



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Caracterización de la comodidad del pavimento para los usuarios de vehículos de movilidad personal mediante el uso de un patinete eléctrico instrumentado con tecnología Raspberry Pi. Aplicación práctica en el distrito Pla del Real de la ciudad de Valencia.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Just Martínez, Víctor

Tutor/a: Pérez Zuriaga, Ana María

Cotutor/a: Llopis Castelló, David

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

AUTOR/A: Just Martínez, Víctor

Tutor/a: Pérez Zuriaga, Ana María

Cotutor/a: Llopis Castelló, David

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>2</b>
2.1. ESTADO ACTUAL DE LA MICROMOVILIDAD .....	2
2.2. VIBRACIONES DEL PAVIMENTO.....	2
<b>3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS .....</b>	<b>6</b>
3.1. OBJETIVOS .....	6
3.2. HIPÓTESIS DE PARTIDA.....	7
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>8</b>
4.1. PLANTEAMIENTO.....	8
4.2. INSTRUMENTALIZACIÓN .....	9
4.2.1. Programar.....	9
4.2.2. Vehículo.....	10
4.2.3. Montaje.....	10
4.2.4. Pruebas .....	11
4.3. ENCUESTA .....	12
4.4. TOMA DE DATOS .....	13
4.4.1. Características de la infraestructura.....	13
4.4.2. Tramos de estudio.....	13
4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	14
4.5.1. Reducción y estandarización.....	14
4.5.2. Análisis .....	14
<b>5. DESARROLLO .....</b>	<b>16</b>
5.1. INSTRUMENTACIÓN.....	16
5.1.1. Placa Raspberry Pi.....	16
5.1.2. Cámara VIRB .....	18
5.1.3. Sensor MinIMU-9 v5.....	19
5.1.4. Vehículo instrumentado.....	23
5.2. SELECCIÓN DE TRAMOS DE ESTUDIO.....	26
5.3. TOMA DE DATOS .....	26
5.3.1. Datos de campo .....	26
5.3.2. Encuesta.....	26
5.4. REDUCCIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE DATOS .....	27
5.4.1. Datos de campo .....	27
5.4.2. Encuesta.....	32
<b>6. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.....</b>	<b>33</b>
6.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	33
6.1.1. Comodidad del pavimento.....	33
6.1.2. Impacto de los elementos singulares .....	52
6.2. ANÁLISIS DE LA ENCUESTA.....	57
6.2.1. Caracterización de las personas encuestadas y su uso de los VMPs.....	57
6.2.2. Análisis de la percepción de la comodidad según el tipo de pavimento...	60
6.2.3. Análisis de la percepción de los elementos singulares.....	64
6.3. COMPARACIÓN ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y ENCUESTA.....	65
6.3.1. Comodidad del pavimento.....	65
6.3.2. Elementos singulares .....	66
<b>7. ANÁLISIS DE LA INFRAESTRUCTURA CICLISTA DE PLA DEL REAL.....</b>	<b>67</b>
7.1. INFRAESTRUCTURA CICLISTA EXISTENTE .....	67



<b>8. PROPUESTA DE MEJORAS PARA EL PLA DEL REAL .....</b>	<b>69</b>
8.1. RELACIÓN VALORADA .....	72
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>76</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases para el desarrollo del trabajo y pasos a seguir .....	9
Figura 2. Esquema de sensores .....	11
Figura 3. Diagrama de fases.....	12
Figura 4. Patinete Xiaomi Mi Electric Scooter 1S. [Fuente: Xiaomi] .....	16
Figura 5. Esquema de Raspberry Pi 4B y pines GPI. [Fuente: Raspberry Pi] .....	17
Figura 6. Escritorio de la Raspberry Pi.....	18
Figura 7. Cámara VIRB colocada en el manillar del vehículo instrumentado. ....	19
Figura 8. MiniIMU-9 v5. [Fuente: Web de Pololu].....	19
Figura 9. Calibrado del giróscopo .....	21
Figura 10. Foto de ejemplo de posición de calibrado .....	21
Figura 11. Esquema de posición de los ejes del sensor para el calibrado.....	22
Figura 12. Calibrado del acelerómetro .....	23
Figura 13. Patinete instrumentado .....	25
Figura 14. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en ALF-CIU .....	28
Figura 15. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en ALF-COL.....	28
Figura 16. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en ALF-RN.....	28
Figura 17. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en H-UPV.....	28
Figura 18. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en H-CAV .....	28
Figura 19. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en H-BLA .....	29
Figura 20. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en B-ALA.....	29
Figura 21. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en B-SAL.....	29
Figura 22. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en B-MAC .....	29
Figura 23. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en ADTR-UV .....	30
Figura 24. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en B-ALA.....	30
Figura 25. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en B-SAL.....	30
Figura 26. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en B-MAC .....	30
Figura 27. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h de ASF-CIU.....	31
Figura 28. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h de ASF-COL .....	31
Figura 29. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h de ASF-RN.....	31
Figura 30. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en H-UPV.....	31
Figura 31. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en H-CAV.....	31
Figura 32. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en H-BLA .....	32
Figura 33. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en ADTR-UV .....	32
Figura 34. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en ASF-CIU .....	34
Figura 35. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en ASF-COL.....	34
Figura 36. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en ASF--RN.....	35
Figura 37. Comparación de las secciones de asfalto a 20 km/h.....	36
Figura 38. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en H-UPV .....	36
Figura 39. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en H-CAV .....	37
Figura 40. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en H-BLA .....	38
Figura 41. Comparación de las secciones de hormigón a 20 km/h. ....	39
Figura 42. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en B-ALA.....	40
Figura 43. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en B-SAL.....	40



Figura 44. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en B-MAC .....	41
Figura 45. Comparación de las secciones de baldosas a 20 km/h .....	42
Figura 46. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en ADTR-UV .....	42
Figura 47. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en ASF-CIU .....	43
Figura 48. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en ASF-COL .....	44
Figura 49. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en ASF-RN .....	44
Figura 50. Comparación de las secciones de asfalto a 15 km/h] .....	45
Figura 51. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en H-UPV .....	46
Figura 52. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en H-CAV .....	46
Figura 53. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en H-BLA .....	47
Figura 54. Comparación de las secciones de hormigón a 15 km/h .....	47
Figura 55. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en B-ALA .....	48
Figura 56. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en B-SAL .....	49
Figura 57. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en B-MAC .....	49
Figura 58. Comparación de las secciones de baldosas a 15 km/h .....	50
Figura 59. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en ADTR-UV .....	51
Figura 60. Comparación de las secciones y las distintas velocidades .....	51
Figura 61. Comparación de los RMS de cada configuración a distinta velocidad .....	52
Figura 62. Elementos singulares en la 1ª pasada de ASF-CIU a 20 km/h .....	54
Figura 63. Elementos singulares en la 3ª pasada de ASF-CIU a 20 km/h .....	54
Figura 64. Elementos singulares en la 2ª pasada de ASF-CIU a 15 km/h .....	54
Figura 65. Elementos singulares en la 3ª pasada de ASF-CIU a 15 km/ .....	55
Figura 66. Elementos singulares en la 2ª pasada de H-UPV a 20 km/h. ....	55
Figura 67. Elementos singulares en la 1ª pasada de H-UPV a 15 km/h. ....	55
Figura 68. Elementos singulares en la 3ª pasada de B-SAL a 20 km/h .....	56
Figura 69. Elementos singulares en la 2ª pasada de B-MAC a 15 km/h .....	56
Figura 70. Elementos singulares en la 1ª pasada de ADTR-UV a 20 km/h .....	57
Figura 71. Elementos singulares en la 2ª pasada de ADTR-UV a 15 km/h. ....	57
Figura 72. Distribución de las respuestas por sexo .....	58
Figura 73. Distribución de las respuestas por identidad de género .....	58
Figura 74. Histograma de frecuencia de las edades de las personas encuestada .....	59
Figura 75. Método de transporte más habitual .....	59
Figura 76. Distancia media recorrida a lo largo de una semana .....	59
Figura 77. Motivos de los desplazamientos con VMP .....	60
Figura 78. Comparación gráfica de las respuestas para cada tipo de pavimento .....	61
Figura 79. Pavimento asfáltico .....	62
Figura 80. Pavimento asfáltico por sexo .....	62
Figura 81. Pavimento asfáltico por motivo de desplazamiento .....	62
Figura 82. Pavimento de hormigón .....	62
Figura 83. Pavimento de hormigón por sexo .....	62
Figura 84. Pavimento de hormigón por motivo de desplazamiento .....	62
Figura 85. Pavimento de baldosas cuadrados .....	63
Figura 86. Pavimento de baldosas cuadradas por sexo .....	63
Figura 87. Pavimento de baldosas cuadradas por motivo de viaje .....	63
Figura 88. Pavimento de adoquines transversales .....	63
Figura 89. Pavimento de adoquines transversales por sexo .....	63
Figura 90. Pavimento de adoquines transversales por motivo de viaje .....	63
Figura 91. Pavimento de adoquines longitudinales .....	64
Figura 92. Pavimento de adoquines longitudinales por sexo .....	64
Figura 93. Pavimento de adoquines longitudinales por motivo de viaje .....	64
Figura 94. Percepción de la comodidad de los elementos singulares .....	64



Figura 95. Distribución de la infraestructura existente por tipología de pavimento .....	67
Figura 96. Estado del pavimento de la infraestructura ciclista de Pla del Real .....	68
Figura 97. Nivel de comodidad de la infraestructura ciclista de Pla del Real .....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Objetivos específicos del trabajo y tareas asociadas .....	6
Tabla 2. Variables a estudiar .....	8
Tabla 3. Tamaño muestral mínimo para una distribución normal .....	14
Tabla 4. Medida teórica en las diferentes posiciones del sensor para la calibración del sensor.....	22
Tabla 5. Tramos de estudio. ....	26
Tabla 6. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en ASF-CIU.....	33
Tabla 7. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en ASF-COL .....	34
Tabla 8. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en ASF-RN.....	35
Tabla 9. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en asfalto. ....	35
Tabla 10. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en H-UPV.....	36
Tabla 11. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en H-CAV .....	37
Tabla 12. Análisis ANOVA de la sección H-CAV a 20 km/h .....	37
Tabla 13. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en H-BLA .....	38
Tabla 14. Análisis ANOVA de la sección H-BLA a 20 km/h.....	38
Tabla 15. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en hormigón .....	39
Tabla 16. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en B-ALA.....	39
Tabla 17. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en B-SAL.....	40
Tabla 18. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en B-MAC .....	41
Tabla 19. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en baldosas.....	41
Tabla 20. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en ADTR-UV .....	42
Tabla 21. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en ASF-CIU.....	43
Tabla 22. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en ASF-COL.....	43
Tabla 23. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en ASF-RN.....	44
Tabla 24. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en asfalto .....	45
Tabla 25. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en H-UPV .....	45
Tabla 26. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en H-CAV .....	46
Tabla 27. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en H-BLA .....	46
Tabla 28. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en hormigón .....	47
Tabla 29. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en B-ALA.....	48
Tabla 30. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en B-SAL.....	48
Tabla 31. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en B-MAC .....	49
Tabla 32. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en baldosas.....	50
Tabla 33. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en ADTR-UV .....	50
Tabla 34. Rango de vibraciones aceptables para cada pavimento.....	52
Tabla 35. Resumen del análisis de las respuestas de comodidad de pavimento .....	61
Tabla 36. Análisis de los diferentes puntos de vista.....	61
Tabla 37. Resumen de los estadísticos de las respuestas de elementos singulares...	65
Tabla 38. Propuesta de clasificación de la comodidad en función de las vibraciones .	65
Tabla 39. Relación de precios unitarios de las propuestas. [Fuente: IVE] .....	69
Tabla 40. Precios estimados de las actuaciones propuestas en Pla del Real .....	70
Tabla 41. Presupuesto de Ejecución Material. ....	72



## RESUMEN

El transporte es uno de los sectores que más contribuye en la contaminación ambiental y a la crisis climática. Debido a esto, las grandes urbes alrededor del mundo han empezado a cambiar el enfoque que se le da a la movilidad, dando el paso del paradigma tradicional (en el que se prioriza el coche y los vehículos privados motorizados) a uno más sostenible en el que se apuesta por potenciar el transporte público y el uso de vehículos de movilidad personal (VMP). La micromovilidad se encarga precisamente de estos (patinetes, bicicletas...), intentando reducir la cantidad de vehículos con motores de combustión presentes en las calles. Además, también son una solución a los problemas de primera y última milla en el transporte público. Los ingenieros y planificadores urbanos centran sus esfuerzos en proveer la infraestructura necesaria para garantizar una circulación cómoda y segura para estos vehículos. Sin embargo, dado el reciente y rápido auge de los VMP y la constante evolución y adaptación de los elementos existentes, no se han llevado a cabo muchas evaluaciones de adecuación de las medidas aplicadas. Uno de los aspectos a estudiar es la comodidad de los usuarios, que puede medirse a partir de las vibraciones transmitidas por la superficie de rodadura. Por ello, este Trabajo Final de Máster estudia las aceleraciones verticales que la infraestructura transmite a los usuarios de VMP mediante el uso de un patinete eléctrico instrumentado con los elementos necesarios que permite registrar dichas variables físicas en distintos tipos de pavimento. Al mismo tiempo, se realiza una valoración cualitativa de la comodidad con una encuesta dirigida a los usuarios de la infraestructura ciclista en toda España. Los resultados obtenidos muestran que los usuarios prefieren los pavimentos asfálticos y de hormigón frente a otros pavimentos conformados por elementos individuales (baldosas o adoquines). Esta preferencia queda respaldada por lo registrado en campo, siendo el pavimento asfáltico el que menos vibraciones genera entre los pavimentos estudiados. Tras analizar la infraestructura existente en el distrito Pla del Real, se propone priorizar la actuación sobre aquellos carriles con una categoría de comodidad más baja, cambiando el pavimento a uno de asfalto, mejorando así la experiencia de los usuarios, así como su seguridad.

*Palabras clave: Micromovilidad, patinete eléctrico, carril bici, comodidad, confort, vibraciones, pavimento, aceleraciones verticales, patinete instrumentalizado.*



## RESUM

El transport és un dels sectors que més contribueixen en la contaminació ambiental i a la crisi climàtica. Per això, les grans ciutats al voltant del món han escomençat a canviar la perspectiva en la que es tracta la mobilitat, passant del paradigma tradicional (en què es prioritza el cotxe i els vehicles privats a motor) a un més sostenible en el que s'aposta per potenciar el transport públic i l'ús de vehicles de mobilitat personal (VMP). La micromobilitat s'encarrega precisament d'estos (patinets, bicicletes...), intentant reduir la quantitat de vehicles amb motors de combustió presents en els carrers. A més a més, també són una solució als problemes de primera i última milla en el transport públic. Els enginyers i planificadors urbans centren els seus esforços en proveir de la infraestructura necessària per a garantir una circulació còmoda i segura per a aquestos vehicles. No obstant, donat la recent i sobtada creixuda dels VMP i la continua evolució i adaptació dels elements existents, no s'ha realitzat gairebé cap avaluació de l'adequació de les mesures aplicades. Un dels aspectes a estudiar es la comoditat dels usuaris, que pot mesurar-se a partir de les vibracions transmeses per la superfície de rodament. Per això, aquest Treball Final de Màster estudia les acceleracions verticals que la infraestructura ciclista transmet als usuaris de VMP mitjançant l'ús d'un patinet elèctric instrumentat amb els elements necessaris que permeten enregistrar les esmenades variables físiques en diferents tipus de paviments, alhora que es realitzen valoracions qualitatives de la comoditat amb una enquesta dirigida als usuaris de la infraestructura ciclista en tota Espanya. Els resultats obtinguts mostren que els usuaris prefereixen els paviments asfàltics i de formigó, mentre que els paviments de rajoles i empedrats cauen al final de la classificació. Aquesta preferència la recolza també les dades de camp, sent el paviment asfàltic el que menys vibracions transmet entre els paviments estudiats. Per altra banda, el paviment de formigó i de rajoles generen unes vibracions molt similars, mentre que l'empedrat en posició transversal és el que més acceleracions transmet. Una vegada analitzada la infraestructura existent al districte Pla del Real, es recomana prioritzar les vies on el grau de comoditat és més baix, suggerint un canvi del paviment per un d'asfalt, el qual millorarà l'experiència dels usuaris, així com la seua seguretat.

*Paraules clau: Micromobilitat, patinet elèctric, carril bici, comoditat, confort, vibracions, paviment asfàltic, paviment, acceleracions verticals, patinet instrumentalitzat.*



## ABSTRACT

Transportation is one of the most contaminant sectors nowadays, contributing to climate crisis. As a response to this, the way mobility is treated has changed worldwide, moving from the traditional way (where cars and private vehicles were the priority) to a more sustainable one that opts to enhance public transport and personal mobility vehicles (PMV). Micromobility is in charge to study the latter (bicycles, electric scooters...), in an attempt to reduce the number of cars and motorbikes on the streets. Furthermore, it also a solution to first and last mile transportation problems. In order to attain this, urban planners and engineers have been focusing on providing the necessary elements to guarantee a safe and comfortable ride for these vehicles. However, due to the sudden growth of this transportation mode, the evolution and adaptation of the infrastructure, there are almost no assessments on the existing measures to check whether they are adequate. One of the variables to study is the riding comfort of users, which can be measured through the vibrations transmitted by the pavement to the users. Thus, this Master's Thesis aims to study the vertical accelerations transmitted by the infrastructure using an electric scooter equipped with the necessary elements to record the data on different pavement configurations. Parallel to this, a poll was made to have a qualitative assessment on riding comfort directly from the users. As a result, the asphaltic pavement was the better assessed, followed by concrete pavement. This choice is also validated by the data gathered by the sensor, where asphalt transmits much less vibrations than other pavements, although concrete does not differentiate that much from tiling, with transversally oriented cobblestone is the one that transmits the most vibrations, out of the studied pavements. Therefore, after analyzing the existing infrastructure on the Valencian district *Pla del Real*, it is recommended to change the pavement of the most uncomfortable bike-lanes, according to the classification proposed on this text, to an asphalt pavement, improving both users' experience and safety.

*Keywords: Micromobility, e-scooter, electric scooter, cycling infrastructure, vibrations, pavement, comfort, asphaltic pavement, vertical accelerations, instrumented e-scooter.*



## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento se plantea como Trabajo Final de Máster del alumno Víctor Just Martínez con el fin de obtener el título de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universitat Politècnica de València (UPV). En él se pretende llevar a cabo un estudio de las vibraciones experimentadas al utilizar la infraestructura ciclista de València, desarrollando así una clasificación de la comodidad para su posterior aplicación en el distrito de El Pla del Real.

Este estudio se desarrolla dentro del marco del proyecto de investigación “esMicromobility: Evaluación de la Seguridad Vial de la Micromovilidad”, con referencia PID2019-111744RB-I00, financiado por la Agencia Estatal de Investigación – Ministerio de Ciencia e Innovación, en el que participa el Grupo de Investigación de Ingeniería de Carreteras (GIIC) del Instituto de Transporte y Territorio (ITT) de la UPV.

Para poder seguir el contenido de este trabajo, es necesario conocer la definición de los vehículos de movilidad personal (VMP), que según el RD 970/2020 (BOE.Es - BOE-A-2020-13969 Real Decreto 970/2020, de 10 de Noviembre, Por El Que Se Modifican El Reglamento General de Circulación, Aprobado Por Real Decreto 1428/2003, de 21 de Noviembre y El Reglamento General de Vehículos, Aprobado Por Real Decreto 2822/1998, de 23 de Diciembre, En Materia de Medidas Urbanas de Tráfico., n.d.), , se definen como aquellos vehículos monoplaza, de una o más ruedas y propulsados únicamente por motores eléctricos (baterías de hasta 100 VCC que proporcionen al vehículo una velocidad máxima de entre 6 y 25 km/h, con una potencia limitada) . Quedan fuera de esta clasificación los juguetes, los vehículos para personas con movilidad reducida y aquellos tipificados como “L” en el Reglamento 168/2013 de la UE.

Sin embargo, para simplificar y garantizar una mayor claridad del texto, cuando se hable de VMP a lo largo del documento se entenderá que este término también hace referencia a las bicicletas. Este conjunto de vehículos forma, además, la micromovilidad, facilitando la multimodalidad (combinándose con el transporte público).

Desde la ingeniería civil se ha apoyado a la micromovilidad dotando de infraestructura específica a los municipios. Sin embargo, dicha infraestructura solía ser exclusiva para las bicicletas, pero, dada la reciente popularidad del resto de VMP, es necesario analizar la infraestructura existente, evaluando la adecuación para la integración cómoda y segura a la circulación de estos nuevos modos de transporte.

Es por todo lo anterior que se ha elegido esta temática, dada la importancia que tiene en el desarrollo de ciudades y en la estrecha relación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la agenda 2030, en particular el objetivo 11 de ciudades sostenibles.

El documento consta de una revisión bibliográfica de investigaciones similares que se han llevado a cabo en los últimos años, seguido por el planteamiento de las hipótesis de partida y los objetivos a alcanzar. A continuación, se presentará la metodología y una descripción de las diferentes etapas del proyecto (programación, instrumentación, elección del ámbito de actuación y toma de datos) para terminar con el análisis de los datos recogidos, el análisis de la infraestructura ciclista del distrito Pla del Real de València y recomendaciones para su mejora desde la perspectiva de la comodidad derivadas de las conclusiones de la investigación.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. ESTADO ACTUAL DE LA MICROMOVILIDAD

El transporte siempre ha sido uno de los factores que más impacto negativo tienen sobre el medio ambiente, y debido a la crisis climática en la que vivimos actualmente se está intentando orientar todas las actividades sociales y económicas para que sean más sostenibles. Esto aplica también en el sector de la movilidad, ya que los vehículos motorizados acarrear muchos efectos negativos. De hecho, muchas ciudades alrededor del mundo están lidiando con dichos efectos (Oeschger et al., 2020) y sus gobiernos intentan cambiar el enfoque de la movilidad urbana, intentando dar el paso hacia un paradigma más sostenible, en el que el coche no sea el principal medio de transporte en zona urbana, sino que en su lugar lo sean los VMP y el transporte público.

Aquí es donde entra la micromovilidad, ya que se está convirtiendo en uno de los ejes principales de la nueva movilidad urbana como alternativa sostenible real a la movilidad tradicional. Los VMP traen asociados un gran número de beneficios indiscutibles, entre los cuales se incluyen la disminución de emisiones, del tiempo de recorrido y del coste para el usuario (Hardt & Bogenberger, 2019).

Estas nuevas formas de desplazarse por el entorno urbano están contribuyendo a generar un cambio en el sistema de transporte, empezando por dar solución a los problemas de primera y última milla del transporte público.

El patinete eléctrico es el que más ha visto incrementado su uso en los últimos años a nivel mundial. Estos vehículos son capaces de alcanzar velocidades mayores a las bicicletas. Esto, junto con su uso sencillo y bajo coste, han sido los principales responsables de su crecimiento repentino.

Sin embargo, su repentina aparición en las ciudades y la falta de infraestructura diseñada específicamente para estos vehículos ha supuesto un aumento de la siniestralidad, por lo que es necesario estudiar su operación y seguridad para garantizar una micromovilidad cómoda y segura, con el fin de establecer criterios para su diseño.

De hecho, Ma et al. (2021) vieron que ha habido un aumento en los partes de emergencia entre los usuarios de VMP. Esto se debe tanto a la interacción con otros usuarios de la vía (como los peatones), como a la falta de infraestructura de calidad.

Según Barbudo et al. (2015), tras haber realizado un análisis de diferentes normativas, se dieron cuenta de que existe una carencia clara de criterios específicos de diseño, que deberían incluir no sólo la sección transversal, sino también el diseño geométrico y el pavimento utilizado.

### 2.2. VIBRACIONES DEL PAVIMENTO

Como ya se ha mencionado, no existe normativa en lo referente al diseño de infraestructura para vehículos de VMP. Se pueden encontrar algunas recomendaciones basadas en el uso de la bicicleta, pero ninguna habla de las características que debe tener el pavimento desde un punto de vista de la comodidad. Por ello, es necesario llevar a cabo estudios sobre la infraestructura ya existente, como el planteado en este trabajo, para poder generar unas recomendaciones.

El término de comodidad cubre un amplio abanico de parámetros, desde la configuración de la vía propiamente dicha hasta su entorno, pasando por la meteorología o la salubridad (limpieza) de las inmediaciones. De todos ellos, los que

más destacan son el tipo de pavimento, su estado y su rugosidad (Rybarczyk & Wu, 2010), todos ellos indicadores que se perciben principalmente por el tacto. Esto hace que evaluar la comodidad dentro de unos estándares sea más complicado, ya que son variables subjetivas

Stöver (2011), desarrolló un manual de diseño para el tráfico ciclista, mencionando varios factores a tener en cuenta (distancias, pavimento, entorno...). En cuanto a la comodidad incluye que la superficie del pavimento debe ser lisa, que los recorridos no deberían presentar parones (stops, semáforos...) de forma innecesaria, debiendo garantizar que los usuarios tengan una visión del tráfico que pasa por las intersecciones cercanas, entre otros. De todos ellos, el que más importa es la textura del pavimento. En el manual se insiste en que debe utilizarse material liso y no poroso como el asfalto o el hormigón, pero no justifica con ningún estudio que se haya llevado a cabo en este campo.

Ambrož (2017) realizó un estudio para comprobar si podían utilizarse sensores conectados a una Raspberry Pi con el fin de tomar medidas dinámicas durante el recorrido, llegando a la conclusión de que los resultados son equiparables a los de equipos más costosos y aparatosos, por lo que es recomendable utilizar esta tecnología por su relación coste/rendimiento.

Algunos estudios han analizado las vibraciones experimentadas por una bicicleta al circular por diferentes pavimentos (Gao et al., 2018; Hölzel et al., 2012; Nuñez et al., 2020). Sin embargo, la influencia del tipo de pavimento y su conservación en las vibraciones sufridas por los patinetes es diferente al experimentado por las bicicletas debido al menor tamaño de las ruedas (Cano-Moreno et al., 2019). Por ello, algunas investigaciones recientes han evaluado las posibles vibraciones sufridas por patinetes eléctricos al circular por distintos pavimentos (Ma et al., 2021), aunque con tomas de datos reducidas y sin considerar el estado de conservación.

Únicamente Cafiso et al. (2022) han presentado un estudio inicial que considera posibles deterioros del pavimento, relacionando la media cuadrática de las aceleraciones con el IRI (International Roughness Index) utilizado en carreteras. Esta aproximación es interesante, pero sólo sería válida para la infraestructura compartida entre vehículos motorizados y VMP. Además, los datos se extrajeron de sensores de teléfonos móviles inteligentes y únicamente se consideró el pavimento asfáltico.

Otros han analizado también las características resistentes de la superficie de contacto rueda-infraestructura (Gao et al., 2019), llegando a la conclusión de que la comodidad a la hora de circular viene claramente condicionada por las vibraciones experimentadas por el usuario. Por ello, es lógico deducir que el pavimento en la superficie de rodadura juega un papel decisivo en la comodidad, siendo este un factor clave a la hora de afrontar la elección entre tomar un camino u otro, o incluso si desplazarse utilizando VMPs. Además, Gao et al. (2018) cumplieron el estudio inicial realizado con bicicletas compartidas con una encuesta a los usuarios voluntarios después de cada recorrido, para poder relacionar los datos objetivos con los subjetivos a la hora de crear el modelo de comodidad.

Por su parte, Olieman et al. (2012) analizaron la influencia no sólo de la superficie sino también de la velocidad y la presión de las ruedas de una bicicleta deportiva y de una bicicleta de montaña, llegando a la conclusión no sólo de que el pavimento por el que se transita afecta a las vibraciones experimentadas, sino que existe una relación casi proporcional entre la velocidad a la que se recorre la vía y las aceleraciones verticales registradas por los sensores. Sin embargo, este estudio está limitado a



bicicletas y a la transición de pavimento asfáltico a adoquinado, dejando de lado los pavimentos de hormigón y otros vehículos de movilidad personal, por lo que no es suficiente para generar unos criterios de clasificación de la comodidad.

Por otro lado, Qian et al. (2020) también realizó encuestas para comparar con los resultados del modelo que desarrolla. En este caso no utiliza únicamente las aceleraciones verticales, sino que también estudia los giros de manillar y determina la macrotextura con el ensayo del cono de arena. Como resultados de su ensayo, desarrollaron dos modelos para comparar si la propuesta más barata da resultados equiparables a los tradicionales.

En lo relacionado con modelos predictivos, Valle y Herrera (2019) desarrollaron un estudio bicicletas instrumentadas, midiendo no sólo las aceleraciones en el eje vertical sino también los giros en todas las direcciones y las otras dos componentes de la aceleración. Encontraron una correlación muy estrecha entre la rotación en el eje transversal y las aceleraciones longitudinales y verticales, así como entre estas aceleraciones. Teniendo en cuenta la estrecha relación entre las variables, confeccionaron varios modelos evitando que estas formaran parte simultáneamente. Consiguieron desarrollar un modelo para bicicletas para valorar el estado del pavimento. Sería necesario realizar un estudio semejante con otros vehículos

En cuanto cómo afectan las vibraciones al cuerpo humano, la norma UNE-ISO 2631-1, publicada en España por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR, 2008), presenta algunas recomendaciones en cuanto a la obtención y tratamiento de las aceleraciones en función de la posición del cuerpo y de otros factores. Cabe destacar que propone una clasificación de comodidad en función de la aceleración experimentada por el cuerpo. Sin embargo, esta fue desarrollada para vehículos motorizados, donde el usuario habitualmente viaja sentado, por lo que es necesario estudiar cómo adaptarla a los usuarios de la micromovilidad.

El presente trabajo se plantea como ampliación de dichos estudios, analizando los siguientes tipos de pavimento y la influencia de elementos singulares en ellos (trapas, grietas, raíces...)

- Pavimento asfáltico
- Pavimento de hormigón
- Baldosas cuadradas
- Adoquinado

Este último se puede desdoblar, a su vez, en dos tres configuraciones según la orientación del adoquín: longitudinal (lado mayor paralelo a la dirección de la marcha), transversal (lado mayor ortogonal al sentido de la marcha) o alternando entre ambas posiciones.

Además del análisis de las vibraciones en este tipo de pavimentos, se va a completar el estudio con una encuesta a nivel nacional, dirigida a quienes usan Vehículos de Movilidad Personal en zona urbana, sobre su percepción de comodidad ante cada tipo de pavimento.

Entre las preguntas se encuentran también los casos en los que las tapas de instalaciones se encuentran en mitad de la infraestructura ciclista, ya que se espera que la percepción de comodidad sea diferente.

Esto, además, viene justificado por el hecho de que la comodidad no viene definida únicamente por las vibraciones propias del pavimento, sino que también entran en juego otros factores como obstáculos o desperfectos que obliguen a las personas



usuarias a cambiar su trayectoria para esquivarlos, o que generen más vibraciones de lo normal.

Este estudio pretende definir un modelo que ayude a definir qué tipo de pavimento es más cómodo, de cara a la construcción de nueva infraestructura, y marcar unas bases para poder planificar el mantenimiento de la ya existente.

Por tanto, dado que la tendencia en la movilidad urbana es a fomentar un sistema más sostenible, es crucial conocer el nivel de confort percibido por quienes usan estas infraestructuras, para poder potenciar su uso.

### 3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

#### 3.1. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Máster es analizar las aceleraciones verticales transmitidas por diferentes tipologías de pavimento con el fin de caracterizar la comodidad de dichos pavimentos en función del rango de las vibraciones registradas, identificando el impacto de cada uno en la experiencia de las personas usuarias de la infraestructura ciclista.

Además de esto, también se pretende analizar cómo afectan los elementos singulares que se puedan encontrar en el trazado (trapas, fisuras, raíces...) en la comodidad del viaje.

Tras analizar estos parámetros en varias secciones de la red de infraestructura ciclista de la ciudad de València, se aplicará a la infraestructura existente en el distrito de Pla del Real. Para llevar a cabo estas metas, se propone el diseño de la instrumentación de un patinete eléctrico, que se empleará para las tomas de muestras naturalísticas, y el desarrollo de una encuesta online. Para alcanzar dicho objetivo se pueden definir los siguientes objetivos específicos:

- Sensorización de un VMP
- Determinación de las aceleraciones verticales
- Caracterización de la comodidad de cada pavimento
- Analizar la influencia de elementos singulares
- Aplicación al distrito Pla del Real

A su vez, estos objetivos específicos pueden dividirse en diferentes tareas para conseguir cumplirlos. En la Tabla 1 se muestra una relación de objetivos específicos y sus tareas asociadas. Algunas tareas aparecen repetidas ya que son comunes a dos o más objetivos

Tabla 1. Objetivos específicos del trabajo y tareas asociadas

Objetivo específico	Tarea
Sensorización de un VMP	Investigar metodologías empleadas en estudios similares
	Elegir VMP
	Programación y calibrado de los sensores
	Colocación de los elementos
Determinación de las aceleraciones verticales	Investigar metodologías empleadas en estudios similares
	Determinar secciones de estudio
	Realizar la toma de datos
Caracterización de la comodidad de cada pavimento	Registro de datos de cada sección
	Análisis de los datos registrados
	Comparación con la percepción de personas usuarias
Analizar la influencia de elementos singulares	Registro de datos de cada sección
	Analizar los datos registrados
Aplicación al distrito Pla del Real	Inspección de la infraestructura existente
	Comparación con los resultados de los análisis anteriores
	Establecer recomendaciones para la mejora de la infraestructura del Pla del Real desde el punto de vista de la comodidad debida a las vibraciones

### 3.2. HIPÓTESIS DE PARTIDA

La primera hipótesis planteada es que la tipología de pavimento influye sobre la percepción de la comodidad por parte de los usuarios, por lo que los pavimentos de mayor rugosidad superficial (mayor macrotextura) generarán mayores vibraciones y serán más incómodos.

Teniendo en cuenta la posible afección del tipo de pavimento en las vibraciones, se considera estudiar los siguientes 5 tipos

- Asfalto
- Hormigón
- Baldosas cuadradas (20x20 cm)
- Adoquinado longitudinal (10x20 cm)
- Adoquinado transversal (20x10 cm)

La segunda hipótesis es que, dependiendo del vehículo utilizado y de sus características, las aceleraciones experimentadas en el eje vertical son distintas, por lo que un vehículo como el patinete eléctrico, con apenas amortiguación, tenderá a ser más sensible que, por ejemplo, una bicicleta de montaña.

Además, se considera que, a igualdad del resto de factores, a mayor velocidad de circulación, mayor será también el impacto sobre las vibraciones. Por ello, se realizará la toma de datos a distintas velocidades.

Por último, se entiende que la presencia de elementos singulares tendrá un menor impacto en cuanto a las vibraciones en los pavimentos que generen unas mayores vibraciones, en contraposición con los pavimentos más lisos donde la presencia de dichos elementos puede ser más evidente durante la conducción.

En resumen, las hipótesis de partidas son las siguientes:

- **Hipótesis 1 (H1):** Los pavimentos con una mayor macrotextura tenderán a generar más vibraciones que aquellos más lisos, siendo así más incómodos que estos últimos.
- **Hipótesis 2 (H2):** La percepción de la comodidad de las vibraciones depende de las características del vehículo (suspensión)
- **Hipótesis 3 (H3):** La velocidad juega un papel importante en las aceleraciones verticales movilizadas durante la conducción, siendo la relación proporcional (a mayor velocidad, mayores aceleraciones verticales).
- **Hipótesis 4 (H4):** Los elementos singulares en mitad del trazado tendrán un impacto mayor en las vibraciones (y por ende en la comodidad) en aquellos pavimentos con una superficie de rodadura más lisa.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. PLANTEAMIENTO

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el objetivo fundamental de este trabajo es analizar la comodidad experimentada por quienes utilizan los carriles bici, siendo las aceleraciones verticales uno de los principales condicionantes de la comodidad.

Para comprobar si los pavimentos de las vías ciclistas de la ciudad de Valencia son adecuados desde el punto de vista de las vibraciones, se propone observar los siguientes factores:

- Infraestructura
- Operación
- Percepción del usuario

Estos factores se pueden descomponer, a su vez, en diferentes variables que ayudan a simplificar su estudio. En la Tabla 2 se recoge la fragmentación de los factores en las diferentes variables específicas que se van a considerar.

*Tabla 2. Variables a estudiar*

FACTOR GLOBAL	VARIABLE ESPECÍFICA	MÉTODO DE ESTUDIO
Infraestructura	Tipología de pavimentos	Inspección visual Registro con cámara VIRB
	Obstáculos en el recorrido	Inspección visual Registro con cámara VIRB
Operación	Velocidad de circulación	Registro del VMP
	Vibraciones	Registro del sensor
Percepción del usuario	Percepción de las vibraciones	Encuesta

Estas variables requieren definir diferentes metodologías de toma de datos. Lo primero a tener en cuenta es que la toma de datos de algunas de las variables ha de ser georreferenciada para crear una base de datos de fotos y vídeos donde identificar dichas variables en asociación a su posición. Con ayuda de programas que trabajan con sistemas de información geográfica (SIG) se podrán elaborar mapas donde se podrán identificar los resultados de las inspecciones llevadas a cabo.

A continuación, es necesario el uso de tecnología portátil que permita obtener las mediciones de las aceleraciones verticales y generar un registro de estas. Además, debe poder instalarse en el VMP con el que se realizarán las mediciones. Para reducir las anomalías estadísticas es condición indispensable que las campañas de toma de muestras se lleven a cabo en condiciones normales de circulación, por lo que se considera oportuno que sea un usuario habituado al VMP quien lo conduzca. Estos sistemas portátiles consisten en una unidad de medición inercial (IMU) y tecnología Raspberry Pi.

Por último, la percepción de las vibraciones por parte de quienes usan la infraestructura se debe hacer encuestando de forma directa a la población. Para ello, se diseñará una encuesta en línea difundida a nivel nacional.

Por todo lo anterior, se han definido cuatro etapas para el desarrollo del proyecto. En la Figura 1 se definen las fases y las tareas dentro de cada una de ellas.

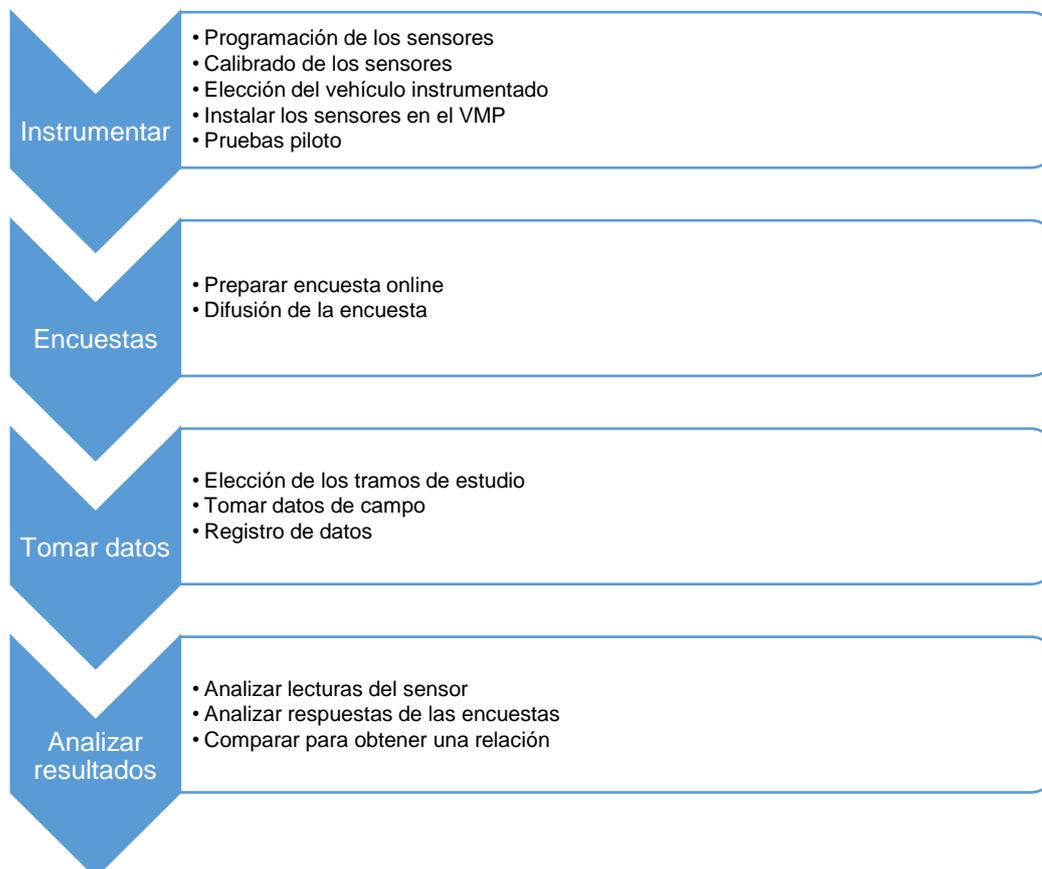


Figura 1. Fases para el desarrollo del trabajo y pasos a seguir

## 4.2. INSTRUMENTALIZACIÓN

En esta etapa primera etapa se pretende desarrollar un sistema móvil con el que sea posible registrar los datos con la mayor precisión posible para el desarrollo del proyecto, al menor coste posible. Para ello se llevará a cabo la programación de los sensores que tomarán y registrarán las lecturas de la variable específica “Vibraciones”. Además, también es necesario definir el vehículo a utilizar para la toma de datos (en adelante “vehículo instrumentado”), así como la ubicación en la que se instalarán los elementos de dicho sistema móvil.

### 4.2.1. Programar

Existe una gran oferta de dispositivos portátiles con una amplia aplicación en proyectos de ingeniería con los que desarrollar proyectos nuevos e innovadores, con una utilidad práctica real y que ofrecen unos resultados razonables. Para este proyecto se ha decidido utilizar una placa portátil Raspberry Pi 4B, que funcionará como un ordenador portátil, desde donde se programarán y controlarán los sensores, registrando las lecturas en archivos dentro de su memoria.

En esta parte del estudio, se utilizará únicamente una unidad inercial de medida (IMU), comúnmente utilizados para tomar medidas de aceleraciones y de velocidades de giro. Su programación se llevará a cabo con Python. Con esto, las muestras tomadas

serán datos brutos que, posteriormente, habrá que corregir con la calibración del sensor, que también se realizará en esta etapa.

La calibración consistirá en tomar datos con el sensor fijo en varias posiciones y comparar los valores registrados con los valores teóricos en cada posición.

Por otra parte, será necesario utilizar una videocámara que registre el estado de la superficie del pavimento, así como también será preceptivo el uso de un sistema posicionamiento global (GPS). Estos elementos pueden ser componentes separados, conectados a la placa base, o ser componentes instalados de forma independiente, siempre que se garantice la sincronización con la IMU.

#### 4.2.2. Vehículo

Para la elección del vehículo instrumentado será necesario que este esté capacitado para circular por la red de infraestructura ciclista. Para ello, deberá cumplir con lo establecido en el Reglamento de Circulación y en el Reglamento General de Vehículos.

En esta materia 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, resuelve que los ciclos son los únicos vehículos que pueden circular por dicha infraestructura, y los define de la siguiente manera: “vehículo provisto de al menos 2 ruedas y propulsado exclusivamente por la energía muscular de la persona o personas que están sobre este”.

Por otra parte, la última actualización del Reglamento General de Circulación y del Reglamento General de Vehículos (RD 970/2020) incluye el término de “Vehículo de Movilidad Personal” (VMP), 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”. Además, al ser definidos como vehículos, no pueden circular por aceras ni zonas peatonales, pero sí tienen permitida la circulación por la red ciclista.

Además, como el estudio se llevará a cabo en la ciudad de València, es necesario tener en cuenta la ordenanza municipal de movilidad (Regidoria de Mobilitat Sostenible de l’Ajuntament de València, 2022), que indica que en los carriles bici que discurren a nivel de peatones, los VMP no podrán alcanzar velocidades superiores a 20 km/h. Por ello, y para poder comparar entre carriles bici, la velocidad máxima a la que se realizarán las tomas será a 20 km/h.

Ante esto se plantean dos alternativas: utilizar una bicicleta o un patinete eléctrico. Existen varios estudios llevados a cabo con la primera propuesta (Bíl et al., 2015; Gao et al., 2018; Joo et al., 2015; Zhu & Zhu, 2019), mientras que con un patinete apenas se han encontrado investigaciones. Además, este último ha crecido en popularidad y en el reparto modal en la movilidad urbana, dada su clara ventaja operativa, económica y ambiental. Es debido a esta reciente entrada en la movilidad urbana que existen tan pocos estudios con respecto a su operación y la interacción con el pavimento. Es por ello que el vehículo instrumentado elegido para llevar a cabo este trabajo será un patinete eléctrico, cumpliendo así los objetivos planteados.

#### 4.2.3. Montaje

Una vez definido el vehículo a instrumentar y el sistema portátil a instalar en este, es necesario elegir dónde se incorporará cada elemento. Para ello, hay que tener en

cuenta los requisitos de la placa para su funcionamiento en remoto, así como las conexiones con el sensor.

La ubicación de la IMU debe estar lo más próxima al centro de gravedad del sistema patinete-conductor y garantizar una unión rígida a un elemento también rígido, para evitar ruidos y anomalías en las lecturas debidas a vibraciones acopladas.

En la Figura 2 se muestra una propuesta para la colocación de los diferentes elementos del sistema.



Figura 2. Esquema de sensores

#### 4.2.4. Pruebas

Antes de empezar a tomar datos para el estudio es necesario llevar a cabo una serie de pruebas con el fin de comprobar que los dispositivos funcionan correctamente y que los datos recolectados son coherentes. Para ello, se propone la toma de datos en 2 pavimentos diferentes: uno liso y uno rugoso. De esta manera se podrá observar si existen diferencias significativas en los datos registrados y comprobar la sensibilidad real de los sensores. Deben quedar registrados los datos de vibraciones, el tipo de pavimento, la fecha y hora y un registro multimedia del entorno.

Una vez se haya corroborado que las muestras obtenidas en las pruebas son válidas para el estudio, comenzará la fase definitiva de toma de datos. En caso contrario, habrá que identificar las causas de los errores, ya que dada la naturaleza del sistema los errores pueden ocurrir en distintos elementos y deberse a distintos motivos. A continuación, se recoge una lista de estas fuentes de error:

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

Una vez identificados los posibles errores, se subsanarán realizando las modificaciones oportunas, en función de su origen. Es decir, si es un error de programación se revisará el código para comprobar dónde está el fallo y se corregirá; en caso de ser por almacenamiento se aumentará la capacidad del dispositivo; si se debe a un problema en las conexiones, estas deberán ser revisadas; si son producto de los sensores (errores de medición), estos deberán ser comprobados y recalibrados o, en su defecto, se deberán cambiar por otros elementos que cumplan la misma función y que funcionen correctamente.

Una vez arreglados los errores, se volverán a repetir las pruebas. Este proceso iterativo se repetirá hasta que no se detecten fallos y se garantice el correcto funcionamiento del sistema.

A continuación, se puede ver un esquema de esta etapa:

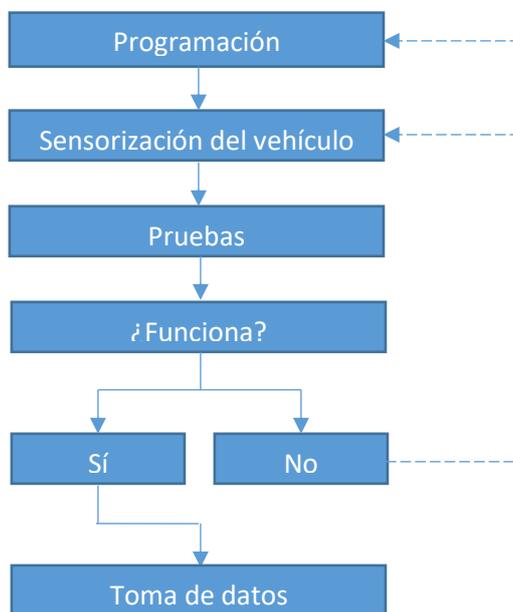


Figura 3. Diagrama de fases

### 4.3. ENCUESTA

En esta parte se desarrollará la encuesta. Para ello hay que tener en mente los parámetros que se quieren analizar y los posibles factores que podrían influir (edad, género, vehículo, experiencia...). Por ello, es necesario que haya, al menos, dos secciones: una en la que se caracterice al usuario, y otra en la que responda directamente a las variables de estudio. Además, se debe tener en cuenta que quienes respondan no tienen por qué tener conocimientos técnicos, por lo que para evitar malentendidos se deben realizar preguntas breves y sencillas.

Se plantea una dificultad a la hora de preguntar por las opiniones de comodidad, ya que no pueden responder tras haber pasado por los pavimentos seleccionados, por lo que será necesario hacerles saber el tipo de pavimento con una foto de cada uno. De esta manera, se obtendrá la opinión de quienes respondan a la encuesta online con relación a la percepción de comodidad que tienen de cada pavimento. Por otra parte, se puede preguntar por la percepción de comodidad de todos los pavimentos en una sola encuesta, por lo que se obtendrá la percepción de cada persona para la infraestructura ciclista estudiada. La primera sección (caracterización del usuario) deberá incluir preguntas de la siguiente clase:

- Características sociodemográficas (edad, género, ocupación)
- Experiencia (motivo de desplazamiento con VMP, modo más habitual de transporte...)

La segunda sección irá orientada a las variables de estudio definidas en la Tabla 2. La forma más fácil y efectiva de valorar un aspecto tan subjetivo como la comodidad de la operación debida a las vibraciones es mediante preguntas de tipo Likert, donde se puntúa de 1 a 5 la percepción de cada persona. Es habitual que en estas preguntas también se incluya una sexta opción de “No sabe/No contesta”.



La encuesta online puede empezar a recoger datos desde el momento en el que esté lista.

#### 4.4. TOMA DE DATOS

La recogida de datos se llevará a cabo mediante un muestreo continuo y geolocalizado en los tramos seleccionados de la infraestructura ciclista. Por ello es necesario definir algunos criterios:

- Características de la infraestructura
- Selección de tramos de estudio
- Condiciones generales del muestreo

##### 4.4.1. Características de la infraestructura

El estudio se llevará a cabo analizando varias secciones de la infraestructura ciclista repartidas por toda la ciudad de València, aunque los resultados que deriven de este se analizarán para un distrito que presente una gran diversidad de secciones de las vías ciclistas, así como una alta intensidad de personas que hagan uso de ellas.

Una vez concretada el área de aplicación, se identificarán los diferentes tipos de infraestructura ciclista presentes. Estos deberán ser inspeccionados para su posterior clasificación.

Dado que el objetivo es estudiar las vibraciones transmitidas por distintos pavimentos, será preceptivo realizar toma de datos en acera-bici (discurren a nivel del peatón, sin separadores físicos y únicamente delimitado por el color o tipo de pavimento), ya que es el único tipo de infraestructura en el que se utilizan las baldosas o los adoquines, así como el hormigón. Además, dado que el pavimento asfáltico es habitual en carriles bici segregados, estos también deben ser incluidos en el estudio.

##### 4.4.2. Tramos de estudio

Una vez realizado el estudio de las características de la infraestructura en la zona de estudio, se seleccionarán los tramos específicos donde se tomarán los datos. Este proceso debe hacerse de forma que se garantice la obtención de muestras representativas, teniendo en cuenta que se pretenden analizar las vibraciones en 5 tipos diferentes de pavimento.

Se elegirán siempre tramos rectos, evitando aquellos que presenten interrupciones (semáforos, stops, etc) o cambios en la tipología de pavimento. Además, deben contar con una zona anterior a la sección con la longitud suficiente para alcanzar la velocidad de estudio (20 km/h y 15 km/h).

Una vez seleccionados, se asignará un identificador a cada tramo. Esta identificación incluirá una descripción de las características.

##### Condiciones generales

Para garantizar una toma de datos correcta y que se pueda relacionar con el uso habitual de la infraestructura, se propone tomar los datos con condiciones meteorológicas favorables, evitando tomar datos días de lluvia o con el pavimento mojado.

En cuanto al tamaño de la muestra, es necesario tener un mínimo de muestreos. Este mínimo se puede estimar asumiendo que los datos se asemejan a una distribución normal mediante la siguiente ecuación.

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

En esta ecuación,  $n$  representa el tamaño de la muestra,  $\sigma$  la desviación típica de la variable a estudiar de cada muestra y  $e$  el error asociado. En este estudio se utilizará como variable estadística la media cuadrática ( $RMS$ ).

Se ha tomado la decisión de establecer un intervalo de confianza del 95% de confianza (correspondiente a un parámetro  $z = 1,96$ ), y asumiendo un error admisible del sensor de  $0,05 g$  para el acelerómetro y variando la desviación estándar del  $RMS$ , se determina el número de datos mínimo. En la siguiente tabla se muestra el resultado de este análisis:

Tabla 3. Tamaño muestral mínimo para una distribución normal

e (g)	$\sigma(g)$						
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,075	0,1
0,01	4	16	35	62	97	217	385
0,025	1	3	6	10	16	35	62
0,05	1	1	2	3	4	9	16
0,1	1	1	1	1	1	3	4
0,15	1	1	1	1	1	1	2

Asumiendo por tanto una desviación de los  $RMS$  del entorno de  $0,04 g$ , con una precisión de  $\pm 0,05 g$  en cada medida, se obtiene que el mínimo de muestras de cada sección, así como el número mínimo de secciones, deberá ser de 3. Esto luego habrá que corroborarlo en la fase del análisis

## 4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.5.1. Reducción y estandarización

Dado que el sensor graba de forma continua, será necesario que, una vez terminada la fase de toma de datos, estos se filtren con la ayuda del vídeo asociado, sabiendo entre qué marcas de tiempo se encuentran los datos de interés. Este proceso se debe llevar a cabo para todos los muestreos realizados durante la fase anterior, pudiendo así obtener un listado de aceleraciones verticales, con sus variables estadísticas, para cada recorrido, diferenciando posteriormente entre pavimentos.

En cuanto a las encuestas se refiere, será necesario llevar a cabo un trabajo de estandarización, organización y filtrado antes de proceder al análisis de las respuestas.

### 4.5.2. Análisis

Tras la estandarización y limpieza de los datos, se procederá al análisis de los mismos. Para establecer los rangos de aceleraciones de cada configuración sin considerar los posibles elementos singulares que se hayan registrado se recomienda utilizar un diagrama Box-Whisker para eliminar datos anómalos. Tras este filtro se determinará el rango de vibraciones en el que se encuentra el 90% de los datos para ver si existen diferencias. Esto se realizará generando un gráfico que muestre la distribución de percentiles.

Además, también se propone utilizar el cálculo de la media cuadrática o valor eficaz de la aceleración ponderada ( $RMS$  por sus siglas en inglés) de cada serie de datos, tal y como propone la norma UNE-ISO 2631-1 (AENOR, 2008), ya que otros

valores como la media no presentarán diferencias notables entre tramos, ya que estos deberían estar cercanos al 0.

$$RMS_{Pavimento} = \sqrt{\frac{\sum_i \bar{x}_i^2}{N}}$$

La ecuación anterior es la relativa a la media cuadrática, donde  $RMS_{Pavimento}$  es la media cuadrática de cada pavimento,  $\bar{x}_i$  es cada registro y  $N$  el número total de registros.

Para comprobar que no hay diferencias estadísticamente significativas entre pasadas o entre tramos de la misma configuración, se aplicará un análisis ANOVA.

El proceso descrito se repetirá un total de tres veces a diferentes escalas. Primero para los recorridos de manera individual. Una vez comprobado que estas pueden considerarse dentro de la misma población, se agregarán para conformar un registro de datos de cada sección y velocidad antes de pasar al segundo nivel, donde se compararán los tramos de estudio de la misma configuración y velocidad entre sí. Tras comprobar mediante las mismas técnicas que pueden considerarse la misma población, se agruparán los datos de cada sección y velocidad para conformar el de cada pavimento y velocidad. Por último, se llevará a cabo el proceso de filtrado, análisis del  $RMS$  y de percentiles para cada configuración y velocidad. Una vez alcanzado el último nivel, se compararán entre sí los diferentes pavimentos y las diferentes velocidades.

En cuanto al análisis de la influencia de los elementos singulares se plantea el uso de un análisis de la varianza mediante ventanas deslizantes ya que utilizar estadísticos de dispersión facilita la detección de datos anómalos a lo largo del recorrido. Esto deberá llevarse a cabo para todas cada pasada de forma individual, teniendo que separar cada vez que se tiene que parar el registro de datos por cruzar un pavimento diferente o por haber tenido que frenar por semáforos u otros acontecimientos con consecuencias similares.

Una vez analizados estos datos experimentales se realizará el análisis cualitativo de la encuesta, permitiendo así combinar ambos análisis para obtener una idea más real de la comodidad de las vibraciones de la infraestructura ciclista.

## 5. DESARROLLO

### 5.1. INSTRUMENTACIÓN

Para llevar a cabo el estudio, se ha tomado la decisión de utilizar un patinete eléctrico Xiaomi Mi Electric Scooter 1S, equipado con ruedas blandas. A este se le han incorporado los siguientes elementos:

- Una placa Raspberry Pi 4B
- Una cámara VIRB de Garmin
- Una unidad de Medición Inercial (IMU) modelo MinIMU-9 v5, de la casa Pololu.
- Una batería externa Green Cell PowerPlay<sup>20</sup>, modelo PBGC03 de 20000 mAh, 77 Wh



Figura 4. Patinete Xiaomi Mi Electric Scooter 1S. [Fuente: Xiaomi]

#### 5.1.1. Placa Raspberry Pi

Esta tecnología desarrollada por Raspberry Pi Foundation en Reino Unido es relativamente reciente. Funciona como un pequeño ordenador de placa única con un gran potencial en el desarrollo de proyectos de ingeniería, dada su versatilidad. No obstante, este elemento tiene un coste realmente bajo, haciéndolo idóneo para este trabajo.

Como con cualquier ordenador, hacen falta diferentes elementos de hardware (tanto de entrada como de salida de datos) para su utilización. Entre ellos es necesaria una pantalla de visualización de datos como elementos de salida, y un teclado y un ratón como elementos de entrada. Además, necesita una memoria SD y una fuente de alimentación externa. La conexión a la red puede llevarse a cabo mediante una conexión ethernet, con una conexión Wi-Fi o desde un dispositivo móvil que disponga de conexión a internet y permita que se comparta a través de una conexión USB, Bluetooth o Wi-Fi.

El modelo utilizado es el más nuevo del mercado: Raspberry Pi 4 modelo B, que cuenta con los siguientes conectores:

- Un puerto USB-C para alimentación de 5V en corriente continua.
- 4 puertos USB-A para instalar los dispositivos periféricos de almacenamiento y entrada de datos (teclado, ratón, memorias-USB...), de los cuales 2 son USB 3.0 y los otros son USB 2
- 2 conexiones micro HDMI para conectar hasta dos visores 4K

- Un puerto Gigabit Ethernet
- Un lector de tarjetas de almacenamiento SD
- Un puerto de audio y vídeo
- Un puerto para una cámara
- Un puerto de visualizador
- 40 pines GPIO

Estos últimos son esenciales, ya que es lo que permite controlar los sensores directamente desde la placa (Figura 5).

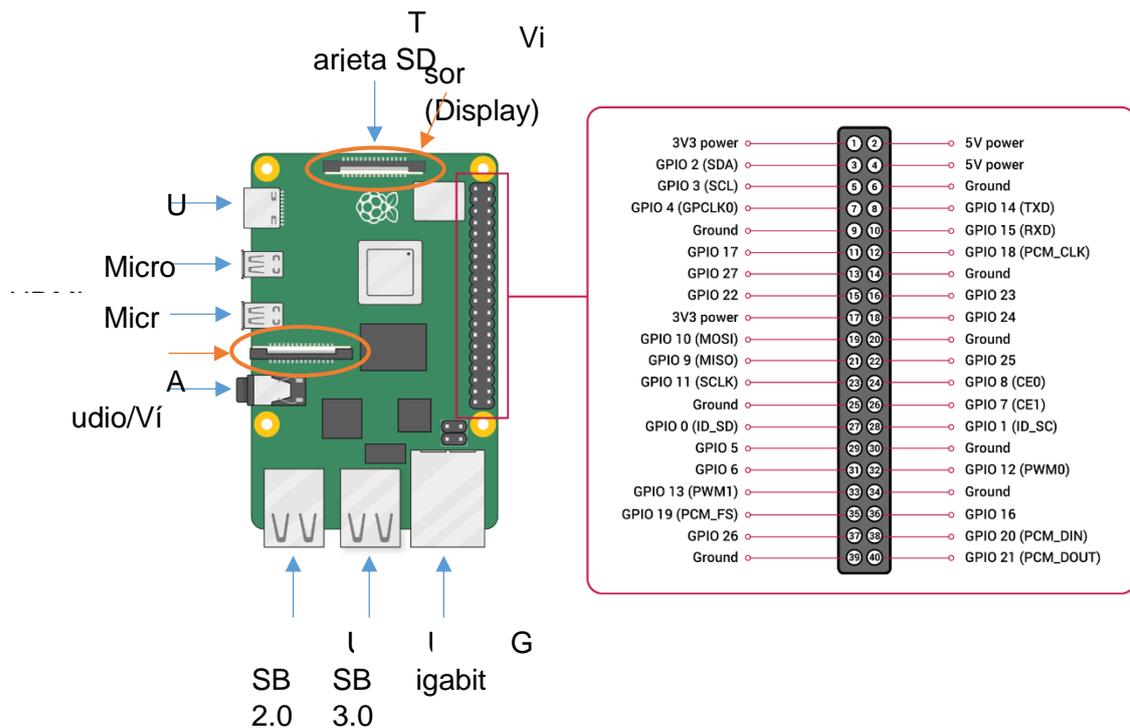


Figura 5. Esquema de Raspberry Pi 4B y pines GPI. [Fuente: Raspberry Pi]

El sistema operativo (SO) de la placa es Linux Raspbian, instalado mediante la tarjeta de memoria Micro SD. La instalación del SO incluye algunos programas esenciales para su uso. El más relevante es Thonny Python 3, un entorno de desarrollo integrado para programar en Python. Con él, se realizará la programación de los sensores. Además, también se instaló el paquete de ofimática Libre Office, necesario para poder almacenar las lecturas en archivos de datos separados por comas (CSV), así como dos softwares para su utilización en remoto durante la fase de toma de datos.

El software necesario para poder utilizar la Raspberry durante la toma de datos consiste en un escritorio remoto (VNC® Server) y en un programa que permite generar una VPN entre ambos dispositivos, de manera que se genera una dirección IP estática (Tailscale®), evitando problemas a la hora de usar el escritorio remoto.

Después de esto, se conectaron los periféricos para que se pudiera trabajar como con un ordenador ordinario y se personalizó el sistema para el proyecto. En la Figura 6 se puede ver una captura de pantalla del escritorio visto desde el dispositivo móvil utilizado durante la fase de muestreo.

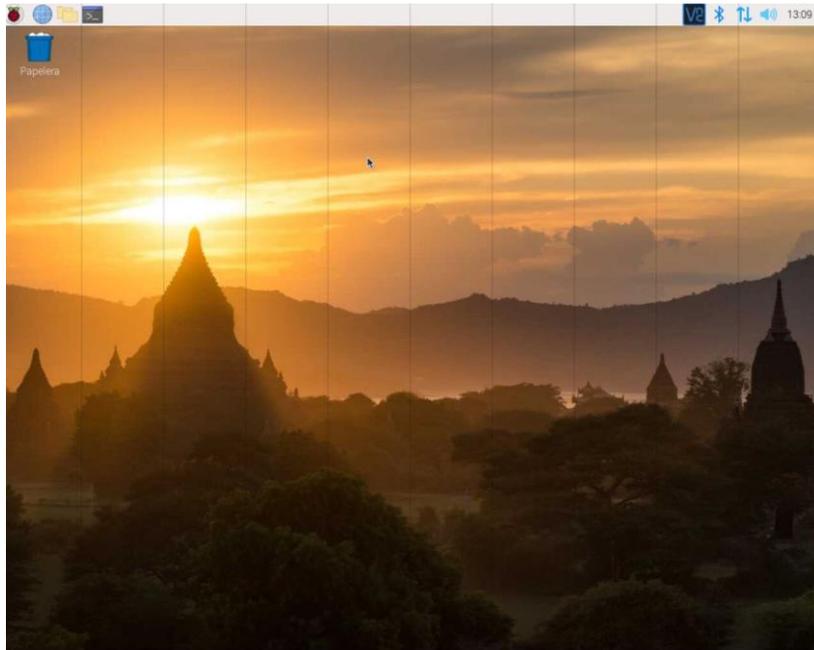


Figura 6. Escritorio de la Raspberry Pi

### 5.1.2. Cámara VIRB

Se ha elegido utilizar una cámara *GARMIN VIRB Elite* (Figura 7), ya que esta integra la toma de datos fotográficos en formato vídeo y un GPS, relacionando cada fotograma con la posición del patinete, pudiendo así geolocalizar los deterioros y los elementos que generan las vibraciones más destacables, y permitiendo su identificación visual.

Las características de esta cámara son:

- Vídeos en calidad HD 1080p
- Pantalla a color de alta resolución. Permite comprobar el rango de grabación
- Acelerómetro y GPS
- Batería extraíble de ion de litio recargable con hasta 3h de duración.

El dispositivo será configurado de tal manera que cada fotograma de la grabación esté vinculado con su localización. Para garantizar que esto ocurre es necesario encender la cámara antes de empezar a grabar y asegurarse de que el GPS se ha iniciado correctamente. Después de esta comprobación, se iniciará la grabación y después se iniciará el código de los sensores, iniciándolo desde el teléfono, donde se ha instalado la aplicación que conecta con la Raspberry. Será necesario que quede grabado cuándo se inicia el programa de los sensores para que luego se pueda sincronizar el vídeo con los datos registrados. La cámara se colocará sobre el manillar del vehículo.



Figura 7. Cámara VIRB colocada en el manillar del vehículo instrumentado.

### 5.1.3. Sensor MinIMU-9 v5

Por otra parte, la IMU cuenta con un acelerómetro y un giróscopo que toman medidas según tres ejes definidos, permitiendo así lecturas tridimensionales de las aceleraciones y los giros. Además, tiene también un magnetómetro a modo de brújula, aunque este no se va a utilizar para este estudio (Figura 8).

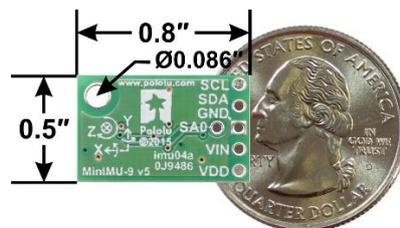


Figura 8. MinIMU-9 v5. [Fuente: Web de Pololu]

El sensor utiliza funciona con un voltaje de entre 2.5V (conexión VDD) y 5.5V (conexión VIN) y tiene varias escalas para cada medida, pudiendo medir desde  $125^{\circ}/s$  hasta  $2000^{\circ}/s$  con el giróscopo, entre  $\pm 2g$  y  $\pm 16g$  con el acelerómetro y  $\pm 4 gauss$  a  $\pm 16 gauss$  con el magnetómetro (Pololu - MinIMU-9 v5 Gyro, Accelerometer, and Compass (LSM6DS33 and LIS3MDL Carrier), s. f.). Para el estudio se ha fijado la escala del acelerómetro en  $\pm 4 g$  y la del giróscopo en  $\pm 245^{\circ}/s$ .

#### CONEXIONES

El sensor requiere 4 conexiones con la Raspberry, a través de los pines GPIO (General Purpose Input Output) de la propia placa:

- VDD (alimentación)
- Ground (toma tierra)
- SCL (controla la velocidad de envío y recepción de información entre el sensor y la Raspberry)
- SDA (puerto a través del cual se realiza el intercambio de información)

En este caso, la alimentación se lleva a cabo conectando el sensor al pin 1 (3V3 power), el controlador de impulsos en el pin 5 (GPIO 3) y el intercambiador de información en el pin 3 (GPIO 2). La toma a tierra puede conectarse a cualquiera de los pines destinados a Ground que queden libres.

Este sensor no necesita la instalación de ningún elemento electrónico (resistencias, condensadores...) para su correcto funcionamiento con la placa, pues el voltaje al que trabaja es bajo y no existe riesgo de dañar los pines GPIO.



### PROGRAMACIÓN EN PYTHON

Para la programación del sensor se utilizó el entorno de desarrollo integrado Thonny Python 3, incluido en la instalación del sistema operativo de la Raspberry Pi. El objetivo es crear un código que obtenga las mediciones y las almacene en una variable que luego se pase a un archivo CSV. El código completo se encuentra en el Anexo II.

Lo primero que se hizo fue importar las librerías con los comandos e instrucciones que se utilizaron. Estas son:

- Librería *time* y *datetime* (para poder asociar una marca de tiempo a cada lectura)
- Librería *pandas* (para almacenar las variables)
- Librería *csv* (para crear y exportar los datos a un archivo CSV)
- Librerías *board* y *busio* (para definir donde está conectado el sensor del que se deben leer los datos)
- Librería *adafruit\_lsm6ds.lsm6ds33* (contiene los comandos necesarios para extraer la información de la IMU)

Lo siguiente fue indicar la posición hexadecimal de la que leer los datos para a continuación crear las variables de almacenamiento de datos, el archivo CSV donde se guardan los datos y definir el número máximo de lecturas que se tomarán.

Después se programó el bucle en el que se guardaban en un vector cada lectura y cada 10 lecturas se guardaba en el archivo definido anteriormente. Además, para sincronizar el vídeo y la toma de datos se añadió una línea de código para mostrar en la consola cuándo se guardaban los datos.

También se consideró la posibilidad de que existan diferentes errores durante la toma de datos debidos a un problema en la alimentación o similares que hagan que una toma de datos no pueda llevarse a cabo. Esto se plasma en el código para que en caso de error no se detenga el programa.

### CALIBRACIÓN DEL SENSOR

La unidad inercial se ha calibrado en dos fases: primero el giroscopio y después el acelerómetro. Para ello, se ha recurrido a un código disponible para otro sensor, aplicando las modificaciones necesarias para su aplicación al modelo utilizado en este estudio.

#### Giróscopo

El proceso de calibrado del giróscopo requiere que la IMU esté estable durante la lectura de datos, ya que consiste en tomar un gran número de lecturas en los tres ejes para conocer la inexactitud que tiene de base. La Figura 10 muestra cómo se fijó el sensor.

Para conseguir que estuviera estable, y pensando en la calibración posterior del acelerómetro, se fijó la IMU con un gato a una mesa. Una vez logrado esto, se tomó una serie de 1000 muestras. El resultado obtenido se presenta en el siguiente gráfico.

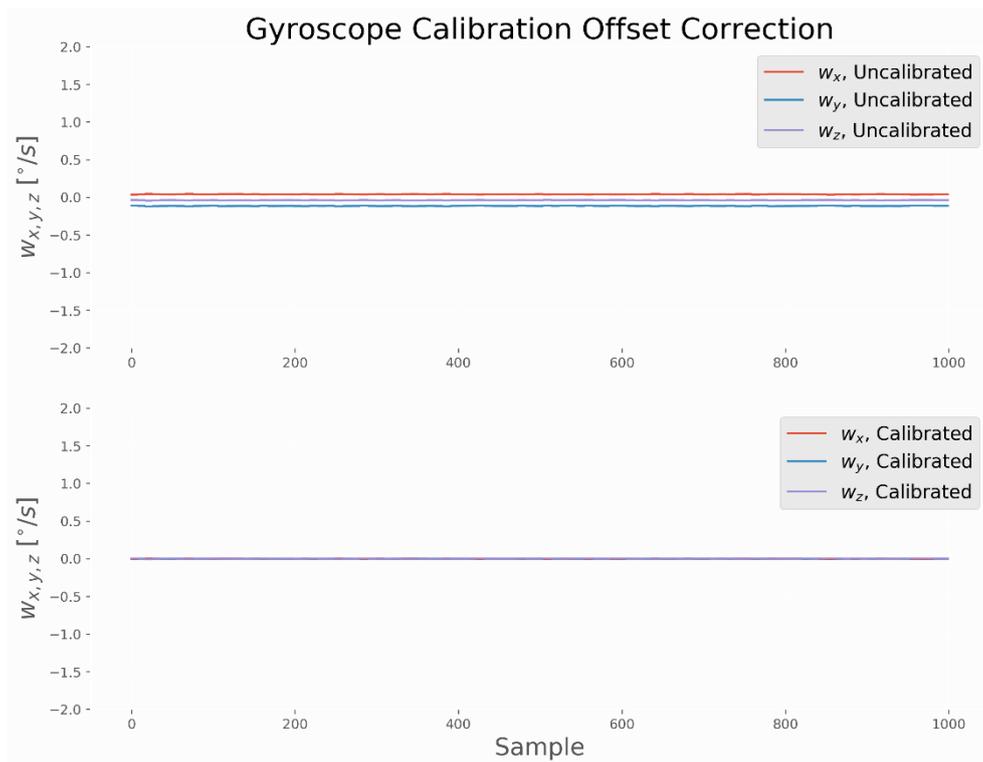


Figura 9. Calibrado del gir6scopo

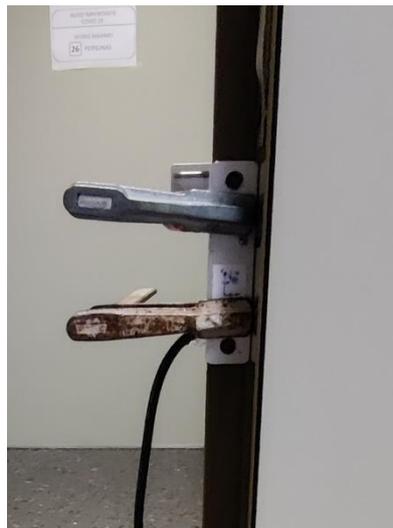


Figura 10. Foto de ejemplo de posici6n de calibrado

Al estar la IMU fija, el valor de las lecturas debera ser 0. Tal y como se aprecia en la primera de las gráficas, las lecturas para cada uno de los ejes difieren ligeramente del 0, por lo que para obtener los datos calibrados se procede a calcular la media muestral para cada una de las tres direcciones definidas y restar esta magnitud a los datos brutos obtenidos para los correspondientes ejes.

#### Aceler6metro

Al igual que con el gir6scopo, es necesario que la IMU est6 estable e inm6vil para poder tomar medidas de los tres ejes, en tres posiciones para cada eje:

- A favor de la gravedad
- En sentido contrario a la acci6n de la gravedad
- En sentido normal a la gravedad

De esta manera, se puede obtener la desviación de las aceleraciones en cada una de las tres direcciones, ya que se sabe que en dirección de la gravedad el resultado debe ser  $+1g$ , en dirección contraria  $-1g$  y en la dirección ortogonal  $0g$ . En la Tabla 4 se muestran los valores teóricos de cada eje según la posición descrita en la Figura 11. La numeración de las posiciones de la tabla sigue el orden de izquierda a derecha y de arriba debajo de la figura.

Tabla 4. Medida teórica en las diferentes posiciones del sensor para la calibración del sensor

Posición	X	Y	Z
1	0	0	$1g$
2	$1g$	0	0
3	0	$1g$	0
4	0	0	$-1g$
5	$-1g$	0	0
6	0	$-1g$	0

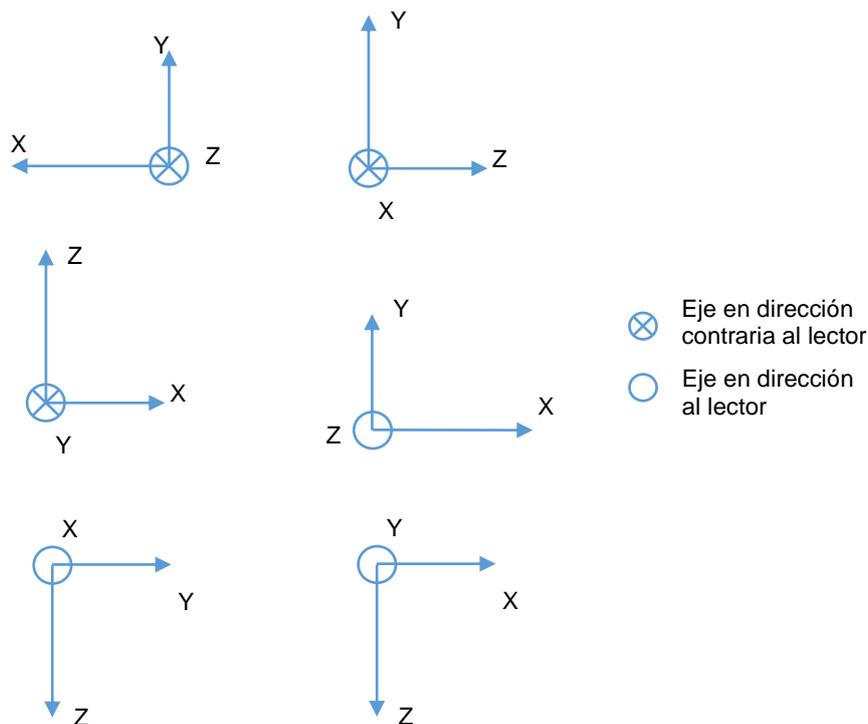


Figura 11. Esquema de posición de los ejes del sensor para el calibrado

La Figura 10 representa una de las posiciones en las que se tomó los datos para calibrar el sensor.

En este caso, el método de corrección difiere del empleado para ajustar la velocidad de giro. Lo que se pretende es asociar a cada uno de los valores tomados en las 3 lecturas realizadas para cada eje, su valor teórico, y ajustar así por mínimos cuadrados a la recta  $y = x$  (donde  $y$  es el valor teórico de la aceleración en ese eje y  $x$  es el empírico). Se ha hecho el cálculo de forma que las teóricas sean  $\pm 1$  o  $0$ , en función de la posición. De esta forma los datos registrados y tratados estarán en función de la constante gravitacional  $g \cong 9,81 \text{ m/s}^2$ .

En la Figura 12 se muestran las gráficas de las aceleraciones antes y después de calibrarlas. La gráfica superior está limitada entre  $\pm 2 \text{ m/s}^2$ , por lo que no se ve la gráfica de la aceleración vertical, pero se puede deducir que estaría ligeramente desviada con respecto a lo que realmente debería detectar. El gráfico inferior, por su parte tiene el eje de abscisas en función de  $g$  y está limitado entre  $\pm 2 g$ . Para la calibración se usaron un total de 50000 lecturas manteniendo la IMU estática en las posiciones mencionadas anteriormente.

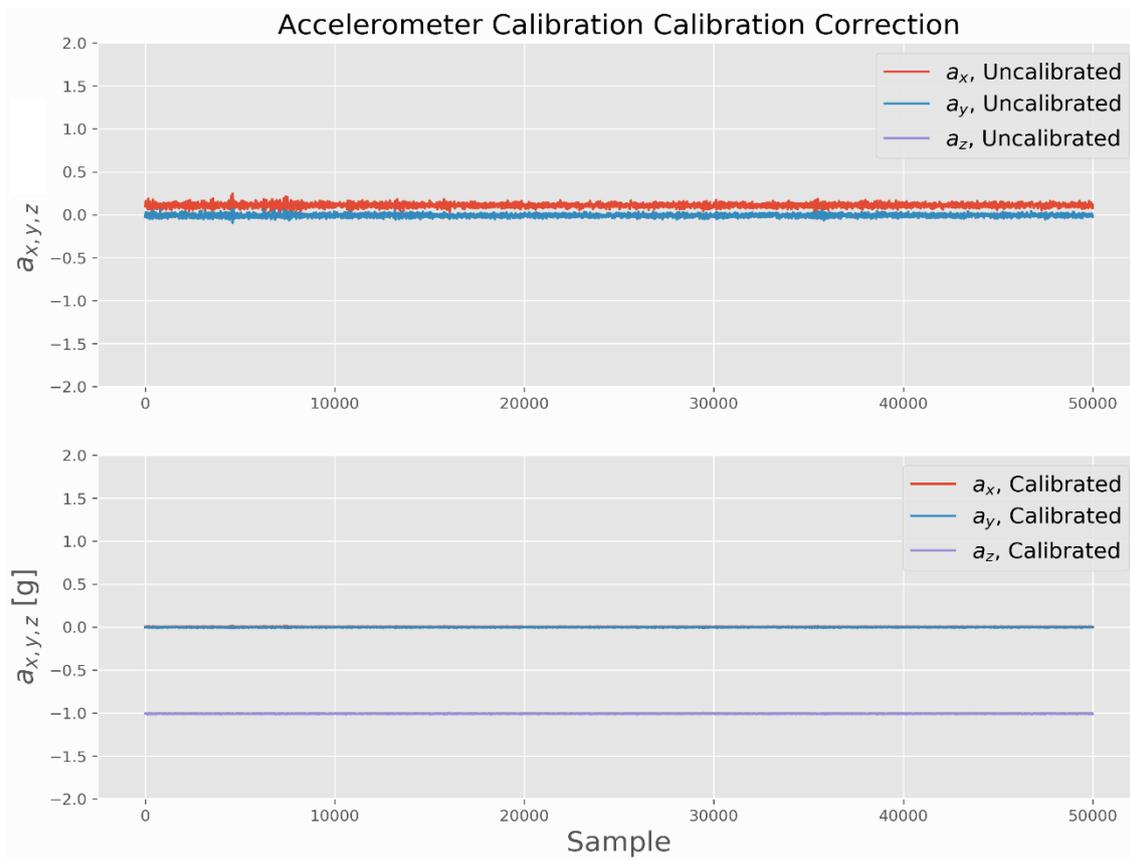


Figura 12. Calibrado del acelerómetro

#### 5.1.4. Vehículo instrumentado

##### Descripción

El vehículo elegido para llevar a cabo el estudio ha sido un patinete eléctrico Xiaomi Mi Scooter 1S, que cuenta con nuevas tecnologías enfocadas al confort y la seguridad de la conducción y optimización de la carga. Puede alcanzar un máximo de 25 km/h y está equipado con una batería de litio que garantiza un rendimiento seguro y duradero, con una autonomía de 30 km aproximadamente. Cuenta con reflectores laterales naranjas, frontales blancos y traseros rojos, con una luz trasera de frenado incorporada en el reflector y una luz delantera. Va equipado, además, con unos neumáticos blandos de 8,5" que permiten una mayor comodidad en distintos pavimentos.

Además, cuenta con un sistema de doble frenado, lo cual ayuda a reducir la distancia de frenado. Esto, junto con un sistema de recuperación de energía le permite transformar la energía cinética en energía eléctrica.

Cuenta con 3 modos de operación, asociados cada uno a distintas velocidades máximas, permitiendo adaptar su uso a las circunstancias y el entorno:



- Peatonal: 0-5 km/h
- Estándar: 0-20 km/h
- Deportivo: 0-25 km/h

Además, cuenta con una tecnología Bluetooth y acceso a la aplicación “Mi home” a través de la cual se puede revisar información sobre el recorrido realizado, el kilometraje y velocidades de circulación

#### Instrumentación

En esta etapa se lleva a cabo el montaje de los elementos encima del vehículo, de forma que se garantice su correcto funcionamiento e intentando alterar lo mínimo posible su apariencia y sus dimensiones.

La IMU se colocó lo más cerca posible del centro de gravedad (CDG) del sistema patinete-conductor, ya que se considera que este punto representa mejor las vibraciones experimentadas por el usuario. Por ello, lo primero que se determinó fue la coordenada horizontal del CDG del patinete. Esto se hizo apoyando la rueda delantera encima de una báscula y dejando la rueda de atrás apoyada en el suelo con la pata de cabra para que se sostuviera sin necesidad de elementos adicionales. De esta manera, conociendo la altura del punto de apoyo en la báscula, la longitud entre puntos de apoyo de las ruedas y el peso total del patinete, se puede obtener dicha coordenada.

Si después se añade el peso del conductor (~80 kg), considerándolo una carga puntual en el centro del vehículo, se puede obtener cuál es la abscisa del CDG del sistema. Esta se encuentra a unos 20 cm del eje de la rueda delantera. No se obtuvo la ordenada ya que el patinete tenía instalado un mástil rígidamente unido al patinete donde se ubicaban sensores de otro estudio llevado a cabo por el departamento que permitía colocar rígidamente el sensor cerca de la ubicación del CDG del patinete sin necesidad de añadir nuevos elementos.

La importancia de que las uniones sean rígidas recae en evitar acoples en las lecturas debidas a la vibración de alguno de los elementos o de su conjunto con respecto al sistema patinete-conductor.

A continuación, se instaló la cámara de vídeo VIRB® sobre el manillar del patinete, utilizando el soporte que venía incluido con el producto. Esa ubicación garantiza una visión frontal del recorrido, pudiendo registrar así todos los desperfectos de la infraestructura, así como el tipo de pavimento.

Lo siguiente fue colocar la Raspberry. Esta se colocó en un mástil en la parte trasera del patinete por las necesidades del otro estudio llevado a cabo con este vehículo. Se instaló dentro de una caja metálica y debajo de esta se colocó la batería externa para alimentar la placa.

Una vez instalada la Raspberry y decidida la ubicación del sensor, se procedió a instalar este en una placa metálica que se atornilló después al mástil delantero, dejando el sensor cubierto para evitar que el polvo u otros elementos pudieran dañar la IMU.

Para el montaje de la caja metálica y de la placa que contiene el sensor se tuvo en cuenta también la conexión entre ambos elementos, haciendo un agujero en cada uno para pasar el cable con los conectores. Este cable se aseguró al patinete eléctrico mediante el uso de bridas.

Esta configuración permite tomar datos sin alterar la funcionalidad del vehículo ni sus características, permitiendo que los resultados sean consistentes con lo expuesto

anteriormente. En la Figura 13 se presenta una fotografía del patinete con todos los elementos colocados.



Figura 13. Patinete instrumentado

### Pruebas

Tras terminar la instalación de los elementos, se llevó a cabo una prueba en dos pavimentos con una macrotextura muy diferente para comprobar que no había problemas con el sensor. El primero de ellos fue un pavimento de gres en uno de los edificios de la ETSICCP con una longitud suficiente para alcanzar velocidad constante y tomar datos. Este pavimento se eligió debido a que se espera que sea más liso que cualquier pavimento en la infraestructura ciclista. El siguiente pavimento fue un camino de tierra en el río, para elegir el caso completamente opuesto (un pavimento que genera una gran cantidad de vibraciones verticales).

Con esto se pudo comprobar que efectivamente, pese al ruido propio del sensor, la escala de los datos registrados era considerablemente distinta, por lo que se asume que el sensor funciona como es debido y el código utilizado no tiene fallos.

Junto a estas pruebas, se decidió cómo sincronizar la grabación de los vídeos de la cámara con los registros del sensor. Para llevar esto a cabo se agregó al código (ver anexo II) unos comandos que mostraban en pantalla la hora de inicio y el aviso cada 10 registros de que se estaba guardando correctamente. Una vez hecho esto, se tomó la opción de grabar la pantalla del teléfono móvil que se utilizaba como escritorio remoto al principio del vídeo de cada pasada, pudiendo así sincronizar manualmente los registros a la hora de filtrar los datos.

Además, se activó la opción para mantener la velocidad sin tener que mantener el acelerador. Esto hace que el vehículo emita un pitido cuando se fija la velocidad. Puesto que esto a veces ocurre a una velocidad distinta, se decidió dictar si se había alcanzado o no, así como cuando se debía considerar el final del tramo (debido a un cambio de pavimento o a la necesidad de frenar). De esta manera se podrán facilitar los datos con mayor facilidad en la fase de tratado.

## 5.2. SELECCIÓN DE TRAMOS DE ESTUDIO

Los tramos de estudio se seleccionaron según lo establecido en el apartado 4.4.2 de este trabajo, para ello se seleccionaron 3 carriles de cada tipo, a excepción del pavimento de adoquines. Esta excepción se debe a que la presencia de estos es muy escasa y pese a haber otros tramos con adoquines o bien no están configurados de la misma manera (siendo colocados de forma longitudinal o de forma alterna) o no tienen las mismas dimensiones, por lo que la comparación de resultados no tendría sentido.

Los tramos escogidos se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 5. Tramos de estudio.*

Pavimento	Carril bici	Código
Asfalto	Passeig de Ciutadella	ASF-CIU
	Carrer de Colón	ASF-COL
	Ronda Nord	ASF-RN
Hormigón	Avinguda de Tarongers (lado UPV)	H-UPV
	Carrer Botanic Cavanilles	H-CAV
	Avinguda Blasco Ibañez	H-BLA
Baldosas (20x20 cm)	Passeig de l'Albereda	B-ALA
	Carrer d'Antonio Ferrandis	B-SAL
	Avinguda Germans Machado	B-MAC
Adoquín transversal (20x10 cm)	Avinguda de Tarongers (lado UV)	ADTR-UV

La elección de estos carriles bici en particular se debe a la presencia de estaciones de metro o tranvía cerca que permiten desplazarse hasta la localización sin necesidad de consumir gran parte de la batería en el desplazamiento ni la necesidad de utilizar vehículo privado para desplazarse al lugar, evitando la contaminación propia del coche y los problemas para buscar aparcamiento.

Para comprobar los tramos de estudio, ver el Plano 01, en el e Anexo I.

## 5.3. TOMA DE DATOS

### 5.3.1. Datos de campo

La toma de datos se realizó tanto por la mañana como por la tarde, permitiendo así recoger los datos lo más pronto posible. Además, la elección de los tramos tuvo en cuenta que algunos tramos estuvieran cerca para aprovechar y muestrear hasta dos secciones en cada viaje.

Se estableció un mínimo de 3 batidas por cada tramo y por cada velocidad, permitiendo así tener datos suficientes para comparar entre sí. En caso de detectar en el tratamiento posterior de los datos que al menos uno de los 3 registros fuera sustancialmente diferente al resto, se repitió el muestreo, ya que se entiende que algo falló durante la toma de datos.

Sólo hay una sección para la cual en vez de 3 pasadas sólo se registraron 2, ya que hubo un problema con la Raspberry que no se pudo solucionar a tiempo

### 5.3.2. Encuesta

Tal y como queda establecido en el apartado 4.3, se llevó a cabo una encuesta online a los usuarios que se dividía en dos secciones: una para caracterizar al usuario

(con preguntas generales como edad, sexo y género, frecuencia y motivos de uso de VMPs entre otras), y una segunda para la valoración de cada configuración planteada.

El tipo de preguntas de esta segunda fase consistía en una imagen de cada configuración y una escala Likert para valorar la comodidad que percibían del pavimento representado en cada imagen. La escala utilizada fue la siguiente:

1. Muy incómodo
2. Incómodo
3. Neutro
4. Cómodo
5. Muy cómodo
6. NS/NC

La difusión se inició a través de estudiantes, familiares y amigos, así como a través de compañeros de trabajo. Además, gracias a la Delegación de Alumnos de la ETSICCP, se difundió un correo con el enlace a todos los estudiantes de la escuela, lo cual permitió llegar más lejos. Los profesores adscritos al Departamento de Ingeniería e Infraestructura del Transporte también ayudaron a difundir la encuesta entre sus compañeros y conocidos, pudiendo así llegar a un mayor número de gente y tener una muestra más diversa. La encuesta permaneció abierta durante 35 días, obteniendo un total de 120 respuestas. Las preguntas se encuentran en el Anexo IV

## 5.4. REDUCCIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE DATOS

### 5.4.1. Datos de campo

Cada pasada se guardó en un archivo CSV (datos separados por comas), tal y como queda descrito en el apartado 4.2.1. Tras acabar cada toma, se utilizó Microsoft Excel para leer y tratar los datos y el programa Garmin Virb Edit para acceder a los vídeos de la cámara y limpiar los registros.

Tras aplicar la corrección por calibración de los datos, se sincronizó cada registro con el correspondiente vídeo, eliminando todos los elementos fuera del tramo de interés. Después, para poder llevar a cabo el análisis de la comodidad de cada pavimento sin las afecciones debidas a elementos singulares se utilizaron gráficos Box-Whisker para eliminar los datos anómalos de cada conjunto de datos. Estos datos no se eliminaron, ya que luego se utilizaron para el análisis de los elementos singulares. A continuación, se muestran los diagramas de Box-Whisker de todas las secciones. En todas las gráficas el conjunto azul representa la primera pasada, el naranja la segunda pasada y el gris la tercera.

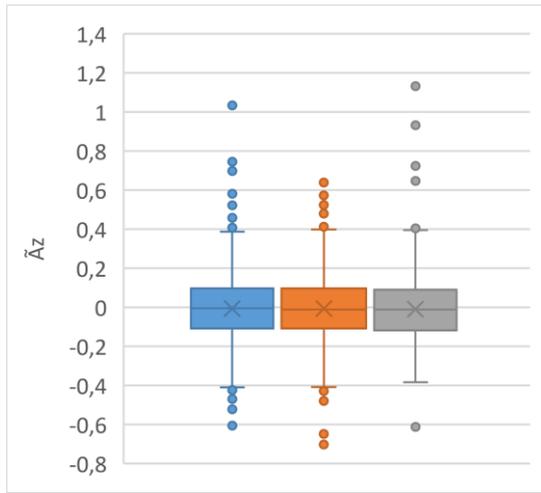


Figura 14. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en ALF-CIU

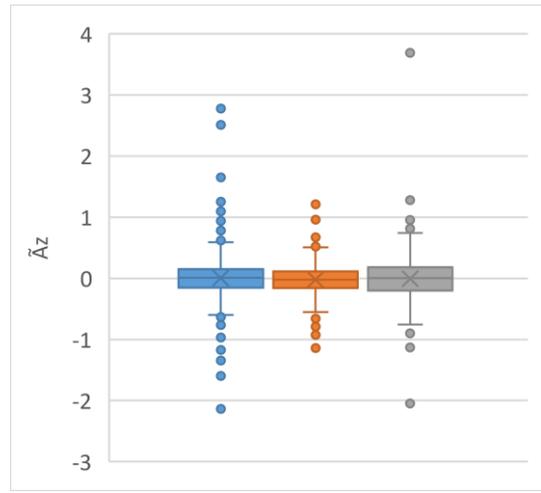


Figura 15. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en ALF-COL

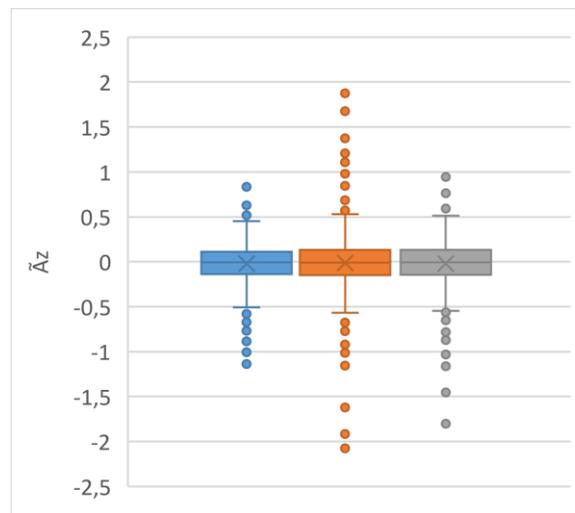


Figura 16. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en ALF-RN.

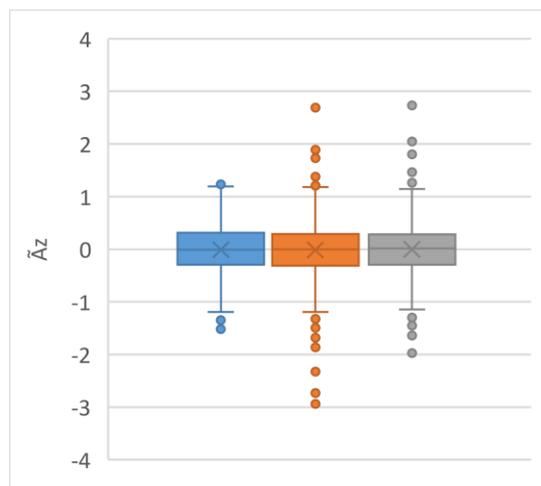


Figura 17. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en H-UPV.

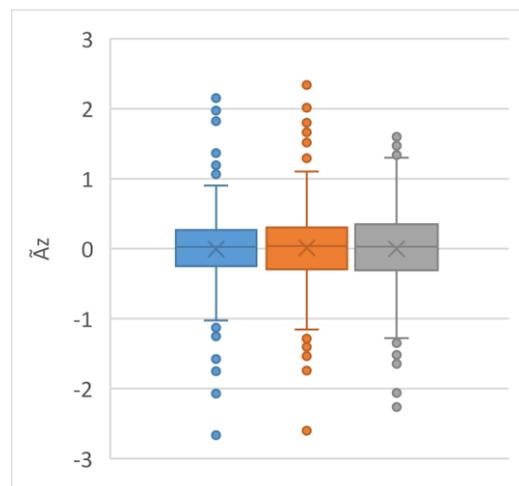


Figura 18. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en H-CAV

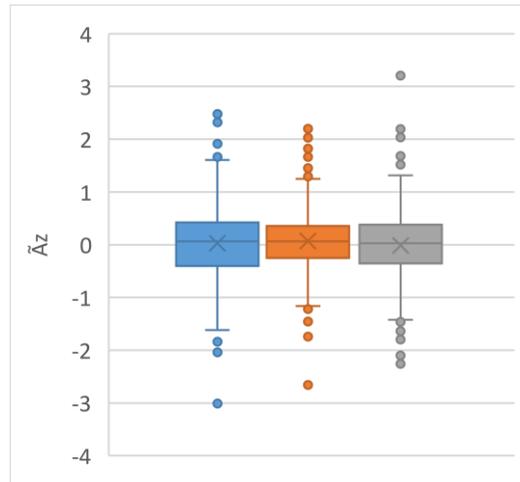


Figura 19. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en H-BLA

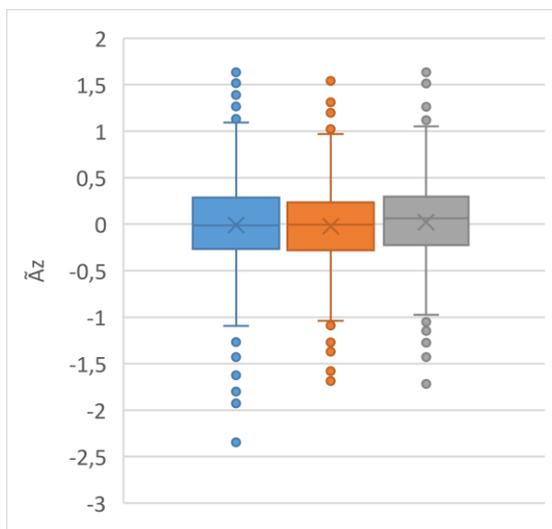


Figura 20. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en B-ALA

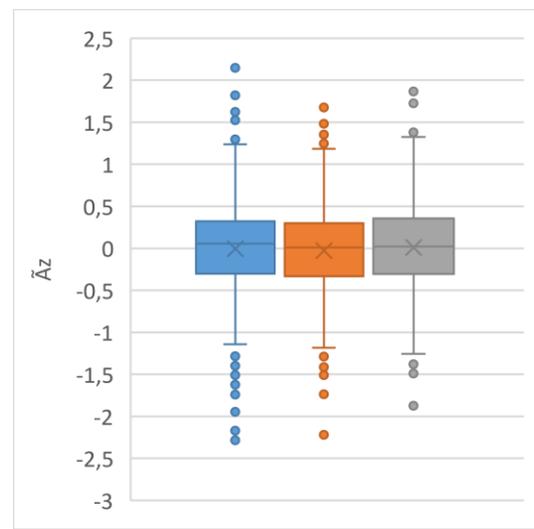


Figura 21. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en B-SAL

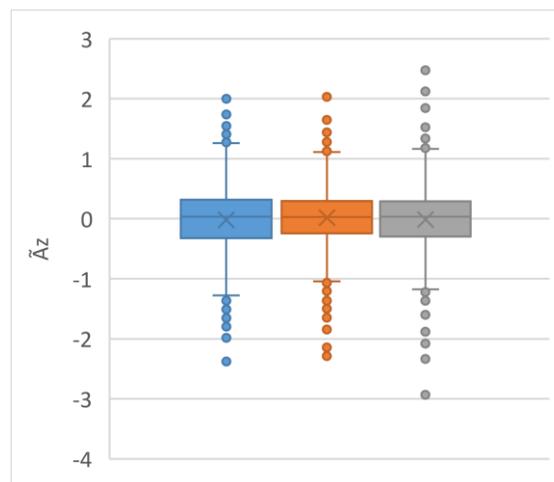


Figura 22. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en B-MAC

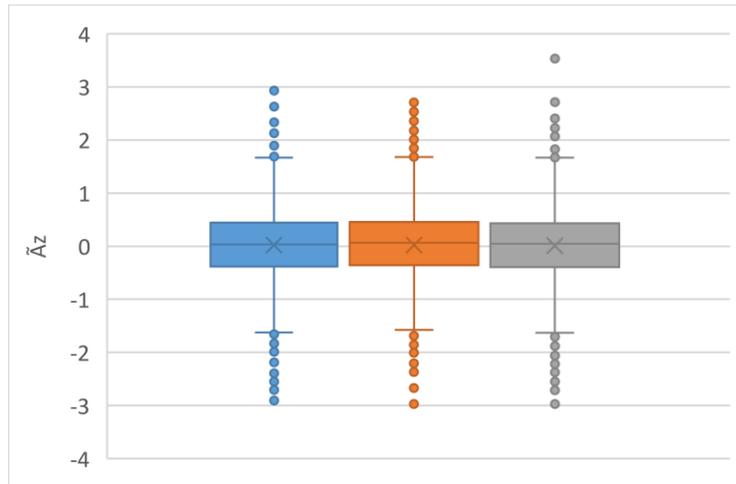


Figura 23. Gráfico Box-Whisker a 20 km/h en ADTR-UV

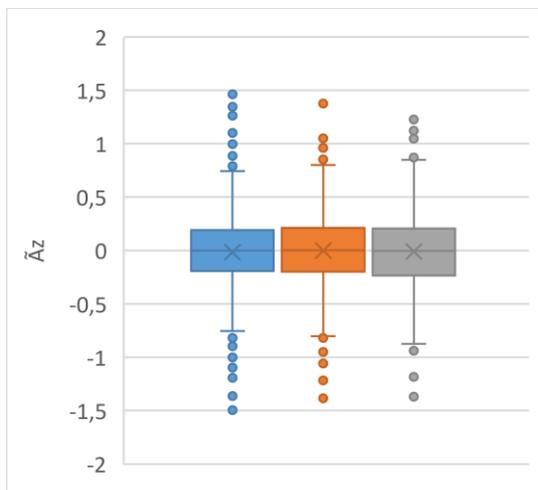


Figura 24. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en B-ALA

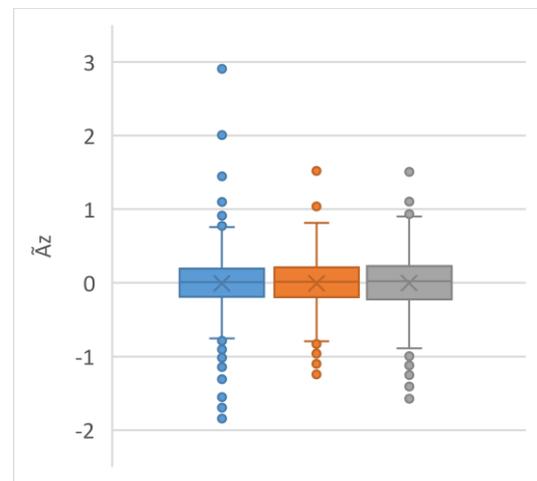


Figura 25. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en B-SAL

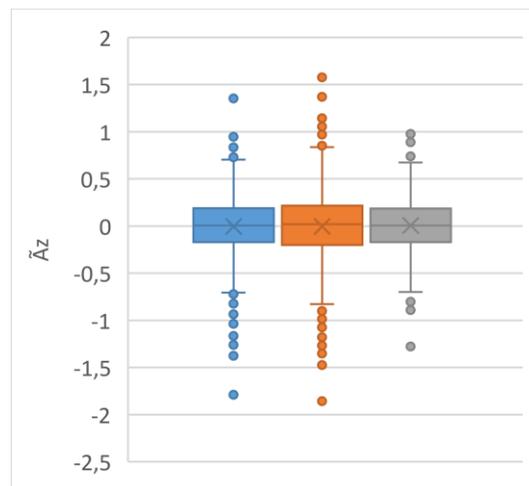


Figura 26. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en B-MAC

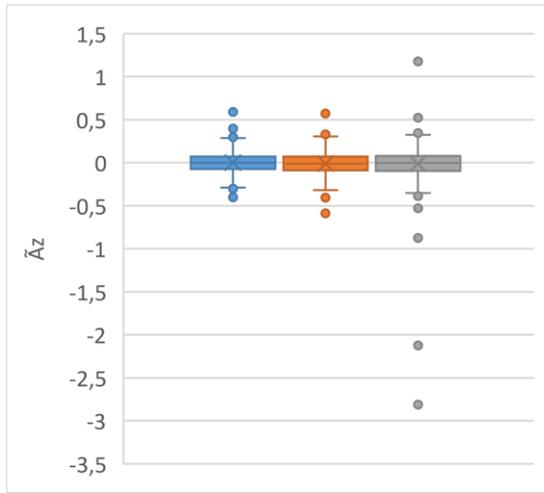


Figura 27. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h de ASF-CIU

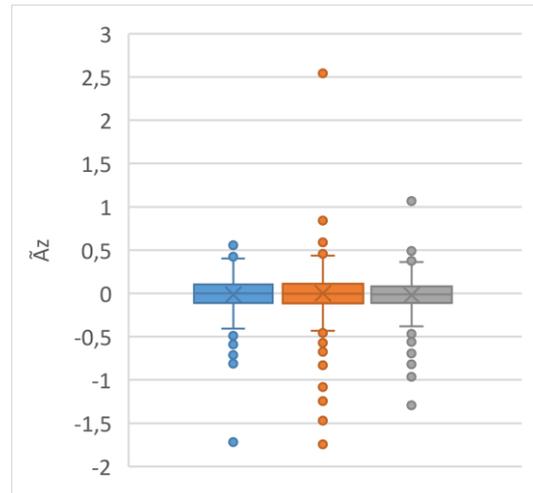


Figura 28. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h de ASF-COL

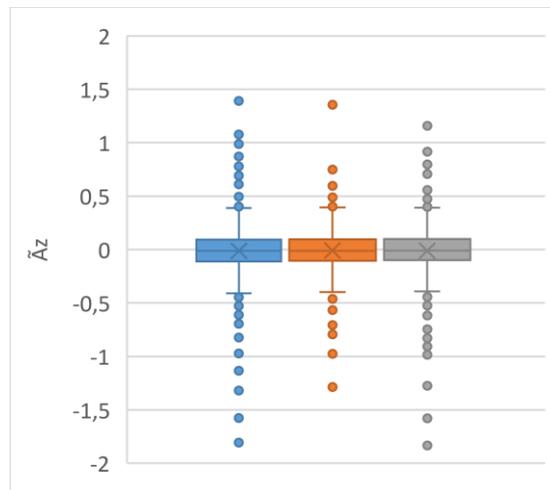


Figura 29. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h de ASF-RN

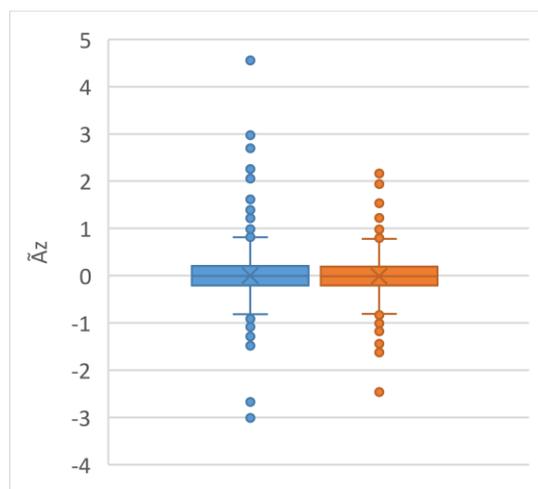


Figura 30. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en H-UPV

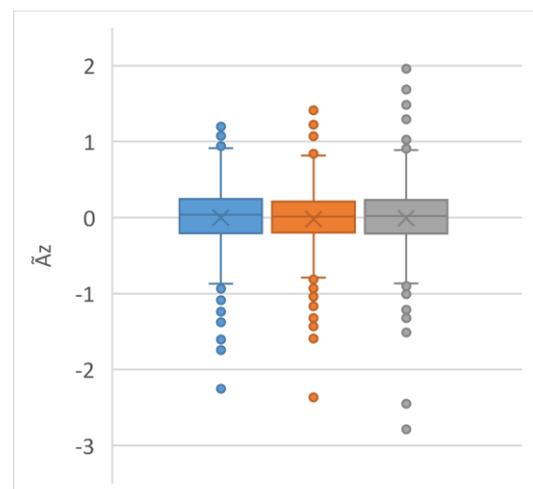


Figura 31. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en H-CAV

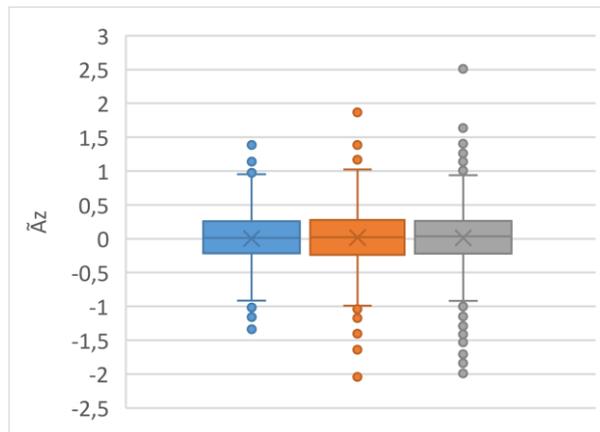


Figura 32. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en H-BLA

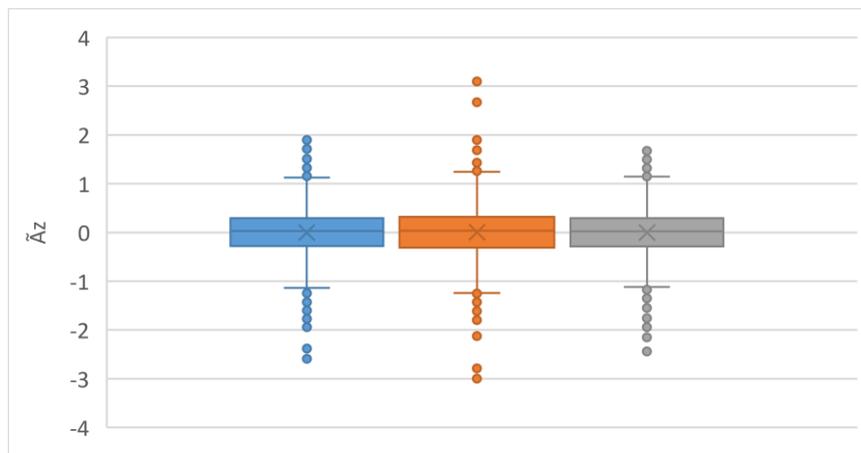


Figura 33. Gráfico Box-Whisker a 15 km/h en ADTR-UV

#### 5.4.2. Encuesta

Las respuestas de la encuesta se filtraron de manera que se asignó un código a cada posible respuesta de opción, de manera que en la pregunta de sexo se asignó el 1 a la opción “Hombre”, 2 a “Mujer” y 3 a “Prefiero no responder”. Se hizo lo mismo con el resto de preguntas que presentan las mismas características.

En el caso del campo de identidad de género, al ser un campo abierto hubo que normalizar los datos manualmente, buscando coincidencias que pudieran haberse escrito de forma diferente. Se observó, además, que muchos de los usuarios que respondieron la encuesta no entendieron la pregunta, al responder con orientación sexual en lugar de con identidad de género. Estos datos anómalos se han modificado para coincidir con lo contestado en la respuesta de sexo, ya que se entiende que, si hubiera discordancia entre la identidad de género y el sexo de la persona, no se darían estas confusiones.

En la pregunta de motivos de viaje, al ser de respuesta múltiple, se generó una variable dicotómica por cada opción, analizando si la opción fue marcada o no.

## 6. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En este apartado se presenta el análisis estadístico que se ha llevado a cabo para el estudio de la variable específica “vibraciones” transmitida por los pavimentos. Para ello, se subdivide el proceso en 2 etapas:

1. Análisis estadístico de los datos obtenidos con el vehículo en función de la configuración del pavimento y el impacto de elementos singulares.
2. Análisis cualitativo de las respuestas de la encuesta de percepción de la comodidad de los usuarios.

### 6.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos se analizaron tras haber tratado los registros, dejando sólo las lecturas pertenecientes a los tramos en los que se va a velocidad constante y con homogeneidad del tipo de pavimento (es decir, se eliminan los datos en parada y transición a velocidad constante y también cuando se debe cruzar un tramo de otro pavimento).

#### 6.1.1. Comodidad del pavimento

En este apartado se analizaron los datos una vez eliminados los datos anómalos con la ayuda del diagrama de Box-Whisker correspondiente.

A partir de dichos datos filtrados se generó un gráfico de percentiles conjunto de las pasadas de cada tramo, así como también se calculó la media cuadrática (*RMS*) de cada una para luego poder compararlas y comprobar si hacen falta más datos. En esos casos, también se llevó a cabo un análisis ANOVA de la varianza, para comprobar si realmente existen diferencias estadísticas que hagan descartar la hipótesis de que pertenecen a la misma población.

Una vez comprobado que podían ser representativos de su sección se agregaron los datos para poder obtener un único conjunto de datos que representara cada tramo estudiado y así compararlo con el resto de tramos. En este segundo nivel también se repitió la comparación mediante el *RMS*, el diagrama de percentiles y el análisis ANOVA.

A continuación se presentan los gráficos y las tablas con los *RMS* y las desviaciones típicas de cada grupo de datos.

[Velocidad 20 km/h](#)

[Pavimento asfáltico](#)

ASF-CIU

Como se puede observar en la Tabla 6, los valores de los *RMS* son prácticamente idénticos, cumpliendo con la hipótesis de  $\sigma (RMS_i) \leq 0,04 g$ . En la Figura 34 también se puede ver la gran coincidencia entre los valores.

Tabla 6. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 20 km/h en ASF-CIU

Pasada	<i>RMS</i> [g]
1	0,14694635
2	0,14715198
3	0,14102658
$\sigma$	0,00347887

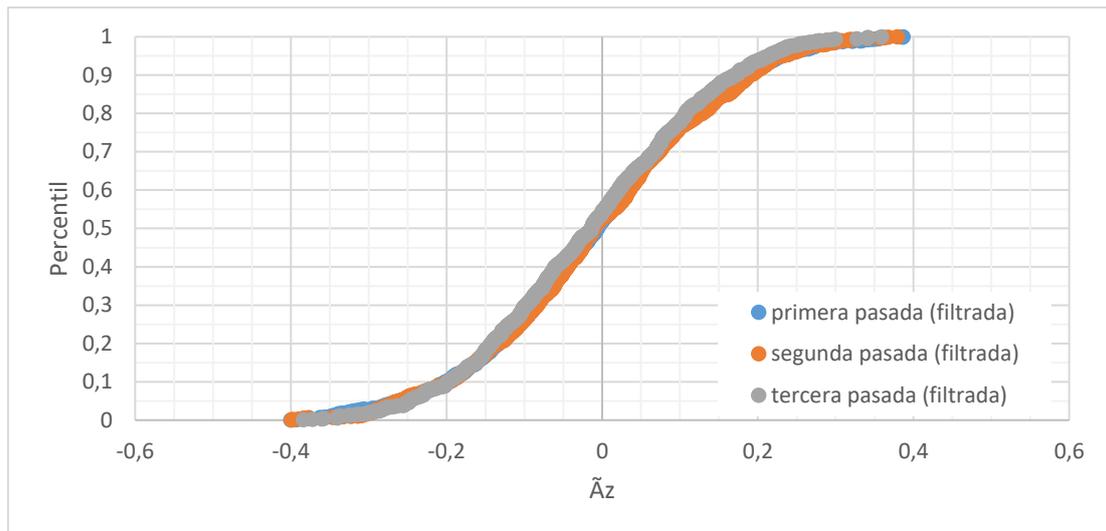


Figura 34. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en ASF-CIU

#### ASF-COL

En este conjunto se puede ver que las pasadas son bastante parecidas entre sí, teniendo un *RMS* similar, aunque con una mayor desviación que en el caso del tramo ASF-CIU. Esto también se puede ver en el gráfico de percentiles, ya que no son tan coincidentes como en el caso anterior. Pese a ello, como la desviación de los *RMS* es inferior al establecido anteriormente, puede considerarse iguales.

Tabla 7. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 20 km/h en ASF-COL

Pasada	<i>RMS</i> [g]
1	0,20968913
2	0,18904486
3	0,24466512
$\sigma$	0,02811618

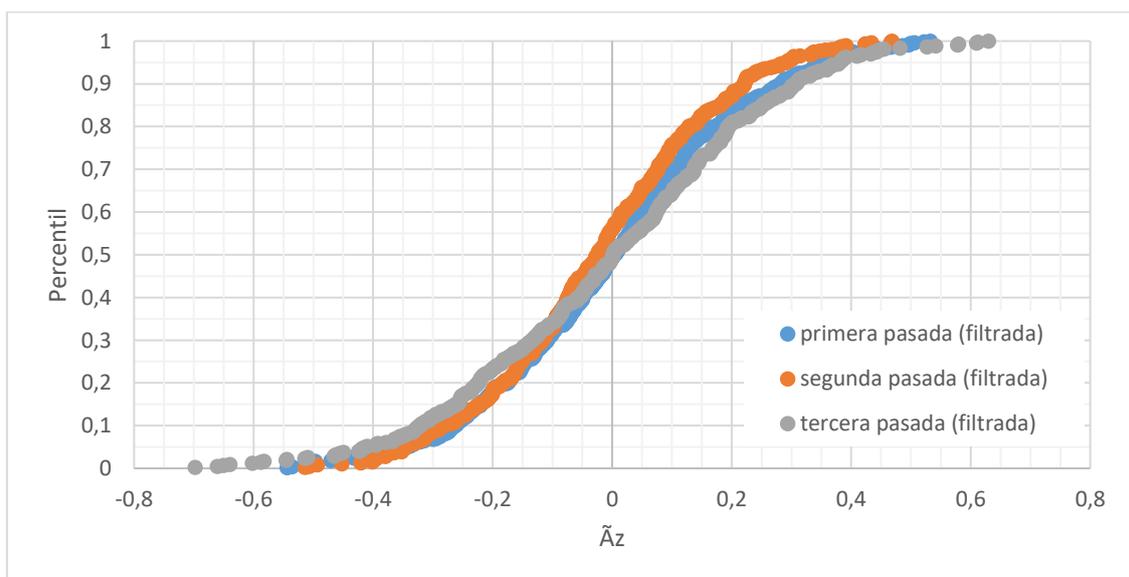


Figura 35. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en ASF-COL

#### ASF-RN

En la sección ASF-NR a 20 km/h se puede ver que las pasadas son similares entre sí, como se observa en el gráfico de percentiles. Las tres batidas presentan

además un *RMS* muy similar entre sí, cumpliendo con el criterio de la desviación siendo inferior a 0,04 *g*

Tabla 8. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 20 km/h en ASF-RN

Pasada	<i>RMS</i> [ <i>g</i> ]
1	0,178924
2	0,192909
3	0,191317
$\sigma$	0,007656

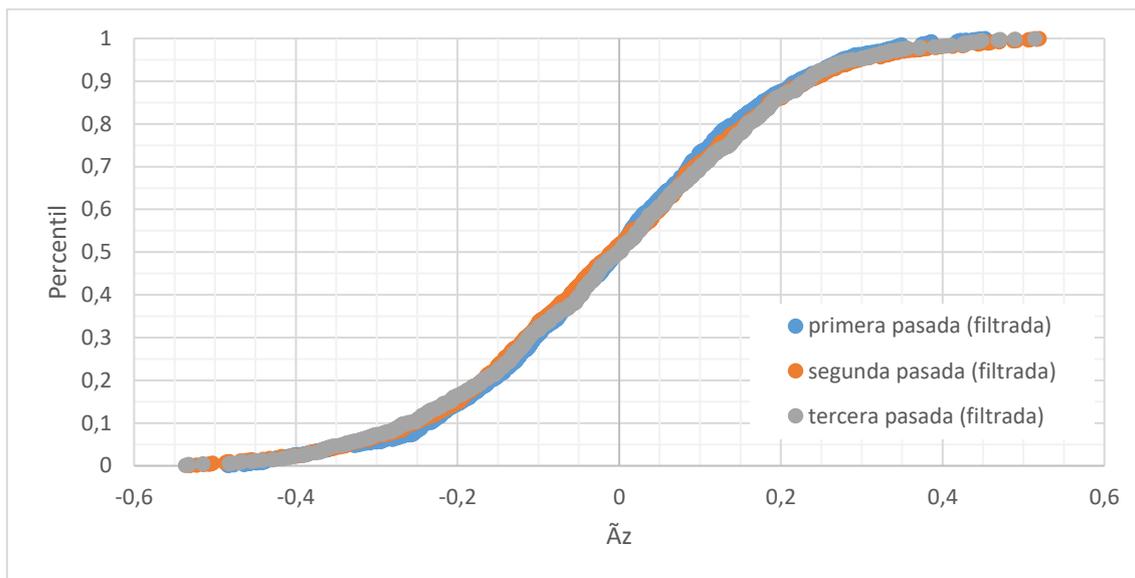


Figura 36. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en ASF--RN

#### Conjunto asfalto

Después de haber analizado las 3 secciones individualmente, se procedió al análisis conjunto, comparando los tres conjuntos.

Como se puede ver en la Figura 37, la sección ASF-CIU registra unas aceleraciones menores al de las otras dos, y al comprobar la desviación de los *RMS* de cada sección se ve que no supera el límite de 0,04 *g*.

Por tanto, pueden agruparse para formar el registro de datos de los pavimentos asfálticos cuando se recorren a 20 km/h.

Tabla 9. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 20 km/h en asfalto.

Sección	<i>RMS</i> [ <i>g</i> ]
ASF-CIU	0,145273
ASF-COL	0,207793
ASF-RN	0,185192
$\sigma$	0,031657

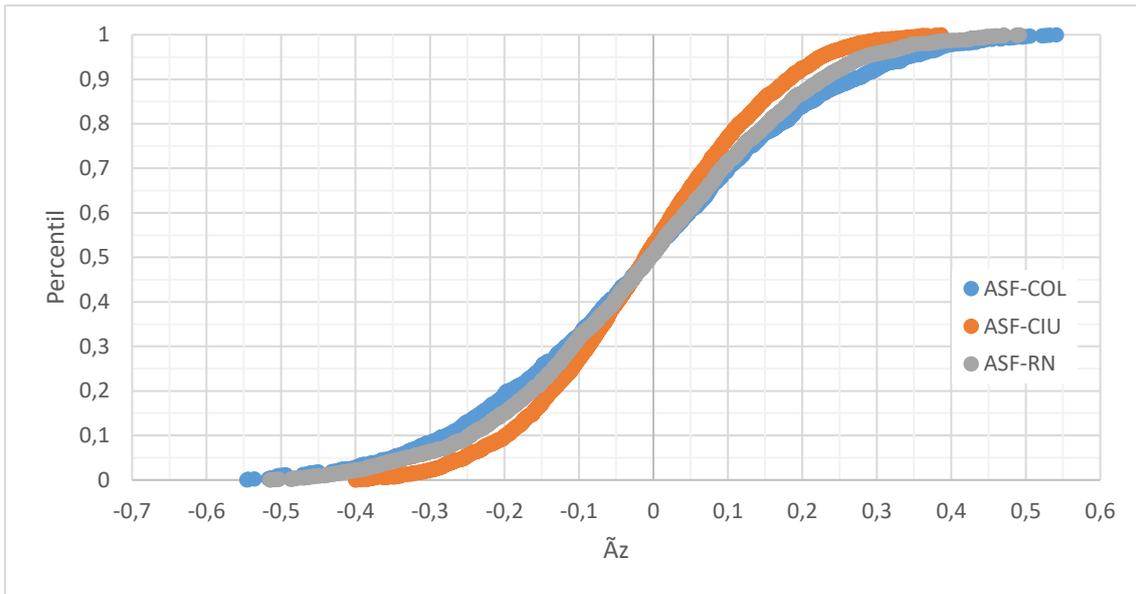


Figura 37. Comparación de las secciones de asfalto a 20 km/h

### Pavimento de hormigón

#### H-UPV

El rango de datos es prácticamente idéntico entre las pasadas, a la vista de la Figura 38. Esto también lo reflejan las medias cuadráticas, cuya desviación es inferior al 0,03  $g$  establecido anteriormente.

Además, en la gráfica de percentiles se puede ver que se superponen, por lo que no es necesario tomar más datos y pueden agregarse para representar esta sección.

Tabla 10. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en H-UPV.

Pasada	RMS [ $g$ ]
1	0,43425965
2	0,43598168
3	0,41582021
$\sigma$	0,01117634

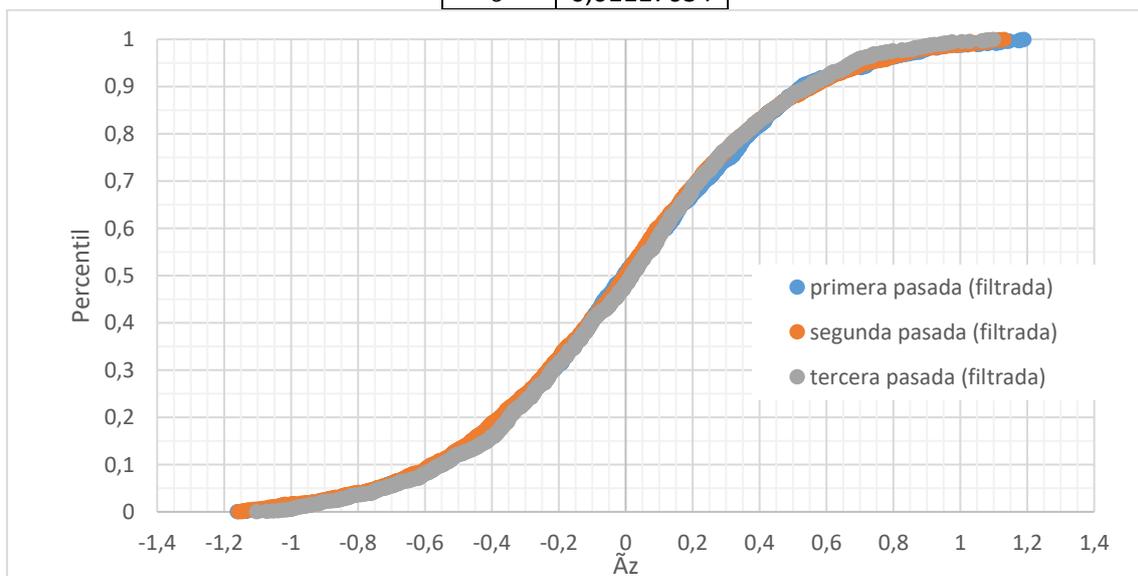


Figura 38. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en H-UPV

### H-CAV

Esta sección presenta una mayor diferencia entre las pasadas que el resto de los tramos analizados. Esto se puede ver en la Figura 39, donde se nota una mayor diferencia entre las aceleraciones positivas de cada pasada, así como también en el valor del *RMS*. La desviación estándar del *RMS* es  $\sigma \cong 0,057 g$ , por lo que sería necesaria mínimo otra pasada. Sin embargo, un análisis ANOVA de un factor revela que no existe una diferencia significativa entre las tres muestras suficiente para considerarlas pertenecientes a poblaciones diferentes, por lo que pueden seguir considerándose representativas de la sección. En la Tabla 12 se muestra los parámetros del análisis ANOVA y se puede comprobar como el valor F es menor al valor crítico,

Tabla 11. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en H-CAV

Pasada	<i>RMS</i> [g]
1	0,36294888
2	0,42549845
3	0,47620555
$\sigma$	0,0567314

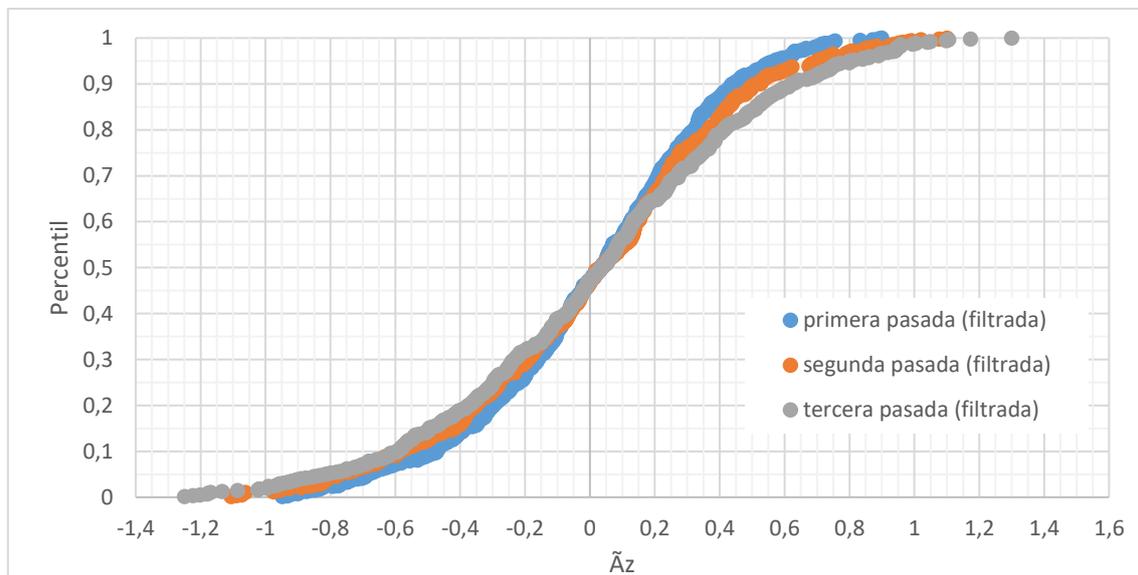


Figura 39. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en H-CAV

Tabla 12. Análisis ANOVA de la sección H-CAV a 20 km/h

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,05984109	2	0,02992055	0,16840914	0,84502174	3,00087225
Dentro de los grupos	310,559837	1748	0,17766581			
Total	310,619678	1750				

### H-BLA

En esta sección también se presenta una diferencia entre las pasadas, aunque el gráfico de percentiles muestra un ajuste mejor. Pese a este mejor ajuste en los percentiles, la desviación típica de los *RMS* queda por encima del límite, por lo que al igual que con la sección H-CAV, se llevó a cabo un análisis ANOVA. Este también reflejó

que la diferencia no era suficiente como para considerarlos estadísticamente diferentes, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 13. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en H-BLA

Pasada	RMS [g]
1	0,56478
2	0,466182
3	0,499782
$\sigma$	0,050125

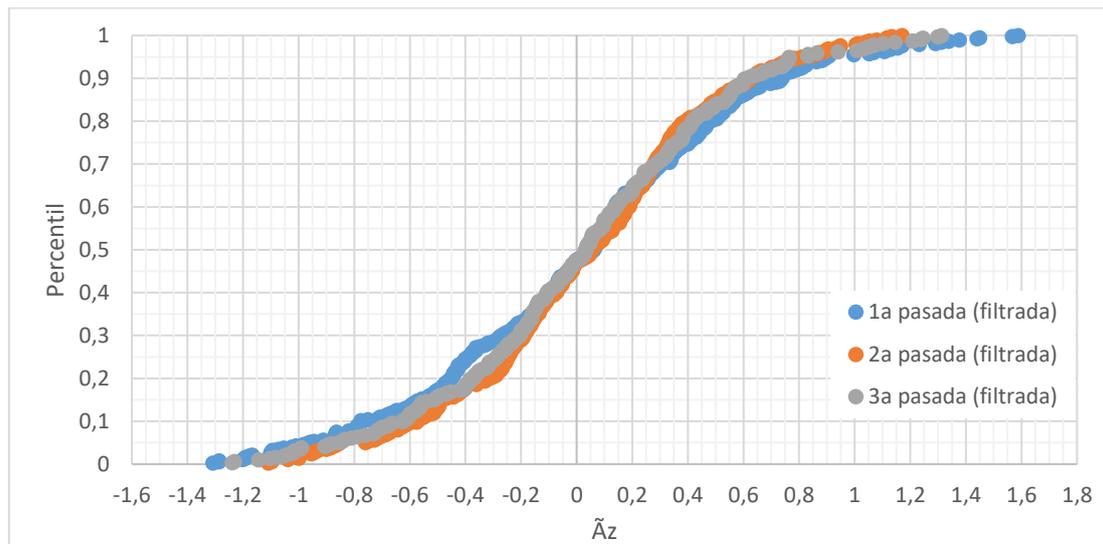


Figura 40. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en H-BLA

Tabla 14. Análisis ANOVA de la sección H-BLA a 20 km/h

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,06332092	2	0,03166046	0,12061259	0,88638942	3,00419069
Dentro de los grupos	279,034486	1063	0,26249716			
Total	279,097807	1065				

#### Conjunto hormigón

Tras analizar las tres secciones de hormigón recorridas a 20 km/h de forma individual, se preparó el análisis conjunto de las mismas. De este análisis derivan la Tabla 15 y la Figura 41. En ellos se puede ver que las tres secciones analizadas tienen una distribución de aceleraciones verticales muy similar, siendo casi coincidentes a la vista del gráfico, siendo la desviación de los RMS ligeramente superior al límite de 0,04g, por lo que se va a suponer que no es necesario añadir ningún tramo.

Por ello, se pueden tomar como tramos representativos de los carriles bici de hormigón recorridos a 20 km/h, pudiendo así agregarlos para generar una única muestra para comparar más adelante con el resto de configuraciones de pavimentos y velocidades.

Tabla 15. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en hormigón

Sección	RMS [g]
H-UPV	0,4258599
H-CAV	0,4113725
H-BLA	0,4925261
$\sigma$	0,0432824

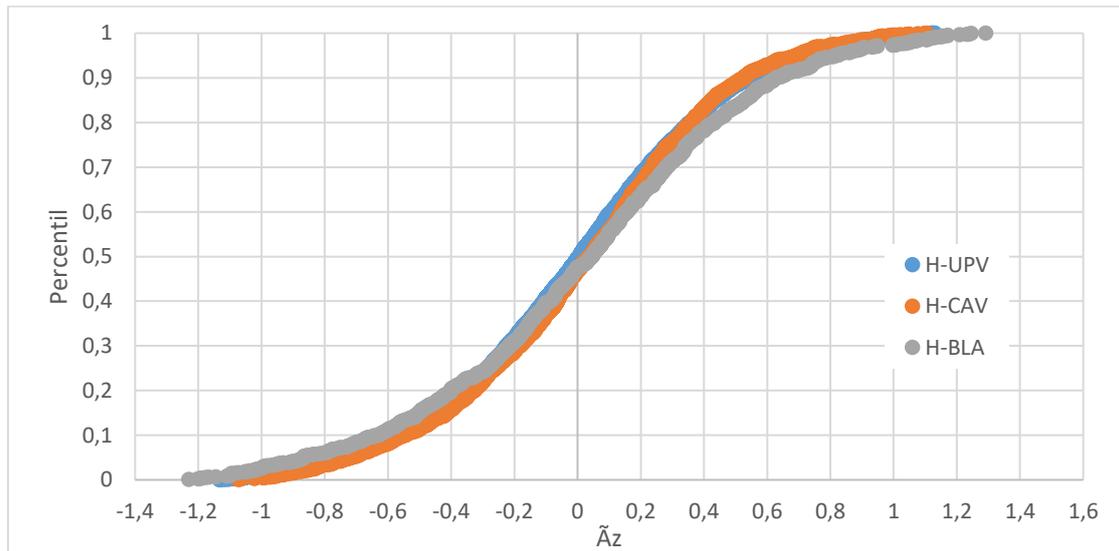


Figura 41. Comparación de las secciones de hormigón a 20 km/h.

### Pavimento de baldosas

#### B-ALA

La Tabla 16 corrobora la hipótesis de que son estadísticamente iguales, ya que la desviación estándar de los RMS es de  $\sigma = 0,011 g$ . Además, en la Figura 42 se ve que son prácticamente coincidentes, aunque la tercera pasada difiere ligeramente en la zona cercana a la media.

Tabla 16. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en B-ALA

Pasada	RMS [g]
1	0,38592898
2	0,36352049
3	0,37464907
$\sigma$	0,01120433

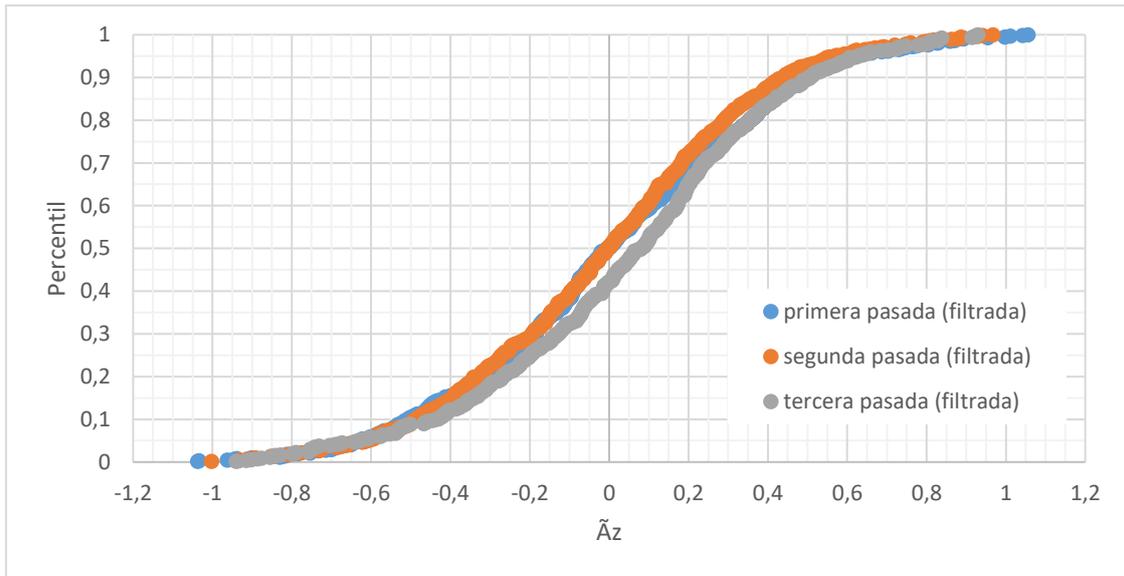


Figura 42. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en B-ALA

### B-SAL

A la vista tanto de la desviación de los *RMS* como de la gráfica de percentiles, las 3 pasadas correspondientes a la sección B-SAL a 20 km/h pueden considerarse estadísticamente iguales.

Tabla 17. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 20 km/h en B-SAL

Pasada	<i>RMS</i> [g]
1	0,43977067
2	0,45915179
3	0,47322597
$\sigma$	0,01679766

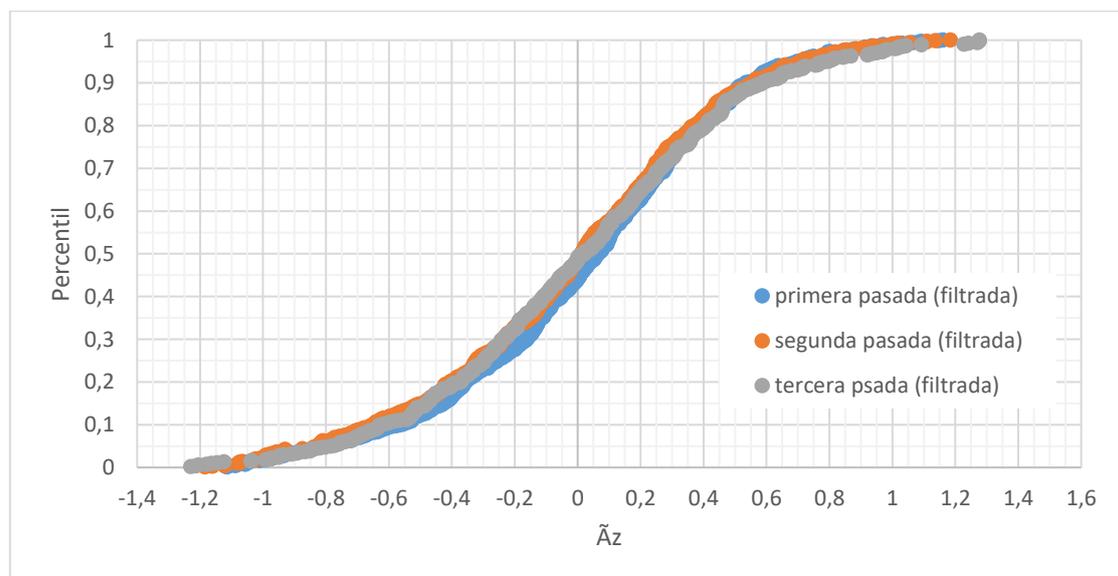


Figura 43. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en B-SAL

### B-MAC

En cuanto al tramo B-MAC, las tres pasadas pueden considerarse pertenecientes a la misma población, dado el alto grado de coincidencia entre los *RMS* y los gráficos de percentiles.

Tabla 18. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 20 km/h en B-MAC

Pasada	<i>RMS</i> [g]
1	0,45246761
2	0,39649453
3	0,43929356
$\sigma$	0,02926402

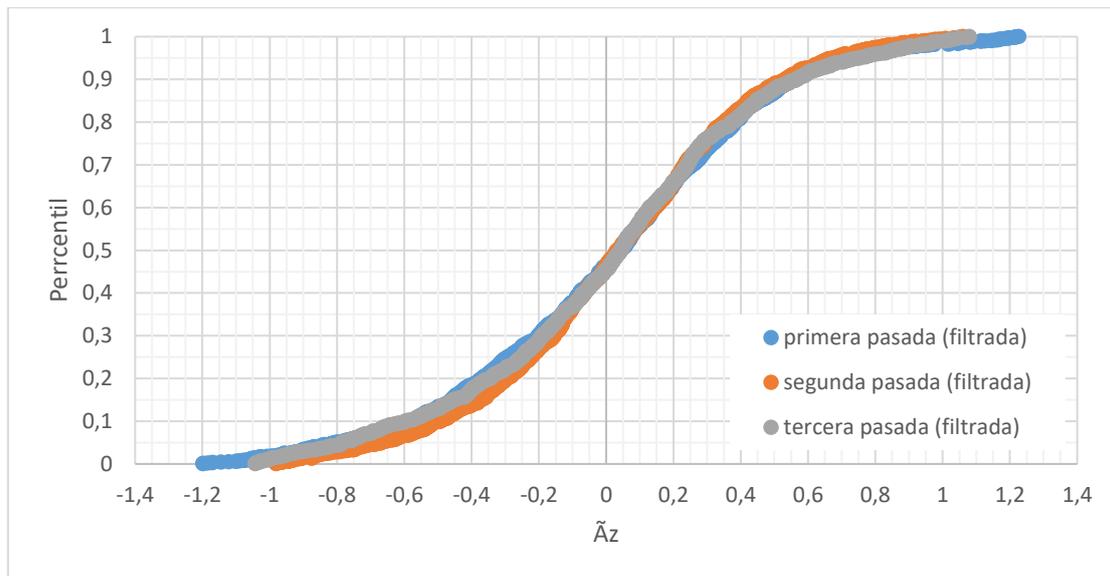


Figura 44. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en B-MAC

### Conjunto baldosas

Tras comparar las tres secciones se elaboró la Figura 45, en la que se muestran la distribución de percentiles de todas las secciones. El tramo de Alameda es el que menos se parece, aunque sigue siendo suficientemente cercano como para considerarlo igual, tal y como demuestra la desviación de las medias cuadráticas.

Por ello, se consideró razonable agrupar las tres secciones para representar el pavimento de baldosas cuadradas a una velocidad de 20 km/h.

Tabla 19. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 20 km/h en baldosas

Sección	<i>RMS</i> [g]
B-ALA	0,372051
B-SAL	0,449265
B-MAC	0,419839
$\sigma$	0,038969

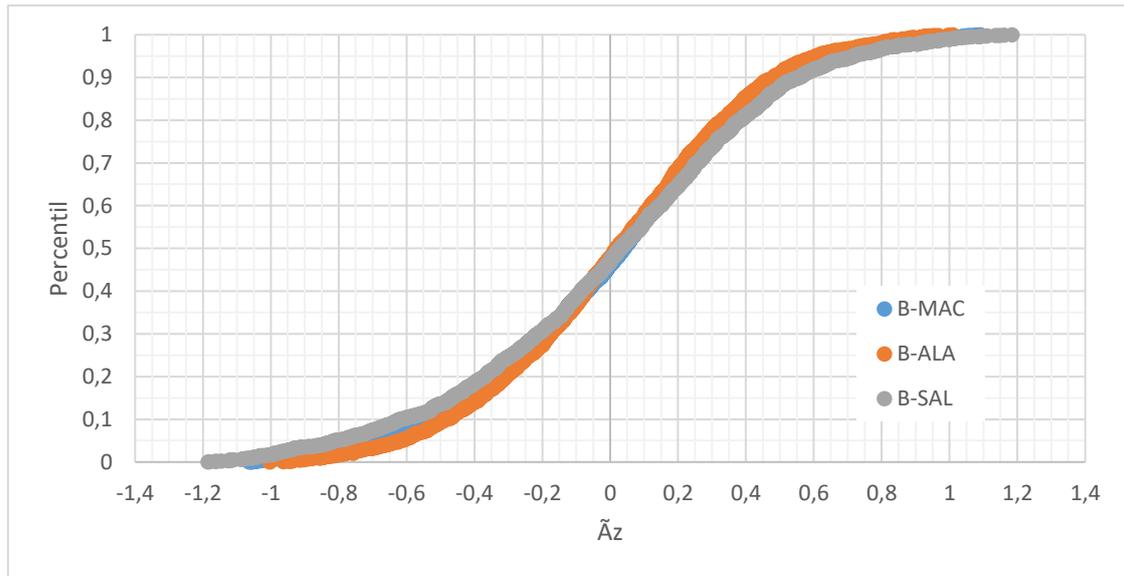


Figura 45. Comparación de las secciones de baldosas a 20 km/h

### Adoquinado transversal

En esta sección se puede ver que las tres pasadas son conjuntos prácticamente idénticos, y que por tanto representan correctamente las vibraciones del carril bici. Por otra parte, al ser el único carril bici de adoquines transversales, y al querer representar esta distribución, se considerará como representativo de los carriles bici con adoquines transversales a 20 km/h.

Tabla 20. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 20 km/h en ADTR-UV

Pasada	RMS [g]
1	0,60452123
2	0,59148278
3	0,59189655
$\sigma$	0,0074112

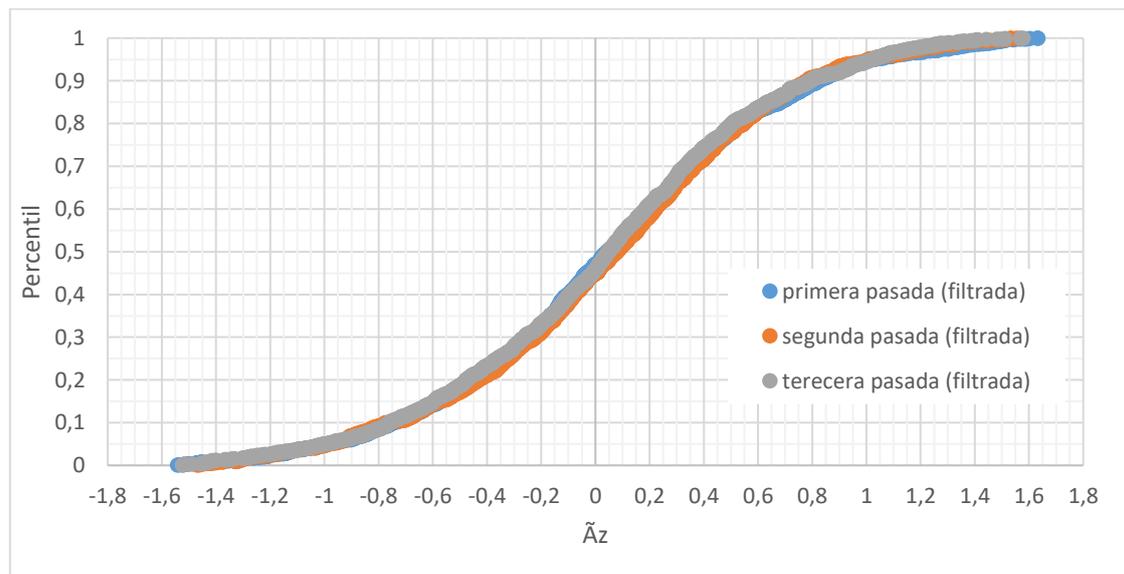


Figura 46. Percentiles de las pasadas a 20 km/h realizadas en ADTR-UV

### Velocidad 15 km/h

#### Pavimento asfáltico

##### ASF-CIU

En este caso se puede ver al comparar los *RMS* (Tabla 21) y en la gráfica de percentiles (Figura 47) que no existe diferencia estadística significativa entre las pasadas, ya que los *RMS* presentan una desviación muy inferior al límite de 0,04 *g*.

Tabla 21. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 15 km/h en ASF-CIU

Pasada	<i>RMS</i> [ <i>g</i> ]
1	0,10815808
2	0,1162554
3	0,12369466
$\sigma$	0,0077706

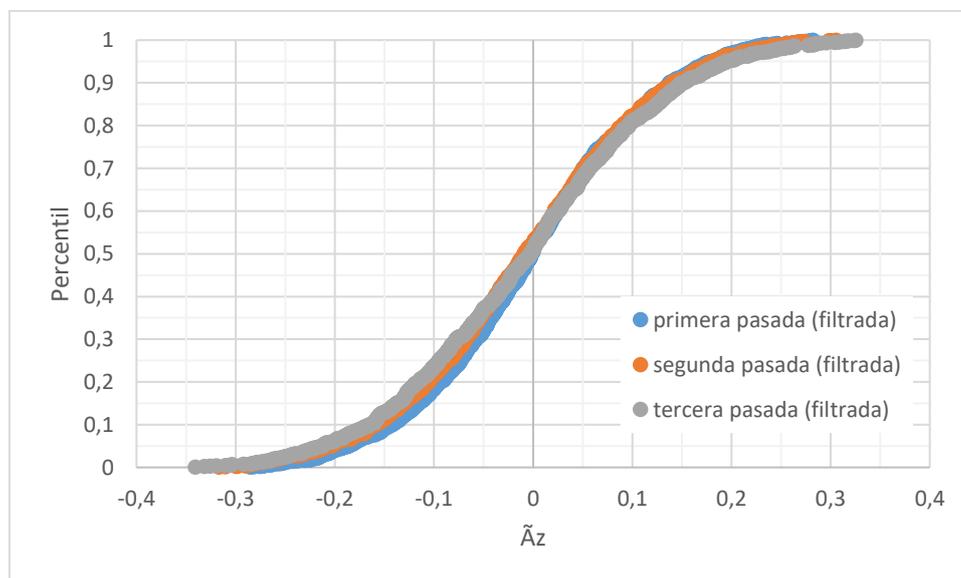


Figura 47. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en ASF-CIU

##### ASF-COL

Para la velocidad de 15 km/h en la sección ASF-COL se obtiene una distribución en las pasadas más parecidas entre sí que a 20 km/h, aunque sigue existiendo una diferencia en el sector positivo de las aceleraciones. Pese a esto último, y a la vista de la tabla de *RMS* se puede confirmar que pertenecen a la misma población.

Tabla 22. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 15 km/h en ASF-COL

Pasada	<i>RMS</i> [ <i>g</i> ]
1	0,15477135
2	0,16567335
3	0,13846182
$\sigma$	0,01369502

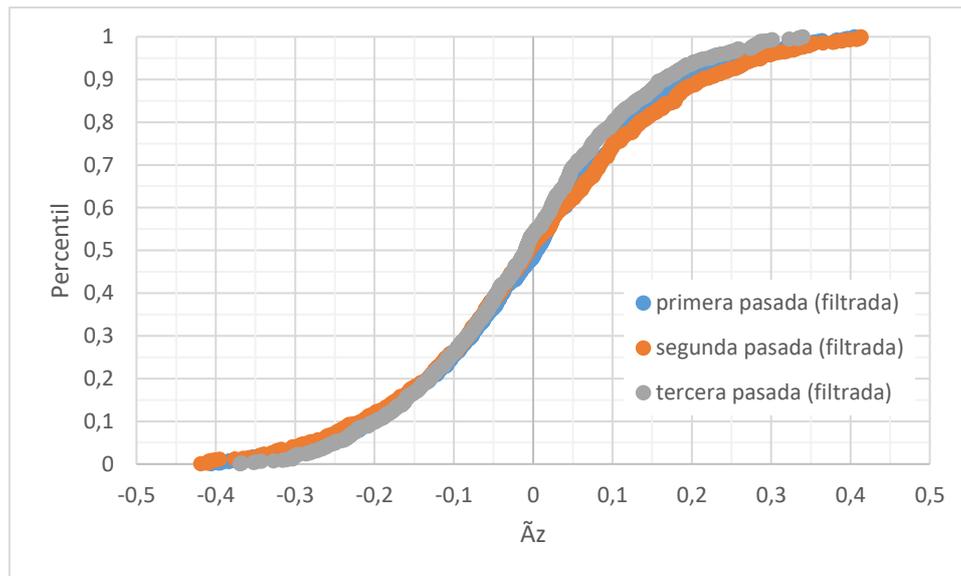


Figura 48. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en ASF-COL

#### ASF-RN

A 15 km/h, la sección de la Ronda Nord muestra la misma similitud entre las pasadas que a 20 km/h, teniendo una desviación de los RMS muy pequeña.

Tabla 23. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en ASF-RN

Pasada	RMS [g]
1	0,139296
2	0,144537
3	0,138479
$\sigma$	0,003287

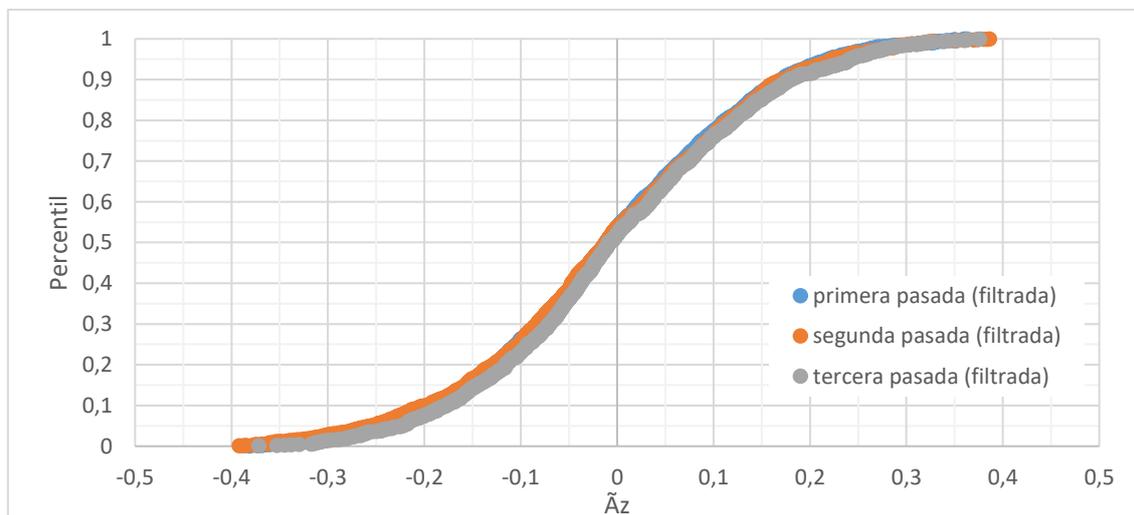


Figura 49. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en ASF-RN.

#### Conjunto asfalto

A 15 km/h, se puede observar que la diferencia entre los RMS de cada sección es menor que a 20 km/h, siendo la desviación en este caso de  $\sigma = 0,018 g$ . Además, en la Figura 50 se observa una mayor coincidencia entre las secciones. Por ello, se confirma la hipótesis de poder ser agrupadas para confeccionar el grupo de datos que representen los pavimentos de asfalto recorridos a 15 km/h.

Tabla 24. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en asfalto

Sección	RMS [g]
ASF-CIU	0,114653
ASF-COL	0,149611
ASF-RN	0,140497
$\sigma$	0,018134

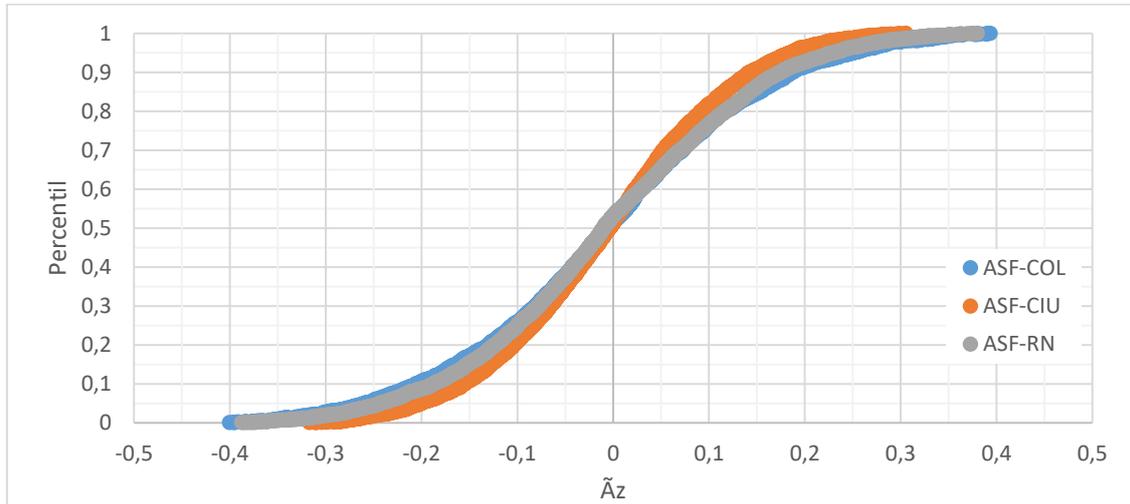


Figura 50. Comparación de las secciones de asfalto a 15 km/h

### Pavimento de hormigón

#### H-UPV

Debido a un problema con la Raspberry durante la toma de datos que no se pudo solucionar a tiempo, de este tramo sólo se pudieron realizar 2 pasadas a 15 km/h, como ya se ha comentado anteriormente. Sin embargo, la semejanza entre ambas pasadas parece indicar que no sería necesaria una tercera pasada para garantizar una correcta representación de las aceleraciones verticales, ya que la desviación de los RMS es de  $\sigma = 0,0078 g$ , y el límite para 2 datos es de  $0,03 g$ .

Tabla 25. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en H-UPV

Pasada	RMS [g]
1	0,29936132
2	0,2883399
$\sigma$	0,0077932

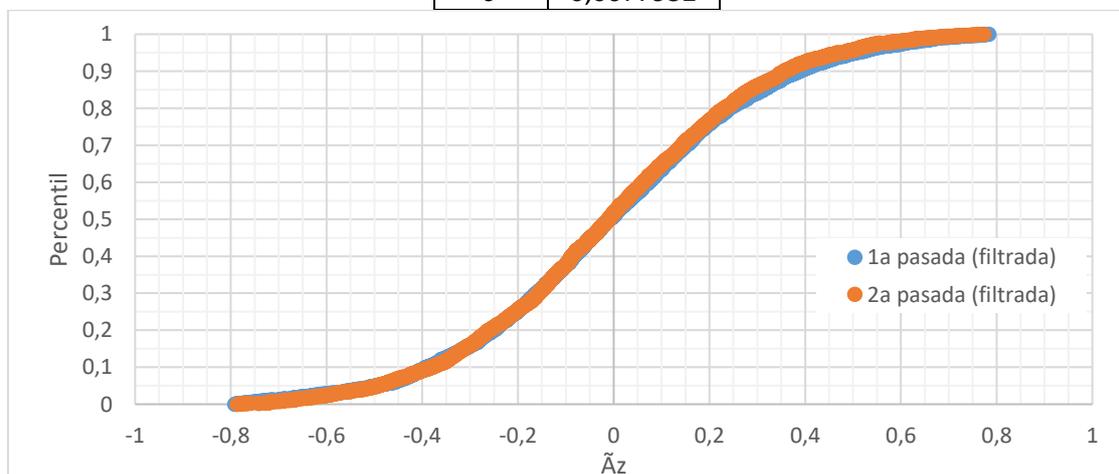


Figura 51. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en H-UPV

#### H-CAV

Al contrario que en el caso de esta misma sección a 20 km/h, aquí la diferencia entre las secciones es muy pequeña, siendo prácticamente coincidentes los *RMS* y las gráficas de percentiles. Es por tanto correcto agruparlos para conformar la serie de datos que representen esta sección y velocidad en el análisis posterior.

Tabla 26. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 15 km/h en H-CAV

Pasada	<i>RMS</i> [g]
1	0,32899441
2	0,29763068
3	0,31400142
$\sigma$	0,01568691

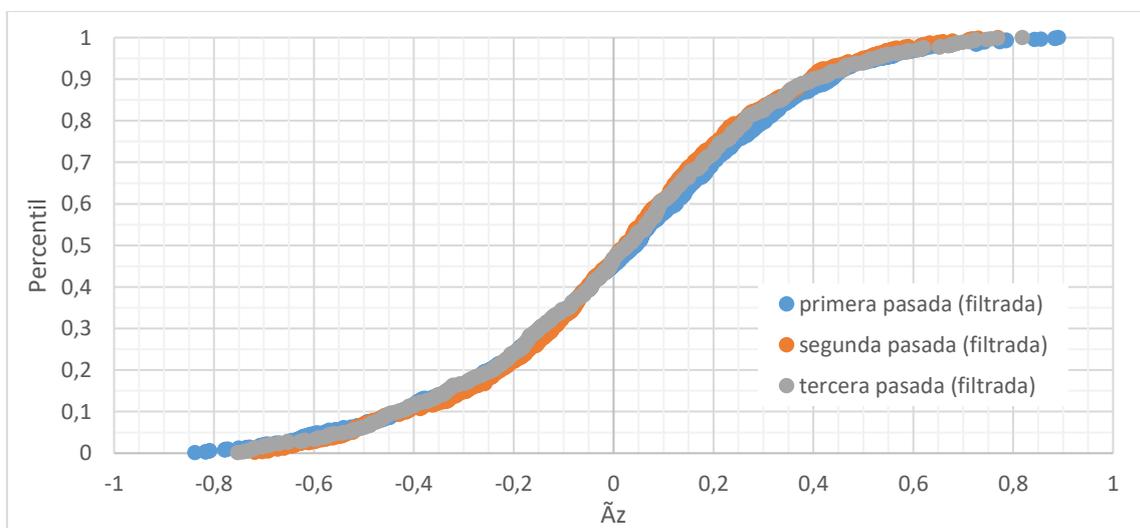


Figura 52. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en H-CAV

#### H-BLA

Este conjunto de datos también presenta una gran similitud entre las tres pasadas a 15 km/h. Esto salta a la vista al ver la Tabla 27, ya que la desviación de los *RMS* es muy pequeña. Por ello, aunque en la Figura 53 se vea que difiere un poco en la zona positiva, es seguro afirmar que forman parte de la misma población (Tramo H-BLA a 15 km/h)

Tabla 27. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 15 km/h en H-BLA

Pasada	<i>RMS</i> [g]
1	0,340056
2	0,374879
3	0,352389
$\sigma$	0,017657

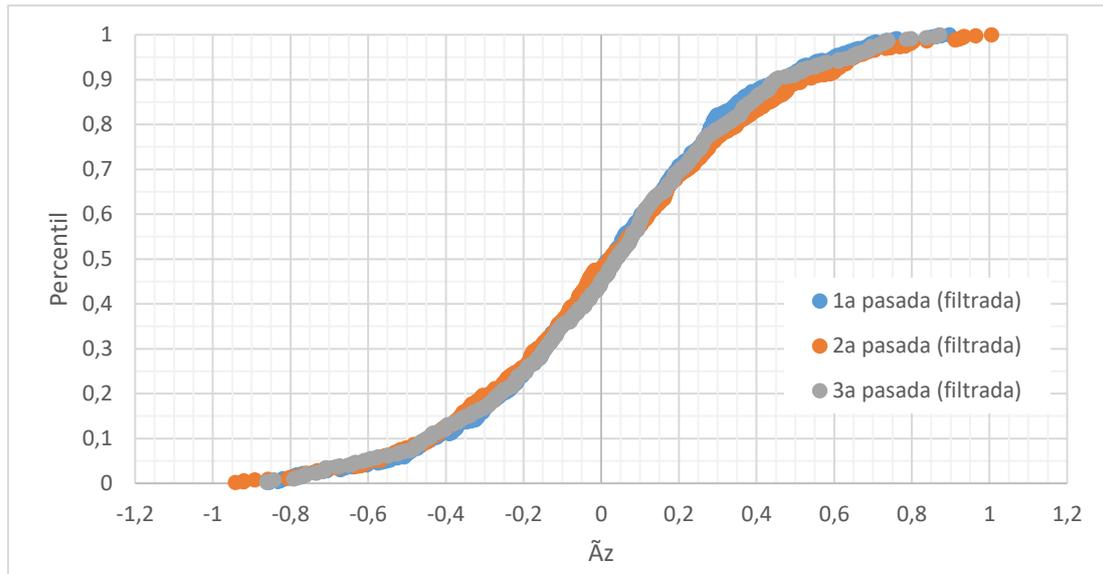


Figura 53. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en H-BLA

### Conjunto hormigón

Al comparar los resultados obtenidos para las secciones de hormigón a 15 km/h se obtienen la Figura 54 y la Tabla 28, donde se aprecia que, pese a ajustarse bastante bien, la sección H-BLA presenta unas aceleraciones verticales positivas más grandes que las otras dos, mientras que en el lado negativo son prácticamente iguales. Pese a ello, dado que  $\sigma_{RMS} < 0,04$ , se puede asumir que son iguales.

Tabla 28. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en hormigón

Sección	RMS [g]
H-UPV	0,293691033
H-CAV	0,310766966
H-BLA	0,352561991
$\sigma$	0,03028807

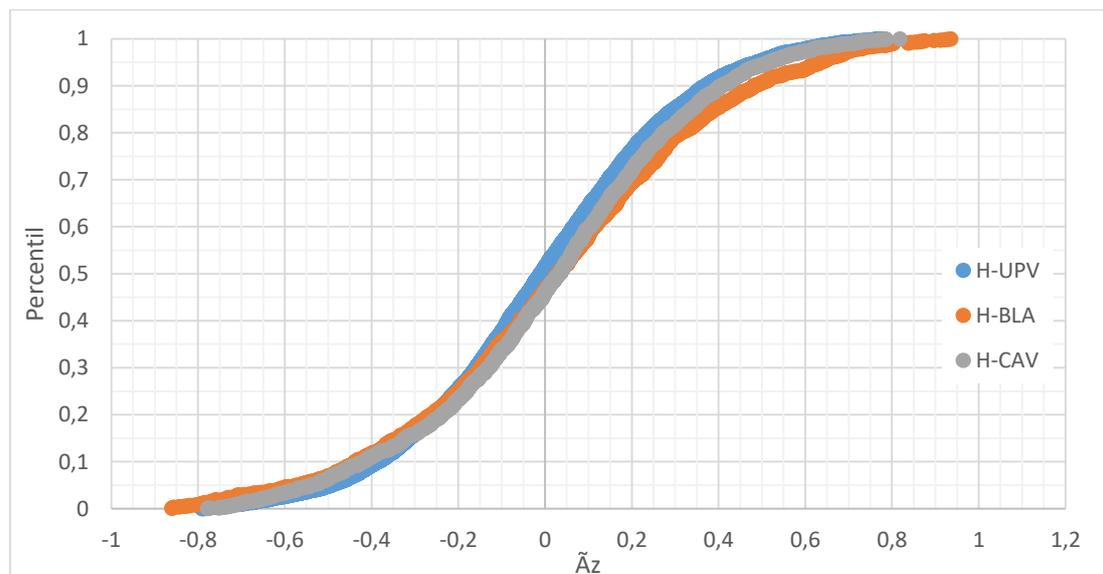


Figura 54. Comparación de las secciones de hormigón a 15 km/h

### Pavimento de baldosas

#### B-ALA

Igual que a 20 km/h, las 3 pasadas son estadísticamente iguales, a la vista de la Tabla 29.

Tabla 29. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en B-ALA

Pasada	RMS [g]
1	0,27414904
2	0,28819251
3	0,31238773
$\sigma$	0,01934263

Una diferencia con en el recorrido a 20 km/h es que, en la gráfica de percentiles, las tres pasadas son más coincidentes, lo cual también apoya la hipótesis de que son estadísticamente iguales.

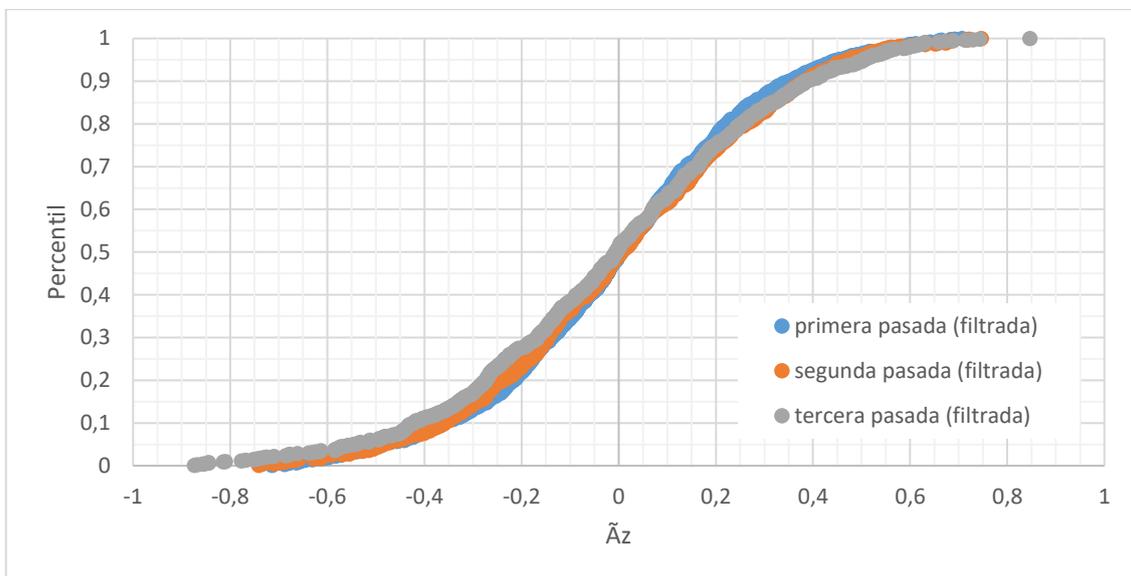


Figura 55. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en B-ALA.

#### B-SAL

En este caso, se pueden ver que el valor del RMS es muy similar y la práctica coincidencia en el diagrama de percentiles, pueden considerarse de la misma población.

Tabla 30. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en B-SAL

Pasada	RMS [g]
1	0,26231611
2	0,28379802
3	0,31940027
$\sigma$	0,02883168

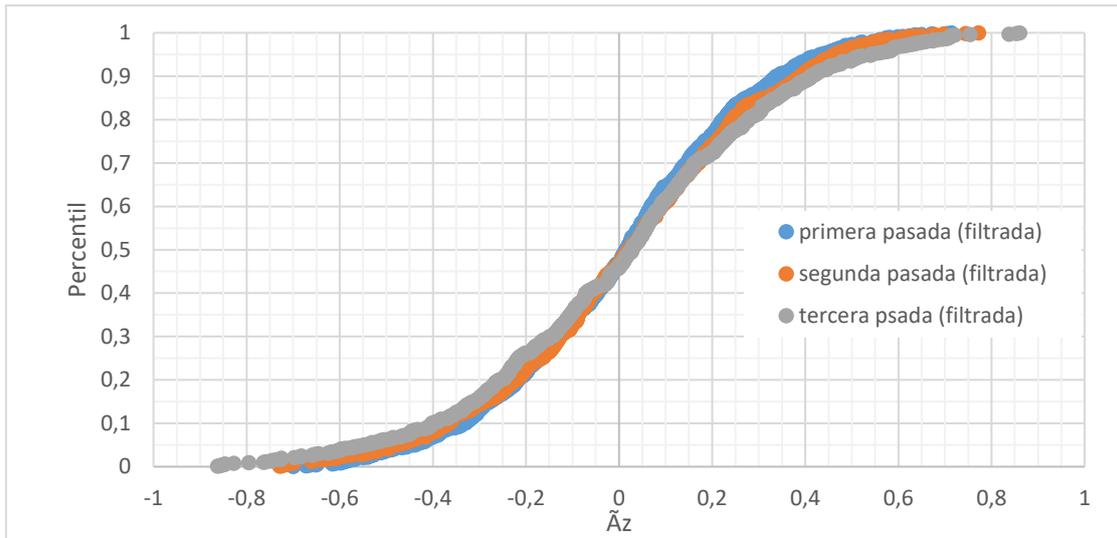


Figura 56. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en B-SAL

### B-MAC

A partir de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 57, así como con la Tabla 31, se puede deducir que las tres pasadas representan correctamente a la sección B-MAC, ya que todas son muy similares entre sí.

Tabla 31. Tabla resumen de los RMS de las pasadas a 15 km/h en B-MAC

Pasada	RMS [g]
1	0,25721642
2	0,30004388
3	0,25381996
$\sigma$	0,02576295

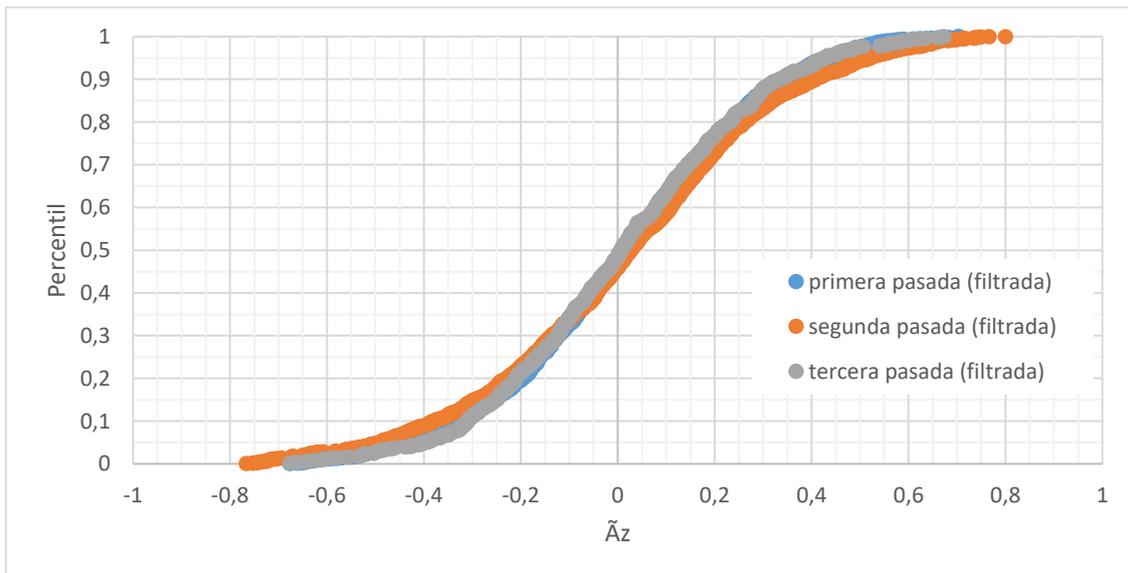


Figura 57. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en B-MAC

### Conjunto baldosas

A diferencia del conjunto de tramos de baldosas a 20 km/h, el ajuste entre las tres secciones a 15 km/h es casi perfecto, a la vista de la Figura 58 y del valor de la

desviación del *RMS*. Por tanto, es posible agruparlos para conseguir una representación del pavimento de baldosas cuadradas de 20 cm de lado a 15 km/h

Tabla 32. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 15 km/h en baldosas

Sección	<i>RMS</i> [g]
B-ALA	0,286978
B-SAL	0,282968
B-MAC	0,269205
$\sigma$	0,00932184

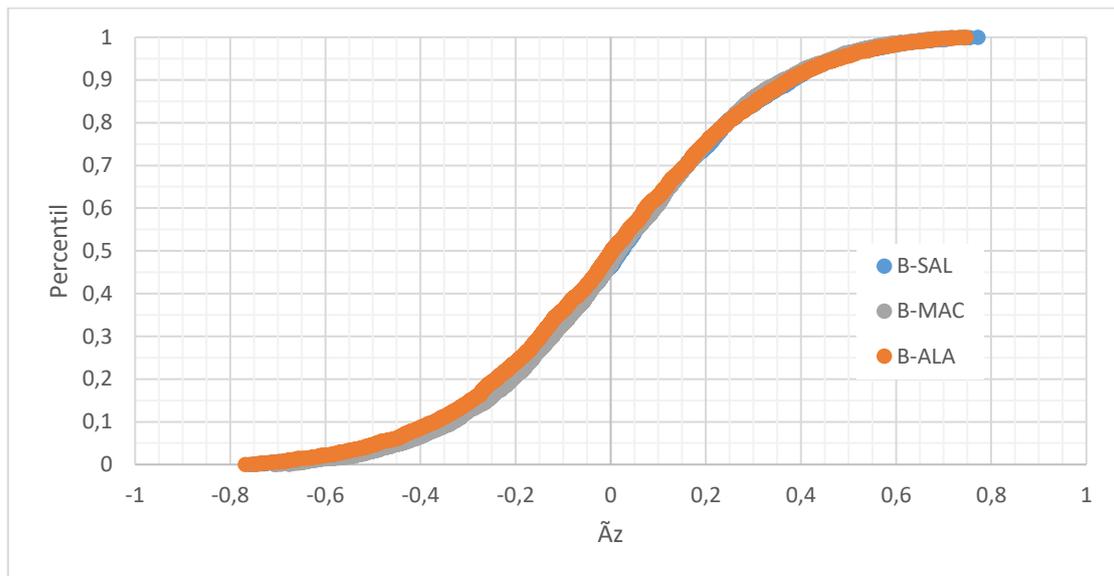


Figura 58. Comparación de las secciones de baldosas a 15 km/h

#### Adoquinado transversal

En esta sección se puede ver que las tres pasadas son también prácticamente coincidentes (en especial la primera y la tercera), y que por tanto representan correctamente las vibraciones del carril bici. Por otra parte, al ser el único carril bici de adoquines transversales, y al querer representar esta distribución, se considerará como representativo de los carriles bici con adoquines transversales a 15 km/h.

Tabla 33. Tabla resumen de los *RMS* de las pasadas a 15 km/h en ADTR-UV

Pasada	<i>RMS</i> [g]
1	0,41080441
2	0,45238175
3	0,42573514
$\sigma$	0,0210620

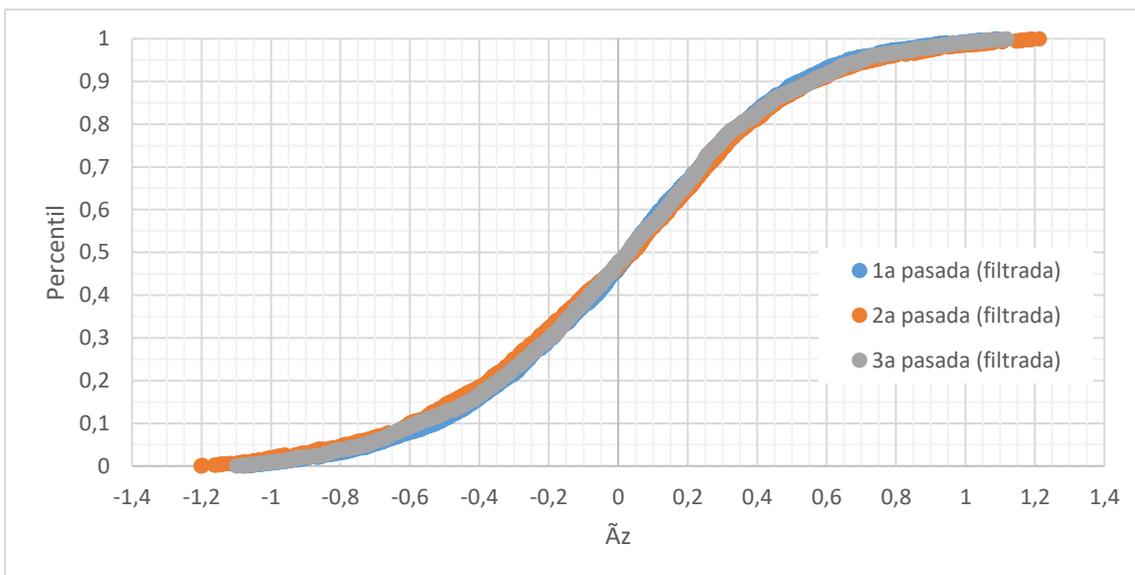


Figura 59. Percentiles de las pasadas a 15 km/h realizadas en ADTR-UV

### Comparación de pavimentos a diferentes velocidades

Una vez procesados y agregados todos los pavimentos se configuró una gráfica de percentiles que permitiera comparar los datos obtenidos entre sí (Figura 60), y otra para comparar los RMS de cada uno (Figura 61).

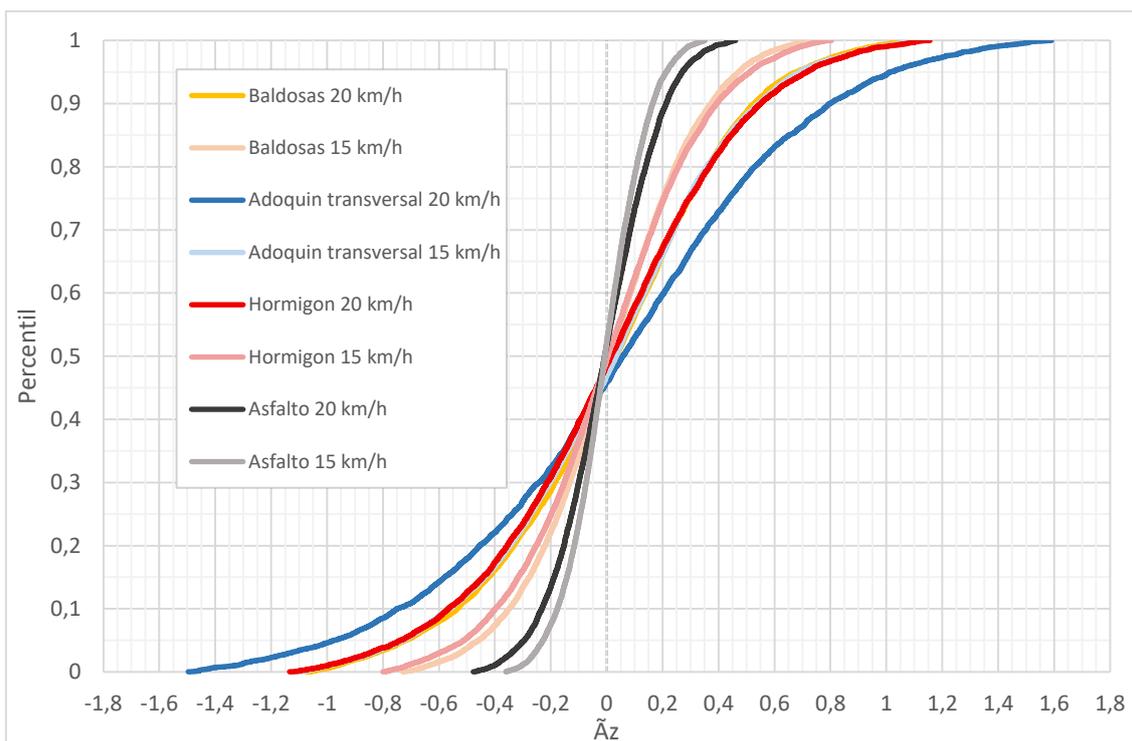


Figura 60. Comparación de las secciones y las distintas velocidades

De este gráfico se puede extraer la Tabla 34, donde se recogen las vibraciones en el percentil 5 y en el percentil 95 de cada tipología, conociendo así entre qué valores se encuentra el 90% de los datos.

Tabla 34. Rango de vibraciones aceptables para cada pavimento

Pavimento	$v_{circulación} = 20 \text{ km/h}$		$v_{circulación} = 15 \text{ km/h}$	
	Percentil 5	Percentil 95	Percentil 5	Percentil 95
Asfalto	-0,30 g	0,25 g	-0,20 g	0,20 g
Hormigón	-0,70 g	0,70 g	-0,50 g	0,50 g
Baldosas	-0,70 g	0,70 g	-0,45 g	0,45 g
Adoquinado transversal	-1,0 g	1,0 g	-0,70 g	0,70 g

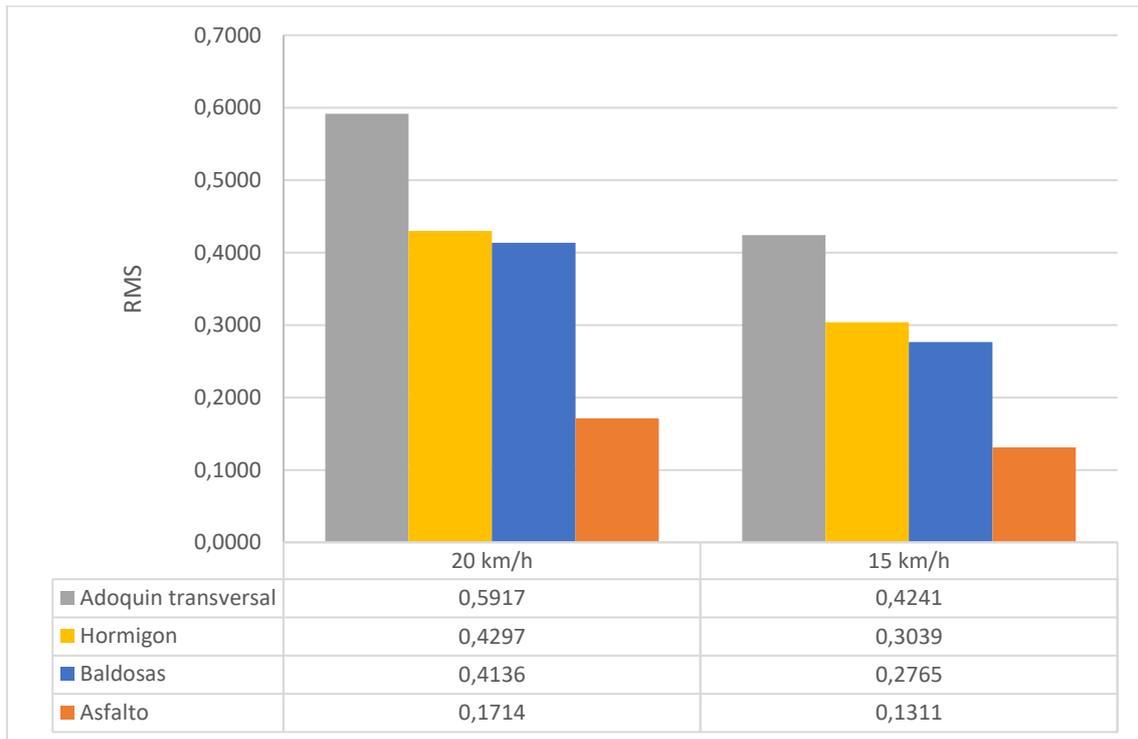


Figura 61. Comparación de los RMS de cada configuración a distinta velocidad

A la vista de los gráficos se puede observar que el asfalto es el que menores vibraciones genera, mientras que en segundo lugar se encuentran los pavimentos de hormigón y las baldosas cuadradas de 20x20 cm, que generan unas vibraciones casi idénticas. Por último, el adoquinado transversal con adoquines de 20x10 cm genera unas vibraciones mucho mayores al resto de pavimentos.

Además, se puede observar que las vibraciones generadas por el adoquinado a 15 km/h es equiparable a las generadas por hormigón o baldosas cuadradas de 20 cm a una velocidad de 20 km/h.

### 6.1.2. Impacto de los elementos singulares

En cuanto al impacto de los elementos singulares, esto debe analizarse individualmente para cada pasada, ya que no en todas se registraron elementos singulares y las ventanas deslizantes para el cálculo de la varianza no puede ser conjunto

En los apartados siguientes se presentarán las gráficas de las pasadas en las que se han registrado elementos singulares. En ellas se representan el registro de aceleraciones verticales de la pasada ( $\ddot{z}$ -g), la desviación estándar mediante una obtenida mediante ventanas deslizantes ( $desv_X$ , donde X es el número de la pasada) y



la desviación estándar de toda la pasada (media  $\text{desv}X$ , donde  $X$  es el número de la pasada). Los puntos con elementos singulares se han marcado y se ha colocado un número al lado que representa qué ha generado dicho valor anómalo en las gráficas.

1. Juntas/parqueo
2. Baches
3. Pavimento deteriorado
4. Trapas

Las juntas sólo aplican a las secciones de hormigón, ya que hace referencia a las juntas de dilatación que se realiza en este tipo de pavimento, mientras que los parqueo aplican a hormigón y a asfalto.

Se entiende como baches levantamiento del pavimento por presencia de raíces o de algún elemento de aforo que al cubrirlo haya levantado localmente el pavimento.

Dentro de pavimentos deteriorados se incluyen pasos de cebra (donde cambia la rugosidad) o en caso de asfalto cuando el carril bici cruza un carril de tráfico motorizado, así como si existe suciedad (principalmente ramas) en el pavimento por falta de limpieza.

Para ver todas las gráficas con todos los elementos detectados, ver Anexo III

#### Pavimento asfáltico

En las gráficas presentadas a continuación se muestran ejemplos de algunos elementos singulares en la sección ASF-CIU. Se presentan dos gráficas para el tramo a 20 km/h y otras dos para el tramo a 15 km/h.

Como se puede apreciar, tanto en la representación gráfica de las aceleraciones verticales como en la de la desviación por ventanas deslizantes es fácil determinar la presencia de elementos singulares. Algunos puntos singulares destacados en la serie de aceleraciones verticales se pierden en la representación de la desviación, debido al tamaño de las ventanas deslizantes. Sin embargo, queda demostrado que este método es capaz de detectar una gran cantidad de singularidades presentes en el registro.

Como conclusión en los pavimentos asfálticos se deduce que independientemente de la velocidad de circulación la diferencia en las vibraciones es considerable, pasando del rango determinado en el apartado anterior de  $\pm 0,3 g$  a valores que van desde  $\pm 0,5 g$  en los más leves, hasta  $\pm 3 g$  en casos extremos. Este valor está muy cerca del límite de la escala a la que se ha configurado el sensor, por lo que es posible que los resultados reales sean mayores a  $3 g$ , sería necesario repetir las pasadas cambiando la escala de medida del sensor para corroborarlo.

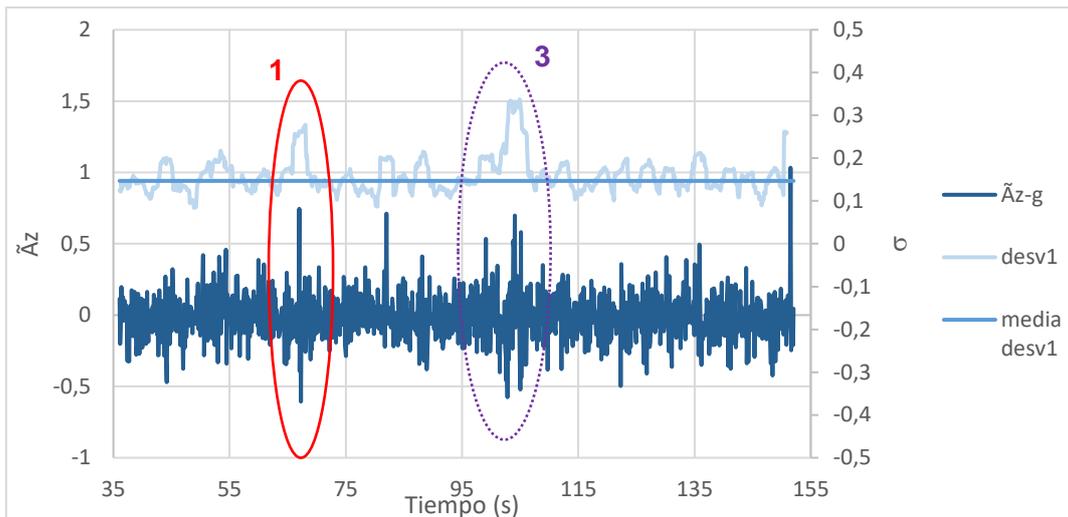


Figura 62. Elementos singulares en la 1ª pasada de ASF-CIU a 20 km/h

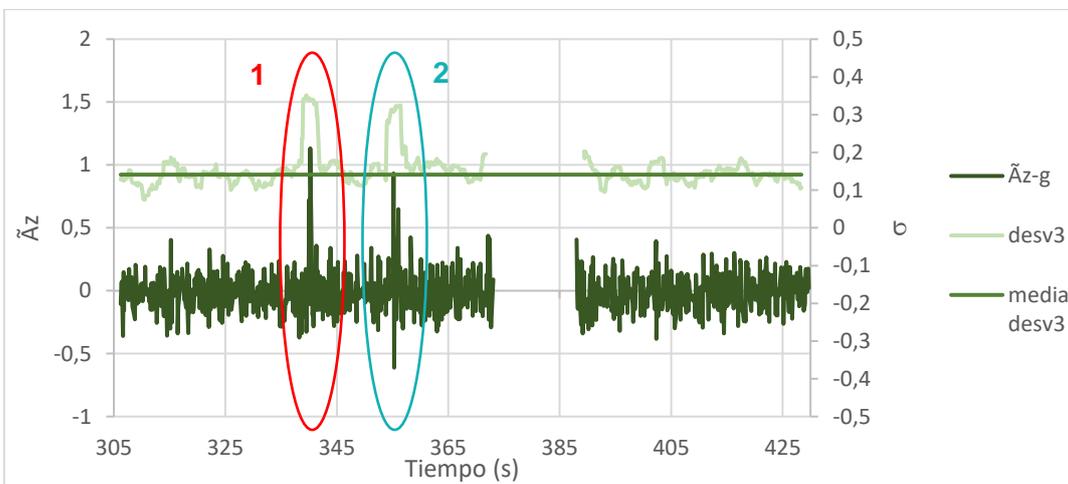


Figura 63. Elementos singulares en la 3ª pasada de ASF-CIU a 20 km/h

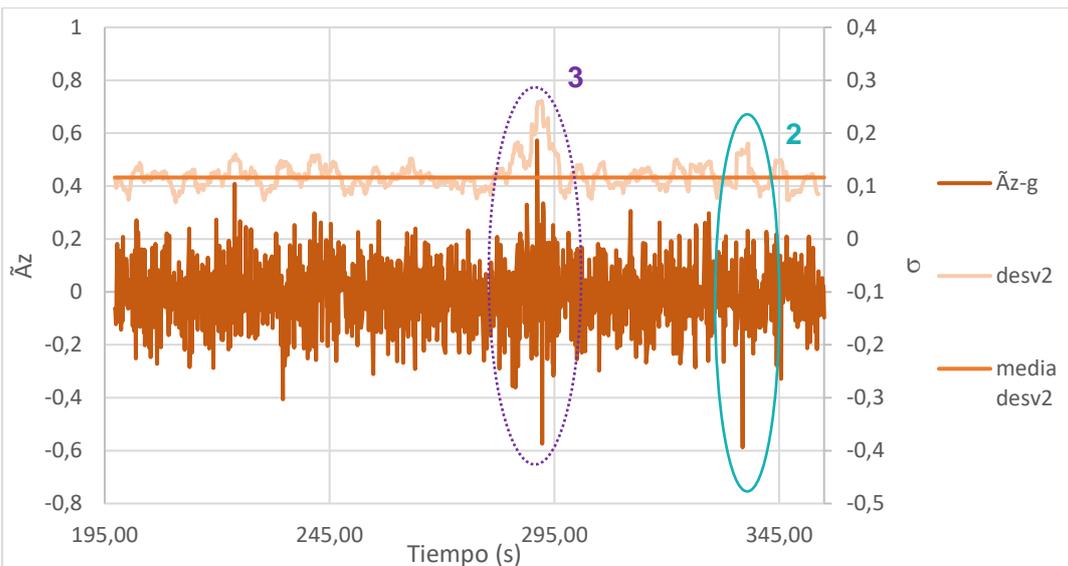


Figura 64. Elementos singulares en la 2ª pasada de ASF-CIU a 15 km/h

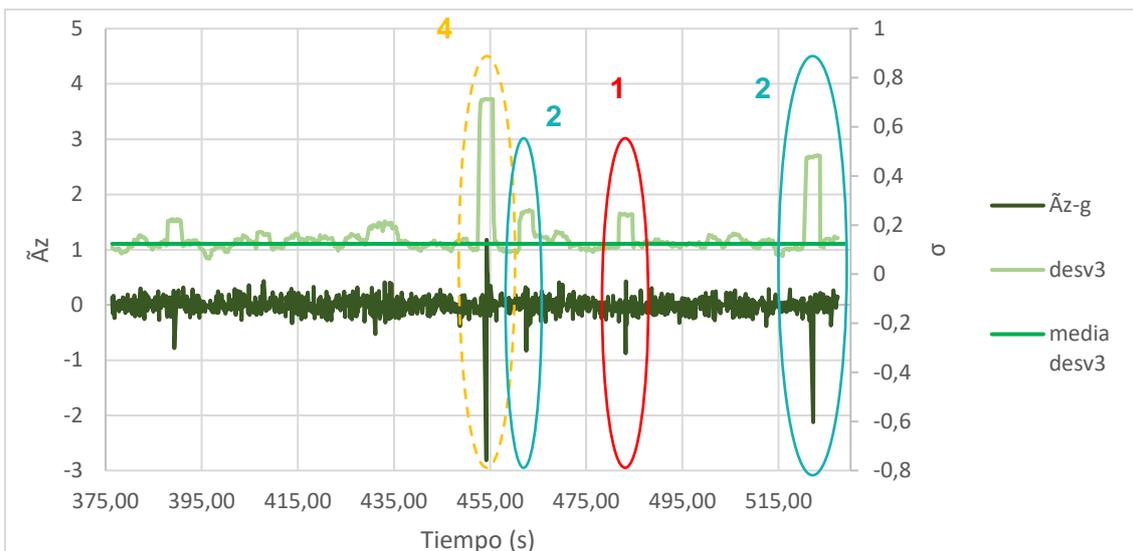


Figura 65. Elementos singulares en la 3ª pasada de ASF-CIU a 15 km/

Pavimento de hormigón

En lo referente a los pavimentos de hormigón y la sensibilidad a los elementos singulares, se puede observar en los gráficos siguientes que las trapas y otros elementos son fácilmente detectables.

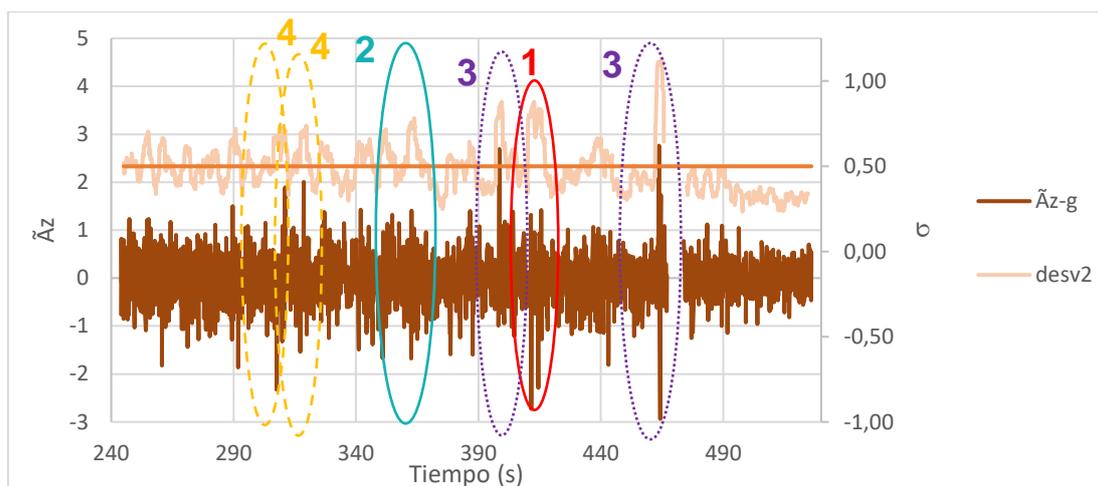


Figura 66. Elementos singulares en la 2ª pasada de H-UPV a 20 km/h.

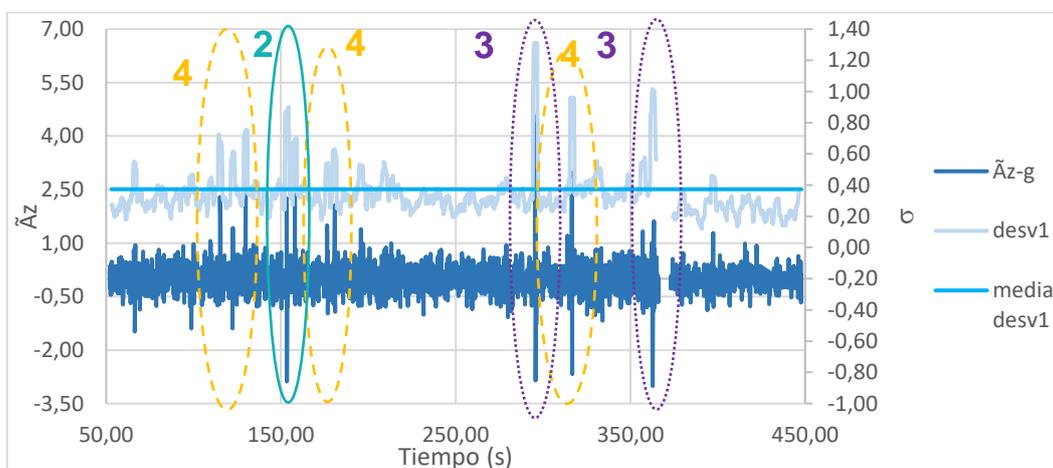


Figura 67. Elementos singulares en la 1ª pasada de H-UPV a 15 km/h.

### Pavimento de baldosas cuadradas

A continuación se muestran dos gráficas de pavimento de baldosas, uno a 20 km/h y otro a 15 km/h, donde se puede identificar algunos elementos singulares. En este tipo de pavimento no se consideran las juntas ni el pavimento deteriorado, ya que el primero no tiene sentido y el último se debe generalmente siempre a ramas que levantan el pavimento y lo deterioran, por lo que se considera equivalente a un bache.

En este caso se puede ver que se sigue apreciando los elementos singulares en mitad del trayecto, aunque la mayoría no se diferencian en gran medida del resto de datos. Esto quiere decir que el impacto sobre la comodidad general es menor que en el caso del pavimento asfáltico.

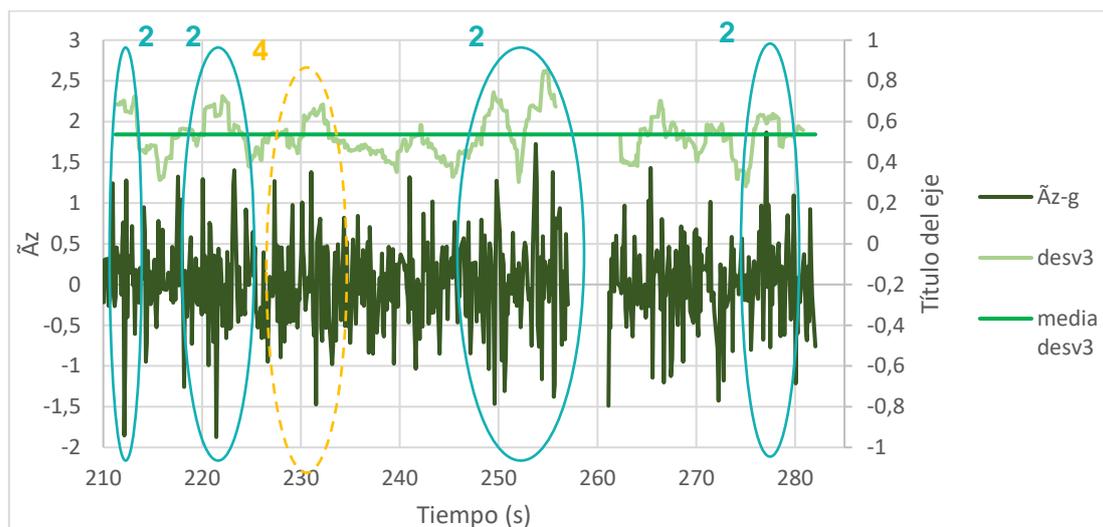


Figura 68. Elementos singulares en la 3ª pasada de B-SAL a 20 km/h

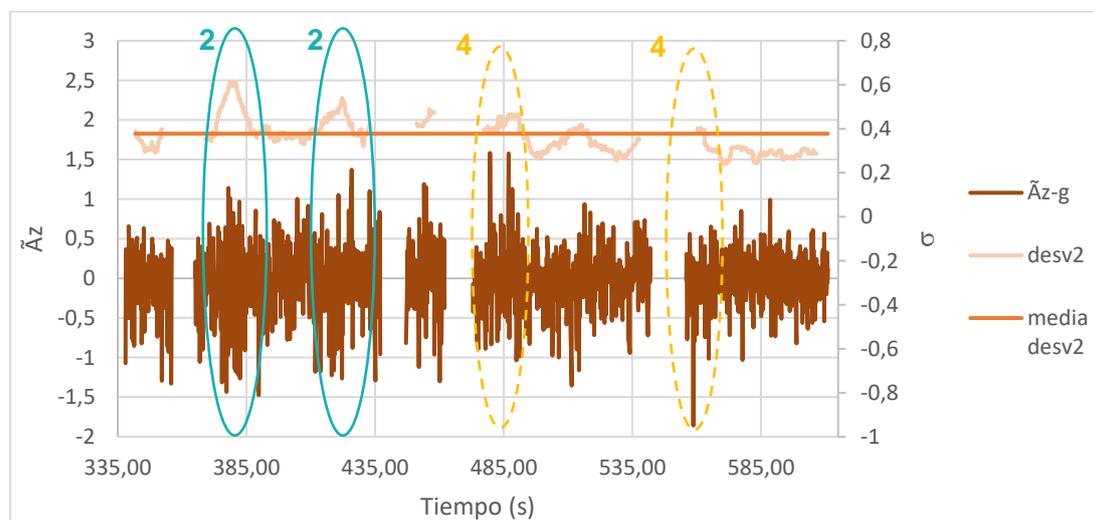


Figura 69. Elementos singulares en la 2ª pasada de B-MAC a 15 km/h

### Pavimento de adoquines transversales

En las gráficas siguientes se muestran dos pasadas sobre adoquines en la sección ADTR-UV. Sobre ellas se han marcado varios puntos singulares, en su mayoría debido a puntos levantados por las raíces de los árboles colindantes.

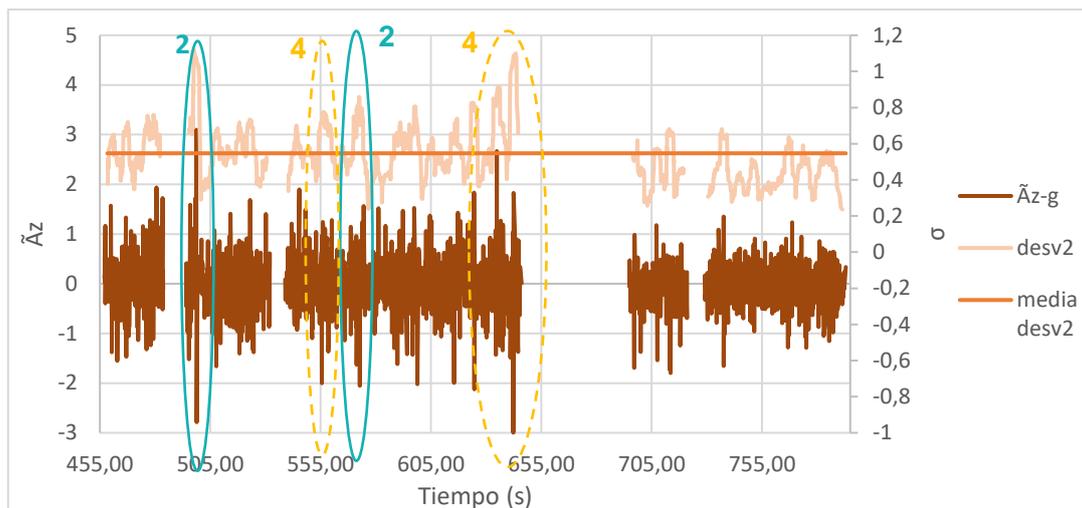


Figura 70. Elementos singulares en la 1ª pasada de ADTR-UV a 20 km/h

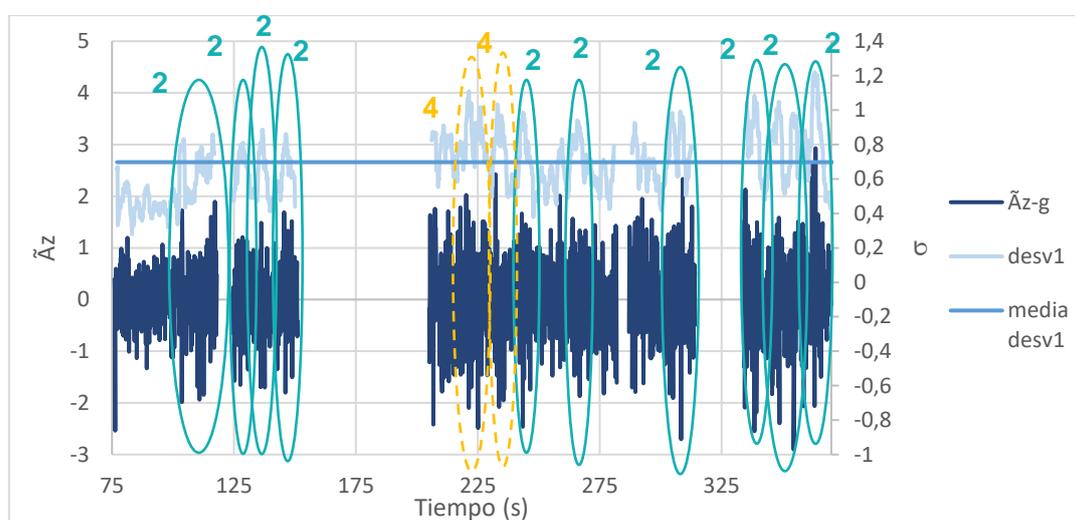


Figura 71. Elementos singulares en la 2ª pasada de ADTR-UV a 15 km/h.

## 6.2. ANÁLISIS DE LA ENCUESTA

En este apartado, se va a explicar el análisis de la encuesta online realizada, así como los resultados obtenidos de dicho análisis. La encuesta está pensada para determinar la comodidad percibida de diferentes pavimentos por quienes usan la infraestructura ciclista.

Con este fin, la encuesta se define en dos grupos de preguntas claramente diferenciados:

- Caracterización de las personas encuestadas y su uso de los VMPs
- Análisis de la percepción de la comodidad según el tipo de pavimento

Estos dos bloques son los mismos en los que a continuación se va a dividir esta sección para detallar minuciosamente el análisis de cada uno.

### 6.2.1. Caracterización de las personas encuestadas y su uso de los VMPs

La encuesta sobre la influencia de la configuración de los carriles bici en la percepción de la comodidad de la micromovilidad obtuvo un total de 120 respuestas.

De estas 120 respuestas, 76 son de hombres, 41 de mujeres y 3 de personas prefirieron no indicar su sexo (Figura 72).

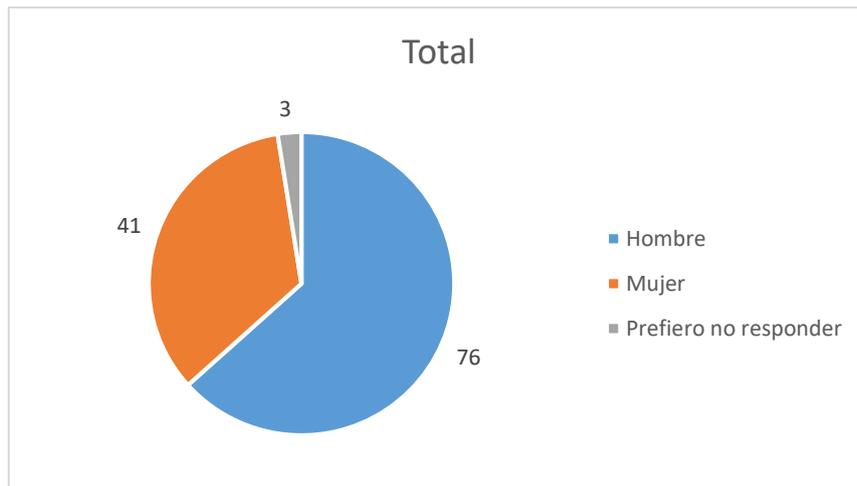


Figura 72. Distribución de las respuestas por sexo

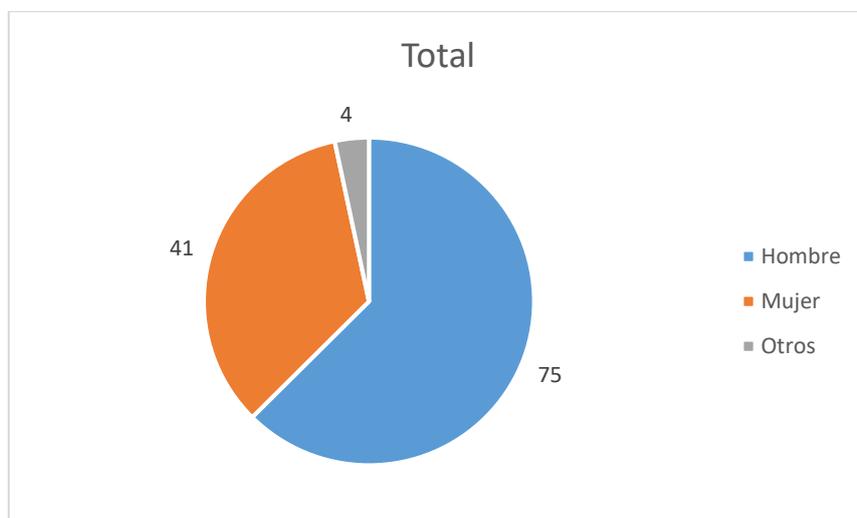


Figura 73. Distribución de las respuestas por identidad de género

En cuanto a la identidad de género de quienes respondieron, los números son prácticamente los mismos: 75 personas se identifican como hombres, 41 como mujeres y 4 como personas no binarias (Figura 73). Por ello, a la hora de analizar las preguntas esto no se tendrá en cuenta.

**El rango de edades es de 18 a 67 años, siendo predominante respuestas de jóvenes entre 18 y 26 años:**

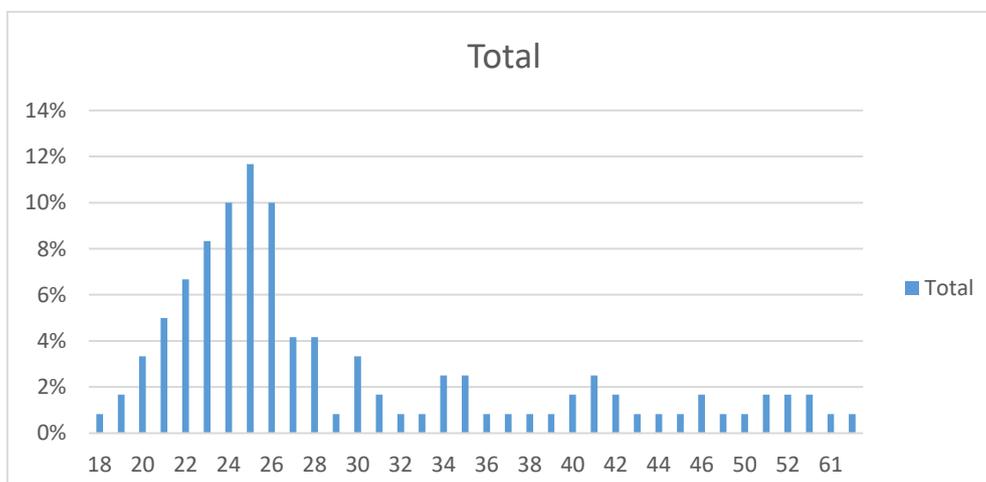


Figura 74. Histograma de frecuencia de las edades de las personas encuestada

Un 35% de las personas que completaron la encuesta respondieron que utilizan la bicicleta privada como su principal medio de transporte, un 20% utiliza el transporte público, un 17% utiliza el sistema de bicicletas públicas ofrecido por sus localidades y un 14% utiliza el coche privado, mientras que el patinete eléctrico fue seleccionado como forma de transporte frecuente en el 8% de las respuestas recibidas, la moto en el 5% (2% utilizan sistemas de *motosharing* o moto compartida y el 3% moto propia) y el 1% restante van a pie (Figura 75).

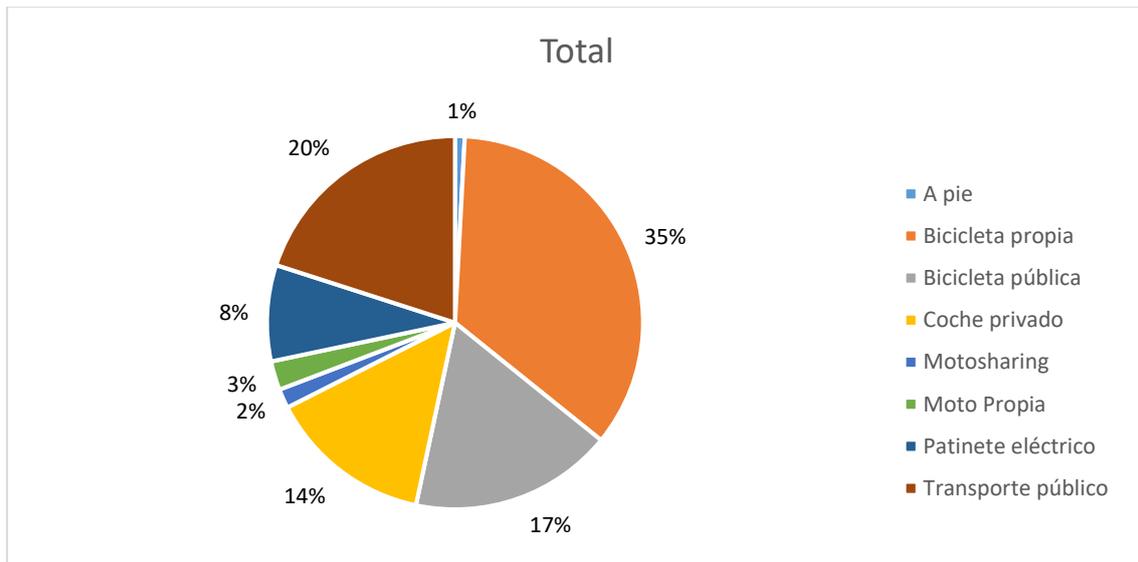


Figura 75. Método de transporte más habitual

Con esta distribución se obtiene que el 61% de quienes participaron utilizan algún VMP como su medio de transporte más habitual en el entorno urbano. De estos, un 86% utilizan bici (pública o privada) y el otro 14% se mueven en patinete eléctrico.

Un tercio de quienes respondieron la encuesta indicaron que recorren entre 3 y 5 kilómetros a la semana, un cuarto entre 5 y 10 kilómetros. Un 29% recorre menos de 3 km semanales y el 13% restante recorre más de 10km (Figura 76).

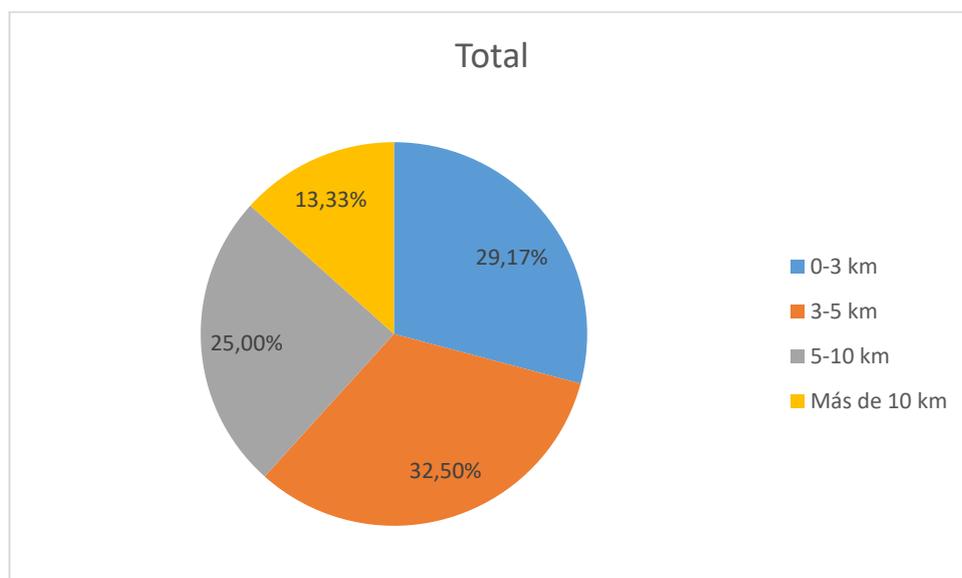


Figura 76. Distancia media recorrida a lo largo de una semana

En cuanto a los motivos de los desplazamientos, un 28,33% lo hace para compras y un 25,83% por actividad física o deporte. Los motivos de desplazamiento más habituales son el ocio (57,5%), los estudios (41,67%) y el trabajo (40,83%). En un 4,17% de los casos lo hacen por otros motivos (Figura 77).

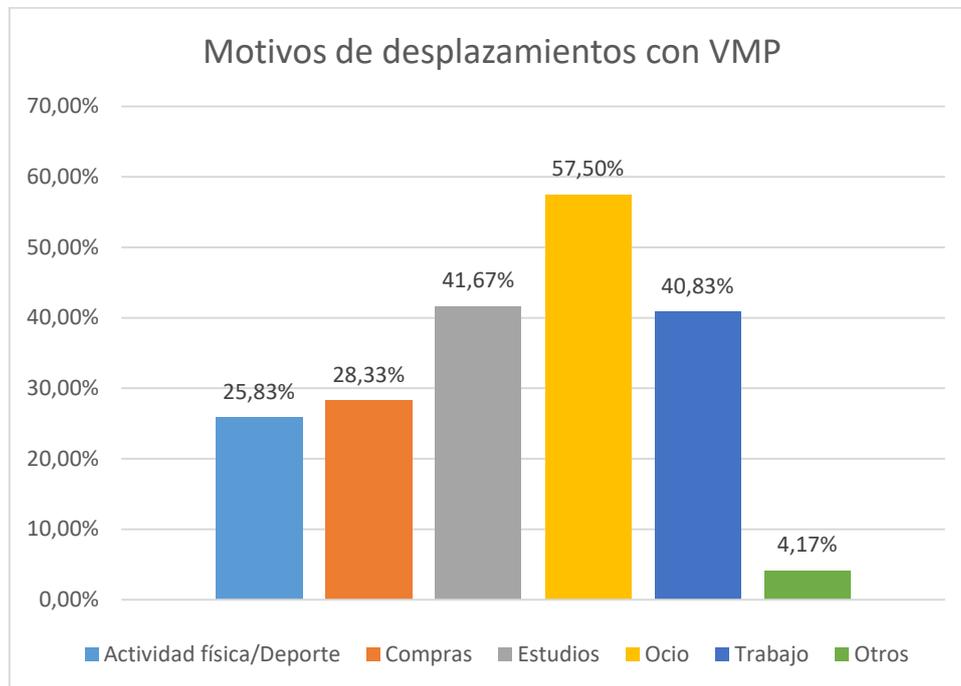


Figura 77. Motivos de los desplazamientos con VMP

### 6.2.2. Análisis de la percepción de la comodidad según el tipo de pavimento

En esta parte de la encuesta cada pregunta iba acompañada de una imagen en la que se mostraba una configuración diferente de pavimento. Quienes completaron la encuesta debían indicar el grado de comodidad que les transmitía cada una siguiendo la escala Likert que se presenta a continuación:

- 1- Muy incómodo
  - 2- Incómodo
  - 3- Aceptable
  - 4- Cómodo
  - 5- Muy cómodo
- NS/NC- No Sabe/No Contesta

El análisis de esta parte se va a realizar a diferentes niveles, empezando por un análisis general de las respuestas, comparando cada pavimento, para a continuación hacer un análisis individualizado de cada pregunta, segregando las respuestas por sexo y motivo de viaje. En la Figura 78 se recogen todas las respuestas acerca de la comodidad percibida de los diferentes tipos de pavimento.

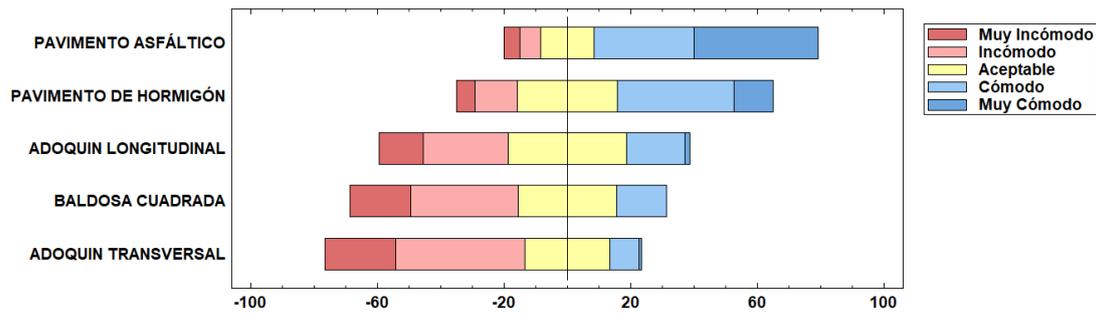


Figura 78. Comparación gráfica de las respuestas para cada tipo de pavimento

Del gráfico Likert anterior, realizado con la ayuda del programa *Statgraphics*, se resuelve que el pavimento considerado más cómodo es el asfáltico (40% de los que respondieron la encuesta lo consideran muy cómodo), seguido por las vías de hormigón. En tercer lugar, encontramos el adoquinado en sentido longitudinal. A continuación, está el pavimento con baldosas cuadradas y en último lugar el adoquinado transversal.

En líneas generales, el análisis estadístico de las respuestas se puede resumir en la siguiente tabla. En ella se puede ver que el recuento de respuestas no es homogéneo, dado que se han obviado las respuestas NS/NC:

Tabla 35. Resumen del análisis de las respuestas de comodidad de pavimento

Pavimento	Recuento	Media	Mediana	Moda	Desviación est.
Pavimento asfáltico	119	3,94118	4	5	1,13237
Pavimento de hormigón	120	3,36667	3	4	1,04828
Baldosas cuadradas	120	2,43333	2	2	0,972397
Adoquín transversal	120	2,25000	2	2	0,933185
Adoquín longitudinal	118	2,66102	3	3	0,993371

Además, los últimos tres tipos de pavimento en la clasificación tienen más valoraciones negativas que positivas, por lo que en la medida de lo posible debería evitarse su utilización en las vías que se proyecten en el futuro.

En la siguiente tabla se recoge un análisis más detallado de las respuestas recibidas para cada tipo de pavimento, segregando por sexo y el motivo del desplazamiento, para comprobar posibles diferencias entre poblaciones.

Se puede observar que, por norma general, las mujeres tienen una percepción de la infraestructura menos cómoda que la de los hombres. Además, los desplazamientos bajo motivos no catalogados (los que se engloban en "Otros") son los que tienen mejor valoración dentro del mismo pavimento. A pesar de ello, no se aprecia una diferencia significativa en la comodidad según el motivo de desplazamiento,

Tabla 36. Análisis de los diferentes puntos de vista

1. Pavimento asfáltico
------------------------



Figura 79. Pavimento asfáltico

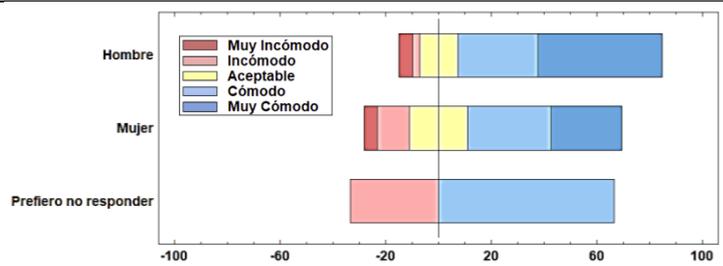


Figura 80. Pavimento asfáltico por sexo

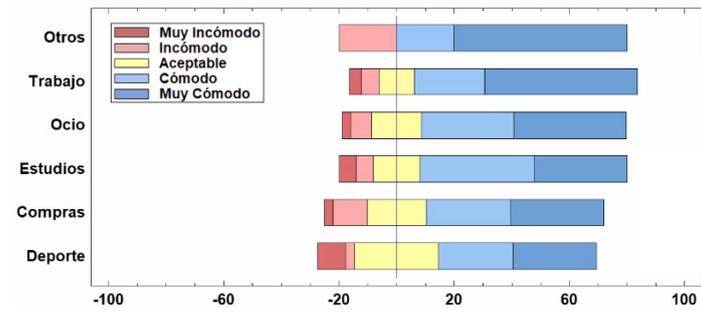


Figura 81. Pavimento asfáltico por motivo de desplazamiento

## 2. Pavimento de hormigón



Figura 82. Pavimento de hormigón

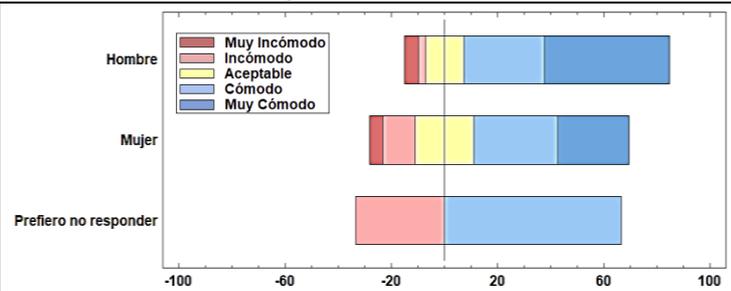


Figura 83. Pavimento de hormigón por sexo

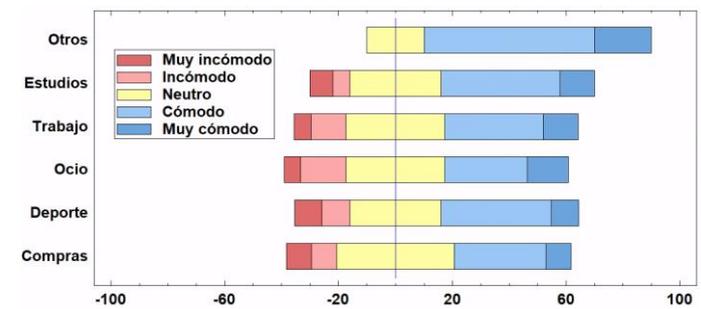


Figura 84. Pavimento de hormigón por motivo de desplazamiento

### 3. Baldosasa cuadradas

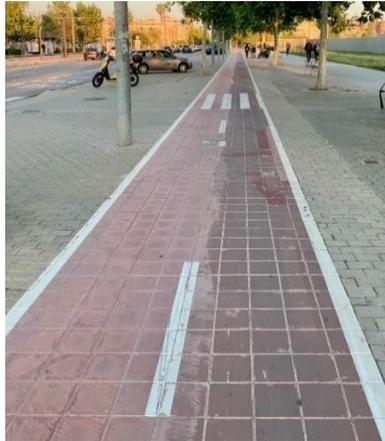


Figura 85. Pavimento de baldosas cuadradas

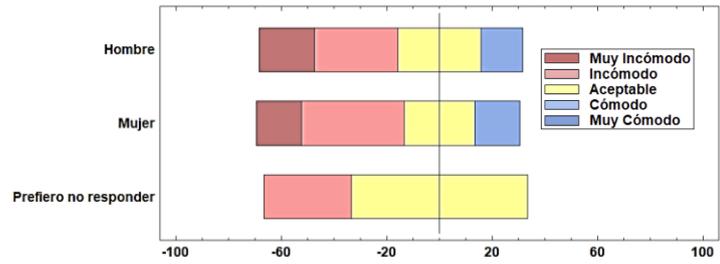


Figura 86. Pavimento de baldosas cuadradas por sexo

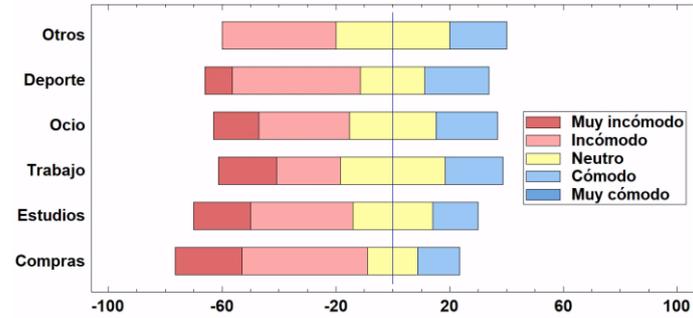


Figura 87. Pavimento de baldosas cuadradas por motivo de viaje

### 4. Adoquinado transversal

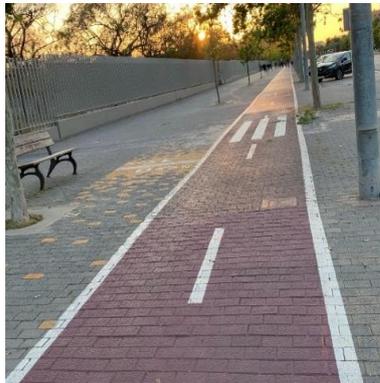


Figura 88. Pavimento de adoquines transversales

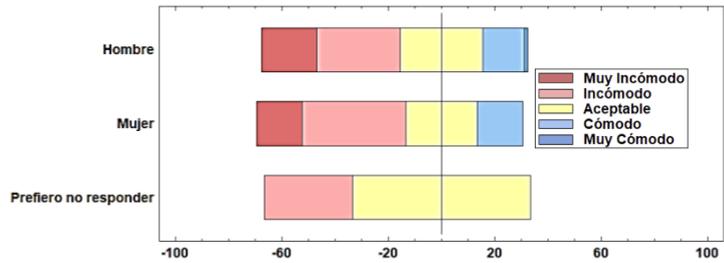


Figura 89. Pavimento de adoquines transversales por sexo

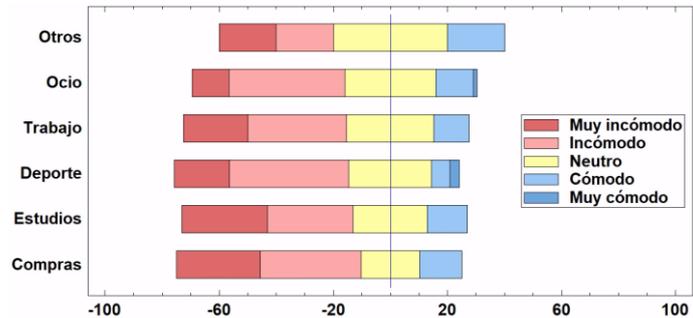
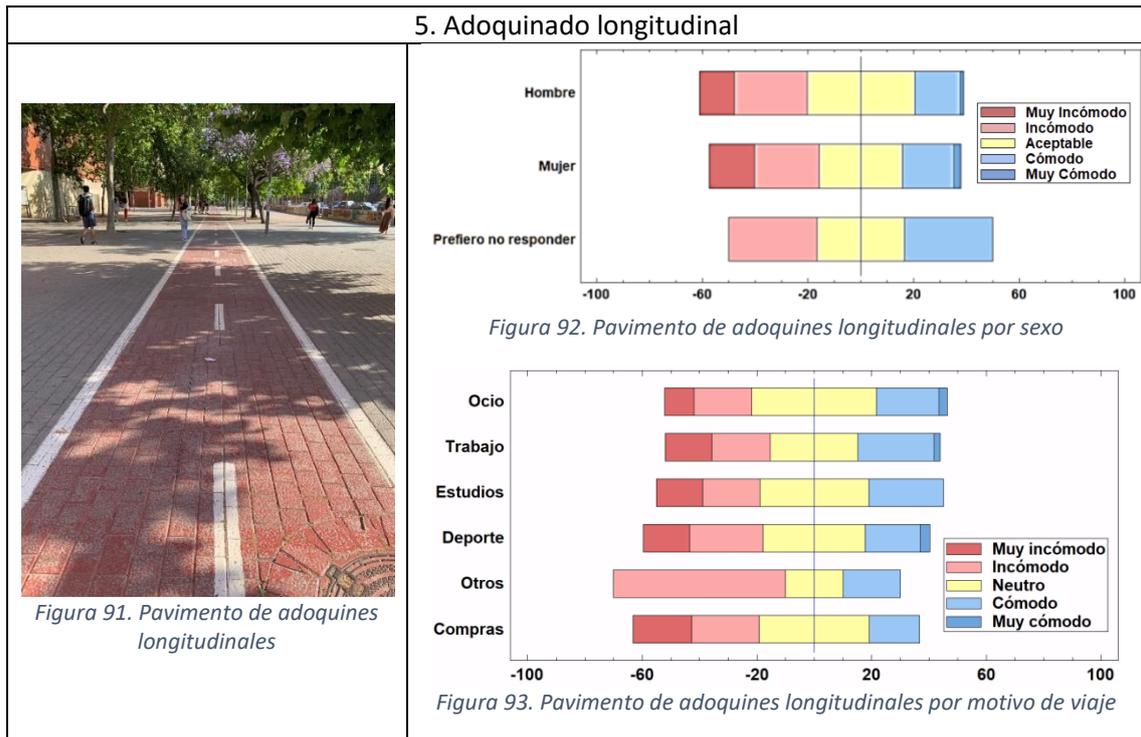


Figura 90. Pavimento de adoquines transversales por motivo de viaje



### 6.2.3. Análisis de la percepción de los elementos singulares

Siguiendo también una escala de Likert, se preguntó también por la afección que tenían tapas de alcantarillas y de suministros en el nivel de comodidad y en la probabilidad de cambiar la trayectoria (desplazarse transversalmente para esquivar el obstáculo). En este caso se preguntó sólo por pavimentos asfálticos, de baldosas y de adoquines. La graduación de las respuestas es la siguiente:

- 1- Muy bajo
- 2- Bajo
- 3- Medio
- 4- Alto
- 5- Muy alto
- NS/NC- No Sabe/No Contesta

La Figura 94 muestra el reparto de las respuestas recolectadas en cuanto a la comodidad de los elementos singulares. En este caso, todos los pavimentos tienen una valoración media negativa.

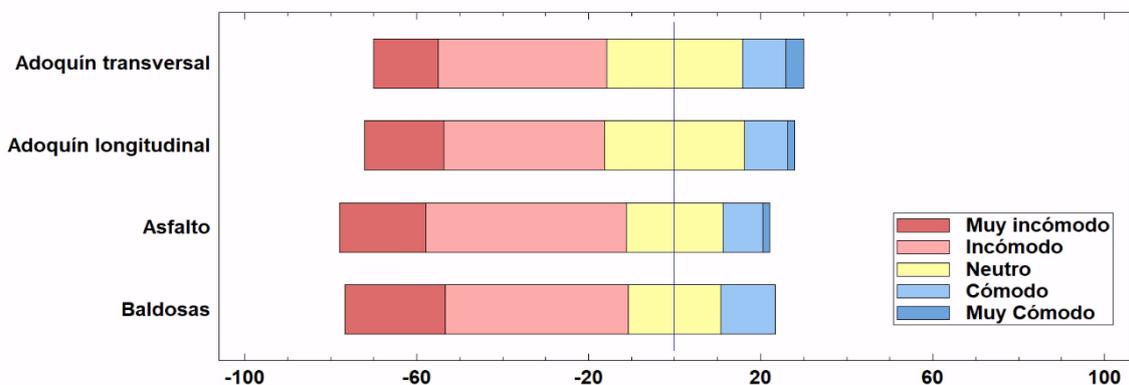


Figura 94. Percepción de la comodidad de los elementos singulares

En la Tabla 37 se reúnen los estadísticos representativos de la muestra analizada. En él se puede ver que más o menos todos los pavimentos reciben la misma valoración en cuanto a comodidad de los elementos singulares, siendo imposible ordenar por preferencia, ya que la diferencia es mínima.

Tabla 37. Resumen de los estadísticos de las respuestas de elementos singulares

Pavimento	Recuento	Media	Mediana	Moda	Desviación est.
Asfalto	120	2,25833	2	2	0,935377
Baldosas cuadradas	120	2,23333	2	2	0,946338
Adoquín transversal	120	2,49167	2	2	0,999965
Adoquín longitudinal	120	2,39167	2	2	0,951278

Sin embargo, se puede extrapolar que encontrar dichos elementos en la infraestructura provoca un impacto mayor sobre la comodidad percibida en los pavimentos de asfalto que ante un pavimento de adoquines con el mismo elemento.

## 6.3. COMPARACIÓN ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y ENCUESTA.

### 6.3.1. Comodidad del pavimento

A partir de los datos obtenidos en la encuesta y del análisis de los datos de campo se puede realizar la siguiente clasificación:

Tabla 38. Propuesta de clasificación de la comodidad en función de las vibraciones

COMODIDAD	RANGO DE $RMS_{20}$ [g]	PAVIMENTO
<b>Muy cómodo</b>	$RMS_{20} < 0,20$	Pavimento asfáltico en buen estado
<b>Cómodo</b>	$0,20 \leq RMS_{20} < 0,45$	Pavimento asfáltico en estado adecuado Hormigón en buen estado Baldosas de 20 cm en buen estado
<b>Neutro</b>	$0,45 \leq RMS_{20} < 0,50$	Hormigón en estado adecuado Adoquín longitudinal en buen estado
<b>Incómodo</b>	$0,50 \leq RMS_{20} < 0,65$	Hormigón en mal estado Pavimento asfáltico en mal estado Baldosas de 20 cm en estado adecuado Adoquín longitudinal en estado adecuado Adoquín transversal en buen estado
<b>Muy incómodo</b>	$0,65 \leq RMS_{20}$	Baldosas de 20 cm en mal estado Adoquín longitudinal en mal estado Adoquín transversal en estado adecuado Adoquín transversal en mal estado

Para realizar la clasificación se ha estimado los valores límite de cada rango en función del análisis de las encuestas y el valor del  $RMS$  a 20 km/h ( $RMS_{20}$ ) que se ha obtenido para los pavimentos estudiados. El rango de vibraciones del resto de pavimentos se ha estimado. Sería necesario llevar a cabo una investigación más profunda analizando pavimentos en diferentes estados de conservación y realizar encuestas *in situ* para conocer la percepción de comodidad de los usuarios.

El estado de conservación de los pavimentos se ha dividido según el siguiente criterio:

- **BUEN ESTADO:** no presenta deterioros o presenta deterioros superficiales leves con finas grietas. En el caso de pavimentos asfálticos y de hormigón, se considera que no presenta casi desintegración de la superficie de rodadura, así como poco o ningún deterioro en bacheo o reparación. En el caso de adoquines, baldosas y hormigón, el material de sellado de las juntas se encuentra en buen estado, casi sin defectos.
- **ESTADO ADECUADO:** Presenta un deterioro superficial con grietas de mediana severidad, con desprendimientos y desintegración significativos de la superficie de rodadura. El área reparada de bacheos está algo deteriorada. En el caso de pavimentos de hormigón, baldosas o adoquines, el material de sellado de juntas presenta defectos moderados.
- **MAL ESTADO:** Deterioro superficial con grietas bien definidas, desprendimientos y desintegración extensivas de la superficie de rodadura, con el área de reparaciones severamente dañada. Para el caso de adoquinado, pavimentos de hormigón y baldosas, el material de sellado se encuentra en muy malas condiciones.

### 6.3.2. Elementos singulares

Al comparar los datos de la encuesta con los obtenidos del análisis de los elementos singulares se ha llegado a la conclusión de que en pavimentos con una macrotextura elevada, la presencia de trapas, raíces u otros elementos que provoquen desperfectos superficiales, apenas afectará a la comodidad percibida, ya que estos pavimentos ya transmiten unas vibraciones elevadas y que cuesta diferenciar de muchos de los elementos singulares.

## 7. ANÁLISIS DE LA INFRAESTRUCTURA CICLISTA DE PLA DEL REAL

Con el objetivo de aplicar los resultados y los criterios que se han deducido como resultado del estudio de la comodidad de las vibraciones de los pavimentos de carriles bici en zona urbana, se ha elegido como ámbito de aplicación el distrito del Pla del Real de la ciudad de València. Los motivos por los que se ha elegido dicho distrito son principalmente dos: la gran variedad de infraestructura ciclista existente, así como una alta intensidad de vehículos de micromovilidad.

El Pla del Real es el nombre del distrito número 6 de la ciudad de València y cuenta con una superficie de 1693 km<sup>2</sup> y una población censada de 30538 habitantes. Está compuesto por los barrios de Exposició, Mestalla, Jaume Roig y Ciutat Universitaria. Además, limita al norte con el distrito de Benimaclet, al este con Algirós y Camins al Grau, al sur con L'Eixample y al oeste con Ciutat Vella y La Saldia.

### 7.1. INFRAESTRUCTURA CICLISTA EXISTENTE

El distrito cuenta con más de 15000m de carril bici, centrandó la mayor parte de ellos en las vías principales (Avinguda Blasco Ibañez, Avinguda de Primat Reig, Avinguda d'Aragó y Passeig de l'Albereda), dando continuidad a la conexión entre barrios y el resto de la ciudad.

Más de la mitad de esos 15000 m de carril bici son de carriles con pavimento asfáltico, mientras cerca de un 30% es de baldosas cuadradas (Figura 95). Para ver en mayor detalle los carriles bici, consultar el plano 3.

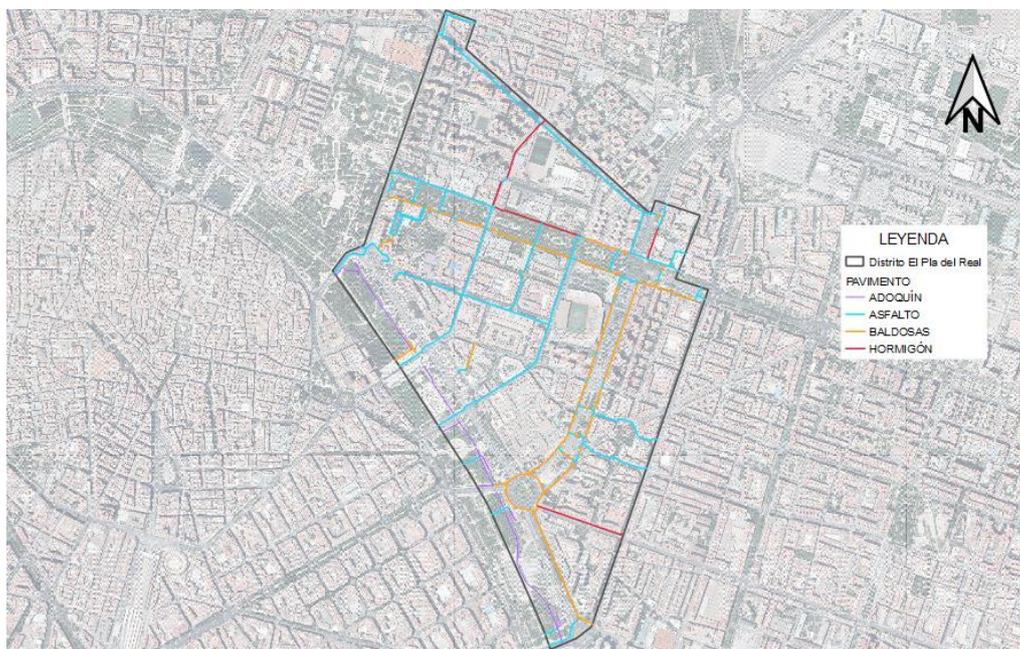


Figura 95. Distribución de la infraestructura existente por tipología de pavimento

Además, el distrito cuenta con un total de 16 puntos de aparcamiento de Valenbisi (sistema público de bicicletas de la ciudad de València), potenciando así el uso de la infraestructura ciclista.

En cuanto a las condiciones del pavimento de la infraestructura ciclista existente, se presenta en la Figura 96 una vista aérea de cómo se encuentran las diferentes vías.

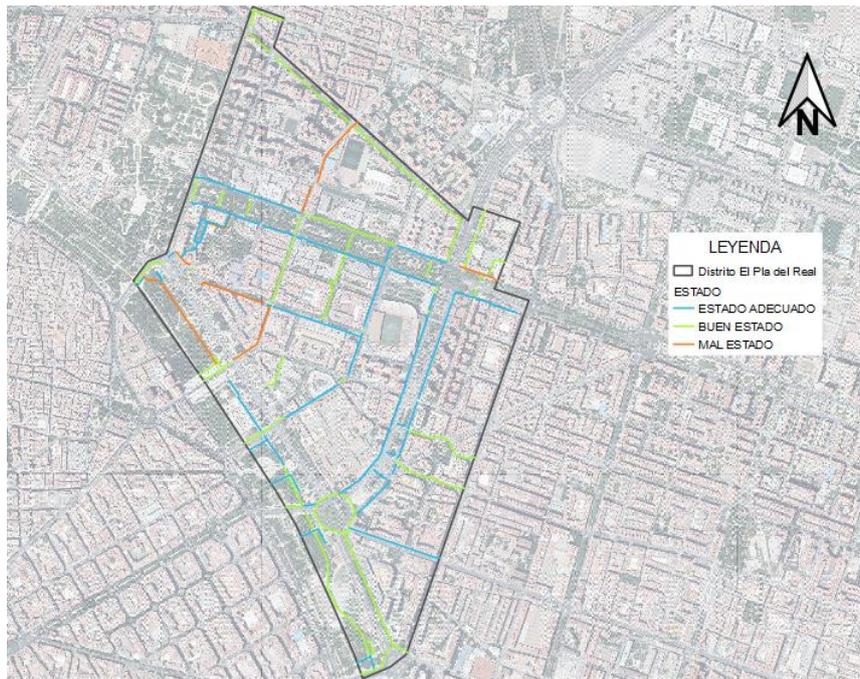


Figura 96. Estado del pavimento de la infraestructura ciclista de Pla del Real

Entorno a un 60% de los carriles bici están en buen estado de conservación, un 30% en un estado adecuado y el resto se ha considerado que presenta suficientes desperfectos como para considerarlos en mal estado. Para mayor detalle, ver plano 4

Con estos dos datos, al combinarlos se obtiene la Figura 97, donde se presentan los diferentes carriles con el nivel de comodidad asignado en función del pavimento y el estado en el que este se encuentra, siguiendo lo establecido en la Tabla 38. Para una vista en mayor detalle, ver plano 5

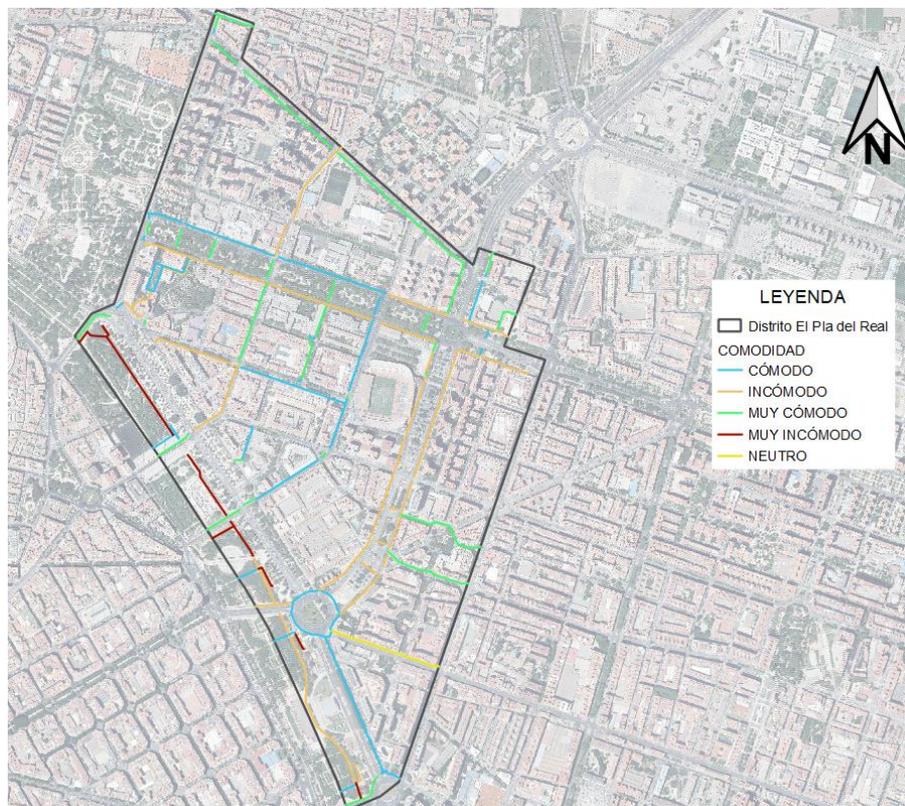


Figura 97. Nivel de comodidad de la infraestructura ciclista de Pla del Real



## 8. PROPUESTA DE MEJORAS PARA EL PLA DEL REAL

A continuación, una vez analizada la infraestructura existente en el distrito del Pla del Real, se realizarán las propuestas de mejora en base a los resultados del estudio.

Visto el nivel de comodidad asociado a cada elemento que compone la infraestructura ciclista del distrito Pla del Real de la ciudad de València, sólo hay una propuesta óptima para mejorar el nivel de comodidad de los usuarios, evitando así que utilicen la calzada y potenciando la movilidad sostenible: cambiar los pavimentos por pavimentos asfálticos.

El cambio en el material de la superficie de rodadura viene motivado por el hecho de ser el pavimento asfáltico el más cómodo de los pavimentos analizados, con unas aceleraciones verticales a 20 km/h en el rango de  $\pm 0,3 g$  en pavimentos en buen estado, además de ser el mejor valorado entre los usuarios encuestados.

También sería recomendable que en aquellos casos en los que existe vegetación rodeando los carriles, esta tenga raíces que crezcan principalmente en vertical, y no en horizontal, ya que estos últimos acaban provocando que se levante el pavimento del carril, generando deterioros en la infraestructura que se transmiten en vibraciones y un descenso de la comodidad y seguridad de la persona usuaria. Además, en relación con los elementos singulares, se recomienda nivelar las trapas con el pavimento, evitando así los saltos que provocan la mayoría de los datos anómalos en los registros de las tomas de datos realizadas.

A continuación, se presenta una tabla con los precios unitarios de los costes de sustitución del pavimento:

Tabla 39. Relación de precios unitarios de las propuestas. [Fuente: IVE]

	Ud.	Precio unitario	Precio lineal
Quitar adoquines	m2	20 €	30,0 €
Quitar baldosas	m2	8 €	12,0 €
Fresado pavimento de hormigón	m2	1,50 €	2,3 €
Fresado del pavimento asfáltico	m2	1,50 €	2,3 €
Colocación de pavimento asfáltico	m2	20 €	30,0 €

Para el precio lineal se ha considerado un ancho de vía de 1,5 m. Con estos valores se confecciona la siguiente tabla con la estimación del coste que tendría sustituir el pavimento de cada carril bici con un nivel de comodidad por debajo de cómodo (neutro, incómodo y muy incómodo).

La Tabla 40 está ordenada según el orden de preferencia que debería realizarse el cambio de pavimento en caso de tener un presupuesto limitado que no permita llevar todas las medidas a cabo (por grado de comodidad). Si en el mismo nivel de confort se encuentra un pavimento de hormigón y uno de baldosas, se priorizará cambiar la baldosa, ya que estas se estropean con mayor facilidad que el pavimento de hormigón, ya que las baldosas tienden a soltarse, amontonarse o romperse, pudiendo llegar a

encontrar que faltan varias baldosas en un pequeño tramo, lo cual puede ser muy peligroso.

Tabla 40. Precios estimados de las actuaciones propuestas en Pla del Real

Nombre Calle	Estado Pavimento	Tipo de Pavimento	Longitud	Comodidad	Precio
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	74,09	MUY INCÓMODO	4.445,37 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	40,68	MUY INCÓMODO	2.441,00 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	38,67	MUY INCÓMODO	2.320,21 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	122,13	MUY INCÓMODO	7.327,98 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	215,96	MUY INCÓMODO	12.957,62 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	38,67	MUY INCÓMODO	2.320,21 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	74,19	MUY INCÓMODO	4.451,53 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	56,19	MUY INCÓMODO	3.371,24 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	4,01	MUY INCÓMODO	240,83 €
Paseo Alameda	ADECUADO	ADOQUÍN	44,74	MUY INCÓMODO	2.684,32 €
Paseo Alameda	MALO	ADOQUÍN	420,14	MUY INCÓMODO	25.208,58 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	303,02	INCÓMODO	12.726,95 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	117,70	INCÓMODO	4.943,47 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	96,26	INCÓMODO	4.043,00 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	197,71	INCÓMODO	8.303,75 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	62,08	INCÓMODO	2.607,52 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	97,61	INCÓMODO	4.099,52 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	99,69	INCÓMODO	4.186,87 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	167,32	INCÓMODO	7.027,30 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	34,09	INCÓMODO	1.431,86 €

Nombre Calle	Estado Pavimento	Tipo de Pavimento	Longitud	Comodidad	Precio
Cruce Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	27,91	INCÓMODO	1.172,03 €
Cruce Av.Aragón	ADECUADO	BALDOSAS	29,23	INCÓMODO	1.227,53 €
Cruce Av.Aragón	ADECUADO	BALDOSAS	53,01	INCÓMODO	2.226,32 €
Puente de Aragón	BUENO	ADOQUÍN	59,35	INCÓMODO	3.560,72 €
Micer Mascó	POBRE	ASFALTO	239,74	INCÓMODO	7.731,56 €
Micer Mascó	ADECUADO	BALDOSAS	10,54	INCÓMODO	442,51 €
Don Armando Palacio	POBRE	ASFALTO	244,58	INCÓMODO	7.887,66 €
Pla del Real	POBRE	ASFALTO	68,56	INCÓMODO	2.210,99 €
Av.Blasco Ibañez	ADECUADO	BALDOSAS	227,73	INCÓMODO	9.564,60 €
Av.Blasco Ibañez	ADECUADO	BALDOSAS	106,98	INCÓMODO	4.493,27 €
Av.Blasco Ibañez	ADECUADO	BALDOSAS	119,66	INCÓMODO	5.025,70 €
Av.Blasco Ibañez	ADECUADO	BALDOSAS	332,93	INCÓMODO	13.983,01 €
Av.Blasco Ibañez	ADECUADO	BALDOSAS	180,20	INCÓMODO	7.568,58 €
Av.Blasco Ibañez	ADECUADO	BALDOSAS	144,46	INCÓMODO	6.067,18 €
Av.Blasco Ibañez	POBRE	ASFALTO	144,53	INCÓMODO	4.661,00 €
Av.Blasco Ibañez	ADECUADO	BALDOSAS	188,96	INCÓMODO	7.936,23 €
Dr.Gómez Ferrer	POBRE	HORMIGÓN	266,59	INCÓMODO	8.597,66 €
Plaza Legión Español	ADECUADO	BALDOSAS	90,96	INCÓMODO	3.820,36 €
Plaza Legión Español	POBRE	ASFALTO	118,85	INCÓMODO	3.833,03 €
Av.Aragó	ADECUADO	BALDOSAS	400,08	INCÓMODO	16.803,32 €
Puente de Aragón	ADECUADO	BALDOSAS	54,19	INCÓMODO	2.275,80 €

Nombre Calle	Estado Pavimento	Tipo de Pavimento	Longitud	Comodidad	Precio
Dr.Gómez Ferrer	POBRE	HORMIGÓN	100,05	INCÓMODO	3.226,56 €
Paseo Alameda	BUENO	ADOQUÍN	67,55	INCÓMODO	4.053,29 €
Paseo Alameda	BUENO	ADOQUÍN	34,31	INCÓMODO	2.058,38 €
Paseo Alameda	BUENO	ADOQUÍN	116,72	INCÓMODO	7.002,90 €
Paseo Alameda	BUENO	ADOQUÍN	69,17	INCÓMODO	4.150,05 €
Paseo Alameda	BUENO	ADOQUÍN	508,36	INCÓMODO	30.501,61 €
Paseo Alameda	BUENO	ADOQUÍN	74,19	INCÓMODO	4.451,53 €
Paseo Alameda	BUENO	ADOQUÍN	56,19	INCÓMODO	3.371,24 €
Av.Puerto	ADECUADO	HORMIGÓN	341,51	NEUTRO	11.013,79 €

## 8.1. RELACIÓN VALORADA

Partiendo del coste de cada actuación individual propuesta, se presenta la correspondiente relación valorada. Primero se agrupan los costes por cada unidad de obra, consiguiendo el Total de Ejecución Material que se muestra en la Tabla 41

Tabla 41. Presupuesto de Ejecución Material.

Actuación	Coste	Porcentaje
Quitar adoquines	63.459,31 €	20,60%
Quitar baldosas	37.707,62 €	12,24%
Fresado pavimento de hormigón	1.593,35 €	0,52%
Fresado del pavimento asfáltico	1.836,58 €	0,60%
Colocación de pavimento asfáltico	203.460,69 €	66,05%
<b>TOTAL</b>	<b>308.057,55 €</b>	



---

<b>TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL</b>	<b>308.057,55 €</b>
Gastos Generales (13%)	40.047,48 €
Beneficio Industrial (6%)	18.483,45 €
IVA (21%)	76.983,58 €

---

<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	<b>443.572,07 €</b>
--------------------------	---------------------

El presupuesto total tras la aplicación de los gastos generales, el beneficio industrial y el IVA asciende a **CUATROCIENTOS CUARENTA Y TRES MIL QUINIENTOS SETENTA Y DOS EUROS CON SIETE CÉNTIMOS (443.572,07 €)**



## 9. CONCLUSIONES

El estudio presentado en este Trabajo Final de Máster tenía como objetivo caracterizar la comodidad de las vibraciones que generan diferentes tipos de pavimento, así como la influencia de los elementos singulares que pueda haber en el trazado. Esto se llevó a cabo mediante una evaluación cuantitativa y cualitativa de las aceleraciones verticales obtenidas a través de un patinete eléctrico sensorizado, en la ciudad de València (España), y una encuesta al usuario a nivel nacional. Las conclusiones que se presentan a continuación derivan de los resultados de dicho estudio.

En primer lugar, gracias a la encuesta se pudo crear un marco contextual referente al uso de VMPs. Se observó que se utilizan principalmente para viajes urbanos para llegar al centro de estudio, lugar de trabajo o por motivos de lúdicos. Se utilizan sobre todo en distancias cortas, siendo lo más común una distancia de hasta 5 km al día.

Entre los tipos de vehículos para desplazarse en medio urbano, las respuestas muestran que el 52% de los encuestados utilizan la bicicleta como principal medio de transporte (esto supone un 86% de los usuarios que utilizan VMPs), mientras que solo un 8% utiliza patinetes eléctricos (lo cual supone el 14% restante de los usuarios que utilizan VMPs como principal medio de transporte)

En segundo lugar, en cuanto a la infraestructura ciclista del ámbito de estudio, donde los patinetes también tienen permitida la circulación, se encontraron varias configuraciones. Hay varios factores que definen la variabilidad en la infraestructura (ubicación sobre la sección transversal de la vía, la presencia de separadores, el ancho...), que deriva de la reciente necesidad de desarrollar infraestructura específica para VMP, adaptándose a entorno existente. Sin embargo, pese a tantos factores, en este estudio sólo interesa el material del que está conformada la capa de rodadura.

Por ello, dada la variabilidad de tipos de pavimento, se pudo comparar las aceleraciones sufridas por los usuarios en distintos pavimentos. En concreto se analizaron los siguientes tipos de pavimento:

- Pavimento asfáltico
- Pavimento de hormigón
- Pavimento de baldosas cuadradas
- Adoquinado

En cuanto a la metodología para recolectar datos de campo, se recurrió a un sistema móvil montado sobre un patinete eléctrico. El sistema de medida quedó conformado por una unidad inercial de medida (IMU), una Raspberry Pi 4B y una cámara de vídeo, que resultaron en un sistema de bajo coste, fácil programación y alto rendimiento.

Del análisis empírico de las vibraciones en diferentes carriles y a diferentes velocidades se descubrió que el pavimento asfáltico genera muchas menos vibraciones que el resto de los pavimentos analizados, quedando en segundo lugar el pavimento de hormigón y el pavimento de baldosas cuadradas, entre los cuales no se encontraron diferencias estadísticas significativas. Por último, el pavimento de conformado por adoquines presentó unas vibraciones muy elevadas en comparación con los demás. Además, en todos los pavimentos se detectaron aceleraciones mayores cuando se recorrieron a 20 km/h, en comparación con las obtenidas a 15 km/h. Estos dos hechos corroboran la **hipótesis H1** y la **hipótesis H3**.



El motivo de utilizar un patinete eléctrico, en lugar de una bicicleta como en otras investigaciones similares, radica en la **hipótesis H2**, que no se ha podido confirmar, al no haber podido realizar toma de datos con otras ruedas o con otro VMP sensorizado que permitieran realizar la comparación.

En cuanto a la **hipótesis H4**, se puede ver que en los pavimentos asfálticos los elementos singulares son fácilmente identificables en su mayoría, mientras que en pavimentos que presentan más irregularidades es un poco más difícil diferenciarlos de las vibraciones propias del pavimento, por lo que parece que también se satisface la última hipótesis, aunque haría falta un estudio más intensivo de estos elementos para garantizarlo.

Las recomendaciones para nueva infraestructura o rehabilitación de la actual, a partir de los resultados obtenidos, pasan por utilizar pavimento asfáltico en lugar de pavimentos conformados por elementos finitos (adoquines y baldosas), o incluso pavimentos de hormigón, ya que se ha visto que las mezclas bituminosas conforman los carriles más cómodos, por diferencia. Además, de cara a la construcción de nueva infraestructura se recomienda evitar la presencia de trapas en el recorrido, así como también se recomienda que en el caso de plantar vegetación en las inmediaciones de la vía ciclista sean plantas con raíces verticales, en lugar de horizontales, evitando así que estas levanten el pavimento.

Futuras investigaciones deberían ir encaminadas a comprobar la **hipótesis H2** y a estudiar en mayor medida los mismos pavimentos en diferentes condiciones de conservación, para mejorar así la clasificación de comodidad propuesta en este trabajo. Esto debería ir acompañado, a su vez, de una campaña de encuestas *in situ* a los usuarios de la infraestructura, pudiendo así relacionar directamente cada tramo con la valoración de los usuarios que lo están transitando.

También debería analizarse en futuras investigaciones si la posición del sensor influye en las aceleraciones registradas.

En cuanto a la instrumentación utilizada en este estudio, se recomienda utilizarlo para futuras investigaciones, ya que la Raspberry Pi permite controlar una gran variedad de sensores que pueden ayudar a la toma de datos en la línea de esta investigación sobre comodidad y seguridad vial, tales como sensores de ultrasonidos para medir las distancias con otros usuarios (peatones, coches, VMPs...).

A pesar de ello, el sistema montado sobre el patinete tiene margen de mejora, dado los problemas iniciales para su configuración y su uso *in situ*. Se recomienda intentar conectar una pantalla a la Raspberry, en vez de tener que acceder en remoto desde el teléfono inteligente, ya que esto puede acarrear problemas en la conexión que obliguen a desmontar el sistema para solucionarlo. Además, la posición de la batería con respecto a la placa no era óptima, provocando que se desconectara a veces debido a las vibraciones.

En conclusión, el análisis de la infraestructura ciclista existente está lejos de estar completo, debiendo analizar en mayor profundidad la interacción entre la infraestructura y los usuarios, identificando las necesidades y carencias que puedan existir, con el objetivo de mejorar la infraestructura ciclista del futuro, facilitando el crecimiento de la micromovilidad y, con ello, el desarrollo sostenible de las zonas urbanas.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. (2008). *UNE-ISO 2631-1*.
- Ambrož, M. (2017). Raspberry Pi as a low-cost data acquisition system for human powered vehicles. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 100, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.037>
- Barbudo, A., Jiménez, J. R., Ledesma, E. F., & Sierra, M. J. (2015). Surface regularity and skid resistance in cycle lane - Available design recommendations | Regularidad superficial y adherencia en vías ciclistas - recomendaciones de diseño disponibles. *Informes de La Construcción*, 67(540). <https://doi.org/10.3989/ic.15.010>
- Bíl, M., Andrášik, R., & Kubeček, J. (2015). How comfortable are your cycling tracks? A new method for objective bicycle vibration measurement. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, 415-425. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.05.007>
- BOE.es - BOE-A-2020-13969 Real Decreto 970/2020, de 10 de noviembre, por el que se modifican el Reglamento General de Circulación, aprobado por Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre y el Reglamento General de Vehículos, aprobado por Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, en materia de medidas urbanas de tráfico. (s. f.). Recuperado 29 de julio de 2022, a partir de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2020-13969>
- Cafiso, S., di Graziano, A., Marchetta, V., & Pappalardo, G. (2022). Urban road pavements monitoring and assessment using bike and e-scooter as probe vehicles. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00889. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E00889>
- Cano-Moreno, J. D., Marcos, M. I., Haro, F. B., D'Amato, R., Juanes, J. A., & Heras, E. S. (2019). Methodology for the study of the influence of e-scooter vibrations on human health and comfort. *ACM International Conference Proceeding Series*, 445-451. <https://doi.org/10.1145/3362789.3362906>
- Gao, J., Sha, A., Huang, Y., Hu, L., Tong, Z., & Jiang, W. (2018). Evaluating the cycling comfort on urban roads based on cyclists' perception of vibration. *Journal of Cleaner Production*, 192, 531-541. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.275>
- Gao, J., Sha, A., Huang, Y., Liu, Z., Hu, L., Jiang, W., Yun, D., Tong, Z., & Wang, Z. (2019). Cycling comfort on asphalt pavement: Influence of the pavement-tyre interface on vibration. *Journal of Cleaner Production*, 223, 323-341. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.153>
- Hardt, C., & Bogenberger, K. (2019). Usage of e-Scooters in Urban Environments. *Transportation Research Procedia*, 37, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.178>
- Hölzel, C., Höchtl, F., & Senner, V. (2012). Cycling comfort on different road surfaces. *Procedia Engineering*, 34, 479-484. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.082>
- IVE- Institut Valencià de l'Edificació. (n.d.). Recuperado el 30 de agosto a partir de: <https://bdc.f-ive.es/BDC22/1/DDD>
- Joo, S., Oh, C., Jeong, E., & Lee, G. (2015). Categorizing bicycling environments using GPS-based public bicycle speed data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.012>



- 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*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105954>
- Nuñez, J. Y. M., Bisconsini, D. R., & Rodrigues da Silva, A. N. (2020). Combining environmental quality assessment of bicycle infrastructures with vertical acceleration measurements. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 137, 447-458. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.032>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102628>
- Olieman, M., Marin-Perianu, R., & Marin-Perianu, M. (2012). Measurement of dynamic comfort in cycling using wireless acceleration sensors. *Procedia Engineering*, 34, 568-573. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.097>
- Pololu - *MinIMU-9 v5 Gyro, Accelerometer, and Compass (LSM6DS33 and LIS3MDL Carrier)*. (s. f.). Recuperado 3 de octubre de 2021, a partir de <https://www.pololu.com/product/2738#lightbox-picture0J7060>
- Qian, X., Moore, J. K., & Niemeier, D. (2020). Predicting Bicycle Pavement Ride Quality: Sensor-Based Statistical Model. *Journal of Infrastructure Systems*, 26(3), 04020033. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000571](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000571)
- Raspberry Pi 4 Model B specifications – Raspberry Pi*. (n.d.). Recuperado el 12 de marzo de 2022 a partir de <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
- Regidoria de Mobilitat Sostenible de l'Ajuntament de València. (2022). *Ordenanza de movilidad*. Ajuntament de València.
- Rybarczyk, G., & Wu, C. (2010). Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis. *Applied Geography*, 30(2), 282-293. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2009.08.005>
- Stöver, H. (n.d.). *Manual de diseño para el tráfico de bicicletas*. [www.crow.nl](http://www.crow.nl)
- Valle, M., & Herrera, J. C. (2019). Uso De Datos Pasivos Obtenidos Mediante Dispositivos Inerciales Para Inferir La Condición Del Pavimento En Ciclovías. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(1), 33-44. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732019000100033>
- Xiaomi España – *Comprar Mi Electric Scooter 1S Online*. (n.d.). Recuperado el 3 de octubre de 2021 a partir de <https://www.mi.com/es/buy/product/mi-electric-scooter-1s>
- Zhu, S., & Zhu, F. (2019). Cycling comfort evaluation with instrumented probe bicycle. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 129, 217-231. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.009>