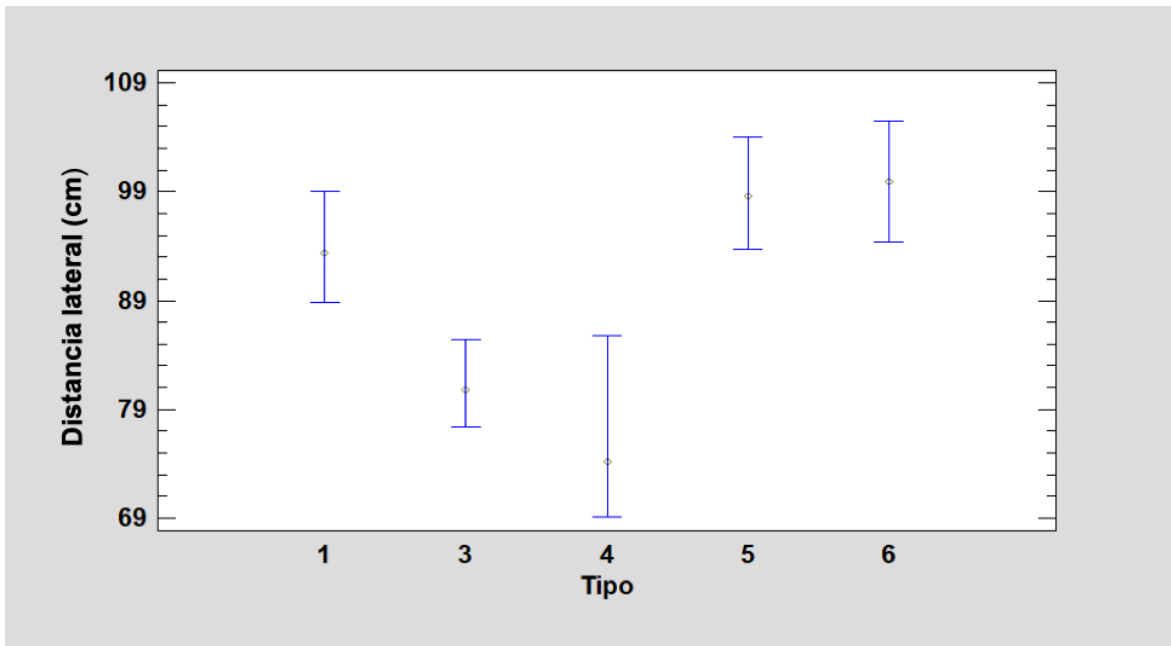


Figura 50 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con bicicletas en todos los tipos de carriles. Fuente: Statgraphics.

6.2.1.2 Patinetes eléctricos

Para el análisis del encuentro con patinetes eléctricos se ha seguido el mismo procedimiento que anteriormente. Así pues, el primer paso fue realizar la prueba de normalidad para, posteriormente, llevar a cabo la prueba de hipótesis correspondiente.

En este caso, se utilizaron dos tipos de pruebas en función del tamaño de la muestra. Para aquellas tipologías donde número de observaciones fue menor que 50, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk. Esta establece que, si el P-valor correspondiente es inferior a 0,05, para el nivel de confianza de 95% se rechaza la idea que de los datos provienen de una distribución normal. Si el número de datos fue mayor a 50, se replicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov descrita anteriormente. En la Tabla 30 se presentan los resultados.

(*) Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Tipo	P-valor	Ajuste normal
1. Acera bici sin separadores físicos	0,000191416	No
3. Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal	0,955362	Si
4. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección	0,549386	Si
5. Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado (*)	0,120776	Si
6. Carril bici en mediana peatonal	0,00351315	No

Tabla 30 Prueba de normalidad para la muestra de maniobras de encuentro con patinetes eléctricos. Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en Statgraphics.

En resumen, solo tres de las cinco tipologías de infraestructura ciclista presentan, con una confianza del 95%, normalidad en los datos observados (P-Valor < 0,05). Por tanto, para realizar el test estadístico de comparación de resultados se optó de nuevo por la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, cuyos resultados se recogen en la Tabla 31.

El resultado de la prueba de Kruskal-Wallis arrojó un P-valor menor que 0,05, por lo que se puede afirmar que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas de las muestras de datos, con un nivel de confianza del 95%.

Tipo	Tamaño Muestra	Rango Promedio	Estadístico	Valor-P
1	35	108,429	36,1229	0
3	32	67,5		
4	29	55,5		
5	60	116,467		
6	36	110,431		

Tabla 31 Resultado prueba Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos por tipo de carril. Fuente: Statgraphics.

Adicionalmente, se identificó qué muestras tienen diferencias significativas de las medianas entre sí (Tabla 32). De manera similar que, para el encuentro con bicicletas, se observaron diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de confianza del 95% entre dos subgrupos. Los tipos de carriles con bordes físicos (tipo 3 y 4) y los que carecen de estos elementos (tipo 1, 5 y 6). Estos resultados también se pueden observar de manera gráfica en la Figura 51.

* indica una diferencia significativa.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
1 - 3	*	40,9286	38,1518
1 - 4	*	52,9286	39,1691
1 - 5		-8,0381	33,1772
1 - 6		-2,00198	37,0281
3 - 4		12,0	39,9924
3 - 5	*	-48,9667	34,1453
3 - 6	*	-42,9306	37,8979
4 - 5	*	-60,9667	35,2783
4 - 6	*	-54,9306	38,9219
5 - 6		6,03611	32,8848

Tabla 32 Resultado diferencia de rangos promedio prueba Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos por tipo de carril. Fuente: Statgraphics.

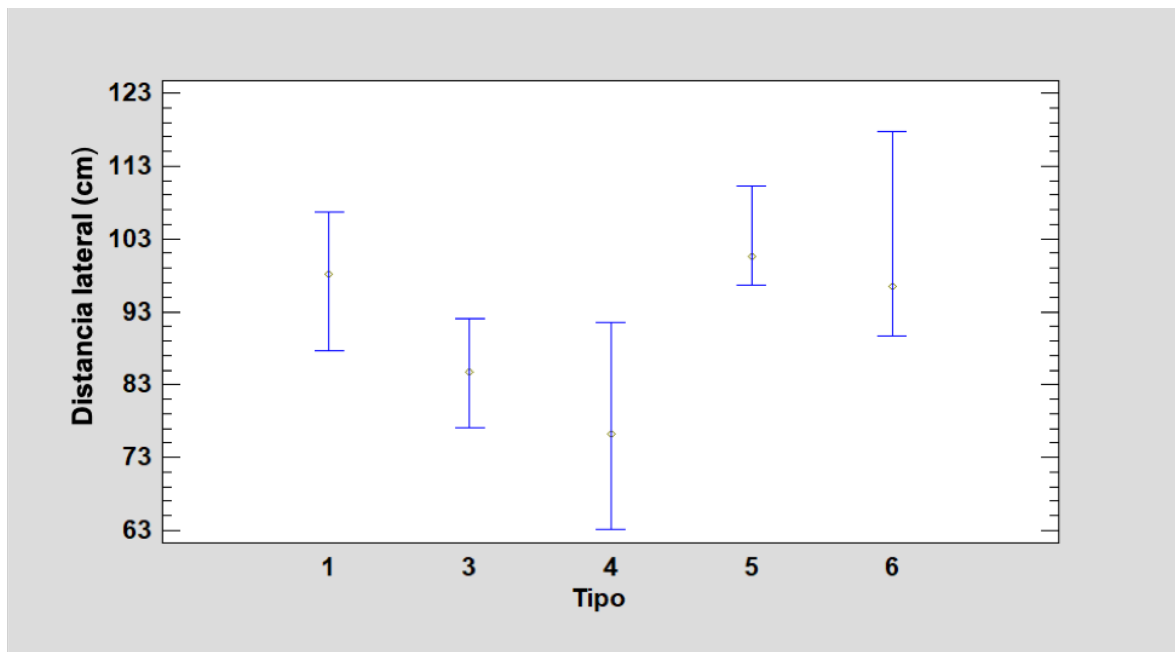


Figura 51 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro con patinetes eléctricos en todos los tipos de carriles. Fuente: Statgraphics.

Al poner en contexto estos resultados con la realidad, donde las cinco tipologías de carril analizadas cuentan con el mismo ancho, se identifica que estas variaciones se deben a la presencia de los elementos de borde que delimitan la infraestructura ciclista. Puesto que, a pesar de que los cinco tipos de carriles en estudio tienen distintas condiciones de entorno, los bordes son la gran diferencia entre los 2 subgrupos conformados a partir del análisis.

Asimismo, este fenómeno ocurre independientemente del tipo de vehículo, ya que, el resultado ha sido el mismo para el análisis exclusivo de las maniobras de encuentro de las bicicletas y de los patinetes eléctricos.

6.2.2 Comparación de según tipo de carril

Por último, se realizó el análisis entre los datos de los dos tipos de vehículos – bicicletas y patinetes– con el objetivo de establecer si difieren los comportamientos de circulación entre estos, en cada una de las tipologías de carriles bici de estudio. Para cada comparación se realizó el mismo procedimiento estadístico descrito anteriormente, la prueba de Kruskal-Wallis, que se trata de una prueba estadística no paramétrica que permite la comparación de muestras que no se distribuyen según una distribución normal. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 33.

Tipo	P-valor	Diferencia significativa
1. Acera bici sin separadores físicos	0,376494	No
3. Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal	0,588084	No
4. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección	0,852359	No
5. Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado	0,217307	No
6. Carril bici en mediana peatonal	0,993136	No

Tabla 33 Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para la comparación en cada de carril entre el tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia en base a los resultados de Statgraphics.

Por último, gráficamente, en la Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55 y la Figura 56 se observan también los valores de la mediana con los cuales se realizó la prueba junto con los intervalos de confianza del 95%.

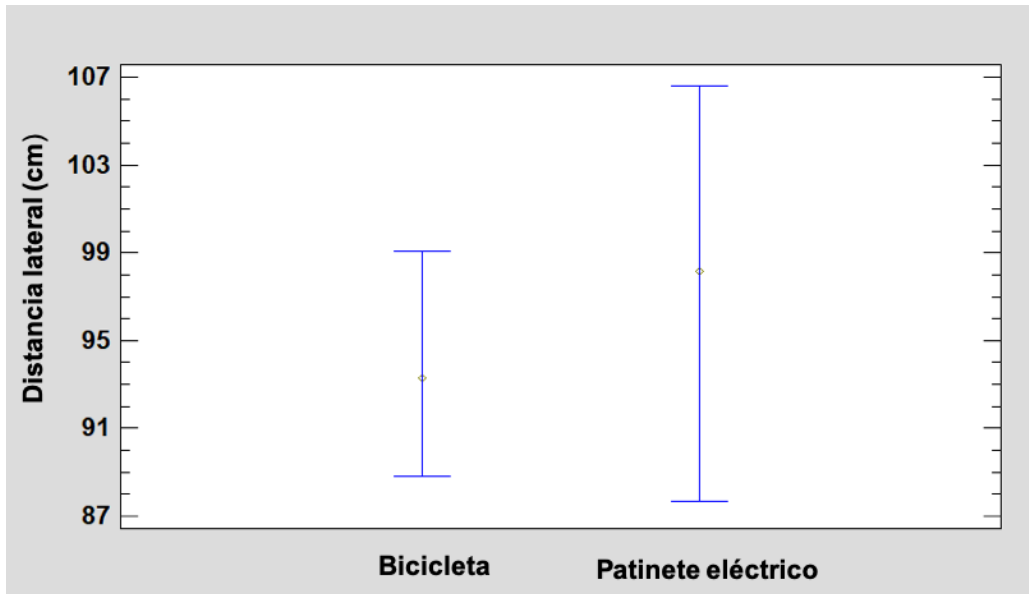


Figura 52 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPS para el carril tipo 1. Fuente: Statgraphics.

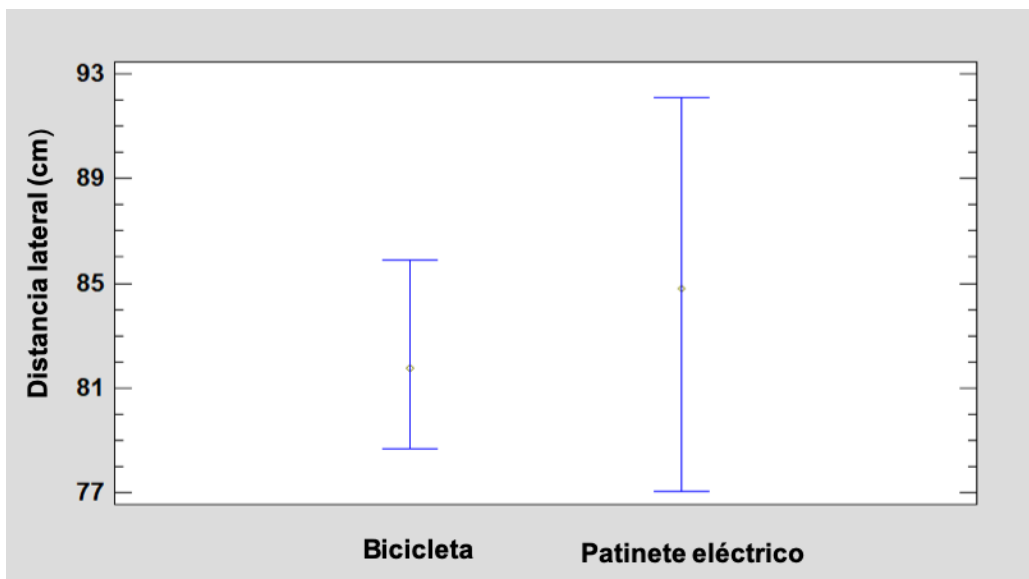


Figura 53 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPS para el carril tipo 3. Fuente: Statgraphics

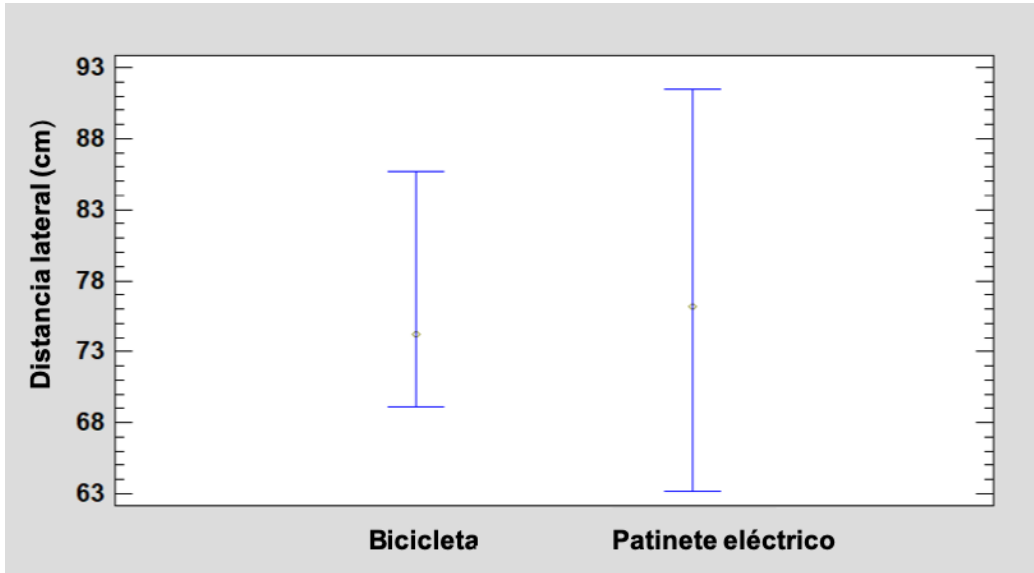


Figura 54 Gráfico de medians de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPs para el carril tipo 4. Fuente: Statgraphics.

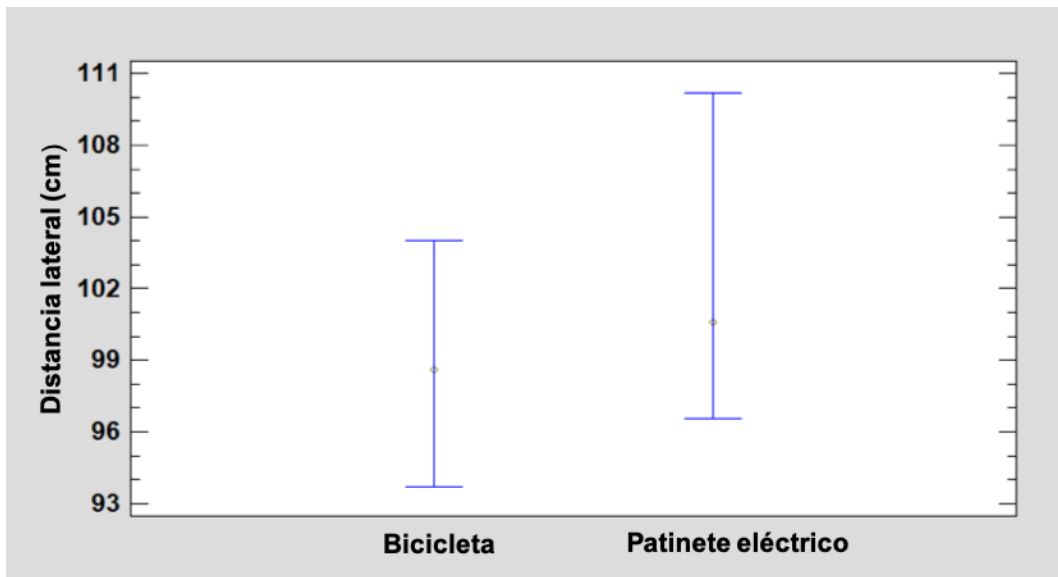


Figura 55 Gráfico de medians de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPs para el carril tipo 5. Fuente: Statgraphics.

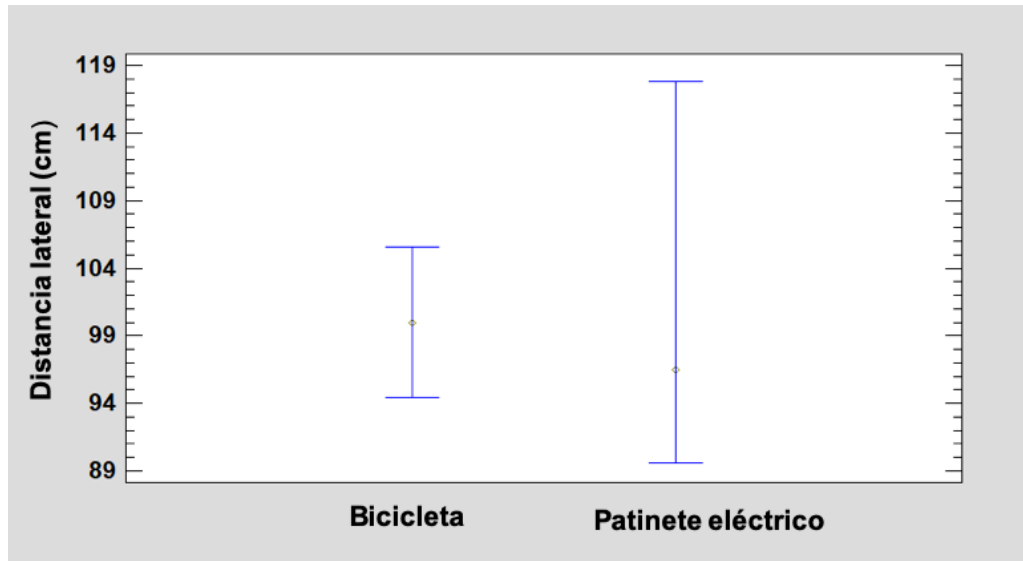


Figura 56 Gráfico de medianas de la prueba de Kruskal-Wallis para la maniobra de encuentro de ambos tipos de VMPS para el carril tipo 6. Fuente: Statgraphics.

En conclusión, no existen diferencias estadísticamente significativas entre tipos de vehículo –bicicleta y patinete eléctrico– en lo que respecta a la distancia lateral que guardan al realizar la maniobra de encuentro, en todas las tipologías de infraestructura ciclista analizadas. No obstante, en todos los tipos de carril bici observados, excepto en el tipo 6, los usuarios de los patinetes eléctricos presentaron una distancia lateral con mediana superior, lo que podría explicarse a partir del tamaño del vehículo y la disposición del usuario en el mismo. Asimismo, este tipo de usuario también presentó una mayor variabilidad en lo que respecta a la distancia lateral, lo que podría estar relacionado con el menor tamaño del vehículo, el cual le podría proporcionar un mayor margen de maniobra.

6.3 Análisis encuesta

En este apartado se resumen los resultados obtenidos de la encuesta realizada para determinar la percepción de riesgo de los usuarios al experimentar maniobras de adelantamiento y encuentro. Para ello, se han desglosado las mismas secciones del cuestionario agrupando las preguntas en las siguientes dos categorías:

- Caracterización de los usuarios y uso de los VMPS
- Análisis de la percepción de riesgo:
 - Según tipo de carril
 - Según tipo de maniobra

A continuación, se describe detalladamente el análisis realizado.

6.3.1 Caracterización de los usuarios y uso de VMPs

La encuesta realizada para obtener la información sobre el nivel de percepción de riesgo de los usuarios de la infraestructura ciclista tuvo como resultado 120 respuestas. Concretamente, el rango de edades de los encuestados fue desde 18 hasta 67 años, pero la mayor cantidad de ellos se encuentran entre los 18 y 25 años, seguido por el grupo de 26 a 32 años (Figura 57).

Figura 57 Histograma de frecuencia de las edades de los encuestados. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al reparto modal de los participantes, se obtuvo que el 35% utiliza la bicicleta privada como vehículo de transporte principal, un 20% el transporte público, 17% el sistema de bicicletas públicas, 14% coche propio, un 8% el patinete eléctrico, y solo un 2% y 3% la moto compartida y propia respectivamente (Figura 58). Con esta distribución es posible identificar el 60% de los encuestados utilizan los VMPs como modo transporte frecuente para desplazarse en el entorno urbano y, de estos, la mayoría usan las bicicletas (52%), ya sean públicas o privadas. Este resultado es acorde a los resultados obtenidos durante la toma de datos, donde se obtuvieron menos registros de maniobras con patinetes eléctricos.

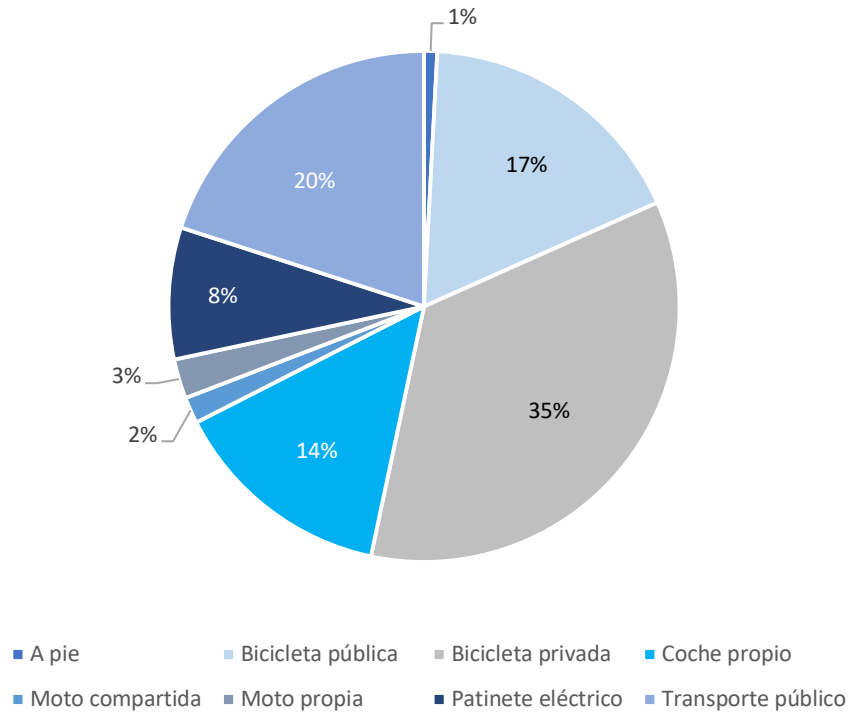
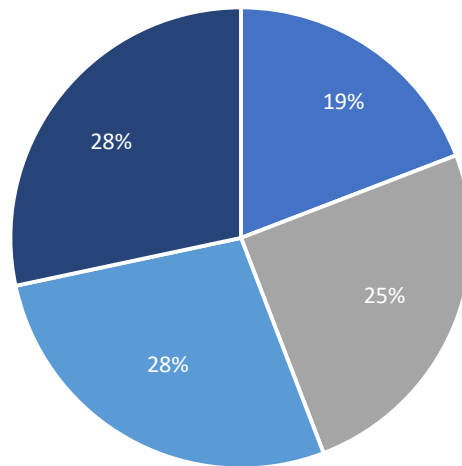


Figura 58 Reparto modal de los encuestados. Fuente: Elaboración propia.

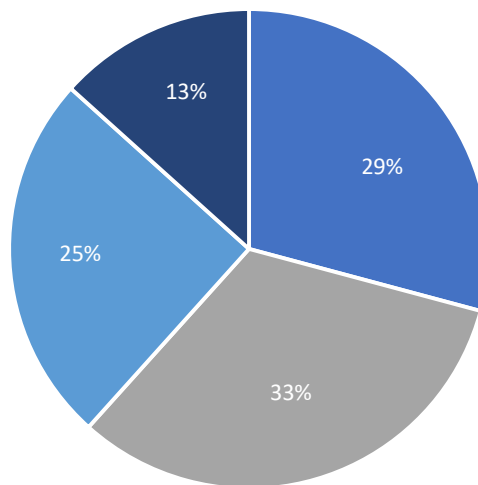
En cuanto a la frecuencia de uso de los VMPs, a pesar de que no se use como modo principal de transporte, se obtuvo una distribución casi equitativa (Figura 59). Un 28% los utiliza una vez a la semana, otro 28% diariamente, siendo estos casos los dos extremos de frecuencia. Un 25% los utiliza cuatro a cinco veces por semana y un 19% de dos a tres veces. Por lo tanto, la mitad de la muestra utiliza con alta frecuencia los VMPs.



■ 2-3 veces por semana ■ 4-5 veces por semana ■ Diariamente ■ Una vez a la semana

Figura 59 Distribución de la frecuencia de uso de los VMPS de los encuestados. Fuente: Elaboración propia.

En lo referente a las distancias que suelen recorrer los usuarios utilizando los VMPS para los rangos establecidos, la mayoría recorre distancias entre los 3 a 5 km, pero también hay una cantidad similar de usuarios que recorren entre 0 y 3 km, y entre 5 y 10 km (Figura 60). Por contra, únicamente 16 encuestados recorren más de 10 km al día. Esto significa que los VMPS son utilizados habitualmente para recorrer distancias cortas.



■ 0-3 km ■ 3-5 km ■ 5-10 km ■ Más de 10 km

Figura 60 Distribución de la distancia promedio recorrida en VMPS por los encuestados. Fuente: Elaboración propia.

Por último, los principales motivos de viaje para escoger los VMPs como modo de transporte son el estudio, trabajo y actividades de ocio con 50, 49 y 48 respuestas, respectivamente. En otras palabras, el principal motivo del uso de este tipo de vehículos es para actividades rutinarias, cuyo origen y destino son lugares habituales (Figura 61).

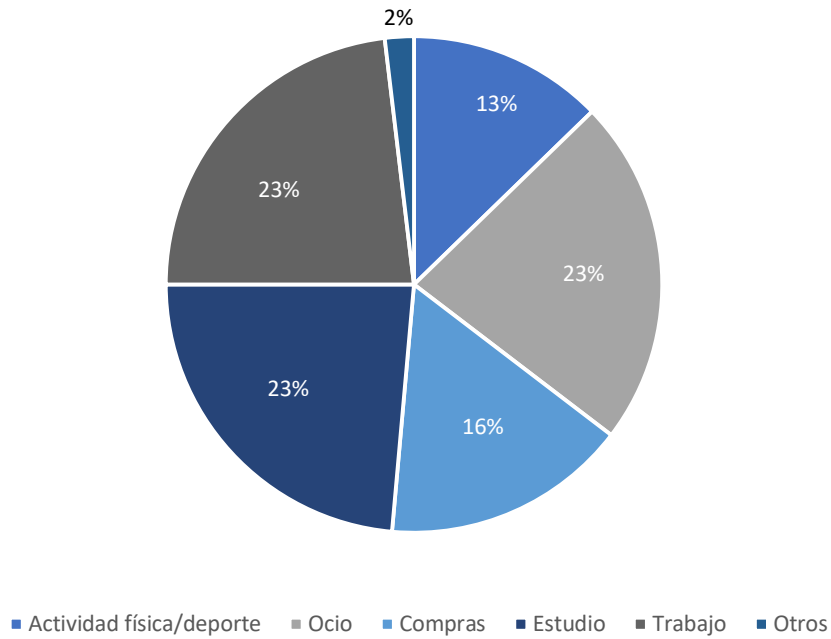


Figura 61 Distribución del motivo de viaje en VMPs de los encuestados. Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Percepción de riesgo

La percepción de riesgo por parte de los usuarios ante la ocurrencia de maniobras de encuentro y adelantamiento fue evaluada para un total de 11 tipologías de carriles bici, valorada por medio de la metodología Likert, con la siguiente escala:

- 1 - Riesgo muy bajo o nulo
- 2 - Riesgo bajo
- 3 - Riesgo medio
- 4 - Riesgo alto
- 5 - Riesgo muy alto
- NS/NC - No Sabe/No Contesta

Los resultados se analizaron agrupados desde dos puntos de vista: por tipología de carril y por tipo de maniobra.

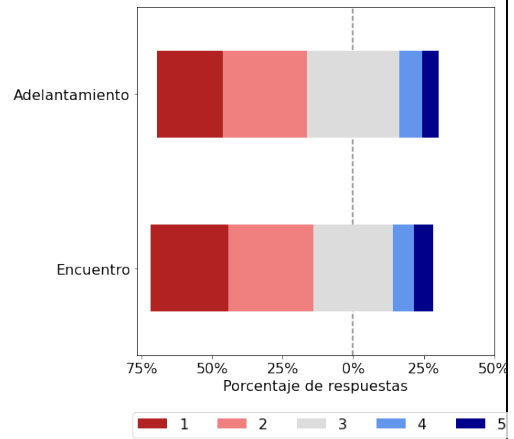
6.3.2.1 Por tipología de carril

Este análisis se realizó para comparar las percepciones de riesgo para ambas maniobras en cuestión, pero diferenciando el nivel según el tipo de carril para el cual se planteaba la pregunta. Concretamente, la encuesta se centró en un total de 11 tipologías de infraestructura ciclista.

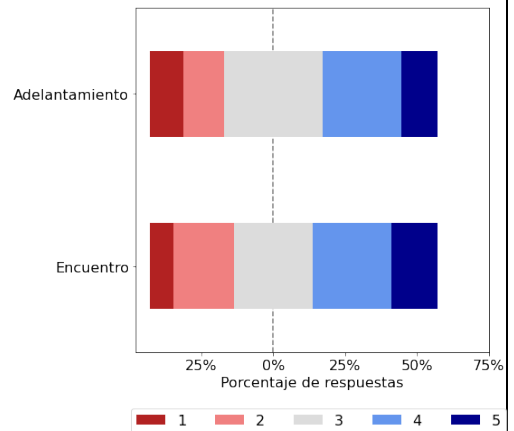
Los resultados de la valoración se presentan en un gráfico en el cual se plasman porcentualmente los 5 niveles de la escala obtenidos, ubicando en el centro el punto medio de dicha valoración (3). De este punto de partida hacia la derecha se ubican los niveles de riesgo percibidos altos (4 y 5) y hacia la izquierda los más bajos (1 y 2), hasta alcanzar el 100% en el eje horizontal. De esta manera se tiene una visión sencilla y visual del resultado de la escala Likert. La Tabla 34 recoge todos y cada uno de los gráficos correspondientes a cada tipología de carril.



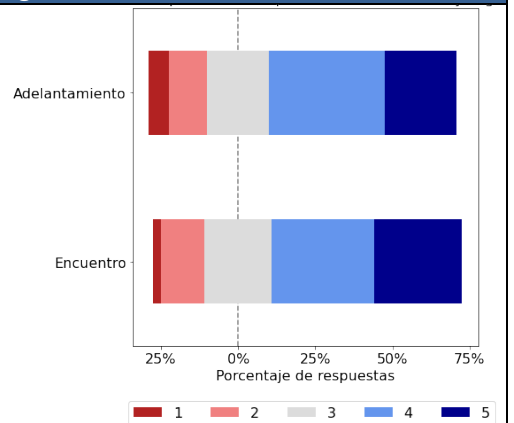
3. Acera bici sin separadores físicos, separado de los aparcamientos en batería



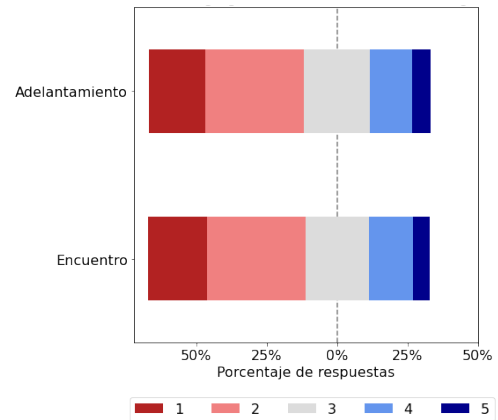
4. Acera bici con proximidad a aparcamientos en línea y vegetación



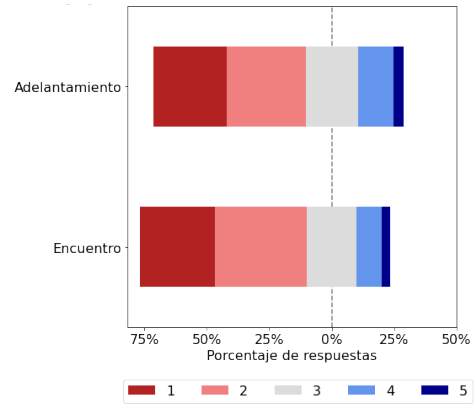
5. Acera bici con proximidad a aparcamientos en batería y vegetación



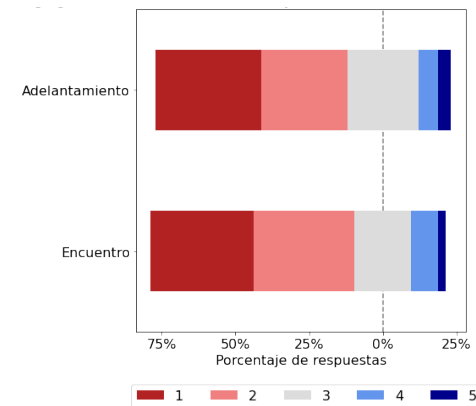
6. Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal



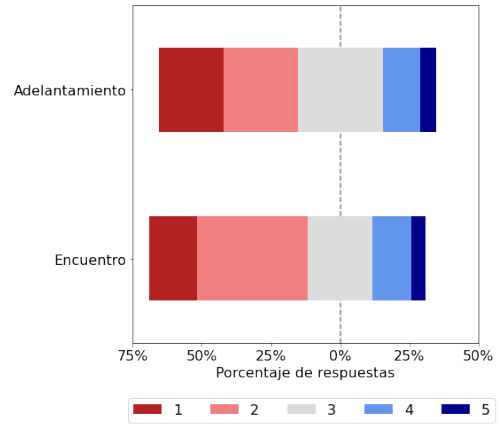
7. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección



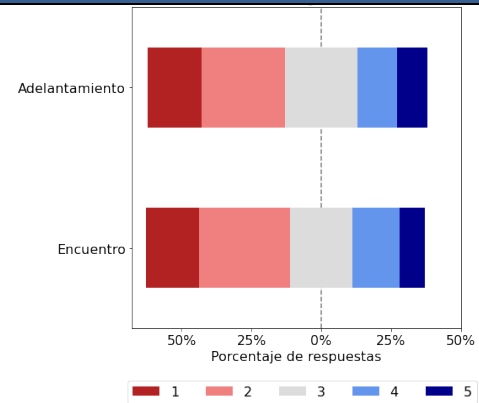
8. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos y bolardos discontinuos como elemento de protección



9. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección y próximo a aparcamientos en línea



10. Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado



11. Carril bici en mediana peatonal

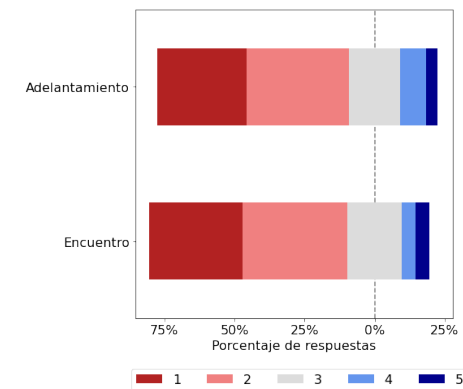


Tabla 34 Resultados percepción de riesgo por tipología de carril. Fuente: Elaboración propia.

Con estos resultados por tipología de carril se identifica que para las configuraciones de carril bici en acera sin separadores, pero distantes de obstáculos como los aparcamientos en línea y en batería (carriles tipo 1, 2 y 3 de la Tabla 34), la percepción de riesgo es baja o muy baja, pues más de la mitad de las personas encuestadas se sitúan a la izquierda del gráfico Likert. Esto probablemente se deba al hecho de que los aparcamientos de encuentren alejados de la infraestructura influye positivamente en la percepción de seguridad del usuario. No obstante, un pequeño porcentaje de los encuestados (alrededor de un 20%) consideran que el nivel puede ser entre alto y muy alto.

Contrario a lo anterior, para las tipologías 4 y 5 de la Tabla 34, donde la acera bici se encuentra próxima a aparcamientos en línea y en batería respectivamente, se determina que para el 40% -60% de los encuestados el riesgo percibido es alto y muy alto, aunque mayor para la maniobra de encuentro.

Para las tipologías segregadas, correspondientes al número 6, 7, 8 y 9 de la Tabla 34, se obtuvo un nivel de percepción de riesgo similar a pesar de contar con distintos elementos de borde, ubicación en la calzada y entorno del carril bici. Para estos predominó la valoración de riesgo bajo o muy bajo, alcanzando que casi el 70% de los encuestados otorgara este peso en los carriles segregados en calzada (tipo 7, 8 y 9), para ambos tipos de maniobras.

Por último, las tipologías de carril bici ubicadas en mediana –peatonal y contiguo a tráfico motorizado (tipo 10 y 11 respectivamente de la Tabla 34)– también fueron valoradas positivamente en relación a la percepción de riesgo. En ambas los usuarios declararon percibir niveles muy bajos, y bajos (en mayor porcentaje) ante la ocurrencia de maniobras en este tipo de infraestructura.

Adicionalmente, se calculó la puntuación media cualitativa en base la misma valoración de la escala Likert (Tabla 35). Numéricamente, en base a esta se identifica que el tipo de carril con mayor nivel de riesgo promedio percibido (promedio mayor a 3) son las aceras bicis próximas a aparcamientos en línea y en batería. En punto medio, se encuentran las aceras bici ubicadas en zona peatonal, seguido por los carriles bici segregados sobre acera con bordillo vegetal y la mediana contigua a tráfico motorizado. Finalmente, las tipologías con menor nivel de riesgo promedio percibido son las aceras bici distantes de aparcamientos en batería, los carriles segregados en calzada y aquellos en mediana peatonal.

	Adelantamiento	Encuentro	Promedio
1. Acera bici sin separadores físicos en zona peatonal	2,53	2,58	2,55
2. Acera bici sin separadores físicos, separado de los aparcamientos en línea	2,60	2,55	2,58
3. Acera bici sin separadores físicos, separado de los aparcamientos en batería	2,43	2,36	2,40
4. Acera bici con proximidad a aparcamientos en línea y vegetación	3,15	3,22	3,18
5. Acera bici con proximidad a aparcamientos en batería y vegetación	3,58	3,71	3,65
6. Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal	2,53	2,51	2,52
7. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección	2,33	2,20	2,26
8. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos y bolardos discontinuos como elemento de Protección	2,14	2,10	2,12
9. Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección y próximo a aparcamientos en línea	2,52	2,49	2,50
10. Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado	2,68	2,64	2,66
11. Carril bici en mediana peatonal	2,18	2,11	2,14

Tabla 35 Valoración numérica de los resultados de la escala Likert. Fuente: Elaboración propia.

6.3.2.2 Por tipo de maniobra

De la misma manera se analizó la percepción de riesgo por tipo de maniobra en función de cada tipología de carril en estudio.

Para la maniobra de encuentro, se observa, de manera general, que predominan los niveles bajos y muy bajos, en todas las configuraciones, en mayor y menor proporción. Las tipologías de carriles donde se obtuvo la menor percepción de riesgo son: carril bici en acera peatonal, carril bici segregado sobre calzada, y acera bici sin separadores físicos y distantes de cualquier tipo de aparcamientos. Es decir, ante menor cantidad de obstáculos posibles y resguardo frente a vehículos motorizados, los usuarios perciben menos riesgo durante su encuentro con otros usuarios al circular en la infraestructura ciclista.

Por contra, los carriles bici donde se percibe mayor nivel de riesgo son las aceras bici próximos a aparcamientos de cualquier disposición, es decir, que no cuentan con ningún elemento de resguardo, y que a pesar de estar en una acera la presencia de este tipo de obstáculos afecta al usuario (Figura 62).

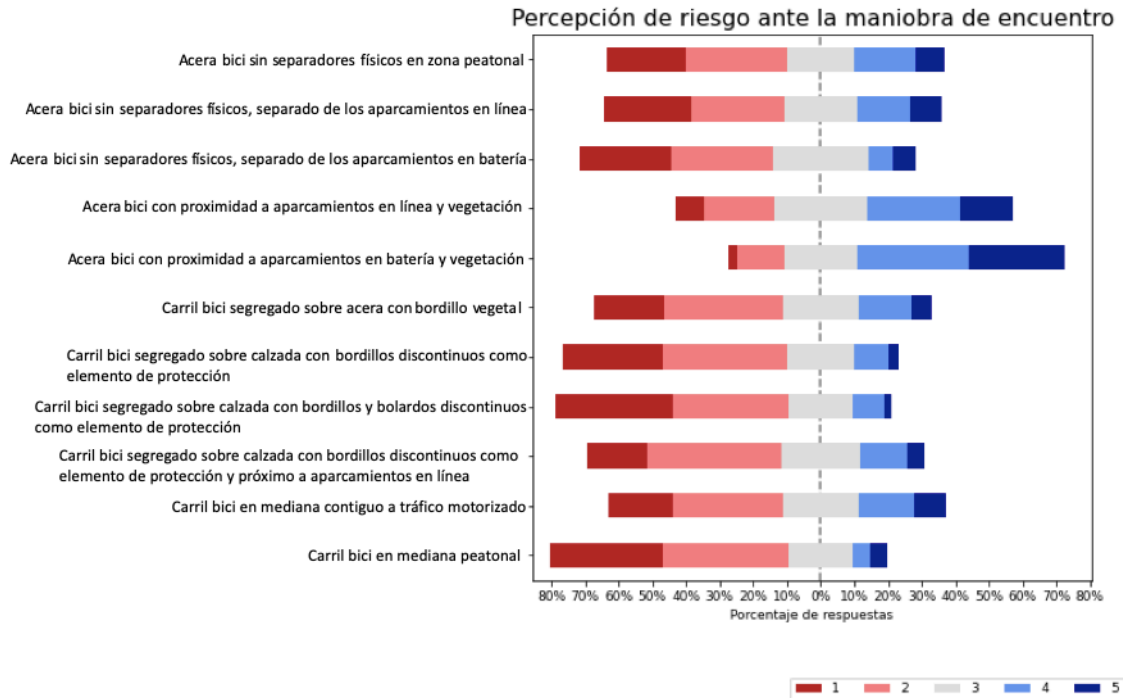


Figura 62 Distribución de la percepción de riesgo de la maniobra de encuentro para todos los escenarios. Fuente: Elaboración propia.

El mismo comportamiento se obtuvo para la maniobra de adelantamiento, tanto para aquellos carriles bici ligados a niveles de riesgo alto como para aquellos asociados a niveles bajos de riesgo (Figura 63).

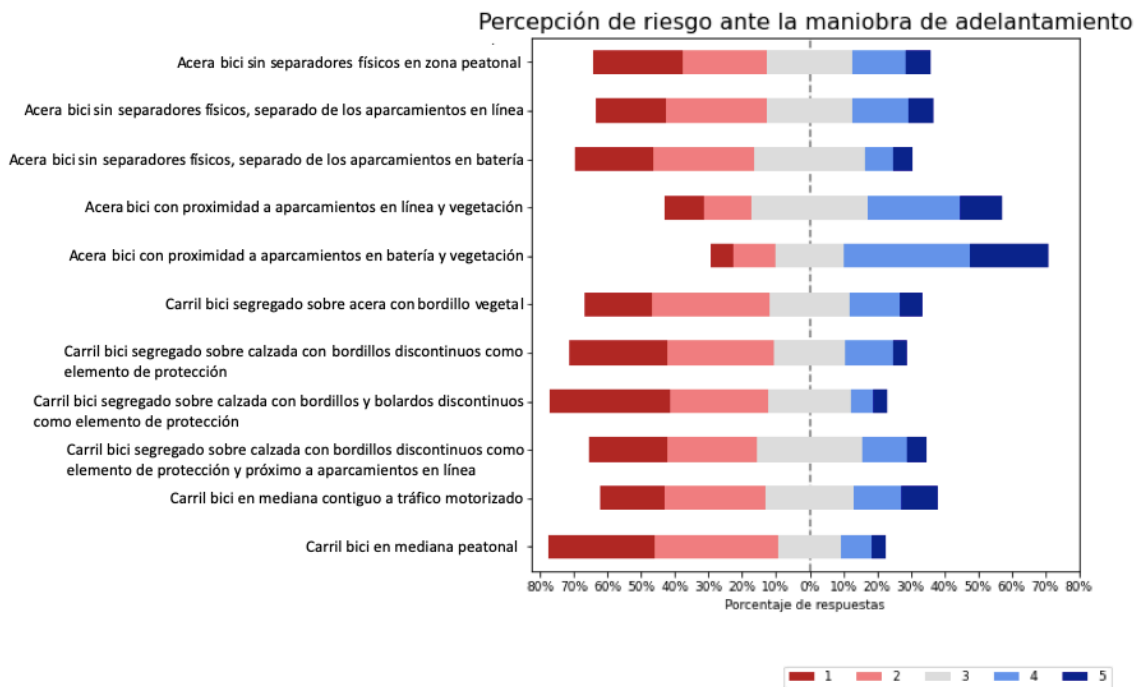


Figura 63 Distribución de la percepción de riesgo de la maniobra de adelantamiento para todos los escenarios. Fuente: Elaboración propia.

6.4 Conclusiones del análisis

A partir del análisis realizado se ha podido identificar que, la configuración de la infraestructura ciclista influye en el comportamiento de los usuarios durante la ejecución de las maniobras de encuentro. También, frente a las distintas tipologías, varía la percepción de riesgo que los conductores tienen durante la circulación.

Principalmente se ha podido establecer que la presencia de bordes es el factor determinante ante la variación de la distancia de separación entre usuarios cuando se produce un encuentro. Cuando estos elementos están en la infraestructura, a pesar de que las tipologías cuenten con el mismo ancho, la separación entre usuarios es más pequeña, puesto que el espacio libre de circulación está restringido. Sin embargo, los usuarios han categorizado este tipo de carril como de poco riesgo, ya que están más protegidos de interacciones con otros agentes de la vía y del entorno, como lo son peatones, obstáculos y vehículos motorizados.

Por esta razón, se propone la implementación de carriles bici de este tipo, pero aumentando el ancho de la sección transversal para que la seguridad de los usuarios sea mayor y tengan más espacio para circular. Como la segregación puede realizarse en carriles tanto en calzada como en acera, se presentan recomendaciones para ambas alternativas.

Comenzando con los carriles bici segregados en calzada, puesto que los encuestados lo categorizaron como más seguro, se sugiere que los bordillos sean rígidos discontinuos de baja altura, bolardos flexibles o tachas. También, estos elementos deben ser visibles para los conductores de VMPs y los otros agentes de la vía, de día y de noche. Tampoco se debe olvidar el resguardo frente a los aparcamientos de la vía y disposición de marcas viales y señalización, en todo el trazado. Ejemplos de esta tipología se muestran en la Figura 64, Figura 65 y en la Figura 66.

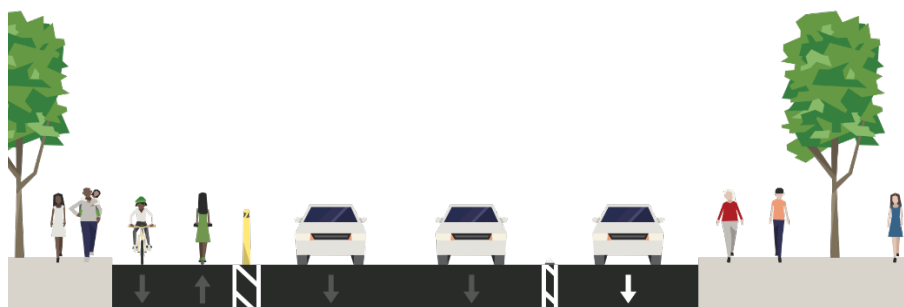


Figura 64 Carril bici segregado en calzada con bolardos verticales como elemento de resguardo. Fuente: Elaboración propia Streetmix.

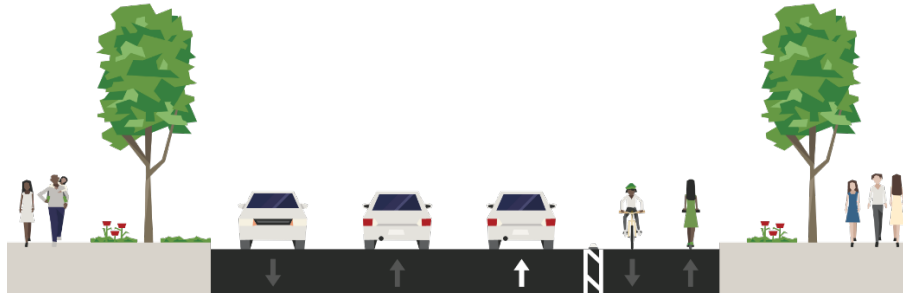


Figura 65 Carril bici segregado en calzada con tachos como elemento de resguardo. Fuente: Elaboración propia Streetmix.

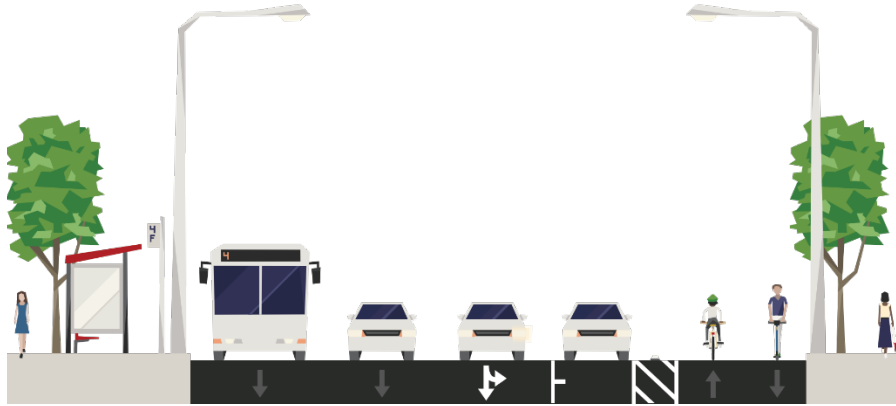


Figura 66 Carril bici segregado en calzada con tachos como elemento de resguardo a aparcamiento en línea. Fuente: Elaboración propia Streetmix.

Otra alternativa es continuar con la implementación de los carriles bici en mediana peatonales, si se cuenta con este tipo de espacios como se indica en la Figura 67. Sin embargo, en caso tal de que el espacio sea reducido, se recomienda la acera bici en acera, pero segregada para reducir la interacción con peatones (Figura 68). En este caso los bordillos deben ser amigables con el entorno, por lo cual se recomienda que sean de tipo vegetal, de poca altura, pero que se encuentren en constante mantenimiento para evitar que estos reduzcan el ancho operativo del carril.

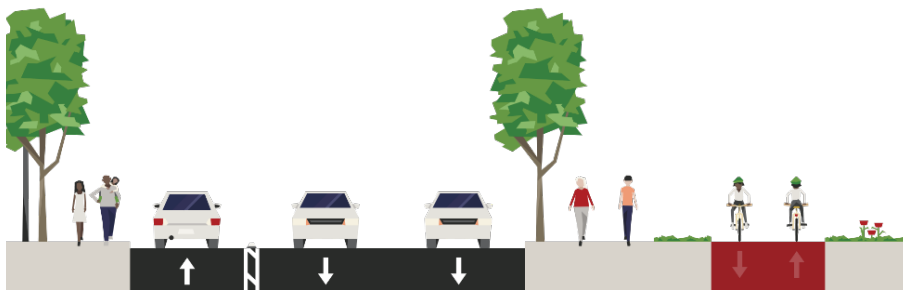


Figura 67 Sección transversal con acera bici en mediana peatonal. Fuente: Elaboración propia Streetmix.

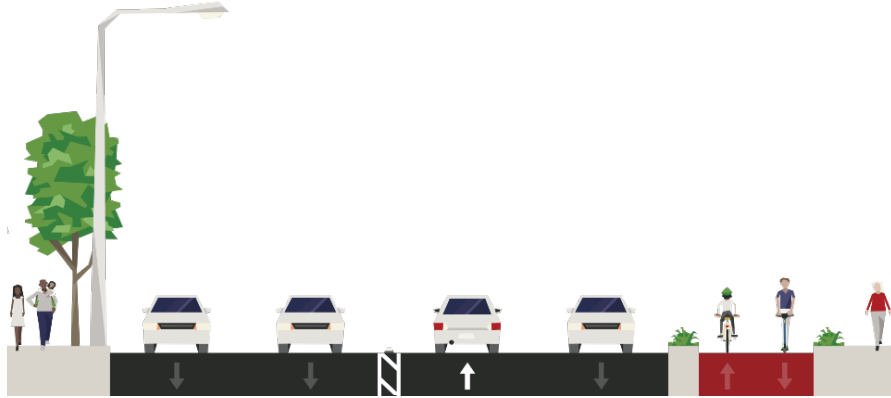


Figura 68 Sección transversal con acera bici protegida con borde vegetal. Fuente: Elaboración propia Streetmix.

En caso tal que el espacio en acera no sea suficiente para disponer de bordillos, también es posible no colocarlos, pero dejar un espacio libre suficiente entre los obstáculos laterales como aparcamientos, árboles, luminaria. Pero también, garantizar que el espacio peatonal sea suficiente para que estos no invadan el carril. En esta tipología las marcas viales son el elemento más importante de la infraestructura para que esta quede claramente delimitada. La (Figura 69) es un ejemplo referente, donde el carril contiguo a la infraestructura ciclista puede ser reemplazado por un aparcamiento en línea o en batería.

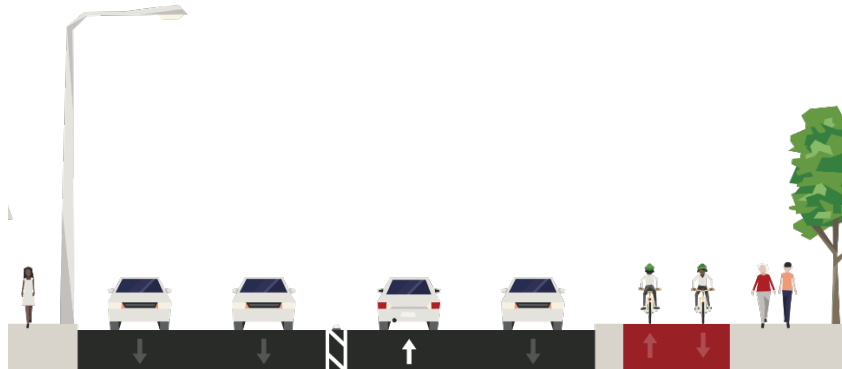


Figura 69 Sección transversal con acera bici libre de obstáculos. Fuente: Elaboración propia Streetmix.

Por último, una última alternativa para aprovechar los espacios existentes en la sección transversal de la vía, es implementar el carril bici en la mediana, de manera que quede contiguo al tráfico motorizado, pero a su vez separado de este. La seguridad de esta tipología debe garantizarse mediante el ancho adecuado del carril, bordes vegetales si es posible y espacio suficiente en ambos laterales hacia la calzada. En la Figura 70 se muestra esta disposición.

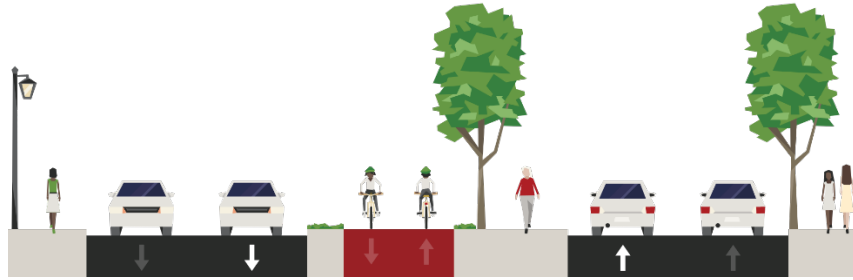


Figura 70 Sección transversal con acera bici resguardada en mediana contigua a tráfico motorizado. Fuente: Elaboración propia Streetmix.

7. APLICACIÓN PRÁCTICA DISTRITO DE ALGIROS

Como se ha mencionado, el trabajo consiste en la caracterización de las maniobras de adelantamiento y encuentro de usuarios sobre la infraestructura ciclista. Para aplicar los resultados obtenidos del estudio en un ámbito, se ha escogido el distrito de Algirós. Este ha sido seleccionado para el desarrollo de este trabajo porque es una zona de la ciudad de Valencia en la que es común el uso de los Vehículos de Movilidad Personal (VMP) y posee una amplia cobertura de infraestructura ciclista.

7.1 Localización

El distrito de Algirós se encuentra ubicado al noreste de la ciudad de Valencia (Figura 71) y está conformado por 5 barrios: La Vega Baixa, La Carrasca, Amistat, Ciutat Jardí y L'Illa Perduda (Figura 72). Este distrito se caracteriza principalmente por ser una zona universitaria, ya que en este se sitúan la Universitat Politècnica de València y uno de los campus de la Universitat de València. Además, el distrito Algirós cuenta con diversos comercios, zonas de ocio y una amplia zona residencial, lo que favorece una afluencia importante de usuarios de VMPs.

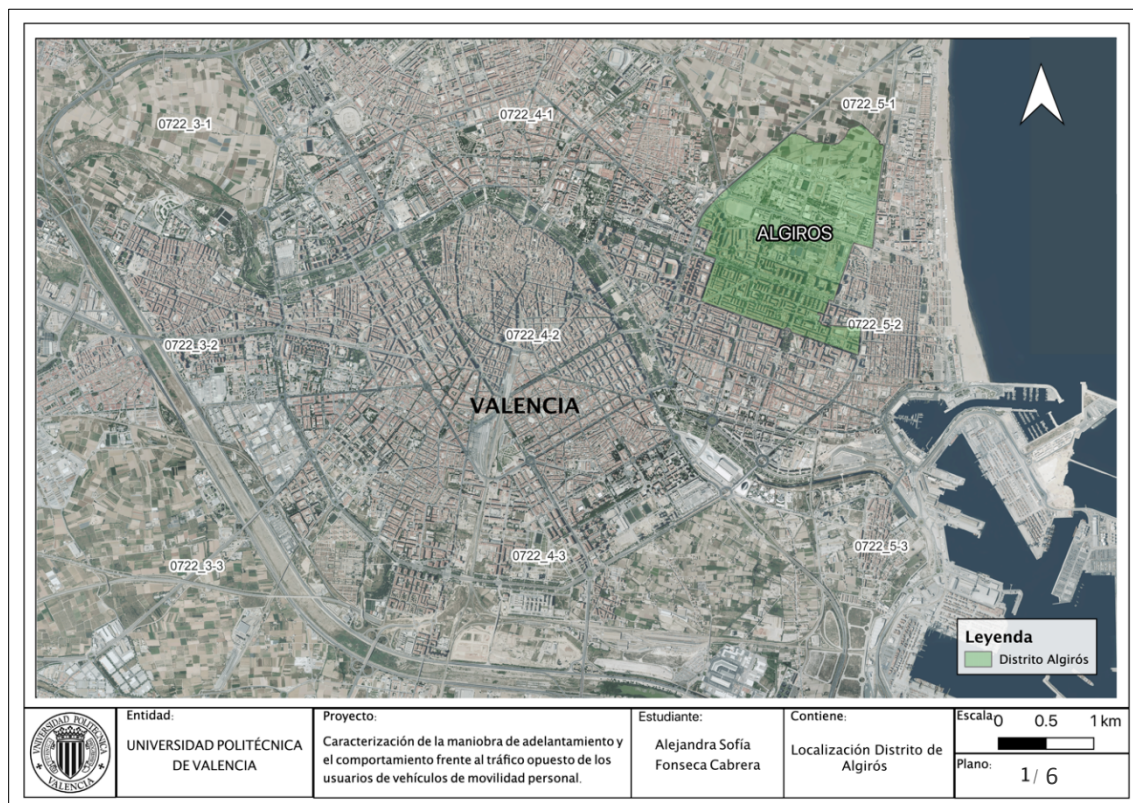


Figura 71 Localización distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia. Datos: Ayuntamiento de Valencia.

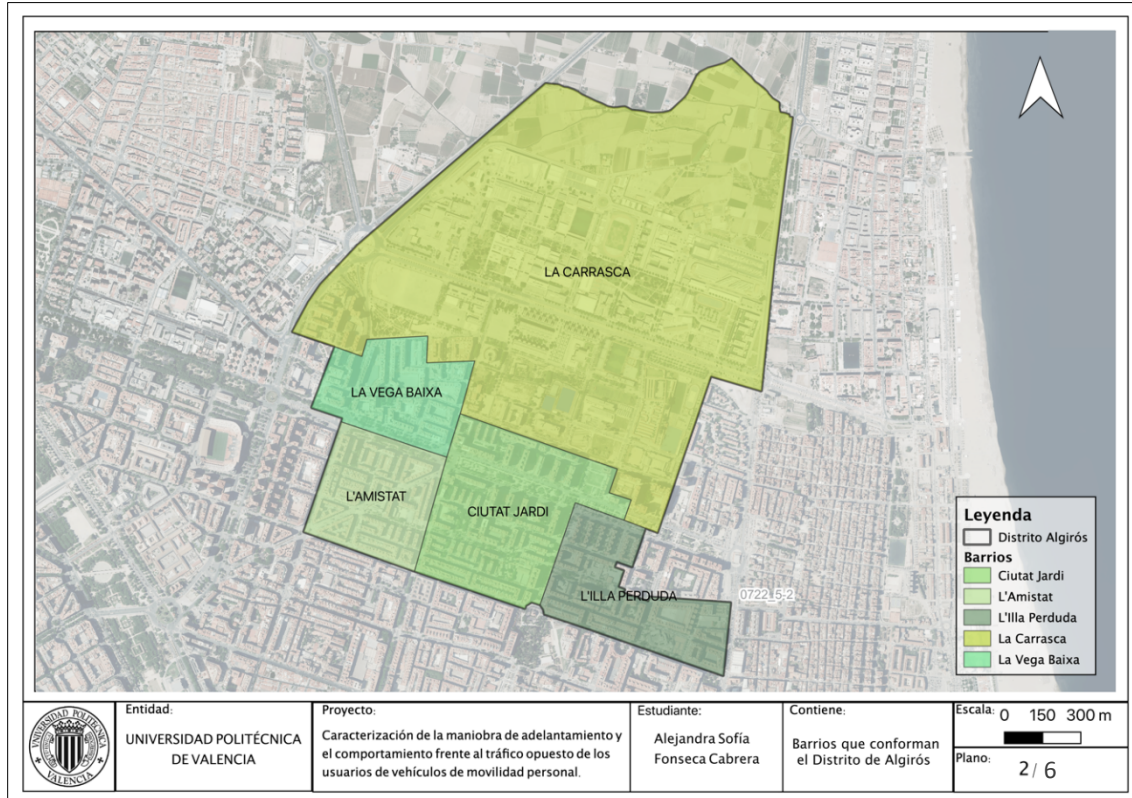


Figura 72 Barrios que conforman el distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia. Datos: Ayuntamiento de Valencia.

7.2 Infraestructura ciclista actual

Actualmente, el distrito de Algirós cuenta con infraestructura ciclista, especialmente, en sus vías principales: Avenida de los Naranjos, Avenida Vicente Blasco Ibáñez, Calle Dr. Manuel Candela y Calle Ingeniero Fausto Elio. La Figura 73 presenta el plano con la infraestructura actual en la zona de estudio, obtenido a partir de la información proporcionada por el portal de datos abiertos del ayuntamiento de Valencia, en los ítems de transporte y urbanismo e infraestructura y elaborado con la herramienta QGIS. La última actualización de datos del portal se llevó a cabo el 10 de enero de 2019.

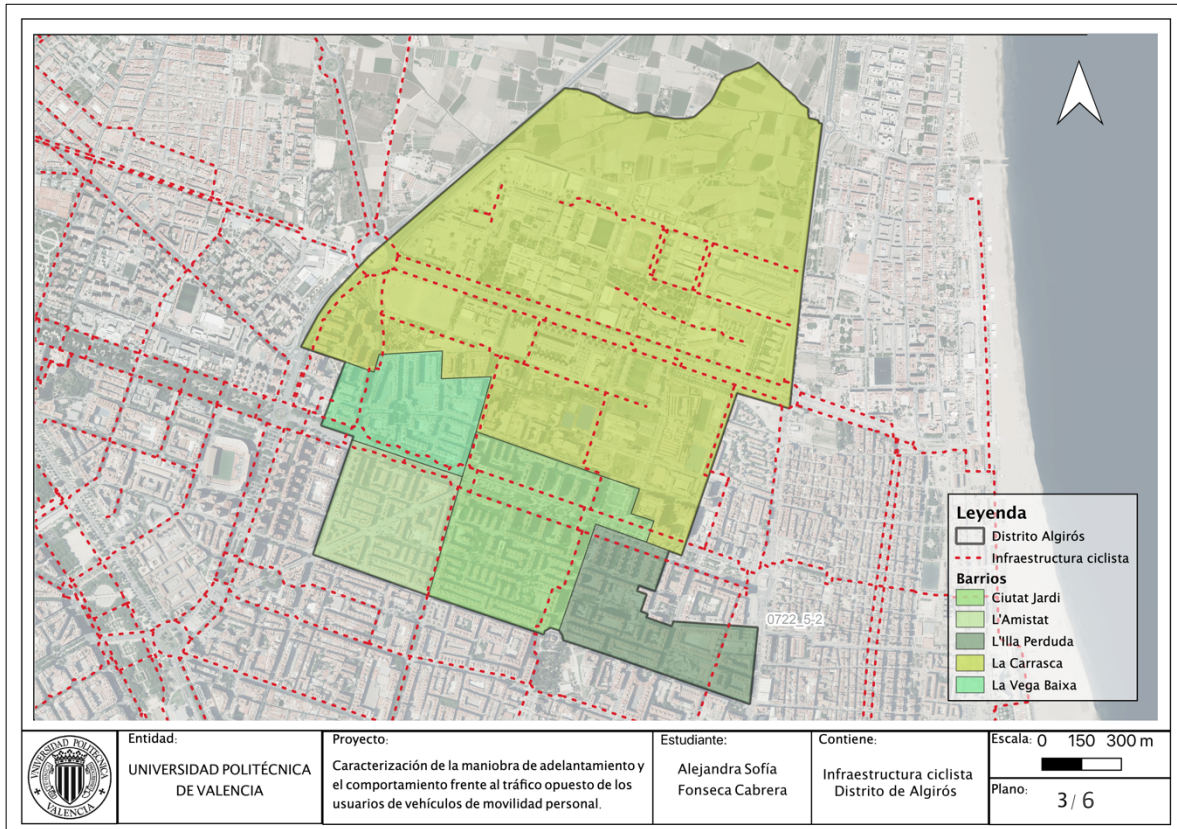


Figura 73 Infraestructura ciclista actual distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia. Datos: Ayuntamiento de Valencia.

En la Figura 73 se puede apreciar la conectividad de los barrios del distrito por medio de la infraestructura ciclista y, asimismo, la conectividad con el resto de la ciudad. En el propio distrito de Algirós es posible encontrar distintas tipologías de carriles bici, los cuales deben ser clasificados antes de la toma de datos.

Otra consideración importante de este distrito es la presencia de 26 estaciones del sistema de bicicletas público de la ciudad “Valenbisi” (Figura 74). Este aspecto favorece también el uso de la infraestructura ciclista, por lo que es más probable encontrar distintos tipos de usuarios que circulan sobre esta.

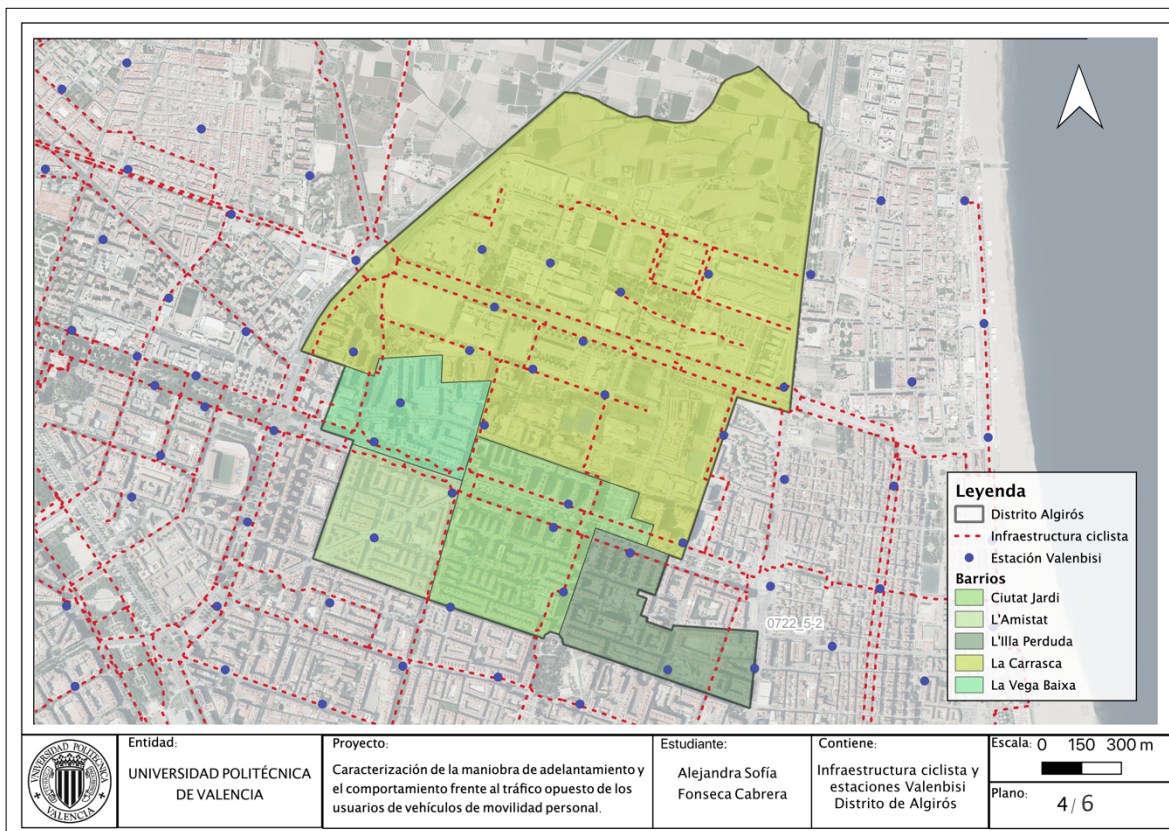


Figura 74 Estaciones de Valenbisi en el distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia. Datos: Ayuntamiento de Valencia.

7.2.1 Clasificación vías ciclistas

Teniendo en cuenta la información previamente mencionada respecto a la localización de la infraestructura ciclista en el distrito de Algirós, se llevó a cabo una visita de campo circulando sobre esta. Durante este proceso, se obtuvieron diversas fotografías y videos a partir de los cuales fue posible caracterizar las vías ciclistas presentes en el distrito.

El “Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial” define en su Anexo I los conceptos básicos, donde se describe 5 tipologías de vías para ciclistas. En primer lugar, define las vías ciclistas como una vía específicamente acondicionada para el tráfico de ciclos, señalizada vertical y horizontalmente como corresponde, y con ancho suficiente para permitir el paso seguro de este tipo de vehículos. Dentro de esta categoría se distinguen 5 tipologías de vías ciclistas (Ministerio del Interior, 2015):

- Carril-bici: Vía ciclista que discurre adosada a una calzada, en un sentido de circulación o en doble.
- Carril-bici protegido: Tipo de carril bici, provisto de elementos laterales que lo separan físicamente de la calzada y de la acera.

- Acera-bici: Tipo de vía ciclista que se encuentra señalizada sobre la acera.
- Pista-bici: Tipo de vía ciclista segregada del tráfico motorizado y con trazado independiente.
- Senda ciclable: Vía dedicada a peatones y ciclos, segregada del tráfico motorizado, que discurre por espacios abiertos, parques, jardines o bosques.

En base a estos criterios, contrastándolos con la información recogida durante la inspección en campo, se clasificaron las vías ciclistas del distrito obteniendo que los tipos de vías ciclistas encontrados en el distrito de Algirós son: acera bici, carril bici protegido y senda ciclable, todos estos de carácter bidireccional en toda su extensión, pero con distintos tipos de bordillos laterales y distintos tipos de pavimento. La representación gráfica de esta clasificación se presenta en la Figura 75.

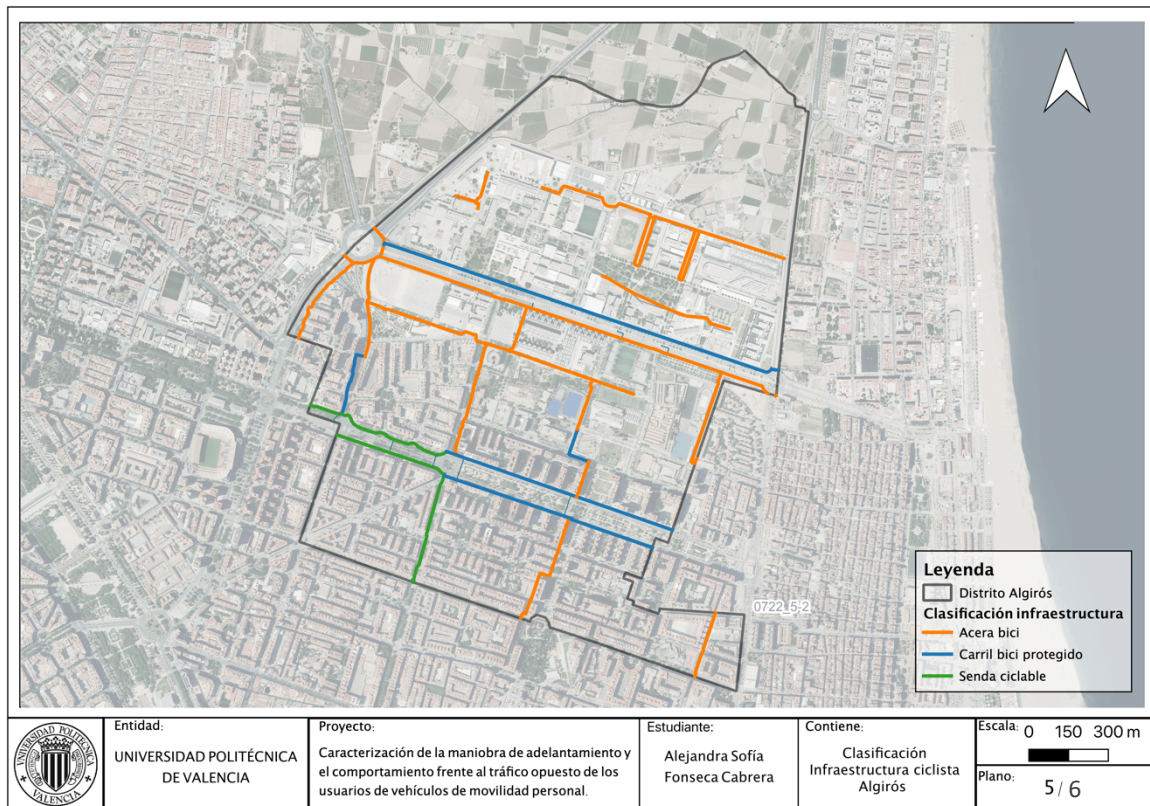


Figura 75 Clasificación de las vías de ciclistas. Fuente: Elaboración propia en base a los datos del Ayuntamiento de Valencia y la recopilación de los resultados de la inspección de campo.

La longitud total de la infraestructura ciclista es de aproximadamente 13.702,39 m, y el tipo de infraestructura que mayor cobertura presenta es la tipología de acera bici, con un 66% respecto a la longitud total. En segundo lugar, se encuentran los carriles bici protegidos con una cobertura del 27% y en último lugar las sendas ciclables con un 7%. Las longitudes y distribución porcentual se obtuvieron en base a los mapas elaborados en QGIS y se presentan en la Tabla 36 y la Figura 76.

Tipo de vía	Longitud (m)
Acera bici	8.366,74
Carril bici protegido	3.758,41
Senda ciclable	1.431,46
Total	13.556,60

Tabla 36 Longitud de las vías ciclistas según tipología. Fuente: Elaboración propia en base a los datos del Ayuntamiento de Valencia y la recopilación de los resultados de la inspección de campo.

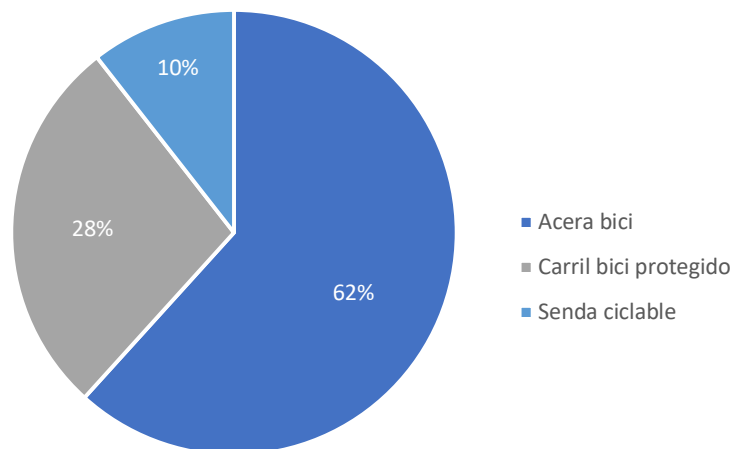


Figura 76 Distribución de las vías ciclistas según tipología. Fuente: Elaboración propia en base a los datos del Ayuntamiento de Valencia y la recopilación de los resultados de la inspección de campo.

Posteriormente a la clasificación general de la tipología de las vías ciclistas, se realizó una caracterización específica para cada tramo encontrado en el distrito. El objetivo de esta inspección fue obtener todas las condiciones que configuran los carriles de la infraestructura ciclista de Algirós. Para ello, los carriles se agruparon en 6 categorías siguiendo la clasificación hecha previamente y teniendo en cuenta las condiciones y características actuales en las que se encuentran, estas son:

- Senda ciclable en mediana contigua a tráfico motorizado
- Senda ciclable en mediana peatonal
- Acera bici

- Acera bici en zona peatonal
- Carril bici protegido en acera
- Carril bici protegido en calzada

En la Figura 77, se presenta la localización de la infraestructura categorizada, junto con un identificador “ID” a cada tramo, para asociarla con la descripción correspondiente inventariada.

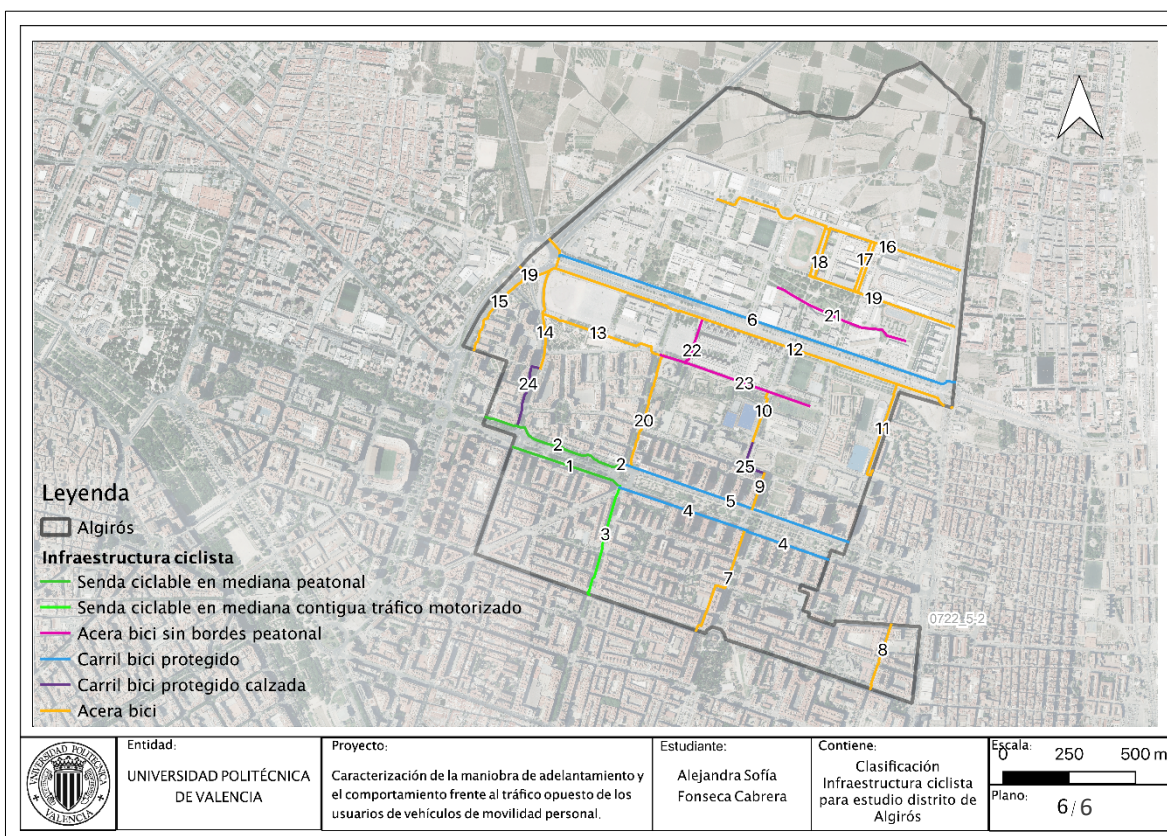


Figura 77 Identificación infraestructura ciclista distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia en base a los datos del Ayuntamiento de Valencia.

En la Tabla 37 se desglosan los tramos que componen cada categoría, y se indica su ubicación, ancho de carril, tipo de borde y de pavimento como características principales.

INVENTARIO INFRAESTRUCTURA CICLISTA DISTRITO DE ALGIRÓS				
Senda ciclable en mediana peatonal				
ID	Vía	Ancho carril	Bordes	Tipo de pavimento
1	Av. Blasco Ibáñez	2,00	Ninguno	Baldosas
2	Av. Blasco Ibáñez	2,00	Ninguno	Baldosas
Senda ciclable en mediana contiguo a tráfico motorizado				
ID	Vía	Ancho carril	Bordes	Tipo de pavimento
3	Carrer Dr. Manuel Candela	3,00	Ninguno, desnivel con la calzada	Hormigón
Carril bici protegido				
ID	Vía	Ancho carril	Bordes	Tipo de pavimento
4	Av. Blasco Ibáñez	3,00	Bordillo vegetal continuo	Hormigón
5	Av. Blasco Ibáñez	3,00	Bordillo vegetal continuo	Hormigón
6	Av. De los Naranjos	2,00	Bordillo vegetal continuo	Hormigón
Acera bici				
ID	Vía	Ancho carril	Bordes	Tipo de pavimento
7	Music Ginés + Humanista Furió	2,00	Ninguno	Baldosas
8	Carrer de la Fusta	2,00	Ninguno	Baldosas
9	Plaza del Actor Enrique Rambal	2,00	Ninguno	Baldosas
10	Carrer Professor Ernest Lluch	1,80	Ninguno	Adoquín
11	Campillo Altobuey	1,80	Ninguno	Baldosa
12	Av. Los Naranjos	2,00	Ninguno	Adoquín
13	Carrer d'Albalat dels Tarongers	2,00	Ninguno	Adoquín
14	Carrer del Clariano	2,00	Ninguno	Asfalto
15	Av. Catalunya	2,00	Ninguno	Hormigón
16	Carrer d'Agustí Alaman i Rodrigo	2,00	Ninguno	Hormigón
17	Calle Kisshomaru Ueshiba	2,00	Ninguno	Hormigón
18	Carrer José Calavera Ruiz	1,80	Ninguno	Hormigón
19	Calle Pedro Duque	2,00	Ninguno	Hormigón
20	Carrer Ramón Llull	2,00	Ninguno	Baldosas
Acera bici en zona peatonal				
ID	Vía	Ancho carril	Bordes	Tipo de pavimento
21	Belisario Betancur	2,00	Ninguno	Hormigón
22	Carrer d'Albalat dels Tarongers	2,00	Ninguno	Adoquín
23	Carrer d'Albalat dels Tarongers	2,00	Ninguno	Adoquín
Carril bici protegido en calzada				
ID	Vía	Ancho carril	Bordes	Tipo de pavimento
24	Carrer del Clariano	2,00	Bordillo de hormigón discontinuo	Asfalto
25	Calle del Serpis	2,00	Bordillo de hormigón discontinuo	Asfalto

Tabla 37 Inventario infraestructura ciclista distrito de Algirós. Fuente: Elaboración propia.

Por último, los resultados de la inspección se agruparon en fichas técnicas para cada tramo asociado a su ID en donde se describe:

- Localización de la vía ciclista
- Breve descripción
- Direccionalidad: Unidireccional o bidireccional
- Tipo de pavimento: Asfalto, adoquín u hormigón

- Tipo de vía ciclista: Según la clasificación presentada en el inciso x.
- Tipo de bordillo:
 - Bordillo según continuidad: continuo o discontinuo
 - Bordillo según material: Vegetal, de hormigón, de plástico
 - Bordillo según “Montable”: Montable o No montable
- Obstáculos: Posibles elementos encontrados a lo largo de los recorridos que pueden afectar la circulación normal de los usuarios
- Imagen

En total se obtuvieron 25 fichas, en la Tabla 38 y la Tabla 39 se presentan un ejemplo de estas. El registro total se encuentra en el Anexo III.

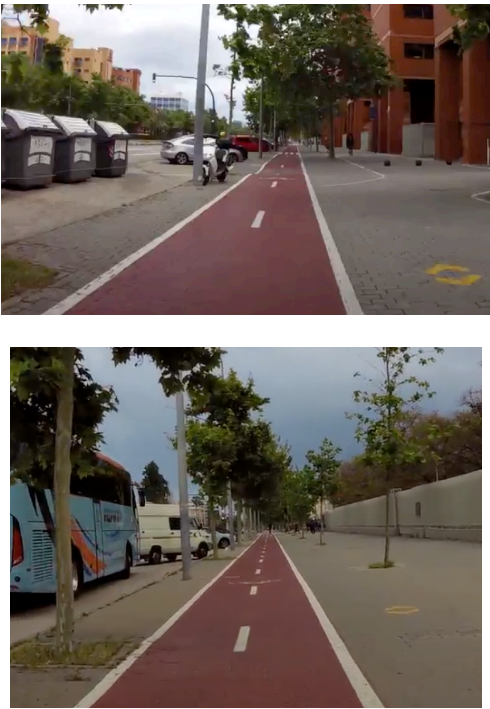
FICHA TIPO No. 1	
ID	1
Ubicación	Avenida de los Naranjos
Descripción	Vía ciclista sobre la acera de la Universitat de València desde la Av. Catalunya hasta Calle Ing. Fausto Emilio
Direccionalidad	Bidireccional
Tipo de pavimento	Adoquín
Tipo de carril	Acera-bici
Tipo de bordillo	Ninguno
Obstáculos laterales	Árboles, posibles vehículos estacionados
Imagen	

Tabla 38 Ficha de caracterización No.1. Fuente: Elaboración propia en base a los datos recolectados en la inspección de campo.

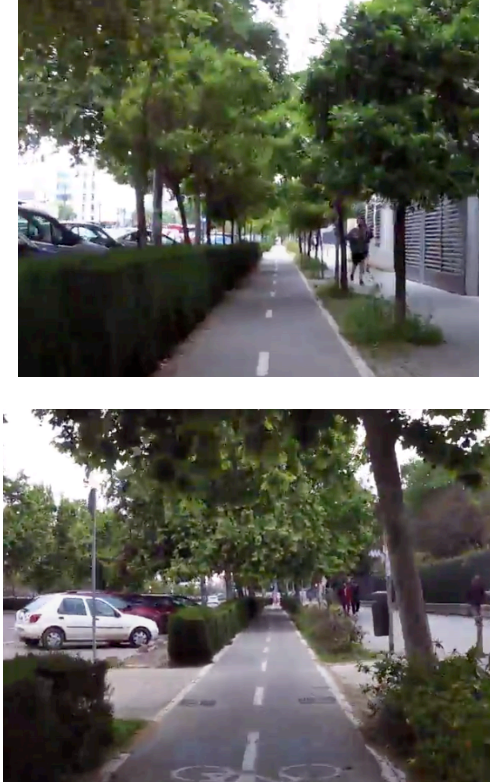
FICHA TIPO No. 2	
ID	2
Ubicación	Avenida de los Naranjos
Descripción	Vía ciclista sobre la acera de la Universitat Politècnica de València desde la Av. Catalunya hasta Calle Ing. Fausto Emilio,
Direccionalidad	Bidireccional
Tipo de pavimento	Asfalto
Tipo de carril	Carril bici protegido
Tipo de bordillo	Bordillo vegetal continuo no montable
Obstáculos laterales	Arbustos y árboles
Imagen	

Tabla 39 Ficha de caracterización No.2. Fuente: Elaboración propia en base a los datos recolectados en la inspección de campo.

7.3 Deficiencias de la red

Una vez caracterizada la infraestructura ciclista del distrito, se procedió a identificar aquellos tramos en donde se podrían encontrar deficiencias asociadas a la afectación de la circulación segura y cómoda a de los usuarios.

En el distrito se encontraron distintas tipologías de infraestructura ciclista urbana, que variaban principalmente en función del borde, del tipo de pavimento y de los obstáculos encontrados su alrededor. Entorno a esto, las deficiencias encontradas fueron las siguientes:

- Espacio libre o de resguardo insuficiente entre las aceras bici y los aparcamientos en línea o en batería. Esta fue la falencia con mayor impacto puesto que, como se señaló anteriormente, esta tipología de carril es la que más se encuentra en el distrito. Esta problemática se encontró en los tramos localizados en calle Músico Ginés, Humanista Furió y de la Fusta.
- Equipamientos públicos o de comercios ubicados cerca de las aceras bici. Similar a la problemática anterior, por tratarse de obstáculos en el entorno de la infraestructura. Esto se presentan en los carriles localizados en Plaza del Actor Enrique Rambal, calle Ramón Llull y Music Ginés.
- Bordillo vegetal abundante que dificulta el paso sobre el carril y reduce el espacio libre en los carriles segregados. Es decir, falta de mantenimiento de la infraestructura. Esta situación se localiza en la acera bici segregada que se encuentra sobre la Avenida los Naranjos.
- Pavimento en mal estado, lo cual, produce cambio en la trayectoria de los usuarios, invasión al carril de sentido opuesto y supone un riesgo si esta situación se presenta en el mismo momento que un encuentro. En la calle Ramón Llull se localiza esta problemática.
- Marcas viales deficientes en las aceras bici por falta de mantenimiento. Principalmente en Carrer del Albat del Tarongers,
- Invasión de peatones a la acera bici por ausencia de espacio peatonal transitable. Esto ocurre específicamente en la Calle del Clariano.
- Presencia vegetal sobre la acera bici localizada en la mediana peatonal de la Avenida Blasco Ibáñez.

7.4 Propuestas de mejora

Con las problemáticas identificadas y localizadas, se proponen un conjunto de actuaciones para mejorar las condiciones actuales de la infraestructura. Estas se subdividen en dos categorías, propuestas para nuevas actuaciones y aquellas para rediseño o mejora de la infraestructura existente.

7.4.1 Nuevas actuaciones

En estas se consideran las recomendaciones plasmadas en el epígrafe 6.4 Conclusiones del análisis, basadas en los resultados del estudio. En estas se incluye:

- Implementación de carriles bici segregados en calzada, protegidos con bordillos discontinuos de poca altura y bolardos, con un ancho mayor a 2 m, sección transversal actual (2 m). Esta actuación puede desarrollarse en la calle Yecla, que actualmente no cuenta con infraestructura ciclista.
- Implementación de carril bici sobre acera, libre de obstáculos cercanos, aparcamientos, equipamientos públicos, de comercios, entre otros. De no ser posible, segregar la acera bici con bordillos vegetales amigables con el entorno peatonal y aumentar el ancho de la sección. Esta medida puede aplicarse en la calle del Explorador Andrés, Calle del Alguer, calle del Serpis, camino del Cabañal. No obstante, pueden requerirse modificaciones adicionales de la vía y aparcamientos para favorecer la infraestructura ciclista.
- Seleccionar un pavimento que no suponga desniveles continuos en el trazado, o levantamiento, rotura de las piezas que lo conforman. Preferiblemente colocar hormigón antes que baldosas o adoquines, para los carriles bici sobre acera en las nuevas actuaciones que se desarrollen.

7.4.2 Rediseño

Estas alternativas corresponden a posibles soluciones de las deficiencias encontradas que pueden mejorarse sin grandes intervenciones de obra. Estas son:

- Realizar mantenimientos periódicos a los bordillos vegetales que protegen las aceras bici, para mantener el espacio de circulación despejado. Igualmente, con los arbustos que se encuentran cercanos a la acera bici en mediana peatonal. Estas actuaciones deben realizarse en la Avenida Blasco Ibáñez y en la Avenida los Naranjos.
- Revisiones periódicas a los carriles bici que presentan pavimentos discontinuos, especialmente aquellos de baldosa, con el fin de identificar a tiempo el deterioro de este y realizar el cambio de material de carpeta correspondiente. Los tramos sugeridos para esta medida son los encontrados en la calle Ramón Llull, la acera bici

en mediana peatonal de la Avenida Blasco Ibáñez, la calle Music Ginés, Humanista Furió y Carrer de la Fusta.

- Mayor regulación de la localización de los equipamientos de comercio de manera que no invadan la infraestructura. Fijación de áreas de despeje, similares a las zonas de servidumbre, en el entorno de los carriles no protegidos. Especialmente a los tramos localizados en la Plaza del Actor Enrique Rambal, calle Ramón Llull y Music Ginés.
- Mantenimiento de las marcas viales de todas las tipologías encontradas en todo el distrito, ya que este es un elemento clave para la seguridad de todos los usuarios. Pero priorizar las actuaciones en aquellas aceras bici sin bordes.
- Aprovechamiento de zonas verdes disponibles de mediana sobre las vías para cambiar el trazado existente de los carriles, donde se cuenta con mayor disponibilidad de espacio, y pueden coexistir peatones y usuarios de VMPS. Estas medidas pueden implementarse en los tramos de la Plaza del Actor Enrique Rambal, calle Ramón Llull y Music Ginés.

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio consistió en la caracterización de las maniobras de encuentro y adelantamiento, entre usuarios de vehículos de movilidad personal, que ocurren durante la circulación en la infraestructura ciclista. La metodología seguida consistió en una evaluación cuantitativa y cualitativa del fenómeno en cuestión mediante el uso de un patinete eléctrico instrumentado, en la ciudad de Valencia (España). Con los resultados obtenidos, se determinan las conclusiones que se describen a continuación.

En primera instancia, con la encuesta realizada a los usuarios para la evaluación cualitativa, se obtuvo una contextualización referente al uso de los VMPs. Con esta información se determinó que estos tipos de vehículos son utilizados principalmente en los entornos urbanos para los viajes de estudio, trabajo u ocio. Mayormente suelen utilizarse para recorrer distancias cortas, de hasta 5 km por día, y con frecuencia de uso a la semana variable. Además, se identificó que predomina el uso de bicicletas (52%) frente al de patinetes eléctricos (8%), lo que estuvo acorde a los resultados obtenidos durante la toma de datos, donde se observó una ratio aproximada 7:3 entre bicis y patinetes eléctricos.

En segundo lugar, con respecto a la infraestructura ciclista del ámbito de estudio, donde también tienen permitido circular los patinetes eléctricos, se encontraron distintos tipos de carriles. La variabilidad en la infraestructura se presenta por muchos factores, como lo son la ubicación sobre la sección transversal de la vía, la presencia de bordes, los tipos de separadores, obstáculos, direccionalidad, ancho de carril y tipo de pavimento. Esta situación se deriva del aumento reciente de la implementación de infraestructura dedicada a los VMPs, que aún sigue en fase de desarrollo y que debe adaptarse al entorno existente.

Como resultado de esta variabilidad, fue posible comparar el comportamiento de los usuarios en las maniobras de adelantamiento y encuentro en distintas tipologías de infraestructura ciclista urbana. Específicamente, se recolectaron datos en las siguientes cinco tipologías, que representan la mayoría de las características comunes encontradas en los itinerarios actuales:

- Acera bici sin separadores físicos
- Carril bici segregado sobre acera con bordillo vegetal
- Carril bici segregado sobre calzada con bordillos discontinuos como elemento de protección
- Carril bici en mediana contiguo a tráfico motorizado
- Carril bici en mediana peatonal

Otro aspecto relevante fue la metodología implementada para la recolección naturalística de datos, que consistió en un patinete eléctrico instrumentado con tecnologías portables (Placa Raspberry Pi y sensores ultrasónicos). Este sistema de sensorización móvil de bajo coste presentó una programación sencilla, precisión en las mediciones, buena capacidad de

almacenamiento de datos y una portabilidad adecuada gracias al tamaño reducido de los dispositivos que lo conforman.

Finalizada la toma de datos, se identificó que la presencia de dicho vehículo instrumentado no influyó en el comportamiento de los usuarios de la infraestructura ciclista. Esta comprobación se obtuvo por medio de los videos que registraron todo el proceso, donde se pudo observar que los conductores no presentaron reacciones significativas o cambios en la conducción ante el paso del patinete eléctrico con todo el sistema de sensorización.

En total, en la recolección de datos se contabilizaron 779 maniobras, donde 728 fueron encuentros y únicamente 51 fueron adelantamientos. Este registro se deriva principalmente del hecho que el encuentro es una maniobra inevitable, mientras que el adelantamiento es voluntario y su ocurrencia depende de factores como la velocidad, el flujo vehicular y la decisión del conductor. Como la muestra resultó muy pequeña, no se realizó un análisis en detalle de este tipo de maniobra, por lo que no pudo comprobarse la **hipótesis H4** del trabajo.

En relación a los vehículos contabilizados, se identificó que para todas las tipologías de carril bici del estudio y ambas maniobras predominó la interacción con bicicletas, coincidiendo con los resultados de la encuesta donde el reparto modal fue mayor para este tipo de vehículo. Del total de maniobras registradas, 536 fueron interacciones con bicicletas (privada y pública) y 243 con patinetes eléctricos, lo que lleva a una representación del 70% y 30%, respectivamente.

Específicamente del análisis de la maniobra de encuentro, se identificó que las muestras de datos obtenidos de bicicletas y patinetes, en su mayoría, no pueden considerarse como normalmente distribuidas con un nivel de confianza del 95%. Por esta razón, para poder hacer comparaciones entre estas, se recurrió a la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis con el fin de identificar si existía diferencia estadística significativa entre las observaciones obtenidas para cada tipo de carril bici.

De este análisis se dedujo que existían diferencias estadísticamente significativas entre aquellos carriles que disponen de bordillos físicos y aquellos que carecen de este tipo de elementos. Concretamente, la distancia lateral que guardaban los usuarios era mayor en aquellos carriles donde no se disponía de bordillo físico. En este sentido, cabe destacar que el ancho de los carriles bici donde se desarrollaron las tomas de datos eran similares, en algunos casos siendo más amplios aquellos que disponían de bordillo físico. Estos resultados se obtuvieron para ambos tipos de vehículos –bicicletas y patinetes eléctricos–.

A partir de esto, es posible concluir que los bordillos son el motivo por el cual se produce el cambio en el comportamiento de los usuarios, puesto que estos reducen el espacio libre lateral para ejecutar la maniobra en cuestión.

Por lo tanto, la **hipótesis H1** del estudio, donde se planteó que la configuración de la infraestructura ciclista influye en el comportamiento de usuarios de VMPs durante la circulación, en relación a la distancia a la que ocurren las maniobras de adelantamiento y encuentro, es verificada. En términos medios, la distancia que guardan los usuarios durante la circulación por aquellos carriles con bordillo físico es aproximadamente 25 cm inferior a la distancia que guardan en carriles sin la existencia de este tipo de elemento.

Sin embargo, a pesar de que el factor común de reducción de la distancia sean los bordillos físicos, la tipología de estos no genera una variación adicional en el comportamiento de los usuarios. Independientemente de que el borde fuese vegetal o rígido discontinuo la prueba hipótesis señaló que estadísticamente las muestras obtenidas no son diferentes con un nivel de confianza del 95%, para ambos tipos de vehículos. Así, se rechaza la **hipótesis H2** planteada.

Por otro lado, al realizar la comparación de los resultados por tipo de vehículo se obtuvo que en ninguna de las cinco tipologías de infraestructura ciclista estudiada existe una diferencia estadísticamente significativa entre las distancias que guardan los usuarios de la bicicleta y los usuarios de patinetes eléctricos, con un nivel de confianza del 95%. En otras palabras, el tipo de vehículo no influye en el comportamiento que tienen los usuarios sobre la infraestructura. Con esta conclusión, se rechaza la **hipótesis H3** planteada, puesto que la distancia lateral es independientemente del tipo de VMPs. No obstante, en cuatro de los cinco carriles bici estudiados, la distancia media que guardan los usuarios del patinete es ligeramente superior a la que guardan los usuarios de la bicicleta, lo que podría estar asociado al menor tamaño del patinete y la disposición del usuario en este tipo de vehículo.

Por último, el análisis cualitativo de la percepción de riesgo de los usuarios frente a la ocurrencia de las maniobras en cuestión –encuentro y adelantamiento– arrojó que los tipos de carriles en los cuales los conductores de VMPs perciben menor peligro son aquellos ubicados en acera sin separadores físicos, confirmándose de esta forma la **hipótesis H5**, siendo esta tipología la que mayor libertad ofrece al usuario en cuanto a lo que a la circulación se refiere.

Sin embargo, contrario a la **hipótesis H6**, en los carriles bici segregados (en acera o calzada, independientemente del tipo de borde que presenten) el riesgo percibido es bastante bajo, para ambos tipos de maniobras.

Aquellas tipologías donde los usuarios perciben mayor riesgo son las aceras bici próximas a aparcamientos de cualquier disposición (en línea o en batería), que no cuenten con ningún elemento de resguardo. Además, los resultados indican que la presencia de obstáculos, en general, influye en la seguridad de los conductores. Todo ello verifica la **hipótesis H7** en la que se estableció que la presencia de obstáculos cercanos a la infraestructura incrementa la percepción de riesgo, disminuyendo la seguridad del usuario.

Este punto de vista se mantiene para ambas maniobras, es decir, el factor determinante ante el riesgo percibido no es el tipo de interacción que se presenta en la infraestructura, sino las características de esta por sí misma. Con esto, se rechaza la **hipótesis H8** del estudio, ya que se planteó que la percepción de riesgo de los usuarios era mayor durante la maniobra de adelantamiento.

Finalmente, considerando en conjunto todos los resultados obtenidos de este, se concluye que la recomendación principal para la implementación de nueva infraestructura ciclista es aumentar el ancho de la sección transversal de aquellos que cuenten con bordillos delimitantes. Ubicar los nuevos carriles alejados de obstáculos permanentes como aparcamientos y equipamientos públicos, y colocar pavimentos sin desniveles que generen cambios de trayectoria durante la circulación.

Mientras que, las actuaciones sugeridas para mejorar las condiciones de la infraestructura existente, se basaron principalmente en obras de mantenimiento periódico de los bordes, pavimentos, marcas viales y cualquier otro elemento de la configuración actual, y en el aprovechamiento de espacios disponibles para cambios de trazado.

Para futura investigación, se recomienda registrar mayor número de maniobras de patinetes eléctricos con el fin de analizar si existe o no variabilidad en la circulación en función del tipo de vehículo. En el presente estudio no se presentó diferencia significativa, pero teniendo en cuenta el número de datos, realizar el análisis con una muestra mayor podría presentar un cambio o, sencillamente, contar con más criterios estadísticos para fijar la conclusión a la que se ha llegado.

Asimismo, se plantea la necesidad de recopilar más registros de maniobras de adelantamiento. Para ellos se sugiere tomar datos en horas y temporadas donde haya mayor flujo vehicular, puesto que en este caso la investigación se desarrolló en una época considerada valle, a pesar de que se recolectaron los datos en las horas punta.

En general, realizar una toma de datos cuando se presente mayor flujo vehicular contribuiría a obtener mayor número de registros con los que se podría realizar otro tipo de análisis. Además, se propone ampliar el tipo de tipologías de carriles bici estudiadas para mayor cobertura, e incluso considerar otros modos de transporte que confluyen en la infraestructura (si continúan en aumento). Igualmente, el estudio puede replicarse, pero instrumentando una bicicleta, y observar la variación del comportamiento de los usuarios frente a otro tipo de vehículo.

La instrumentación utilizada en este estudio se recomienda para futuras investigaciones puesto que son dispositivos de alta disponibilidad de en el mercado y ofrecen una relación costo beneficio significativa. Además, la placa Raspberry Pi puede controlar otro tipo de sensores para medir variables distintas relevantes en el ámbito de estudio como, por ejemplo, las vibraciones percibidas.

En conclusión, se debe continuar con las evaluaciones de la infraestructura ciclista actual, analizar el comportamiento de los usuarios, identificar necesidades y falencias, con el fin de construir de mejores obras, con las cuales se brinden las condiciones óptimas orientadas a la seguridad del uso de los VMPs, favoreciendo así el crecimiento de la micromovilidad y a su vez, el desarrollo sostenible de la ciudad.

9. REFERENCIAS

- AASHTO. (2012). *Guide for the Development of Bicycle Facilities 2012 Fourth edition* (p. 201). American Association of State Highway and transportation Officials (AASHTO).
- Chapman, J., & Noyce, D. (2012). Observations of driver behavior during overtaking of bicycles on rural roads. *Transportation Research Record*, 2321, 38-45. <https://doi.org/10.3141/2321-06>
- CROW. (2011). *Manual de Diseño para el Tráfico de Bicicletas* (p. 392). www.crow.nl
- DGT. (2000). *Manual de recomendaciones de Diseño, Construcción, Infraestructura, señalización, Balizamiento, Conservación y Mantenimiento del carril Bici* (p. 58). <https://ciudadanabicicleta.files.wordpress.com/2012/01/manual-dgt-2000-disec3b1o.pdf>
- Garcia, A., Gomez, F. A., Llorca, C., & Angel-Domenech, A. (2015). Effect of width and boundary conditions on meeting maneuvers on two-way separated cycle tracks. *Accident Analysis and Prevention*, 78, 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.02.019>
- Garmin Ltd. (s. f.). *VIRB® Elite*. Recuperado 7 de mayo de 2021, de <https://buy.garmin.com/es-ES/ES/p/119594/pn/010-01088-11>
- Ho, C.-H., Snyder, M., & Zhang, D. (2020). Application of Vehicle-Based Sensing Technology in Monitoring Vibration Response of Pavement Conditions. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(3), 04020053. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000205>
- Jensen Andresen, T., Hansen, W., Kjaergaard, E., Krag, T., Larsen, J., Lund, B. & Thost, P, S. (2012). Collection of cycle concepts. *Cycling Embassy of Denmark*, 187.
- Llorca, C., Angel-Domenech, A., Agustin-Gomez, F., & Garcia, A. (2017). Motor vehicles overtaking cyclists on two-lane rural roads: Analysis on speed and lateral clearance. *Safety Science*, 92, 302-310. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.11.005>
- Love, D. C., Breaud, A., Burns, S., Margulies, J., Romano, M., & Lawrence, R. (2012). Is the three-foot bicycle passing law working in Baltimore, Maryland? *Accident Analysis and Prevention*, 48, 451-456. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.03.002>
- Loyola Samraj, S., Vishwanath, A., Nagelli, S. S., Prabhu, E., & Tamilarasan, N. (2020). Low-cost data logging and telemetry system for All-Terrain Vehicle performance analysis. *Proceedings of the 2nd International Conference on Inventive Research in Computing Applications, ICIRCA 2020*, 321-325. <https://doi.org/10.1109/ICIRCA48905.2020.9182822>
- Ma, Q., Yang, H., Mayhue, A., Sun, Y., Huang, Z., & Ma, Y. (2021). E-Scooter safety: The riding risk analysis based on mobile sensing data. *Accident Analysis and Prevention*, September 2020, 12. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105954>
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). *Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas* (p. 234). <http://www.despacio.org/portfolio/guia-de-ciclo-infraestructura-de-colombia/>
- Ministerio del Interior. (2015). Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial
- Ministerio del Interior. (2015). Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30

- de octubre, por e. En *Boletín Oficial del Estado* (pp. 103167-103230).
- Municipalidad de Lima. (2017). *Manual de Normas Técnicas para la Construcción de Ciclovías y Guía De Circulación de Bicicletas, 2017*.
- Oeschger, G., Carroll, P., & Caulfield, B. (2020). Micromobility and public transport integration: The current state of knowledge. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 89(November). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102628>
- Via Strada Transport Planning and Design. (2019). *New Zealand Cycle Trail Design Guide. 2019*(August).
- Walker, I. (2007). Drivers overtaking bicyclists: Objective data on the effects of riding position, helmet use, vehicle type and apparent gender. *Accident Analysis and Prevention*, 39(2), 417-425. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.08.010>
- Xiaomi. (2020). *Mi Electric Scooter 1S*. <https://www.mi.com/es/mi-electric-scooter-1S/>

ALEJANDRA SOFÍA FONSECA CABRERA
06/09/2021

10. ANEXOS

Adjuntos al presente documento.

Anexo. Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Relación del TFM “Caracterización de la maniobra de adelantamiento y el comportamiento frente al tráfico opuesto de los usuarios de vehículos de movilidad personal mediante el uso de un patinete eléctrico instrumentado con tecnología Raspberry Pi. Aplicación práctica en el distrito Algirós de la ciudad de Valencia” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

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

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.

Este objetivo se deriva de la situación mundial actual donde la rápida urbanización ha causado que las infraestructuras y servicios sean inadecuados o estén sobrecargados, las metas de busca lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. Este objetivo se encuentra directamente relacionado con el presente TFM, cuya visión global es favorecer la micro movilidad como alternativa sostenible para mitigar los efectos causados por el transporte en el entorno urbano. Las recomendaciones se enfocan a lograr que las ciudades ofrezcan vías adecuadas y aptas para circulación de modos mas amigables con el medio ambiente como lo son las bicicletas, patinetes y demás, de manera que se reduzcan los viajes en vehículos particulares y disminuya la congestión de tráfico mejorando así la calidad de vida de los habitantes.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.

Este objetivo se enfoca en el desarrollo de infraestructuras fiables, sostenibles y de calidad, que favorezcan el bienestar humano, brindad acceso asequible a todos y su vez busca garantizar el acceso a las tecnologías de la información. Este se relaciona directamente con el presente TFM puesto que uno de los principales temas abordados en este fueron las características de la infraestructura ciclista, determinar el estado, los requisitos y futuras recomendaciones para mejorar estas vías con el fin de brindar mejores condiciones a los usuarios. A su vez, el desarrollo de una metodología de tecnologías portátiles de bajo costo, es también una herramienta que se asocia a la innovación para el futuro estudio de otras características de las obras de ingeniería.

ODS 13. Acción por el clima.

Este objetivo busca adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, considerando principalmente los niveles de dióxido de carbono y emisiones de gases de efecto invernadero. Como se mencionó en toda la fase de introducción del TFM, el transporte es uno de los principales contribuyentes a la contaminación ambiental, y la motivación de favorecer el uso de los nuevos modos sostenibles que se han investigado en este trabajo, es llegar a esta meta última de disminuir las emisiones derivadas del sector.