



FACULTAD CIENCIA Y TECNOLOGIA

INGENIERÍA CIVIL

Aplicación de inteligencia artificial para la detección, clasificación y análisis de señalización vial y fallas en pavimentos.

Trabajo previo a la obtención del grado académico del título de Ingeniero Civil

Autores:

Kristel Aracely Vásquez López.

Raúl Esteban Delgado Peralta.

Director:

PhD. Diego Estuardo Correa Barahona

Cuenca-Ecuador

2025

Dedicatoria

Con todo mi amor a mi madre, Yolanda López, quien ha sido el pilar incondicional a lo largo de mi vida. Su apoyo constante y sus palabras de aliento en cada decisión fueron esenciales para seguir adelante. Aunque la distancia nos separaba, una llamada al final del día bastaba para recordarme que nunca estaba sola. Gracias por ser mi fuerza inagotable; este logro es para ti.

A mi padre, Arturo Vásquez, agradezco profundamente por haberme inculcado valores como la responsabilidad y la puntualidad. Tus sabios consejos y enseñanzas han guiado mis pasos y me han ayudado a convertirme en una mejor persona. Deseo que este logro refleje todo lo que me enseñaste y te llene de orgullo, porque sin ti no habría sido posible.

A mi hermano, Cristopher Vásquez, mi alegría constante. Gracias por estar presente incluso en la distancia. Tus bromas en los momentos difíciles, tu apoyo silencioso y tu cariño incondicional fueron un refugio para mi corazón. Gracias por cuidarme, por entenderme como solo tú puedes hacerlo y por desear siempre lo mejor para mí. Este logro también es tuyo.

A mis mascotas, Pepito, Kacy y Casper, por su compañía leal y su amor incondicional. En los días más agotadores, su presencia alegre y tranquila fue un consuelo que me ayudó a continuar. Este logro también se los dedico a ustedes, por acompañarme en silencio y darme tanta paz y alegría.

Kristel Vásquez.

Dedicatoria

Dedico este trabajo, con todo mi cariño y gratitud, a mis padres, Mónica Peralta y Raúl Delgado por ser mi pilar más firme, por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y su ejemplo constante de esfuerzo y perseverancia, siempre serán mi orgullo y las personas que más admiro en esta vida.

A mis hermanas, Danna y Natasha por estar siempre presentes con su apoyo, sus palabras de aliento y su confianza en mí, incluso en los momentos más difíciles.

A mi familia en general, por su apoyo constante en las situaciones que más les necesitaba y por siempre alentarme a mejorar, así como a mis amigos, que los conozco hace más de 12 años y siempre han estado para ser mi apoyo en todo momento.

A mi novia Sofia, que estuvo en los momentos más difíciles para apoyarme y que me ayudo a superar esta etapa con su cariño y sacrificio.

Raúl Delgado.

Agradecimientos

Este trabajo de titulación representa no solo la culminación de una etapa académica, sino también el resultado de un proceso lleno de aprendizajes y esfuerzos compartidos. Es por ello por lo que deseamos dedicar unas palabras de agradecimiento a quienes hicieron posible esta meta.

En primer lugar, agradecemos a Dios, por darnos de sabiduría y fortaleza, su presencia nos dio paz en los momentos de incertidumbre y nos motivó cuando las dificultades parecían superar nuestras fuerzas.

A nuestro director de tesis, PhD. Diego Correa, le expresamos nuestro más profundo agradecimiento por su guía constante y por fomentar en nosotros el pensamiento crítico. Su acompañamiento fue clave para estructurar con claridad y coherencia esta investigación.

A nuestras familias, por su respaldo incondicional a lo largo de toda nuestra formación profesional. Gracias por comprender nuestras ausencias, por alentarnos en los momentos de agotamiento y por comprendernos, esto nos ayudó a culminar nuestro trabajo académico.

A nuestro tribunal, Ing. Carlos Orellana, por sus valiosas observaciones, por tomarse el tiempo de revisar nuestro trabajo y por compartir sus conocimientos a través de sugerencias que nos ayudaron a fortalecer la presentación de este proyecto.

Agradecemos sinceramente al Ing. Esteban Cabrera, cuya experiencia, conocimiento y orientación constante fueron pilares fundamentales en la elaboración de este trabajo de titulación.

Finalmente, a nuestros amigos, compañeros de aula y de vida, quienes han estado presentes con palabras de aliento y con su apoyo emocional. Gracias por brindarnos momentos de alivio, por compartir el esfuerzo y por ayudarnos a mantener el entusiasmo.

Resumen

El presente trabajo de titulación evalúa la aplicación de inteligencia artificial en el ámbito de la gestión de infraestructura vial, mediante el uso del software “Pavimenta2”, desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo. La investigación se enmarca en la necesidad de modernizar los métodos tradicionales de inspección visual, los cuales presentan limitaciones en cuanto a precisión, cobertura espacial y eficiencia operativa. Para ello, se implementó una metodología basada en visión por computador que permitió procesar imágenes georreferenciadas captadas en campo, con el fin de detectar automáticamente fallas en pavimentos flexibles y rígidos, así como elementos de señalización vial horizontal y vertical. Los resultados evidencian que la herramienta “Pavimenta2” posee un alto potencial para optimizar los procesos de evaluación vial, logrando una reducción de hasta el 91,67% en el tiempo requerido para la inspección en comparación con métodos convencionales. El desempeño del software fue especialmente preciso en el análisis de pavimentos rígidos, mientras que en el caso de la señalización vial se identificó una correspondencia parcial entre la detección automatizada y la observación directa. No obstante, se reconocieron ciertas limitaciones en la clasificación de fallas específicas y en la identificación de elementos de señalización menos visibles, así como restricciones asociadas a una documentación técnica desactualizada de la plataforma. En conclusión, la incorporación de inteligencia artificial a través de herramientas como “Pavimenta2” constituye una alternativa viable y eficiente para complementar las metodologías tradicionales de inspección vial, aportando a una gestión más ágil, objetiva y digitalizada del mantenimiento de la infraestructura vial.

Palabras clave del autor: inteligencia artificial, Pavimenta2, fallas en pavimento, señalización vial, visión computacional, infraestructura vial, detección automática.

Abstract

This thesis explores the application of artificial intelligence in the field of road infrastructure management through the use of the software “Pavimenta2,” developed by the Inter-American Development Bank. The research addresses the need to modernize traditional visual inspection methods, which often suffer from limitations in accuracy, spatial coverage, and operational efficiency. A methodology based on computer vision was implemented to process georeferenced images captured in the field, enabling the automated detection and evaluation of defects in flexible and rigid pavements, as well as horizontal and vertical road signs. The results demonstrate that “Pavimenta2” holds significant potential to streamline road condition assessment processes, achieving up to a 91.67% reduction in inspection time compared to conventional methods. The software showed greater precision in the analysis of rigid pavements, whereas in the case of road signage, only partial agreement was found between automated detection and direct observation. However, certain limitations were identified in the classification of specific defects and in the detection of less visible signage elements, in addition to challenges related to outdated technical documentation of the platform. In conclusion, the integration of artificial intelligence through tools such as “Pavimenta2” offers a viable and efficient complement to traditional inspection methods, contributing to a more agile, objective, and digitized approach to road maintenance management.

Author Keywords: artificial intelligence, Pavimenta2, pavement distress, road signage, computer vision, road infrastructure, automated detection.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Índice de contenidos.....	vii
Índice de figuras.....	x
Índice de tablas.....	xii
Índice de ecuaciones.....	xiii
Índice de anexos.....	xiv
Introducción.....	xix
Antecedentes.....	xix
Objetivo general.....	xx
Objetivos específicos.....	xx
Alcance.....	xxi
1. Capítulo 1.....	1
1.1. Historia de la Inteligencia artificial.....	1
1.2. Redes Neuronales Artificiales.....	1
1.3. Big data.....	2
1.4. Visión por Computadora (Computer Visión).....	2
1.5. Redes neuronales convolucionales.....	2
1.5.1. Componentes de una red neuronal convolucional.....	3
1.6. Tensorflow.....	4
1.7. OpenCV.....	4
1.8. YOLO (You Only Look Once).....	5
1.9. Redes Neuronales Siamesas.....	7
1.10. Pavimento.....	7
1.10.1. Innovación en los pavimentos.....	8
1.11. Tipos de pavimentos.....	9
1.11.1. Pavimento Flexible.....	9
1.11.2. Pavimento rígido.....	10
2. Capítulo 2.....	12
2.1. Aprendizaje de la inteligencia artificial.....	12

2.2.	Área de estudio	13
2.2.1.	Área de estudio de pavimento flexible	13
2.2.2.	Área de estudio de pavimento rígido	15
2.2.3.	Área de estudio para comprobación de señalización.....	17
2.3.	Método de recolección de datos.	18
2.3.1.	Método de Recolección de Datos Manual	18
2.3.2.	Método de captura de imágenes	19
2.4.	Especificaciones del manual.....	20
2.4.1.	Requisitos de Hardware.....	20
2.4.2.	Formatos de Datos de Entrada.....	20
2.4.3.	Imágenes con Posiciones Embebidas	20
2.4.4.	Archivos Geo-referenciados en Formato NMEA.....	21
2.4.5.	Archivos CSV con Coordenadas Geográficas.....	21
2.4.6.	Especificaciones para la Captura de Datos	21
2.5.	Procesamiento de datos	22
3.	Capítulo 3	23
3.1.	Evaluación del pavimento	23
3.1.1.	Condición del pavimento.....	23
3.2.	Metodología para evaluación del pavimento.....	23
3.2.1.	Evaluación mediante Pavement Condition Index (PCI).....	23
3.3.	Ciclo de vida del pavimento orientado a su agrietamiento y mantenimiento.....	26
4.	Capítulo 4	27
4.1.	Ejecución.	27
4.2.	Flujograma del código para la detección clasificación y análisis de señalización vial y fallas en pavimentos.	28
4.3.	Extracción y almacenamiento de datos.	31
4.4.	Visualización y análisis de resultados	37
4.5.	Desglose de datos	37
4.6.	Normativa ASTM D6433-11 para pavimento flexible.....	38
	Nota. Datos obtenidos de “Pavimenta2”.	40
4.7.	Normativa ASTM D6433-11 para pavimento rígido	40
4.7.1.	Vía de pavimento flexible Bibín- Octavio Cordero Palacios	41
4.7.2.	Vía de pavimento rígido Biblian-E35.....	47
4.7.3.	Análisis de señalización vial.....	53
5.	Capítulo 5	54

5.1.	Resultados de pavimento flexible evaluado en base al PCI.	55
5.2.	Resultados de las coincidencias de la IA para pavimento flexible.	57
5.3.	Resultados de pavimento rígido evaluado en base al PCI.	58
5.4.	Resultados de las coincidencias de la IA de rígido.	60
5.5.	Resultados de la señalización de la Avenida Primero de Mayo	61
5.6.	Comparación de los resultados mediante método PCI	65
	Conclusiones.....	67
	Recomendaciones	70
	Referencias Bibliográficas.....	71
	Anexos	74

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema de una red neuronal convolucional cualquiera	3
Figura 2: Proceso de unificación de Yolo	6
Figura 3: Estructura de pavimento flexible	10
Figura 4: Estructura de pavimento rígido	11
Figura 5: Octavio Cordero Palacios: Ubicación en el Cantón Cuenca.....	14
Figura 6: Ruta de estudio.....	15
Figura 7: División política administrativa del cantón Biblián.....	16
Figura 8: Ruta de estudio de pavimento rígido.....	17
Figura 9: Ruta de estudio señalización	18
Figura 10: Datos GPS que brinda la captura de imágenes	21
Figura 11: Ejemplo de ubicación de cámara en el vehículo	27
Figura 12: Captura de imagen en el vehículo	28
Figura 13: Flujograma del código para la detección de fallas en pavimentos.....	30
Figura 14: Pavimento sin daño	31
Figura 15: Pavimento con grietas	32
Figura 16: Pavimento con bache	33
Figura 17: Concreto agrietado.....	34
Figura 18: Señal de advertencia.....	34
Figura 19: Señales reglamentarias.....	35
Figura 20: Señal de alto	35
Figura 21: Señal de información.	36
Figura 22: Panel Informativo.....	36
Figura 23: Placas Blancas.....	37
Figura 24: Formato para inspección de pavimento flexible según ASTM D6433-11.....	43
Figura 25: Desgaste superficial carreteras.....	44
Figura 26: Ahuellamiento.....	45
Figura 27: Baches (unidades métricas).....	45
Figura 28: Grietas longitudinales/transversales.....	46
Figura 29: Grietas de reflexión de juntas.....	46
Figura 30: Piel de cocodrilo.....	47

Figura 31: Formato para inspección de pavimento rígido según ASTM D6433-11	48
Figura 32: Grietas severas.	50
Figura 33: Concreto agrietado.	50
Figura 34: Fisuras.	51
Figura 35: Bache grande.....	51
Figura 36: Bache pequeño.	52
Figura 37:Grietas finas.	52
Figura 38: Grafica obtenida de “Pavimenta2” para flexible.....	58
Figura 39: Grafica obtenida de “Pavimenta2” para rígido	61

Índice de tablas

Tabla 1 Rangos PCI	25
Tabla 2 Norma ASTM D6443-11 pavimento flexible.....	38
Tabla 3 Adaptación de Pavimenta2 a norma ASTM.....	39
Tabla 4 Norma ASTM D6443-11 pavimento rígido	40
Tabla 5 Adaptación de Pavimenta2 a norma ASTM.....	41
Tabla 6:Tramos para estudiar.	43
Tabla 7: tramos para estudiar.....	49
Tabla 8 Resultados de índice de condición del pavimento. (PCI).....	54
Tabla 9 PCI de pavimento flexible.....	55
Tabla 10 PCI de pavimento rígido.....	59
Tabla 11 Resultados de coincidencia en señalización	61
Tabla 12 Comparaciones de resultados del estado del pavimento de acuerdo al PCI.....	66

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1	41
Ecuación 2	42

Índice de anexos

Anexo 1 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 836.....	74
Anexo 2 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 852.....	74
Anexo 3 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 868.....	75
Anexo 4 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 885.....	75
Anexo 5 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 911.....	76
Anexo 6 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 920.....	76
Anexo 7 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 944.....	77
Anexo 8 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 956.....	77
Anexo 9 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 970.....	78
Anexo 10 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 984.....	78
Anexo 11 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1006.....	79
Anexo 12 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1014.....	79
Anexo 13 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1041.....	80
Anexo 14 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1054.....	80
Anexo 15 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1064.....	81
Anexo 16 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1070.....	81
Anexo 17 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1077.....	82
Anexo 18 Hoja de encuesta para metodología #foto 836.....	82
Anexo 19 Hoja de encuesta para metodología #foto 852.....	83
Anexo 20 Hoja de encuesta para metodología #foto 868.....	83
Anexo 21 Hoja de encuesta para metodología #foto 885.....	83
Anexo 22 Hoja de encuesta para metodología #foto 911.....	84
Anexo 23 Hoja de encuesta para metodología #foto 920.....	84
Anexo 24 Hoja de encuesta para metodología #foto 944.....	84
Anexo 25 Hoja de encuesta para metodología #foto 956.....	85
Anexo 26 Hoja de encuesta para metodología #foto 970.....	85
Anexo 27 Hoja de encuesta para metodología #foto 984.....	85
Anexo 28 Hoja de encuesta para metodología #foto 1006.....	86
Anexo 29 Hoja de encuesta para metodología #foto 1014.....	86
Anexo 30 Hoja de encuesta para metodología #foto 1041.....	86

Anexo 31 Hoja de encuesta para metodología #foto 1054.....	87
Anexo 32 Hoja de encuesta para metodología #foto 1064.....	87
Anexo 33 Hoja de encuesta para metodología #foto 1070.....	87
Anexo 34 Hoja de encuesta para metodología #foto 1077.....	88
Anexo 35 Medición de área de falla.....	88
Anexo 36 Medición de ancho de vía.....	89
Anexo 37 Toma de datos en campo.....	89
Anexo 38 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1113.....	90
Anexo 39 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1119.....	90
Anexo 40 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1123.....	91
Anexo 41 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1130.....	91
Anexo 42 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1143.....	92
Anexo 43 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1146.....	92
Anexo 44 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1157.....	93
Anexo 45 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1162.....	93
Anexo 46 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1170.....	94
Anexo 47 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1173.....	94
Anexo 48 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1176.....	95
Anexo 49 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1187.....	95
Anexo 50 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1189.....	96
Anexo 51 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1194.....	96
Anexo 52 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1203.....	97
Anexo 53 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1210.....	97
Anexo 54 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1213.....	98
Anexo 55 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1215.....	98
Anexo 56 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1222.....	99
Anexo 57 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1225.....	99
Anexo 58 Hoja de encuesta para metodología #foto 1113.....	100
Anexo 59 Hoja de encuesta para metodología #foto 1119.....	100
Anexo 60 Hoja de encuesta para metodología #foto 1123.....	101
Anexo 61 Hoja de encuesta para metodología #foto 1130.....	101

Anexo 62 Hoja de encuesta para metodología #foto 1143.....	102
Anexo 63 Hoja de encuesta para metodología #foto 1157.....	102
Anexo 64 Hoja de encuesta para metodología #foto 1162.....	103
Anexo 65 Hoja de encuesta para metodología #foto 1170.....	103
Anexo 66 Hoja de encuesta para metodología #foto 1173.....	104
Anexo 67 Hoja de encuesta para metodología #foto 1176.....	104
Anexo 68 Hoja de encuesta para metodología #foto 1187.....	105
Anexo 69 Hoja de encuesta para metodología #foto 1189.....	105
Anexo 70 Hoja de encuesta para metodología #foto 1194.....	106
Anexo 71 Hoja de encuesta para metodología #foto 1203.....	106
Anexo 72 Hoja de encuesta para metodología #foto 1210.....	107
Anexo 73 Hoja de encuesta para metodología #foto 1213.....	107
Anexo 74 Hoja de encuesta para metodología #foto 1215.....	108
Anexo 75 Hoja de encuesta para metodología #foto 1222.....	108
Anexo 76 Hoja de encuesta para metodología #foto 1225.....	109
Anexo 77 Medidas de ancho de vía tomadas en campo.....	109
Anexo 78 Datos estudiados del programa en campo.....	110
Anexo 79 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1283.....	110
Anexo 80 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1284.....	111
Anexo 81 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1285.....	111
Anexo 82 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1286.....	112
Anexo 83 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1287.....	112
Anexo 84 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1288.....	113
Anexo 85 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1289.....	113
Anexo 86 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1290.....	114
Anexo 87 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1291.....	114
Anexo 88 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1292.....	115
Anexo 89 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1293.....	115
Anexo 90 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1294.....	116
Anexo 91 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1295.....	116
Anexo 92 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1296.....	117

Anexo 93 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1297.....	117
Anexo 94 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1298.....	118
Anexo 95 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1299.....	118
Anexo 96 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1300.....	119
Anexo 97 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1301.....	119
Anexo 98 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1302.....	120
Anexo 99 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1303.....	120
Anexo 100 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1304.....	121
Anexo 101 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1305.....	121
Anexo 102 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1306.....	122
Anexo 103 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1307.....	122
Anexo 104 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1308.....	123
Anexo 105 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1309.....	123
Anexo 106 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1310.....	124
Anexo 107 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1311.....	124
Anexo 108 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1312.....	125
Anexo 109 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1313.....	125
Anexo 110 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1314.....	126
Anexo 111 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1315.....	126
Anexo 112 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1316.....	127
Anexo 113 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1317.....	127
Anexo 114 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1318.....	128
Anexo 115 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1319.....	128
Anexo 116 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1320.....	129
Anexo 117 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1321.....	129
Anexo 118 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1322.....	130
Anexo 119 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1323.....	130
Anexo 120 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1324.....	131
Anexo 121 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1325.....	131
Anexo 122 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1326.....	132
Anexo 123 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1327.....	132

Anexo 124 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1328.....	133
Anexo 125 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1329.....	133
Anexo 126 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1330.....	134
Anexo 127 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1331.....	134
Anexo 128 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1332.....	135
Anexo 129 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1333.....	135
Anexo 130 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1334.....	136
Anexo 131 Código del software “Pavimenta2”.....	136

Introducción

La infraestructura vial es un componente fundamental en el desarrollo económico y social, debido a que garantiza la movilidad y el acceso a servicios básicos. Sin embargo, el mantenimiento y la durabilidad de los pavimentos presentan desafíos significativos debido a factores como el tráfico vehicular, las condiciones climáticas y la calidad de los materiales. Para asegurar la seguridad y funcionalidad de estas vías, es necesario implementar métodos de diseño y monitoreo efectivos que aborden las condiciones reales de las infraestructuras viales.

En este contexto, surge la necesidad de explorar soluciones innovadoras que integren nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial, en la gestión y el mantenimiento de las vías. La aplicación de modelos avanzados de análisis y clasificación permite no solo detectar fallas en el pavimento, sino también optimizar los procesos de mantenimiento, evitando gastos innecesarios y mejorando la eficiencia de la obtención de datos. Así, el uso de herramientas tecnológicas se convierte en una ventaja para las entidades responsables, facilitando la identificación oportuna de problemas y garantizando un desempeño superior de las infraestructuras viales a lo largo de su periodo de vida útil.

Este trabajo de titulación propone la implementación de un modelo de inteligencia artificial en el monitoreo y mantenimiento de pavimentos, con el objetivo de demostrar su eficacia en la mejora de la seguridad y la prolongación de la vida útil de las carreteras. A través de un enfoque integral, se analizarán las distintas metodologías existentes y se evaluarán las oportunidades que ofrece la tecnología para abordar las necesidades concretas de las vías estatales, contribuyendo así al desarrollo sustentable de las zonas de influencia.

Antecedentes

El diseño y mantenimiento de pavimentos ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones que abordan la necesidad de enfoques más eficientes y efectivos. Según (AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020) el método de diseño de pavimentos se centra en garantizar la resistencia y durabilidad de las infraestructuras viales a través de consideraciones técnicas que incluyen el tráfico vehicular

y las características del terreno. Este método busca optimizar el rendimiento a lo largo de la vida útil del pavimento, crucial para minimizar el riesgo de deterioro y accidentes.

Sin embargo, la realidad en las vías a menudo se ve impactada por factores externos no considerados en el diseño inicial, como eventos naturales y cambios en los patrones de tráfico (Ríos, Bacca, Caicedo, & Orobio, 2020). Esto resalta la importancia de implementar un sistema de monitoreo continuo y preciso que permita identificar de manera oportuna los problemas en el pavimento. En este sentido, el uso de tecnologías ha sido explorado, aunque su implementación puede resultar costosa y complicar la logística debido a cierres de vías (Division de Transporte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2021).

Recientemente, avances en inteligencia artificial abren nuevas posibilidades para el monitoreo del estado de los pavimentos. Por ejemplo, el software "Pavimenta2", desarrollado por la División de Transporte del Banco Interamericano de Desarrollo, utiliza técnicas de aprendizaje profundo y visión por computadora para clasificar defectos en el pavimento y mejorar la efectividad del mantenimiento (Banco Interamericano de Desarrollo, 2024). Este enfoque no solo permite una mejor identificación y análisis de las fallas, sino que también promueve una gestión más eficiente de los recursos destinados al mantenimiento vial (Pfeifer & Esteves, 2022). Estas innovaciones constituyen una guía prometedora para optimizar la inversión en infraestructura vial y garantizar su durabilidad y seguridad.

Objetivo general

Aplicación de la herramienta de infraestructura digital basada en Inteligencia Artificial "Pavimenta2", a la gestión de activos viales, para la identificación, análisis y caracterización de la señalización, así como la detección y clasificación de fallas en pavimentos.

Objetivos específicos

- Realizar la investigación bibliográfica respectiva e instruirse sobre el software de inteligencia artificial "Pavimenta2". Además, llevar a cabo un levantamiento de datos en campo, tanto manual como utilizando tecnología.

- Realizar un análisis comparativo de las diferencias en los tiempos de evaluación entre la utilización de inteligencia artificial y la inspección visual.
- Comparar la efectividad del software de inteligencia artificial frente a técnicas de inspección visual en la identificación de fallas en pavimentos y señalización, con el objetivo de determinar cuál de estos métodos ofrece mayor eficiencia en el proceso de evaluación.
- Redactar el proceso de implementación de inteligencia artificial, analizando los resultados obtenidos y su impacto en la optimización de la identificación, análisis y caracterización de la señalización, así como la detección y clasificación de fallas en pavimentos.

Alcance

El presente trabajo de titulación se enfoca en la implementación y evaluación del software de inteligencia artificial "Pavimenta2" como una herramienta de ayuda para actividades viales, basándose en identificación, análisis y caracterización de la señalización, así como a la detección y clasificación de fallas en pavimentos.

Esta investigación se desarrollará en diferentes tramos de carreteras, cuyas características sean de deterioro o de señalización para así evaluar la efectividad del software en condiciones reales. El estudio realizará un análisis comparativo entre el método tradicional de inspección visual y la aplicación de "Pavimenta2", evaluando tres aspectos fundamentales: eficiencia en tiempo y precisión en la detección de deterioros viales.

Se aplicará el Índice de Condición de Pavimento (PCI), una medida que evalúa la condición funcional del pavimento desde la perspectiva del usuario. Para garantizar la objetividad en la comparación, se establecerán parámetros de medición estandarizados durante el levantamiento de datos, el cual se realizará simultáneamente mediante inspección visual, manual y con la aplicación tecnológica.

En cuanto al análisis técnico, el estudio abarcará la evaluación de los principales tipos de fallas en pavimentos, incluyendo fisuras, baches y deterioros superficiales, así como la

identificación de señalización. No se incluirá el análisis estructural profundo del pavimento ni evaluaciones de capacidad portante, limitándose a la inspección superficial visible mediante las tecnologías aplicadas.

Se establecerá un procedimiento metodológico para la implementación de "Pavimenta2", identificando variables, requerimientos técnicos y limitaciones que deben considerarse para su utilización. El trabajo finalizará con conclusiones y recomendaciones específicas sobre la herramienta para los sistemas de gestión vial.

1. Capítulo 1

1.1.Historia de la Inteligencia artificial

El deseo de la sociedad de innovar y progresar se manifestó con el desarrollo de artefactos que simulan la apariencia, movimientos y comportamientos humanos. Isaac Asimov (1920-1992), elaboró narrativas que pertenecían al ámbito de la ciencia ficción, estas han logrado concretarse con el desarrollo tecnológico. Su obra "Runaround" establecerán posteriormente las tres leyes de la robótica. El matemático británico Alan Turing (1912-1954) propuso su evaluación "test de Turing", basada en que, si un sistema artificial exhibe comportamientos similares a la inteligencia humana, debe considerarse inteligente (Turing, 1950).

En 1957, Newell y Simon desarrollaron el Sistema de Resolución General de Problemas (GPS), primer programa que separaba la información del problema de su estrategia de solución. McCarthy creó LISP en 1958, un lenguaje para procesamiento de listas, mientras Weizenbaum implementó ELIZA en 1965, primer sistema de comunicación interactiva escrita. Los años 80 vieron la consolidación de lenguajes como LISP y PROLOG, junto con sistemas como EURISKO. Esto generó dos corrientes principales: Newell y Simon lideraron la escuela de Carnegie-Mellon que imitaba la estructura cerebral y desarrollar redes neuronales; McCarthy y Minsky creó una línea de investigación, para obtener resultados inteligentes sin procesos cognitivos humanos, como menciona (Ponce Gallegos, y otros, 2014)

Por lo tanto, la trayectoria de la inteligencia artificial ha estado representada por ciclos de éxito y optimismo, así como por periodos de innovación y perfeccionamiento sistemático en sus implicaciones en campos como medicina, psicología, biología, ética y filosofía; no obstante, el interés académico ha permitido su consolidación como un área de conocimiento de relevancia para la investigación científica.

1.2.Redes Neuronales Artificiales

Una red neuronal, ofrece medios para modelar de manera eficiente problemas de alta complejidad, por eso han recibido un gran interés, también tienen la capacidad de encontrar patrones por medio de algoritmos de aprendizaje, basados en la experiencia que va

recopilando. Según (Salas, 2004) las ANN se basan en la analogía que existe en el comportamiento y función del cerebro humano en específico del sistema nervioso, compuesto por redes de neuronas biológicas que poseen bajas capacidades de procesamiento.

1.3.Big data

Big Data, conocido también en español como macrodatos o inteligencia de datos, es el conjunto de datos que son tan grandes, complejos y variados que no son procesados ni analizados mediante herramientas o métodos tradicionales.

Esta categoría de datos se define por tres dimensiones, denominadas las 3V: volumen, que indica el tamaño de la información; velocidad, que describe con que rapidez se generan y procesan los datos; y variedad, que abarca la diversidad de tipos de datos, que pueden ser estructurados o no, se extiende también a 6V, añadiendo variabilidad, veracidad y valor, que son igualmente importantes para comprender el impacto y la utilidad de Big Data (Moreno, 2018).

1.4.Visión por Computadora (Computer Visión)

La visión es fundamental en el procesamiento de información, pero también representa un proceso complejo, ya que nuestro cerebro debe ser capaz de discernir e interpretar esta información. La visión por computadora, inspirada en la percepción visual humana, se refiere a la obtención automatizada de información a partir de imágenes (López, 2025). Esta tecnología combina modelos avanzados de física, óptica y gráficos computacionales para analizar imágenes y reconstruir propiedades como forma, iluminación y colores.

En el contexto del sistema “Pavimenta2”, esta capacidad es esencial para identificar fallas en el pavimento y clasificar señalizaciones viales mediante el procesamiento de imágenes y videos. Este enfoque permite una evaluación más precisa y eficiente de la infraestructura vial, facilitando su mantenimiento y mejora.

1.5.Redes neuronales convolucionales

Las redes neuronales convolucionales (CNN) representan una innovación tecnológica directamente en el funcionamiento jerárquico de la corteza visual biológica (López, 2025) .

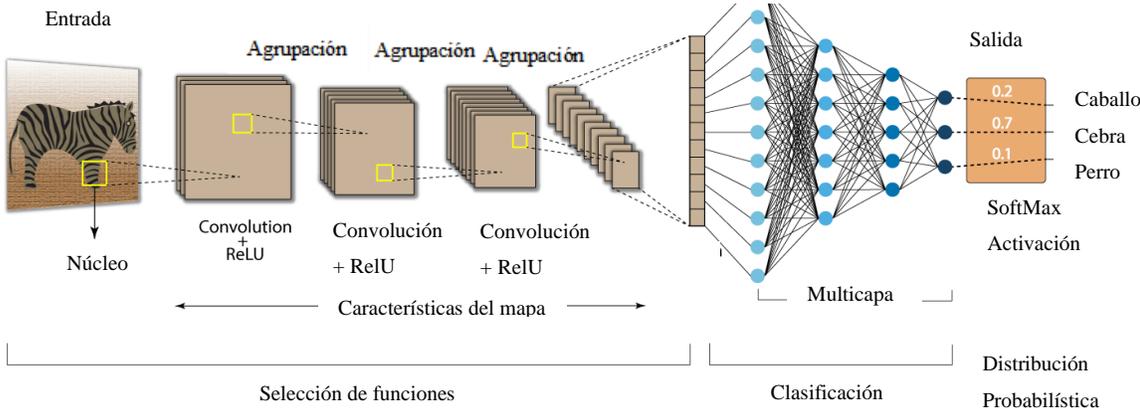
Esta arquitectura neuronal artificial se distingue por su capacidad para procesar datos visuales mediante capas especializadas que extraen características de manera progresiva.

En las primeras capas, la red identifica elementos básicos como bordes y texturas; las capas intermedias combinan estos elementos en estructuras más complejas como formas geométricas; mientras que las capas profundas logran reconocer objetos completos y sus variaciones en diferentes condiciones de iluminación, orientación y escala. La eficiencia computacional de las CNN está en su capacidad para reducir el número de parámetros mediante operaciones de convolución que comparten pesos, aprovechando la naturaleza bidimensional de las imágenes (López, 2025).

1.5.1. Componentes de una red neuronal convolucional

Figura 1

Esquema de una red neuronal convolucional cualquiera



Nota. La figura muestra el esquema del funcionamiento de una red neuronal y como lo analiza para lograr un resultado. Fuente: Adaptada de Redes Neuronales convolucionales (p.41), por Martín de Diego, 2022.

La estructura de las redes neuronales convolucionales se divide claramente en dos fases principales, como se ilustra en la Figura 1. La primera fase, conocida como selección de funciones, se constituye de: la capa de entrada que preserva los valores de píxeles y las dimensiones originales de la imagen, y la capa convolucional, que se encargará de procesar dicha imagen. Posteriormente, encontramos la segunda fase denominada clasificación, constituida por múltiples capas ocultas completamente conectadas entre sí. El proceso

culmina en la capa de salida, encargada de generar las puntuaciones correspondientes a cada categoría y ejecutar el procedimiento de clasificación.

Una ventaja de estas redes es su capacidad para trabajar con entradas diferentes, aplicando al núcleo un número variable de veces según el tamaño de la imagen. Mediante técnicas como zero-padding, que añade bordes de píxeles con valor cero, se preserva el tamaño original de la imagen durante el procesamiento. Las funciones de agrupación proporcionando propiedades y permiten reconocer características independientemente de su ubicación exacta en la imagen.

Esta arquitectura ha revolucionado el campo de la visión por computadora, permitiendo desarrollar sistemas capaces de reconocer objetos, clasificar imágenes y detectar incoherencias.

1.6.Tensorflow

Tensor Flow es una librería de código abierto diseñada para el desarrollo rápido y flexible de aplicaciones en plataformas como CPUs, GPUs y TPUs. Su arquitectura es versátil, permitiendo a los investigadores crear y ejecutar flujo de datos, esto también facilita la investigación académica, que van desde el procesamiento de lenguaje natural y la visión por computadora hasta aplicaciones en medicina, finanzas y ciencias básicas. Fue desarrollada por los investigadores de Google Brain y fue de gran ayuda para el campo del Machine Learning y el Deep Learning, aunque su uso se extiende a muchos otros campos (Valle, 2017-2018).

1.7.OpenCV

Según las siglas de OpenCV, provienen del anglicismo "Open Source Computer Vision Library", es una biblioteca de código abierto para el tratamiento de imágenes y visión por computadora. Se distingue por una sintaxis donde las funciones comienzan con el prefijo "cv" y los tipos de datos con el prefijo "Cv". Esta estructura sistemática permite a los desarrolladores realizar operaciones complejas de procesamiento de imágenes (Medrano & Igual, 2008).

La versatilidad de OpenCV la convierte en una herramienta fundamental en múltiples campos tecnológicos, desde la inteligencia artificial hasta la robótica, pasando por seguridad y medicina. Su capacidad multiplataforma, soporte para diversos lenguajes de programación como C++, Python y Java, y su rendimiento en tiempo real la distinguen como una biblioteca líder en visión computacional. La constante actualización, una comunidad global de desarrolladores y una documentación extensa contribuyen a su continua evolución, consolidándola como una referencia indispensable para profesionales y entusiastas de la tecnología de imágenes y visión artificial.

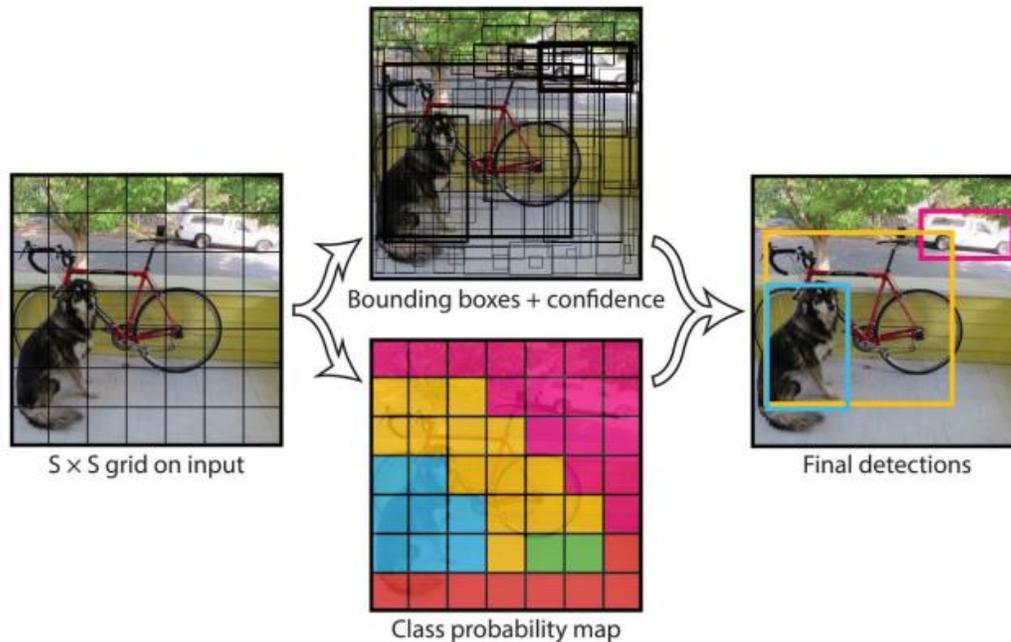
1.8.YOLO (You Only Look Once)

Yolo, es un sistema de detección de objetos que funciona examinando la imagen en su totalidad. Su método consiste en dividir la imagen en una cuadrícula uniforme, donde cada celda predice la presencia de objetos y la probabilidad asociada a cada detección. Este enfoque permite identificar simultáneamente múltiples objetos y sus ubicaciones en una sola pasada, lo que resulta en un proceso de detección más eficiente y rápido que los métodos tradicionales (Ortega, 2020).

Una forma de entender este proceso se lo puede ver en la Figura 2, en la cual Yolo unifica todos estos procesos:

Figura 2

Proceso de unificación de Yolo



Nota. La figura representa como YOLO realiza una puntuación de las celdas para identificar la precisión y la seguridad con la que detecta un objeto. Fuente: Universidad Politécnica de Madrid; Lobo, I (2020).

Este sistema procesa información en una sola pasada de red neuronal, generando tres elementos fundamentales que son las cajas delimitadoras (bounding boxes) que indican la posición espacial y valores de confianza que cuantifican la certeza de cada detección, también un mapa de probabilidad de clases que determina la naturaleza de los objetos identificados. Mediante un algoritmo que combina estos tres componentes, YOLO produce las detecciones finales con alta precisión y eficiencia computacional, superando las limitaciones de los métodos secuenciales.

La primera versión de YOLO estableció un enfoque innovador al analizar la imagen completa en una sola pasada, logrando representaciones generalizadas de objetos que superaban métodos anteriores como DPM y R-CNN.

Se desarrolló YOLOv5, una versión que, aunque no fue publicada formalmente en un artículo académico, ha ganado gran popularidad por su facilidad de uso y excelente rendimiento.

Desarrollado por Ultralytics en 2020, YOLOv5 fue reescrito completamente en PyTorch, lo que facilita su implementación, entrenamiento y personalización. Esta versión presenta una estructura modular, permite el entrenamiento en distintos tamaños de red (YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l, YOLOv5x), e incorpora técnicas modernas de aumento de datos, optimización de pérdidas y mejoras en la arquitectura para acelerar la inferencia sin sacrificar precisión. Gracias a estas características, YOLOv5 supera en velocidad a sus versiones anteriores, manteniendo o incluso mejorando su capacidad de detección, y se ha consolidado como una de las opciones preferidas en proyectos reales de visión por computadora en tiempo real (Ultralytics, 2020).

1.9.Redes Neuronales Siamesas

Las redes siamesas duplican parcialmente la estructura de una red neuronal, para luego unir estas réplicas en una o más capas compartidas, dando como resultado el procesamiento de las etapas anteriores de ambas réplicas. Este diseño facilita la comparación entre dos entradas distintas, como imágenes de personas, mediante la extracción de características relevantes de cada entrada y la aplicación de métodos clasificatorios que producen resultados fácilmente interpretables.

Los modelos siameses para verificación facial comenzaron a desarrollarse a principios del siglo XXI, empleando inicialmente técnicas de reducción dimensional para comparar rasgos entre pares de imágenes (Hadsell, Chopra, & LeCun, 2005). Con el avance del tiempo, surgieron modelos basados en aprendizaje profundo, no obstante, la estructura fundamental ha permanecido constante.

1.10.Pavimento

El pavimento es una estructura compuesta por varias capas que se construye sobre el terreno para proporcionar una superficie adecuada para el tránsito de vehículos y peatones. Esta estructura está diseñada para soportar cargas y resistir el desgaste causado por el tráfico y las condiciones climáticas (Montejo, 2002).

Las principales capas que conforman un pavimento incluyen:

Capa de Subrasante: La base natural del terreno que soporta el resto de las capas.

Capa de Subbase: Mejora la capacidad de carga y estabilidad del pavimento.

Capa Base: Proporciona resistencia adicional y soporte estructural.

Capa de Rodadura: La superficie superior diseñada para el tránsito, que puede ser de asfalto, hormigón u otros materiales.

Es fundamental entender las fallas que pueden presentarse en las superficies pavimentadas, por ende, algunas de las fallas incluyen:

Grietas: Estas rupturas en la superficie del pavimento pueden ser causadas por cambios de temperatura, el tráfico y el envejecimiento de los materiales. Pueden clasificarse como superficiales o profundas, y su presencia puede comprometer la integridad del pavimento.

Baches: Se forman cuando el material del pavimento se deteriora y se desplaza, creando cavidades en la superficie. Los baches representan un riesgo para los vehículos y pueden provocar accidentes.

Desprendimientos: Ocurren cuando se pierde material de la superficie del pavimento, a menudo debido a condiciones climáticas adversas, tráfico pesado o problemas de construcción. Esto puede resultar en una disminución de la fricción de la superficie.

Deformaciones: Estas se manifiestan como hundimientos o abultamientos, que pueden ser causados por una base inadecuada o por el uso excesivo de la vía. Las deformaciones impactan la seguridad y el confort del tránsito.

1.10.1. Innovación en los pavimentos.

La innovación en pavimentos ha revolucionado la infraestructura vial, aportando nuevos materiales y técnicas avanzadas que buscan mejorar la durabilidad de las carreteras, la sostenibilidad y la viabilidad económica. La urbanización y el tráfico continúan en aumento, lo que hace esencial diseñar soluciones que reduzcan el impacto ambiental, por lo tanto, la utilización de materiales reciclados, como el asfalto reciclado, se ha convertido en una

práctica cada vez más común, ya que contribuye a la reducción de escombros y contaminación generada por el asfalto utilizado.

Otra innovación es la adopción de pavimentos porosos, estos permiten la infiltración del agua de lluvia, ayudando así a gestionar el escurrimiento de manera eficaz, característica que resulta beneficiosa en entornos urbanos, donde el sellado del suelo puede dar lugar a inundaciones. Al facilitar la permeabilidad del suelo, estos pavimentos no solo contribuyen a la mitigación de inundaciones, sino que también permiten que el agua se recargue en los acuíferos.

Por último, tecnologías de monitoreo y herramientas digitales están transformando la gestión de las infraestructuras viales de manera significativa, gracias al uso de sensores y sistemas de recopilación de datos, ahora es posible identificar problemas potenciales en las carreteras, lo que permite optimizar los programas de mantenimiento y garantizar una mayor seguridad para los usuarios.

Esta combinación de innovaciones en materiales y tecnologías no solo promete un futuro más sostenible y eficiente para nuestras carreteras, sino que también asegura que estas infraestructuras puedan adaptarse a las crecientes demandas del transporte y la movilidad urbana, contribuyendo así a un desarrollo más equilibrado y responsable.

1.11. Tipos de pavimentos

1.11.1. Pavimento Flexible

Los pavimentos flexibles se caracterizan por estar conformadas de varias capas de materiales granulares y mezclas asfálticas, estas trabajan conjuntamente para distribuir las cargas vehiculares hacia la subrasante, minimizando los esfuerzos aplicados al suelo (Montejo, 2002). Este diseño los hace adecuados para vías de tráfico variable, debido a que tienen la capacidad de adaptarse a las deformaciones del terreno sin generar grietas, garantizando una superficie de rodadura uniforme y segura.

La estructura de los pavimentos flexibles incluye una capa de cemento asfáltico, que por lo general se mide en pulgadas, es el que recibe el contacto directo con los vehículos, seguidas

de una base y subbase que distribuyen las cargas hacia la capa de mejoramiento o la subrasante natural como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Estructura de pavimento flexible.



Nota. La figura representa la estructura que conforma un pavimento e indica el espesor que debe llevar el mismo. Fuente: ¿Que es un pavimento flexible?, por Farro, A 2024.

Las ventajas de los pavimentos flexibles son sus bajos costos iniciales de construcción y su facilidad de mantenimiento, sin embargo, requieren un mantenimiento periódico, debido a que son más susceptibles al deterioro causado por las cargas repetitivas del tráfico y las condiciones climáticas.

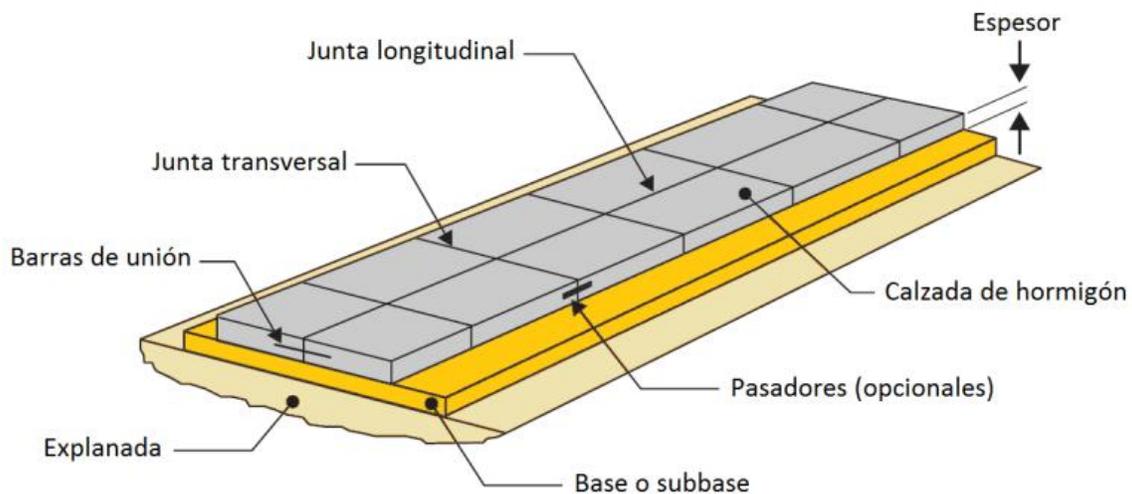
1.11.2.Pavimento rígido

Los pavimentos rígidos son estructuras formadas por losas de concreto hidráulico que se diferencian por su gran resistencia y durabilidad, distribuyen las cargas vehiculares de manera uniforme sobre toda el área, trabajando como una sola piedra artificial, minimizando los esfuerzos en la subrasante (Montejo, 2002). Este tipo de pavimento es especialmente adecuado para vías de tráfico intenso, como autopistas, pistas de aeropuertos y áreas industriales.

Una de las principales ventajas de los pavimentos rígidos es su prolongada vida útil, la cual puede superar varias décadas con un mantenimiento mínimo. Aunque su construcción inicial implica costos elevados, esta inversión se compensa con bajos gastos de mantenimiento a largo plazo. Sin embargo, los pavimentos rígidos presentan riesgo de movimiento de masas y para solucionar estos problemas, se hacen juntas de dilatación y medidas de refuerzo específicas en el diseño (varillas transversales). Estas juntas permiten que los paños de pavimento rígido se expandan o contraigan en respuesta a cambios de temperatura sin que se produzcan grietas que comprometan su integridad estructural, a continuación, en la Figura 4 podemos observar la estructura del pavimento rígido.

Figura 4

Estructura de pavimento rígido



Nota. La figura indica la estructura en detalle cómo debe ser la estructura de un pavimento rígido. Fuente: Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón. por Calo, Souza, E.; Marcolini, E. 2015.

2. Capítulo 2

2.1. Aprendizaje de la inteligencia artificial

"Pavimenta2" surgió como respuesta a la necesidad de optimizar costos en mantenimiento vial y de señalización. Esta herramienta implementa tecnologías de visión artificial para evaluar el estado de pavimentos y señales de tránsito. Su desarrollo representa un avance notable en la aplicación de inteligencia artificial dentro del campo de la ingeniería civil, requiriendo para su aprovechamiento óptimo un estudio profundo de su arquitectura y funcionamiento, según indica la documentación oficial proporcionada por el Banco Interamericano de Desarrollo (Banco Interamericano de Desarrollo, 2024).

La documentación técnica establece que el proceso de aprendizaje debe iniciarse con la exploración de las funcionalidades principales de la biblioteca, incluyendo librerías para importación de imágenes, procesamiento de datos y operación de los modelos de detección. El software permite procesar fotografías de infraestructura vial para identificar diversas patologías como fisuras y depresiones, además de analizar la señalización existente para determinar su condición y clasificación.

Los fundamentos técnicos de "Pavimenta2" se basan principalmente en redes neuronales convolucionales, arquitecturas especializadas en el procesamiento de imágenes que permiten reconocer patrones complejos en superficies pavimentadas con alta precisión. Complementariamente, incorpora algoritmos de segmentación que dividen las imágenes en regiones según su estado de conservación, facilitando la planificación de intervenciones. La documentación técnica recomienda la práctica con datos reales o simulados para calibrar los modelos según requerimientos específicos, proporcionando materiales de apoyo como guías de usuario y ejemplos prácticos que facilitan el dominio de la herramienta y la identificación de posibles adaptaciones para necesidades particulares.

2.2. Área de estudio

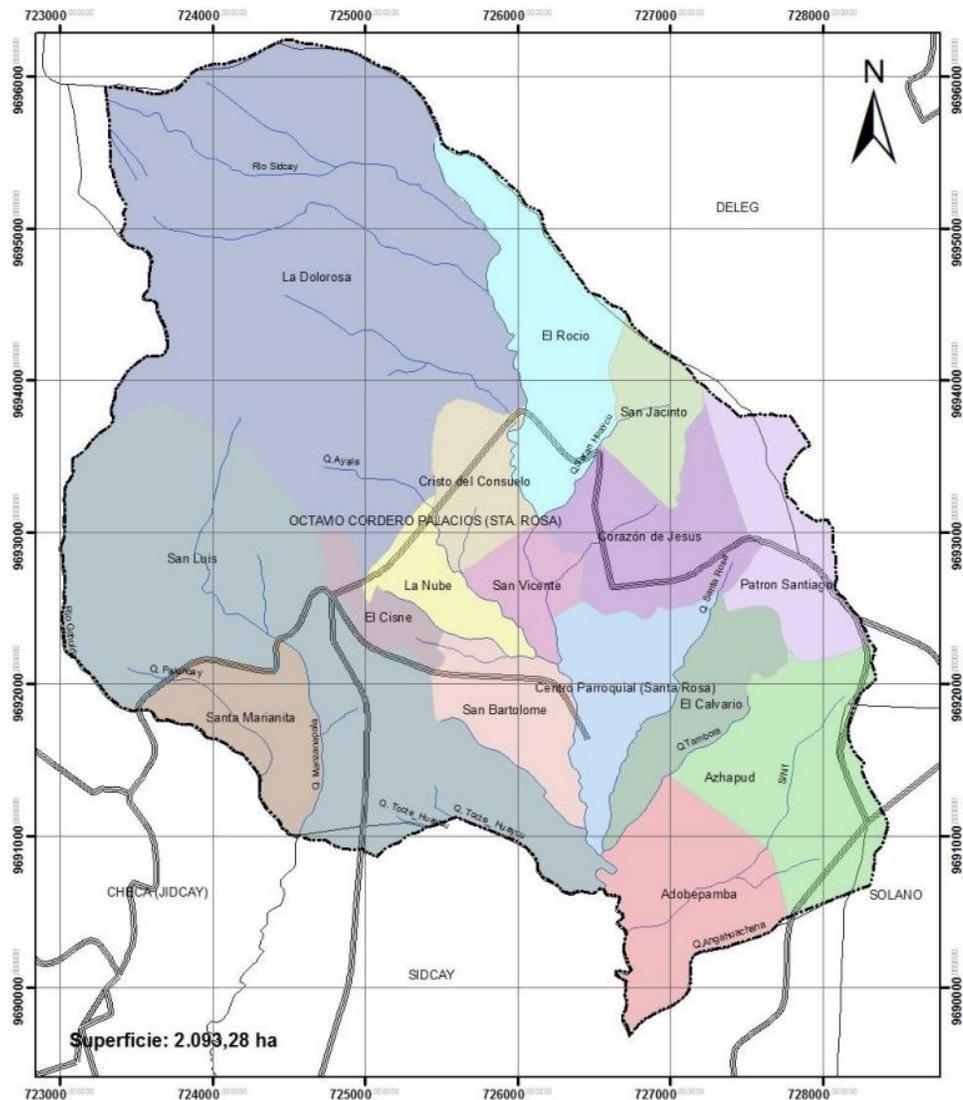
2.2.1. Área de estudio de pavimento flexible

El área de estudio comprende al tramo Bibín-Octavio Cordero Palacios, ubicado en el cantón Cuenca, provincia del Azuay, Ecuador. Este tramo estudiado comprende una longitud aproximada de 6200 metros. Esta zona conecta la zona urbana del cantón con la parroquia rural de Octavio Cordero Palacios.

Esta parroquia está ubicada al noroeste del cantón Cuenca. Limitando al Este: con la parroquia Solano; al Oeste: con la parroquia Checa; al Sur: con la parroquia Sidcay y al Noroeste: con el cantón Déleg. Como se puede observar en la Figura 5, esta localidad tiene una superficie de 2093,28 hectáreas donde está definido sus 15 comunidades más el centro parroquial Santa Rosa.

Figura 5

Octavio Cordero Palacios: Ubicación en el Cantón Cuenca

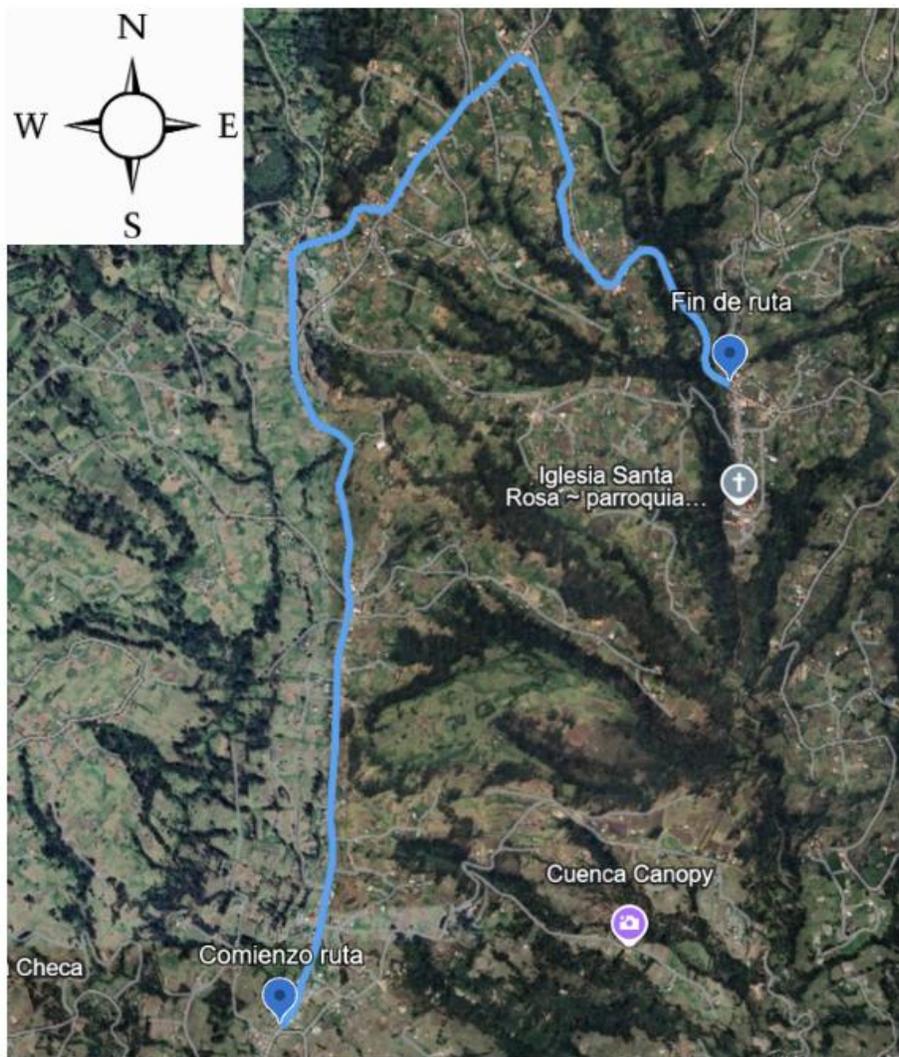


Nota. La figura muestra el mapa político de la parroquia y que servirá para tener una comprensión más clara del estudio. Fuente: Caracterización general de la parroquia (p.4) por Octavio Cordero Palacios GAD parroquial, 2019.

Para su evaluación se procedió a delimitar con coordenadas de punto inicial: $2^{\circ}48'22''S$ $78^{\circ}58'42''W$, como referencia la iglesia del centro de Bibín y coordenadas de punto final: $2^{\circ}47'01''S$ $78^{\circ}57'45''W$, que tiene como referencia la entrada al centro parroquial de Octavio Cordero como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6

Ruta de estudio



Nota. La figura indica la ruta de estudio donde se realizó el análisis de pavimento flexible. Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

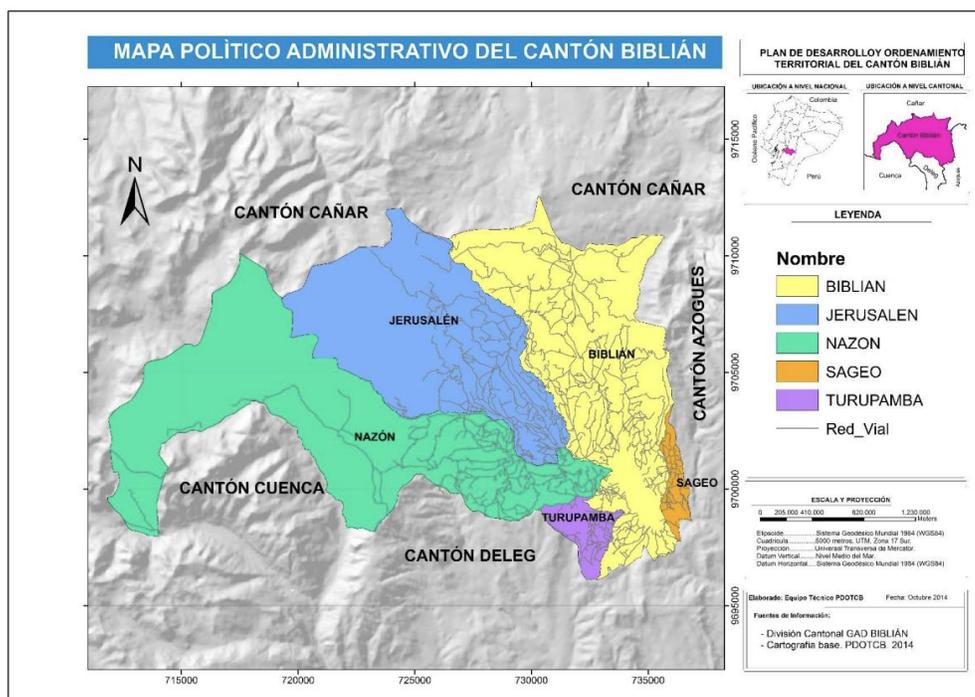
2.2.2. Área de estudio de pavimento rígido

El área de estudio para el pavimento rígido comprende al tramo comprendido entre la Av. Alberto Ochoa y su enlace con la Troncal de la Sierra E35 que se lo considera como un punto clave de conexión entre la Sierra y la Costa, ubicado en el cantón Biblián el cual es una zona estratégica por su ubicación geográfica y su importancia vial en la provincia del Cañar, este cantón como se puede observar en la Figura 7, limita al norte con el cantón Cañar, al sur con

el cantón Déleg y con la provincia del Azuay, al este con el cantón Azogues y al oeste, nuevamente, con el cantón Cañar (Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial del Cañar., s.f.).

Figura 7

División política administrativa del cantón Biblián



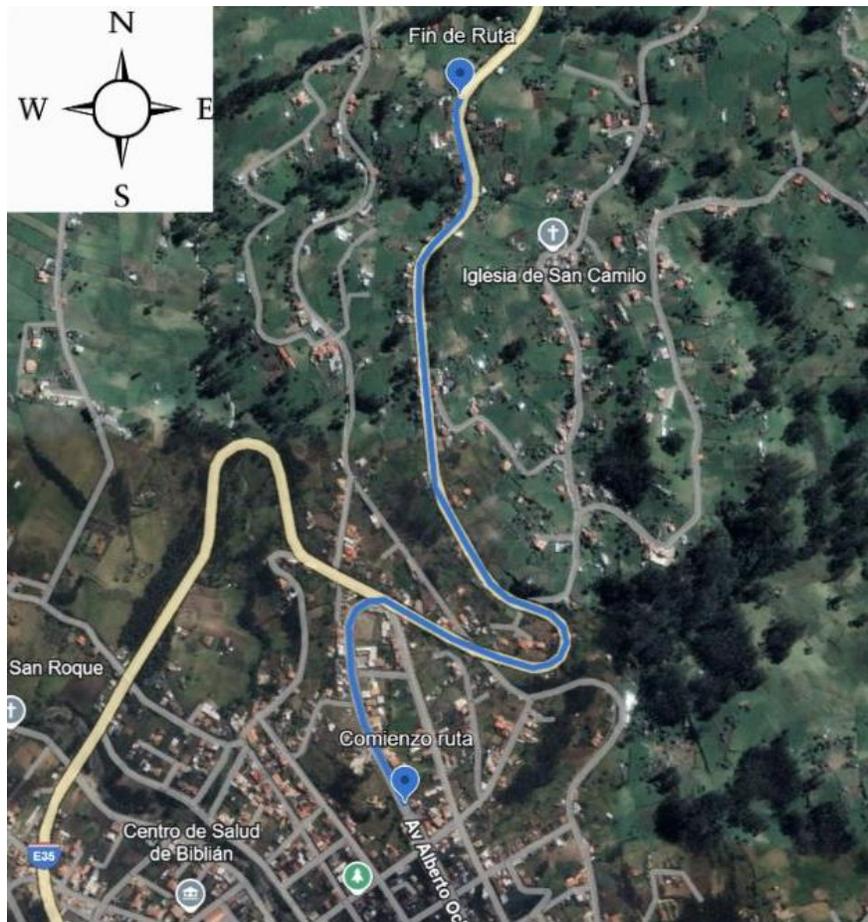
Nota. La figura indica el mapa político del canto Biblián, el cual será parte de estudio de la vía de pavimento rígido. Fuente: GAD Biblián, Elaboración: Equipo técnico PDyOTCB 2014.

Este tramo estudiado comprende una longitud aproximada de 2000 metros, los cuales serán estudiados utilizando el software de “Pavimenta2”.

Como se puede observar en la Figura 8, este estudio analiza la parte norte del cantón, donde comienza por una avenida principal y termina en la carretera E35.

Figura 8

Ruta de estudio de pavimento rígido



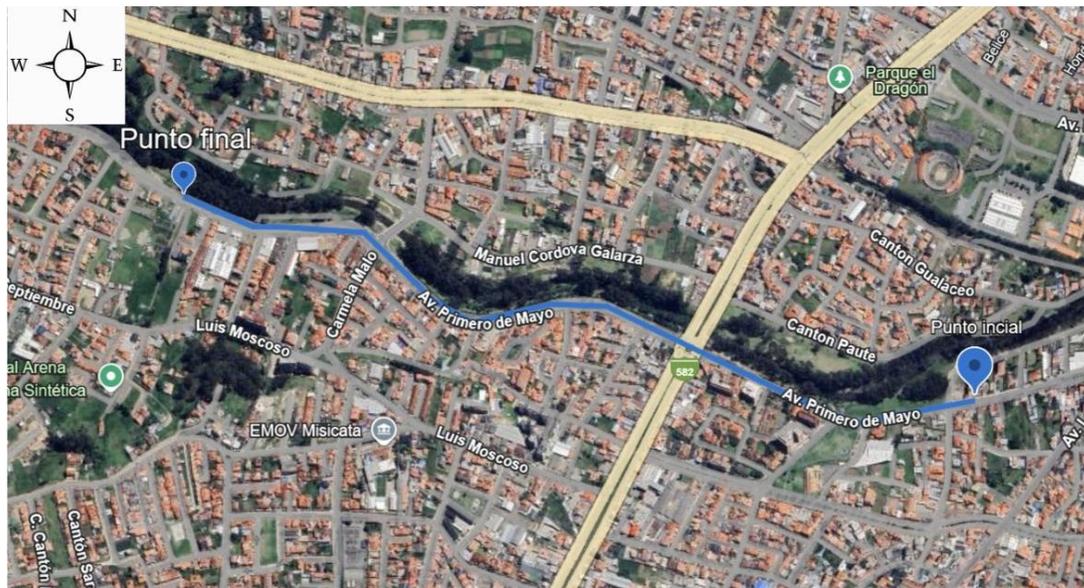
Nota. Ruta de estudio que servirá para el análisis de la vía de pavimento rígido. Fuente: Elaboración propia, Google Earth.

2.2.3. Área de estudio para comprobación de señalización.

Por último, para el ámbito de la señalización se definió estudiar un tramo de 1 km en la ciudad de Cuenca. este análisis comprende la Avenida Primero de Mayo, como se puede observar en la Figura 9, empezando por aproximadamente 300 metros del redondel existente en la intersección de la avenida de las Américas y terminando en la intersección que comprende entre la av. Primero de Mayo y la calle cantón el Pan. Esta zona nos permitirá identificar la eficacia del programa de una manera más fiable, debido a que en esta ubicación del sur de la ciudad existe bastante señalización sobre todo a las imágenes de las cuales el programa es capaz de detectar.

Figura 9

Ruta de estudio señalización



Nota. Ruta de estudio que se analizara en la vía para la identificación de la señalización. Fuente: Elaboración propia, Google Earth.

Esta avenida de gran importancia para la ciudad se encuentra en la parroquia Yanuncay, la cual es una importante arteria vial que está ubicada al sudoeste de la ciudad, donde, en la década de 1980 empezó su construcción con la idea de conectar la zona de menor densidad poblacional con el centro de la ciudad.

2.3.Método de recolección de datos.

2.3.1.Método de Recolección de Datos Manual

El método manual de recolección de datos implica la inspección visual de técnicos especializados y la medición directa de las fallas en el pavimento y la señalización. Este método ha sido utilizado tradicionalmente y es una práctica común en países en vías de desarrollo como es el caso de los países de la región. Este método se lo ha utilizado principalmente para evaluar la condición funcional y estructural del pavimento buscando garantizar la seguridad y comodidad del usuario. Tener un conocimiento claro del estado actual de la vía permite optimizar los costos de mantenimiento y rehabilitación de este, lo que permitirá prolongar la vida útil del mismo.

A su vez, se puede considerar que los técnicos responsables de obtener los datos de la vía pueden adaptarse a diversa situación e inclusive realizar modificaciones en el sitio de ser necesaria, además de que la mano de obra no necesariamente debe tener un entrenamiento exhaustivo para poder recolectar los datos, ni el uso de equipos tecnológicos avanzados para poder desarrollar la misma.

Por otro lado, la evaluación depende del criterio del técnico a cargo, además de hacer el proceso más lento en comparación al método de recolección por imágenes generando que no se abarque una menor extensión de terreno. A su vez los técnicos encargados deben trabajar cerca del tráfico generando una inseguridad y un mayor riesgo de accidentes.

2.3.2.Método de captura de imágenes

El método de captura de imágenes es una técnica moderna que utiliza cámaras para tomar fotografías desde un automóvil detalladas que permite analizar las condiciones de la superficie del pavimento. Estas imágenes son procesadas y analizadas mediante algoritmos avanzados para detectar y evaluar fallas en el pavimento. Para ello las imágenes deberán tener ciertas características para poder ser procesadas, las mismas deberán contar con información geo-referenciada, a su vez deberán tener una iluminación adecuada, una vista nítida del pavimento y con condiciones atmosféricas favorables (Division de Transporte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2021).

Las cámaras de alta resolución pueden captar detalles que la inspección manual puede pasar por alto y así obtener una mayor cantidad de datos en un tiempo más corto, alcanzado áreas extensas con una mínima interferencia del tráfico, además de un menor costo en comparación a otros sistemas tecnológicos (Tello, Aguirre, Diaz, & Hernandez, 2021).

Un aspecto para considerar en la captura de imágenes es la resolución la cual está asociada a la velocidad del vehículo al cual está apoyada la cámara. Además de eso se debe de contar con software especializado capaz de procesar las imágenes mediante una computadora la cual dependiendo del rendimiento deseado puede resultar muy costosa además el personal debe tener un conocimiento previo para poder procesar de una manera adecuada las imágenes disminuyendo el error (Ríos, Bacca, Caicedo, & Orobio, 2020).

2.4.Especificaciones del manual

Para el correcto funcionamiento de la IA "Pavimenta2", es fundamental cumplir con ciertos requisitos técnicos y especificaciones para el procesamiento de datos.

2.4.1.Requisitos de Hardware

Para garantizar un rendimiento óptimo en el procesamiento de imágenes y videos, la IA necesita las siguientes características recomendadas:

Se recomienda una tarjeta NVIDIA con una capacidad superior a 5.3 para acelerar el procesamiento de imágenes. Un mínimo de 16GB de RAM para garantizar la carga y procesamiento eficiente de los datos visuales. Un CPU con al menos 8 núcleos, permitiendo un procesamiento rápido de los modelos de detección de fallas y señalización. Dependiendo del tamaño de los videos e imágenes capturados, se recomienda una capacidad de almacenamiento considerable, preferiblemente en unidades SSD.

2.4.2.Formatos de Datos de Entrada

La IA puede procesar distintos formatos de datos geo-referenciados, que incluyen información visual y de ubicación geográfica, para ello el software necesita recibir archivos de la carretera a procesar. Esto se refiere a un video o conjunto de imágenes.

2.4.3.Imágenes con Posiciones Embebidas

Por esta razón, para el trabajo de titulación utilizamos el conjunto de imágenes geo referenciadas, las cuales con la ayuda de una cámara GoPro 7 nos permitirá obtener las imágenes, la cual mediante su antena de GPS integrada nos brinda la información sobre la altitud, longitud y latitud como se puede observar en la Figura 10.

Figura 10

Datos GPS

GPS	
Latitud	2; 53; 18.510000000000...
Longitud	78; 58; 23.869999999999...
Altitud	2513.52570480928671

Nota: Datos obtenidos mediante la utilización de la cámara. Fuente: Elaboración propia.

Por ende, cada una de las imágenes a procesar tendrán un orden, además de ubicación exacta que permitirá al software obtener resultados con una precisión exacta.

2.4.4. Archivos Geo-referenciados en Formato NMEA

Admite datos en formato NMEA (National Marine Electrónicos Asociación), este contiene información geoespacial obtenida mediante dispositivos GPS, comúnmente generado por sistemas de geolocalización de vehículos y drones.

Un ejemplo del formato NMEA utilizado es:

```
$GPGGA,181908.00,3404.7041778, N,07044.3966270, W,4,13,1.00,495.144, M,29.200, M,0.10,0000*40.
```

2.4.5. Archivos CSV con Coordenadas Geográficas

El sistema también puede procesar archivos en formato CSV (Comma Separated Values), es utilizado cuando se tiene que procesar grandes volúmenes de datos obtenidos de sensores o registros manuales, estos deben incluir, latitud, longitud, fecha y hora

2.4.6. Especificaciones para la Captura de Datos

La calidad de los datos de entrada influye significativamente en la precisión de la toma de información. Por esta razón, se deben seguir ciertas especificaciones.

- Enfoque preciso del carril y señal de tránsito.

- Se deberá tomar las imágenes con una iluminación adecuada, sin interrupción de agentes externos.
- La ubicación de la cámara debe estar fuera del vehículo para evitar distorsiones por el parabrisas.
- Cámara sin efectos como ojo de pez y con una inclinación aproximada de 70°, a un metro del suelo.
- La imagen será tomada a una velocidad aproximada de 60 km/h, con un recorrido por sentido, además el vehículo no permanecerá estático durante el recorrido.
- El archivo geo-referenciado que procesa el sistema, está en formato NMEA o CSV y no se puede conseguir información sin el registro GPS de ubicación.
- Imágenes con buena resolución, mínimo 1920x1080 y no deben ser procesadas por otro software, dado que degradan la calidad de imagen.

2.5. Procesamiento de datos

Una vez recopilados los datos, el sistema procede a analizarlos utilizando algoritmos de visión artificial. Estos algoritmos se basan en modelos de redes neuronales, como YOLO, diseñados para identificar defectos en el pavimento, así como en redes siamesas especializadas en el reconocimiento de señalización vial.

El análisis de los datos procesados proporciona información detallada y valiosa, que incluye: el tipo de defecto o señal detectada, permitiendo clasificar su naturaleza; la ubicación geográfica precisa de cada detección, lo que facilita la planificación del mantenimiento; la probabilidad de certeza de la detección, expresada en un valor entre cero y uno que refleja la confiabilidad del sistema; y el área y dimensiones del defecto en la imagen, lo que ayuda a evaluar su gravedad y determinar las acciones correctivas necesarias.

3. Capítulo 3

3.1.Evaluación del pavimento

3.1.1.Condición del pavimento

Para llevar a cabo un análisis integral de la condición del pavimento, es esencial realizar evaluaciones que aborden diferentes dimensiones. Estos incluyen aspectos superficiales, que se centran en la calidad de la capa superior; aspectos estructurales, que evalúan la integridad y resistencia del pavimento; y aspectos funcionales, que consideran el rendimiento del pavimento bajo condiciones de uso.

3.2.Metodología para evaluación del pavimento

Para evaluar adecuadamente el estado de los pavimentos en infraestructuras viales, este trabajo de titulación se enfoca en la implementación de distintas metodologías que ofrecen representaciones estadísticas y cualitativos sobre su condición.

La investigación y análisis utiliza el Pavement Condition Index (PCI), que ofrece una medición cuantitativa más detallada con parámetros específicos. Este método establecido con se compara con "Pavimenta2", un software desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) incorporando tecnologías de inteligencia artificial para el análisis del pavimento.

Por lo tanto, el uso de esta metodología permite identificar la eficacia frente a los métodos convencionales, al analizar los mismos tramos de pavimento mediante "Pavimenta2". Esta comparación se basa en el análisis, buscando establecer si la solución tecnológica de inteligencia artificial ofrece beneficios significativos en términos de precisión, eficiencia o facilidad de implementación.

3.2.1.Evaluación mediante Pavement Condition Index (PCI)

El Índice de Condición del Pavimento (PCI, por sus siglas en inglés) es una metodología utilizada en la ingeniería civil para evaluar el estado de los pavimentos, ya sean flexibles o rígidos. Se utiliza para identificar las áreas en el pavimento donde se requieren de

mantenimiento o reparación de estas, permitiendo tener una planificación más exacta y eficiente (Cedillo & Pauta, 2023).

Desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACOE) en la década de 1970, el PCI se ha convertido en un estándar internacional para la inspección, clasificación y gestión de pavimentos. Este índice se basa en una escala numérica que va de 0 a 100, donde 0 representa un pavimento en condiciones críticas y 100 un pavimento en perfectas condiciones (Illinois Department of Transportation, (IDOT), 2012).

El PCI evalúa dos componentes principales: defectos superficiales y su severidad. Los defectos pueden incluir grietas, baches, deformaciones, desgaste superficial, entre otros, mientras que la severidad se clasifica en tres niveles: bajo, moderado y alto. La metodología implica la inspección visual y la medición de estos defectos en secciones del pavimento. A cada defecto se le asigna un valor en función de su tipo y severidad, el cual se resta de un puntaje inicial de 100. El resultado final es el PCI, que refleja el estado general del pavimento (Gonzalez, Fernandez, Ruiz, Caballero, & Guerrero, Valverde, 2019).

El proceso para calcular el PCI consta de varias etapas:

1. División del Pavimento en Unidades de Muestra: El pavimento se divide en secciones homogéneas, generalmente entre 100 a 500 metros, dependiendo de la extensión y tipo de la vía.
2. Inspección Visual y Registro de Defectos: Un equipo de inspección recorre las unidades de muestra identificando y registrando los tipos e importancia de los defectos del pavimento.
3. Cálculo de los Valores Deductivos: Utilizando tablas estandarizadas, se asignan valores a cada defecto en función de su tipo y severidad.
4. Ajuste por Densidad de Defectos: Los valores deductivos se ajustan considerando la densidad de los defectos (número de defectos por sección).

Tabla 1

Rangos PCI

Rangos de condición PCI		
Excelente	100 – 86	100 – 65: Viable para la conservación del pavimento
Muy Bueno	85-71	
Bueno	70–56	
Regular	55–41	64-0: No viable para la conservación del pavimento
Malo	40-26	
Muy malo	25-11	
Deficiente	10-0	

Nota. Datos obtenidos de (Illinois Department of Transportation, (IDOT), 2012).

5. Determinación del PCI: El PCI se calcula restando los valores deductivos ajustados de 100. Este valor se interpreta según escalas predefinidas, como se puede observar en la Tabla 1.

Con el avance de la tecnología, el PCI ha evolucionado para incorporar herramientas como drones y sensores remotos. Estas innovaciones permiten realizar inspecciones más rápidas y precisas, reduciendo la dependencia de la inspección manual. Además, se están desarrollando versiones automatizadas del PCI que utilizan algoritmos para analizar imágenes y datos recopilados mediante vehículos equipados con sensores.

Esta metodología es una de las más completas para conocer y diagnosticar de manera objetiva el estado de condición del pavimento, permitiendo realizar no solamente diagnósticos, sino también ser un punto de partida para planes de conservación y mantenimiento (Rivas & Sierra, 2016).

3.3.Ciclo de vida del pavimento orientado a su agrietamiento y mantenimiento

El ciclo de vida del pavimento se caracteriza por diferentes etapas que determinan su funcionalidad y durabilidad. Este proceso inicia con la construcción e incluye fases en las que se irán deteriorando poco a poco, estas son: cargas repetitivas del tráfico vehicular, comportamiento del suelo ante problemas de humedad y uno de los efectos de este deterioro es el agrietamiento, sin embargo, constituye un indicador crítico del estado del pavimento. (Gonzalez, Fernandez, Ruiz, Caballero, & Guerrero, Valverde, 2019) menciona que cuando el pavimento alcanza niveles altos de degradación, se vuelve necesaria la implementación de estrategias para evitar el deterioro acelerado y los costos que conlleva la reconstrucción completa.

La evolución histórica de los pavimentos, Inicio en la construcción con materiales como adoquines, madera o piedra, a principios del siglo XX con la implementación generalizada de pavimentos asfálticos, que introdujeron propiedades de flexibilidad y resistencia anteriormente imposibles. Esto impulsó el desarrollo de metodologías para la investigación de los mecanismos de falla, lo que permitió pasar de un enfoque empírico a diseños con principios mecánicos. También condujo a la creación de procedimientos estandarizados para el dimensionamiento estructural que integran variables como volumen de tráfico, espectro de cargas, etc.

Las tecnologías modernas de mantenimiento, como el sellado preventivo de grietas, el reciclado de materiales in situ y el uso de aditivos modificadores, forman parte de estrategias proactivas que extienden significativamente la vida útil de los pavimentos. Este enfoque multidimensional permite desarrollar infraestructuras viales más resistentes, sostenibles y económicamente eficientes que responden a las crecientes demandas de movilidad.

4. Capítulo 4

4.1.Ejecución.

El análisis de la condición del pavimento se inicia con la captura de imágenes de las vías seleccionadas. Para esta evaluación se trabajó con dos tipos de estructuras viales: pavimento flexible en la vía Bibín-Octavio Cordero Palacios y pavimento rígido en la vía Biblián (centro cantonal)-Cañar, además se analizará exclusivamente la señalización en la vía primero de mayo ubicada en la ciudad de Cuenca.

Estas vías fueron recorridas, documentando el estado de su superficie con imágenes tomadas desde un vehículo en movimiento, siguiendo las recomendaciones del manual de “Pavimenta2” se colocó la cámara en la parte delantera del vehículo como se puede observar en la Figura 11, las imágenes fueron tomadas en un rango de 30 metros aproximadamente.

Figura 11

Ejemplo de ubicación de cámara en el vehículo



Nota. La figura indica donde se coloca la cámara siguiendo las normas en el manual de “Pavimenta2”.
Fuente: Elaboración propia.

Para la captura de imágenes la cámara se colocó en un ángulo siguiendo las indicaciones del manual, donde el pavimento ocupa aproximadamente el 75% de la imagen como se puede observar en la Figura 12.

Figura 12

Captura de imagen en el vehículo



Nota. Imagen obtenida en el trabajo en campo. Fuente: Elaboración propia

Esta configuración permitió una cobertura adecuada y continua del estado de la superficie vial. Las imágenes fueron tomadas sistemáticamente, asegurando que se recolectaran al menos 50 imágenes por kilómetro.

4.2. Flujograma del código para la detección clasificación y análisis de señalización vial y fallas en pavimentos.

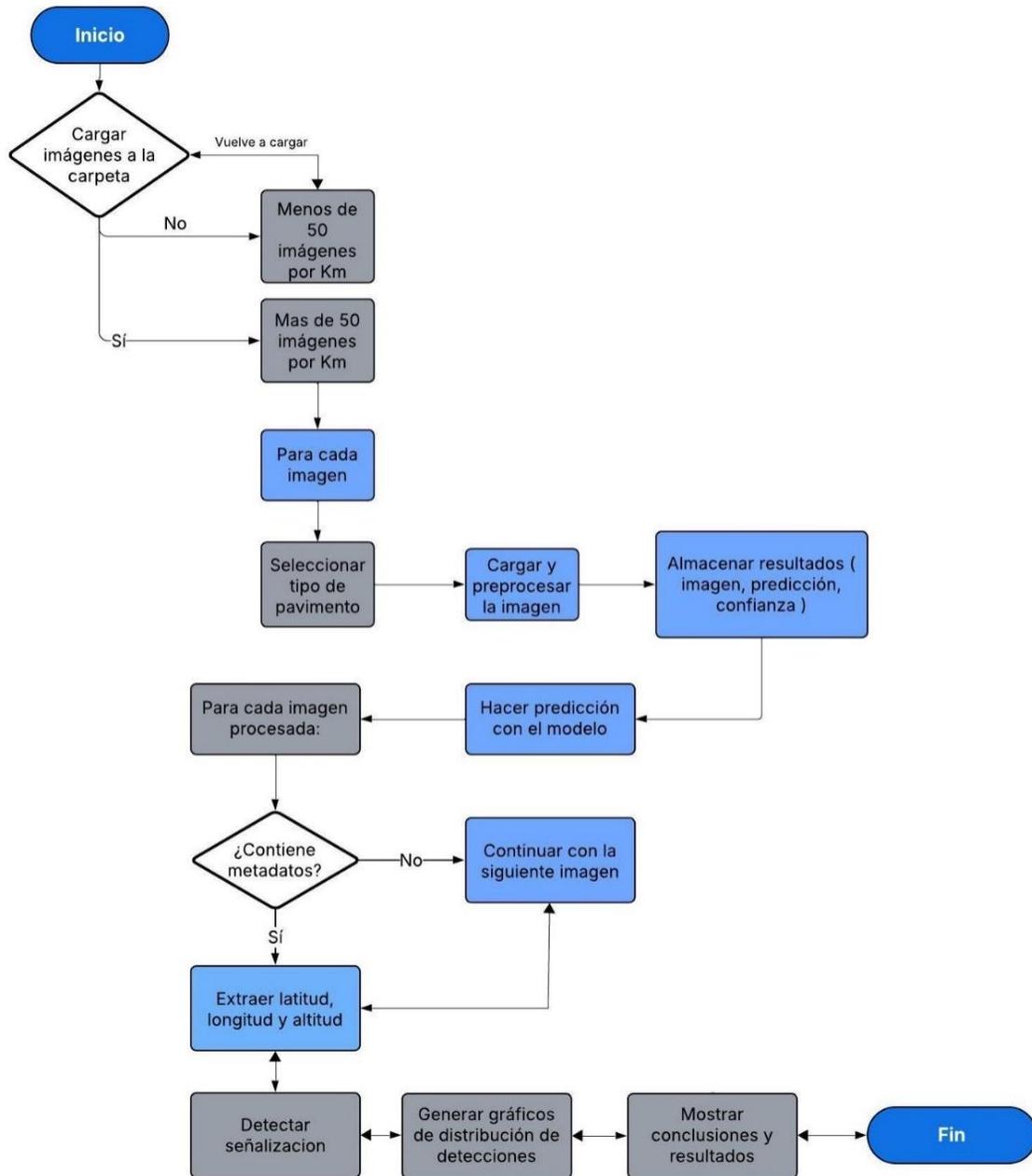
Una vez obtenidas las imágenes, fueron procesadas por un código de acceso libre disponible en la plataforma GitHub como se puede observar en el Anexo 131 y a través del flujograma de la Figura 13, el mismo que fue proporcionado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Se ejecutó en un entorno de trabajo que garantiza un procesamiento eficiente. También, se realizó la instalación de librerías clave como Pillow, OpenCV, Pandas, entre otras, necesarias para el análisis de datos.

El procedimiento inicia con una fase de preparación del entorno, en la que se verifica que se almacenen las imágenes, resultados y que los modelos estén correctamente descargados. A continuación, se lleva a cabo la descarga del modelo preentrenado YOLOv5, el cual está optimizado para la detección de objetos dentro de imágenes. Cada imagen pasa por un proceso que incluye la carga y el preprocesamiento visual, seguido de la extracción de coordenadas GPS desde sus metadatos.

Luego, se ejecuta una clasificación del tipo de pavimento, identificando condiciones del pavimento. Paralelamente, se aplica el modelo YOLOv5 para detectar señalizaciones viales presentes en la imagen. Toda esta información, incluyendo nombre del archivo, tipo de señal detectada, tipo de pavimento, niveles de confianza y coordenadas geográficas.

Figura 13

Flujograma del código para la detección de fallas en pavimentos



Nota. La imagen identifica los pasos a seguir para una correcta utilización del programa. Fuente: Elaboración propia.

4.3.Extracción y almacenamiento de datos.

El proceso comienza con una fase de preparación donde el programa verifica la existencia de las carpetas necesarias para almacenar las imágenes y los resultados de forma organizada. En caso de no encontrarlas, se deberán revisar y crear dichas carpetas para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. También es necesario verificar que el número de imágenes a procesar sea mayor a 50, ya que estas serán capturadas cada kilómetro.

Utilizando OpenCV, el sistema analiza cada imagen de la carpeta, extrayendo datos importantes como el número total de frames y los FPS (cuadros por segundo).

Para el análisis de imágenes se consideran las siguientes categorías de fallas en los pavimentos:

1. Sin daño: El pavimento se encuentra en condiciones óptimas, sin ninguna imperfección visible ni deterioro, se lo puede observar en la Figura 14.

Figura 14

Pavimento sin daño



Nota. La figura muestra un ejemplo de cómo sería un pavimento en condiciones ideales. Fuente: Fenollar desarrolla un nuevo pavimento de hormigón flexible antibache, Mac, 5 de diciembre, 2019.

2. Grietas finas: Son fisuras superficiales que suelen medir menos de 3 mm de ancho. Generalmente no afectan la estructura del pavimento, pero pueden permitir la infiltración de agua si no se controlan.

3. Grietas severas: Fisuras más amplias y profundas, generalmente mayores de 3 mm. Estas grietas pueden comprometer la estabilidad del pavimento y requieren atención inmediata para evitar un deterioro mayor. En la siguiente Figura 15, podemos visualizar un ejemplo de pavimento con grietas, haciendo referencia a los conceptos mencionados.

Figura 15

Pavimento con grietas



Nota. La figura muestra un ejemplo de la falla mencionada previamente. Fuente: Proceso de sellado de fisuras en pavimento, Inviaasa, 2020.

4. Bache pequeño: Depresión en la superficie del pavimento con un diámetro reducido (menos de 30 cm). Puede ser causado por el desgaste o la erosión y, aunque no es crítico, debe repararse para evitar un deterioro adicional.
5. Bache grande: Similar a un bache pequeño, pero con un diámetro mayor a 30 cm. Estos baches pueden representar un peligro significativo para los vehículos y deben ser reparados con urgencia. En la siguiente Figura 16, podemos visualizar un ejemplo de pavimento con bache, haciendo referencia a los conceptos mencionados.

Figura 16

Pavimento con bache



Nota. La figura representa una falla detectada por el programa. Fuente: Bache - Qué es, definición y concepto, Porto, J. P, 2021.

6. Fisuras: Término general que se refiere a cualquier tipo de agrietamiento en el pavimento. Pueden ser finas o severas y pueden surgir de diferentes causas, como el tráfico intenso o las condiciones climáticas adversas.
7. Deformaciones: Alteraciones en la superficie del pavimento que pueden manifestarse como ondulaciones o hundimientos. Estas deformaciones pueden ser consecuencia de una mala compactación o del uso excesivo.
8. Asfalto deteriorado: Se refiere a la pérdida de calidad del pavimento asfáltico, que puede incluir la aparición de grietas, desintegración y pérdida de adherencia. Esto puede ser causado por factores ambientales y de tráfico.
9. Concreto agrietado: Indica que el pavimento de concreto presenta fisuras que pueden variar en tamaño y severidad. Esto puede ser el resultado de cambios térmicos, carga excesiva o defectos en el material, se lo puede observar en la Figura 17.

Figura 17

Concreto agrietado.



Nota. La figura representa una falla tipo concreto agrietado que el programa es capaz de identificar. Fuente: Las fallas de los pavimentos flexibles son un problema común que puede ocurrir en carreteras y calles, Farro, A, 2023.

10. Otro: Categoría que incluye cualquier otro tipo de falla no especificada anteriormente. Esto puede abarcar problemas menos comunes o combinaciones de distintos tipos de fallas.

Y para el análisis de imágenes de señalización vertical se consideran las siguientes opciones:

1. Advertencia: Previenen sobre peligros en la vía (curvas, cruces, zonas escolares), como se lo puede visualizar en la Figura 18.

Figura 18

Señal de advertencia.



Nota. La figura muestra un tipo de señalización tipo advertencia. Fuente: Manual de “Pavimena2”.

2. Reglamentarias: Indican normas obligatorias (velocidad, prohibiciones), como se lo puede visualizar en la Figura 19.

Figura 19

Señales reglamentarias.



Nota. La figura muestra otra de las señales en los que se menciona en el manual es capaz de identificar. Fuente: Manual de “Pavimenta2”.

3. Alto: Señal específica para detenerse por completo, como se lo puede visualizar en la **Figura 20**.

Figura 20

Señal de alto



Nota. La figura representa una señal de pare o “stop sign”. Fuente: Manual de “Pavimenta2”.

4. Información: Brindan datos útiles sobre rutas o servicios, como se lo puede visualizar en la Figura 21.

Figura 21

Señal de información.



Nota. Manual de “Paviment2”.

5. Paneles Informativos: Avisos múltiples o detallados (desvíos, obras), como se lo puede visualizar en la Figura 22.

Figura 22

Panel Informativo.



Nota. La figura muestra un ejemplo que el maula indica es capaz de analizar. Fuente: Manual de “Pavimenta2”.

6. Placas Blancas: Identifican zonas o áreas geográfica, como se lo puede visualizar en la Figura 23.

Figura 23

Placas Blancas



Nota. La figura indica el tipo de señal de tránsito que se analiza. Fuente: Manual de “Pavimenta2”.

La información recopilada se almacena inicialmente en la memoria y posteriormente se transfiere a un archivo CSV, un formato sencillo y compatible con numerosas herramientas de análisis. Adicionalmente, el código incorpora mecanismos de manejo de errores para prevenir fallos en el programa en caso de encontrar archivos dañados o problemáticos, asegurando así una ejecución continua y sin interrupciones.

4.4. Visualización y análisis de resultados

Para transformar los datos almacenados en el archivo CSV en un DataFrame se utiliza Pandas, lo que hace más fácil analizarlos y aplicar operaciones más avanzadas, posteriormente, estos datos se pasan al formato HTML para tener una visualización más clara y dinámica, con colores, resaltados y un orden que ayuda a entender mejor la información.

Esta metodología de visualización resulta útil debido a que se pueden detectar rápidamente patrones, errores o relaciones en los datos de las imágenes de carretera.

4.5. Desglose de datos

El software permite obtener una serie de tablas estadísticas como lo son: graficas exactas de las fisuras existentes, mapa interactivo el cual integra de una manera precisa el tipo de bache y con la ayuda de los datos GPS su ubicación exacta, además de eso el software es capaz de crear diagrama de confiabilidad que indica la seguridad con la que el programa predice que

está identificando el bache o deformidad, para ello es importante obtener la mayor cantidad de imágenes posible y así, detectar con una mayor precisión la condición en la que se encuentra el pavimento.

4.6. Normativa ASTM D6433-11 para pavimento flexible

Para poder realizar una comparación efectiva de las vías estudiadas se debe realizar un análisis de PCI y así, poder comparar la efectividad y la precisión del sistema frente a métodos convencionales. Para ello hay que basarse en la normativa ASTM D6433-11 y adaptarla a las fallas que detecta el software como se puede observar en la Tabla 2 para pavimento flexible.

Tabla 2

Norma ASTM D6443-11 pavimento flexible.

Nº	Tipo de Falla	Descripción	Severidades	Método de Medición
1	Grietas en piel de cocodrilo	Grietas interconectadas en forma de malla.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)
2	Sangrado (Bleeding)	Exceso de asfalto en la superficie, creando una apariencia brillante o resbaladiza.	No aplica	Área afectada (m ²)
3	Grietas en bloque	Grietas que forman bloques rectangulares o cuadrados.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)
4	Baches	Cavidades en la superficie del pavimento causadas por la pérdida de material.	No aplica	Cantidad y tamaño (número y dimensiones)
5	Ondulaciones y hundimientos	Deformaciones en la superficie afectando a la suavidad del pavimento.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)
6	Depresiones	Áreas hundidas en la superficie del pavimento.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)
7	Grietas en el borde	Grietas longitudinales cerca del borde del pavimento, comúnmente debido a falta de soporte lateral.	Baja, Media, Alta	Longitud total (m)
8	Grietas por reflexión de juntas	Grietas que reflejan las juntas o grietas del pavimento subyacente.	Baja, Media, Alta	Longitud total (m)
9	Caída del carril/hombro	Diferencia de altura entre el carril y el hombro del pavimento.	Baja, Media, Alta	Longitud total (m)
10	Grietas longitudinales y transversales	Grietas que se extienden a lo largo o a través del pavimento.	Baja, Media, Alta	Longitud total (m)
11	Parqueo y cortes de servicios	Áreas reparadas o donde se han realizado cortes para servicios públicos.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)

12	Agregado pulido	Superficie del pavimento donde los agregados han perdido su textura, reduciendo la fricción.	No aplica	Área afectada (m ²)
13	Baches	Cavidades en la superficie del pavimento causadas por la pérdida de material.	No aplica	Cantidad y tamaño (número y dimensiones)
14	Cruce de ferrocarril	Irregularidades en la superficie del pavimento en áreas donde cruzan vías férreas.	Baja, Media, Alta	Longitud total (m)
15	Ahuellamiento	Hundimientos en las rutas de las ruedas debido a la consolidación del material.	Baja, Media, Alta	Profundidad (mm)
16	Desplazamiento	Movimiento lateral del pavimento, creando ondulaciones.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)
17	Grietas por deslizamiento	Grietas en forma de medialuna causadas por fuerzas de frenado o aceleración.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)
18	Hinchazón	Elevación localizada del pavimento debido a la expansión del suelo subyacente.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)
19	Desgaste y desintegración	Pérdida de material de la superficie del pavimento debido al envejecimiento y la acción del tráfico.	Baja, Media, Alta	Área afectada (m ²)

Nota. Datos obtenidos de la norma ASTM D6433-11.

En la Tabla 2 se puede observar cinco columnas las cuales describen el tipo de falla que considera la norma, la misma se puede categorizar en diferente tipo de severidad según lo merezca, además se detalla el método de medición el cual indicara la forma en la cual se tiene que tomar los datos cuantitativos o cualitativos de la falla a estudiar.

Por lo tanto, se obtiene como resultado la Tabla 3 donde se identifica las nueve categorías de fallas que tienen una relación directa con la que es capaz de detectar el programa.

Tabla 3

Adaptación de "Pavimenta2" a norma ASTM D6433-11.

Categoría detectada por IA	Falla ASTM D6433-11 más parecida	Relación principal
Asfalto deteriorado	Desgaste / Desintegración (Raveling)	Pérdida de material superficial, envejecimiento o fatiga.
Bache pequeño	Baches (Potholes)	Huecos en la superficie por pérdida localizada de material.
Bache grande	Baches (Potholes)	Igual que el anterior; la norma no separa por tamaño.
Grietas finas	Grietas longitudinales / transversales	Grietas lineales delgadas; suelen ser las primeras en aparecer.

Grietas severas	Piel de cocodrilo (Alligator cracking)	Grietas entrecruzadas con alta severidad (forma de malla).
Deformaciones	Ahuellamiento (Rutting)	Hundimientos en las marcas de rodadura por deformación plástica.
Fisuras	Grietas por reflexión de juntas	Grietas que siguen un patrón estructural o juntas subyacentes.
Concreto agrietado	— (No aplica en ASTM D6433-11)	Este tipo de pavimento corresponde a otra norma (para rígido).
Otro	— (No definido)	No se usa en el cálculo PCI.

Nota. Datos obtenidos de “Pavimenta2”.

4.7. Normativa ASTM D6433-11 para pavimento rígido

Así mismo se presenta la Tabla 4, la cual indica las fallas a considerar en el pavimento rígido según la norma previamente mencionada.

Tabla 4

Norma ASTM D6443-11 pavimento rígido.

Nº	Nombre de la falla	Nombre en inglés (D6433)
1	Grieta en esquina	Corner Break
2	Grieta longitudinal/transversal (sin junta)	Longitudinal/Transverse Crack
3	Descascaramiento de esquina	Corner Spalling
4	Descascaramiento de junta	Joint Spalling
5	Grieta en bloque o map cracking	Map Cracking
6	Escamado o desprendimiento superficial	Scaling/Map Cracking
7	Levantamiento entre losas	Faulting
8	Bombeo	Pumping
9	Fisura por contracción (shrinkage)	Shrinkage Cracks
10	Sellado de juntas dañado	Joint Seal Damage
11	Desintegración por D-Cracking	D-Cracking
12	Exudación o explosión de junta (blowup)	Blowups
13	Diferencia con hombro	Lane/Shoulder Drop-Off
14	Grietas múltiples tipo telaraña	Durability Cracking
15	Polishing o superficie lisa	Polished Aggregate
16	Desintegración localizada (popouts)	Popouts
17	Grieta por junta no alineada (slab crack misalignment)	Slab Crack Misalignment
18	Punchouts (cuando el diseño es tipo losa continua)	Punchouts (raro en losas convencionales)

Nota. Datos obtenidos de la norma ASTM D6433-11.

Se sigue el mismo proceso el cual consiste en adaptar la norma a las fallas detectadas por el programa como se observa en la Tabla 5

Tabla 5*Adaptación de “Pavimenta2” a norma ASTM D6433-11.*

Categoría detectada por IA	Falla correspondiente en ASTM D6433-11 (PCI)
Concreto agrietado	D-Cracking
Grietas severas	Corner Break
Fisuras	Linear Cracking
Grietas finas	Shrinkage Cracks
Bache pequeño	Patch/Utility Cut (pequeño)
Bache grande	Patch/Utility Cut (grande)

Nota. Datos obtenidos de “Pavimenta2”.

La Tabla 5 en comparación a la vía de pavimento flexible es capaz de detectar seis categorías de fallas, las mismas que son las más usuales al momento de evaluar la calidad de una vía.

4.7.1.Vía de pavimento flexible Bibín- Octavio Cordero Palacios

De acuerdo con la ASTM D6433-11 se menciona que el área de muestreo es $225 \pm 90 \text{ m}^2$. para ello se procedió a establecer un máximo y mínimo que son 315 metros y 135 metros respectivamente, así mismo se estableció el inicio del tramo en 0+000 como punto inicial y 6+200 como punto final que da como resultado una longitud total de vía de 6200 metros, en campo se procedió a medir el ancho de la calzada el cual dio como resultado 6,8 que junto a una longitud de muestra de 25 metros se procedió a multiplicar ambos datos para obtener el área demuestra correspondiente a la vía a estudiar, el cual dio como resultado 170 que está dentro del rango de máximo y mínimo que permite a norma.

Posterior a esto se utiliza la Ecuación 1 para obtener el número total de unidades de muestreo

$$n = \frac{Ns^2}{\frac{e^2}{4} \times N - 1 + s^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

e= error admisible en el cálculo del PCI de la sección, comúnmente, e=+/- 5 puntos del PCI.

s =desviación estándar del PCI de una muestra a otra en la misma sección. Al realizar la inspección inicial se asume que la desviación estándar es 10 para pavimentos de CA y 15 para pavimentos PCC. Esta suposición debe ser comprobada de la forma como se describe a continuación después de haber determinado los valores del PCI. Para subsiguientes inspecciones, la desviación estándar de la inspección precedente debe ser utilizada para determinar el valor de n; y

N= número total de unidades de muestra en la sección.

Se obtiene como resultado 248 unidades de muestreo de las cuales 15 serán evaluadas mediante el ASTM D6433-11, inciso 7.5.3 como se puede observar en la Ecuación 2 se obtuvo un intervalo de muestreo que será de 17.

$$i = \frac{N}{n}$$

Ecuación 2

Una vez obtenido el intervalo de muestreo y el número de muestras se procedió a dividir el total en intervalos de 10 fotos cada 25 metros. Para ello se procedió a utilizar el software para obtener los resultados y junto a una observación visual de las fotos se verifico el nivel de concordancia entre la inspección visual con los resultados obtenidos de “Pavimenta2” como se puede observar en la Tabla 6 se presenta en resumen los tramos a estudiar con sus respectivas abscisas, se observa las columnas que junto al estudio en campo realizado se pudo comprobar el nivel de severidad, área total y la densidad. Con la ayuda de la Figura 24 se tomaron los datos correspondientes a las columnas mencionadas en campo, analizando los tramos y fotos seleccionadas anteriormente.

Figura 24

Formato para inspección de pavimento flexible según ASTM D6433-11.

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT								SKETCH:			
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____							
SURVEYED BY _____		DATE _____		SAMPLE AREA _____							
1. Alligator Cracking	6. Depression	11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving							
2. Bleeding	7. Edge Cracking	12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking							
3. Block Cracking	8. Jt. Reflection Cracking	13. Potholes		18. Swell							
4. Bumps and Sags	9. Lane/Shoulder Drop Off	14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling							
5. Corrugation	10. Long & Trans Cracking	15. Rutting									
DISTRESS SEVERITY	QUANTITY							TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	

FIG. 2 Flexible Pavement Condition Survey Data Sheet for Sample Unit

Nota. La figura representa la hoja de encuesta utilizada para el análisis de pavimento flexible. Fuente: (ASTM INTERNATIONAL, 2011).

Tabla 6

Tramos para estudiar.

Abcisas	Detección visual	Detección programa	Severidad	Área total	Densidad	Valor deductivo (%)
	Tipo de falla	Tipo de falla				
K0+025	Bache pequeño	Bache pequeño	ALTA	0,3	0,09%	50%
	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	BAJA	204,0	51,00%	5%
K0+825	Deformaciones	Deformaciones	MEDIA	5,7	1,34%	20%
	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	MEDIA	68,0	10,46%	4%
K1+900	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	MEDIA	17,0	7,56%	3%
K2+125	Bache pequeño	Bache pequeño	MEDIA	1,2	0,20%	15%
	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	BAJA	192,44	64,15%	6%
				0,6358		
K3+025	Bache pequeño	Bache pequeño	MEDIA	5	0,18%	13%
	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	BAJA	190,4	54,40%	5%
K3+725	Grietas finas	Grietas finas	BAJA	1	0,18%	1%

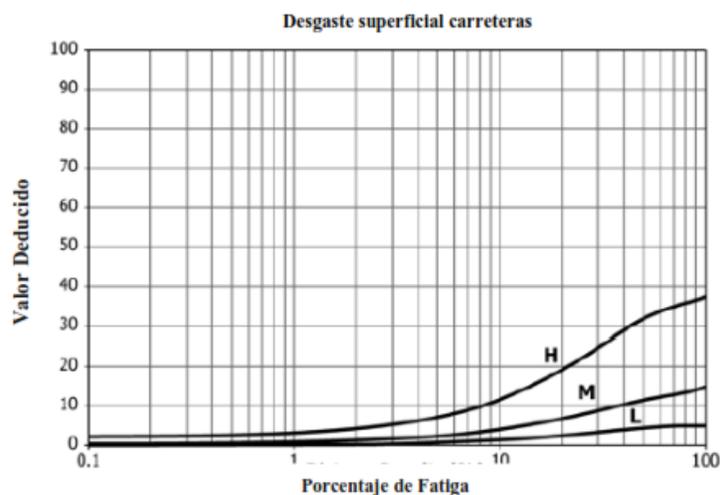
K4+275	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	BAJA	176,8	88,40%	6%	
K4+475	Deformaciones	Deformaciones	ALTA	51	7,56%	55%	
K5+150	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	BAJA	183,6	56,49%	6%	
K5+475	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	BAJA	170	68,00%	7%	
K5+725	Bache pequeño	Bache pequeño	BAJA	0,4788	5	0,32%	9%
K5+875	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	BAJA	170	97,14%	6%	
K6+050	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	BAJA	136	90,67%	5%	

Nota. Datos obtenidos del estudio en campo.

Una vez obtenida la densidad de la falla registrada se procedió a obtener el valor deductivo, el cual observando en las siguientes figuras: Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29 y Figura 30 dependiendo el tipo de falla se escoge el porcentaje del mismo para su posterior análisis.

Figura 25

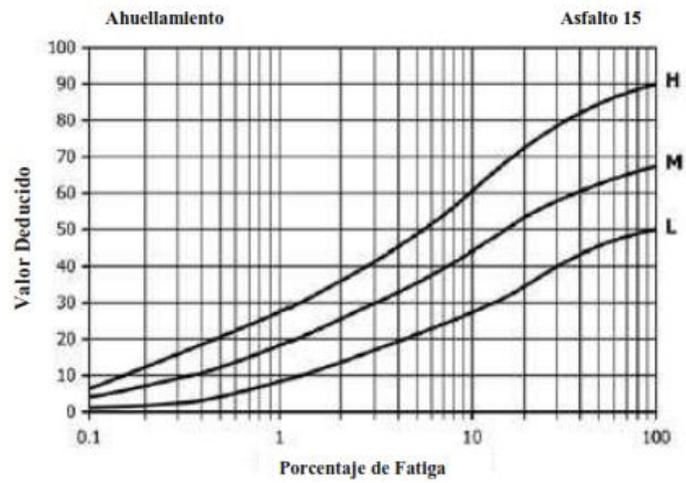
Desgaste superficial carreteras



Nota. La figura muestra el valor deductivo con respecto al desgaste superficial. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 26

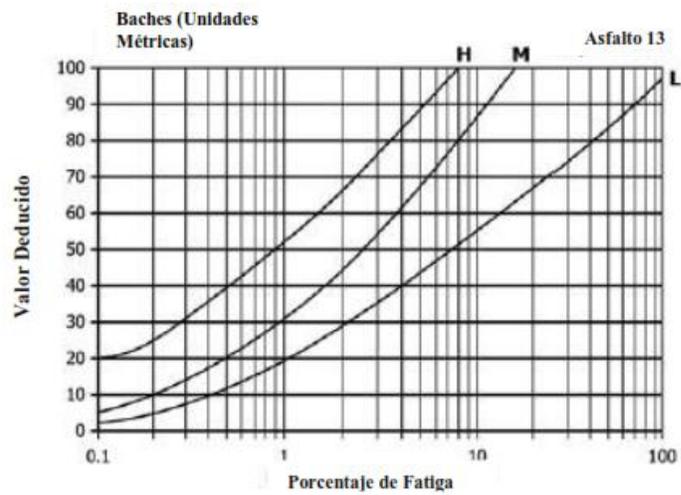
Ahuellamiento



Nota. La imagen representa el valor deductivo a calcular de la falla ahuellamiento. Fuente: extraída de (Vasquez, 2002).

Figura 27

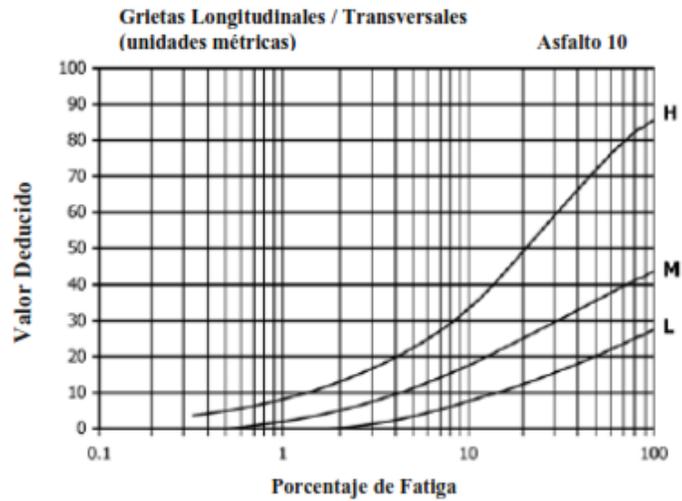
Baches (unidades métricas)



Nota. La imagen representa el valor deductivo de baches. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 28

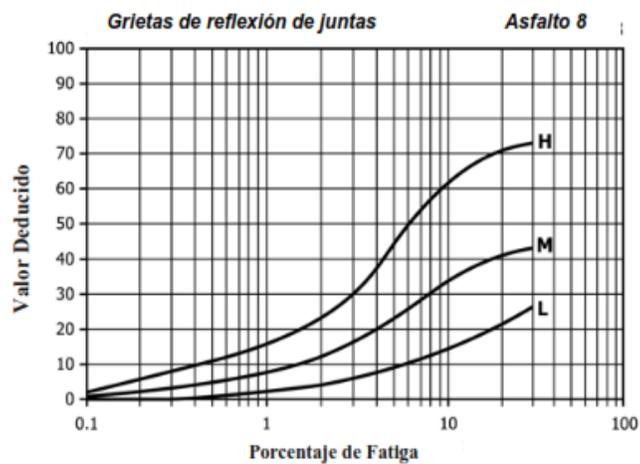
Grietas longitudinales/transversales



Nota. La figura muestra el valor deducido a analizar en grietas longitudinales de la vía. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 29

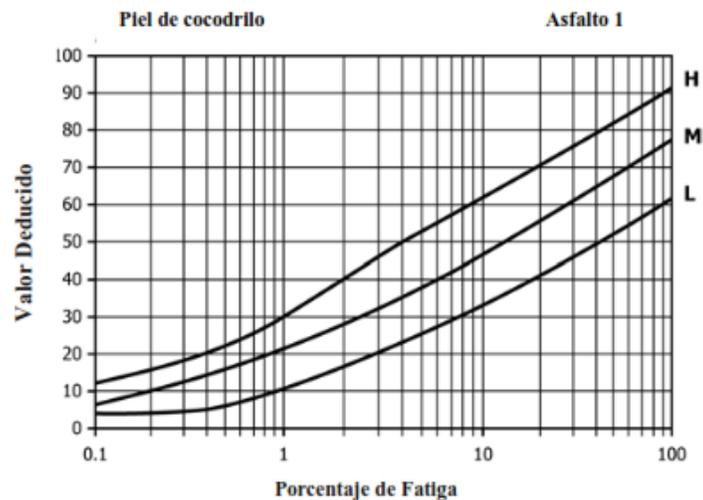
Grietas de reflexión de juntas



Nota. La figura muestra los valores deducidos para grietas de reflexión de juntas. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 30

Piel de cocodrilo.



Nota. La figura muestra los valores deductivos de piel de cocodrilo. Fuente: (Vasquez, 2002).

4.7.2. Vía de pavimento rígido Biblian-E35

La metodología utilizada para el cálculo del PCI del pavimento rígido se desarrolla de igual manera con la norma ASTM D6433-11 donde menciona que el área de muestreo es 20 ± 8 m², donde se define el tramo a estudiar entre la abscisa 0+000.00 y 2+000.00 dando como resultado una longitud total de vía de 2000 metros, con un ancho de calzada de 8 metros y una longitud de muestra de 20 metros respectivamente.

Según (ASTM INTERNATIONAL, 2011) para hacer el cálculo del PCI de una vía de pavimento rígido es necesario definir el ancho y largo total de la losa, el mismo que en campo fue de 4 y 4,5 metros respectivamente, esto nos servirá para obtener el número total de losas a lo largo y ancho de la vía, que dan como resultado 444 de largo, 2 de ancho y 889 el número total de losas a estudiar.

Posterior a esto se utiliza la Ecuación 1 previamente mencionada en la sección 4.7.1 siguiendo los mismos procedimientos para obtener las unidades de muestreo total donde se considera utilizar una desviación estándar de 15, dando como resultado 20 unidades de muestreo donde, en cada una existen 8 losas contiguas.

De la misma manera para obtener el intervalo de muestreo expresado en la Ecuación 2 de la sección 4.7.1 dando como resultado un intervalo de 3. Una vez obtenidos estos resultados se procedió a definir las abscisas correspondientes a 10 fotos de 20 metros cada una que da como resultado 10 secciones de 200 metros, se procedió a realizar la inspección en campo donde se analizará el nivel de severidad, el número de losas afectadas, la densidad y el valor deductivo. Como se observa en la Figura 31.

Figura 31

Formato para inspección de pavimento rígido según ASTM D6433-11.

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____	
SURVEYED BY _____		DATE _____		SAMPLE AREA _____	
Distress Types				SKETCH: • • • • • • • • • • 10 • • • • • 9 • • • • • 8 • • • • • 7 • • • • • 6 • • • • • 5 • • • • • 4 • • • • • 3 • • • • • 2 • • • • • 1 • • • • • 1 2 3 4	
21. Blow up/Buckling	31. Polished Aggregate				
22. Corner Break	32. Popouts				
23. Divided Slab	33. Pumping				
24. Durability Crack	34. Punchout				
25. Faulting	35. Railroad Crossing				
26. Joint Seal	36. Scaling				
27. Lane/Shoulder	37. Shrinkage				
28. Linear Cracking	38. Spalling Corner				
29. Patching (Large)	39. Spalling Joint				
30. Patching (Small)					
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %		DEDUCT VALUE

Nota. La figura representa el formato a llenar para el trabajo en campo donde en la parte “sketch” se grafica la silueta del pavimento dependiendo el número de losas y la ubicación de la falla detectada. Fuente: (*ASTM INTERNATIONAL, 2011*).

Como se puede observar en la Tabla 7 se indica las diferentes columnas mencionadas para realizar los análisis correspondientes.

Tabla 7

Tramos para estudiar.

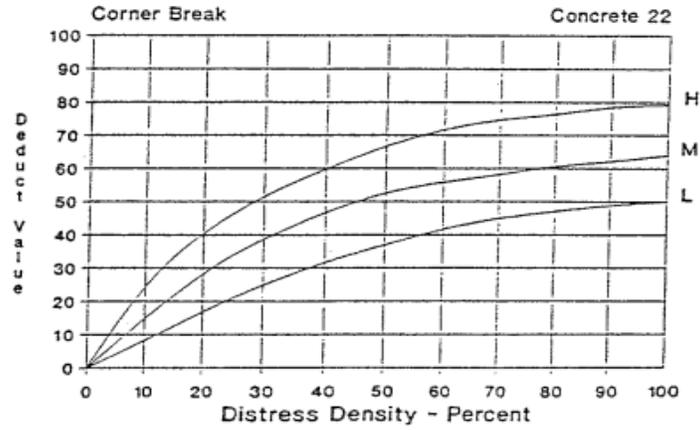
Abscisas	Detección visual	Detección programa	Severidad	# De losas	Densidad	Valor deductivo (%)
	Tipo de falla	Tipo de falla				
K0+080	Concreto Agrietado	Concreto agrietado	Baja	3	38%	12%
K0+160	Grietas severas	Grietas severas	Media	2	25%	35%
K0+220	Fisuras	Fisuras	Baja	3	38%	17%
K0+300	Grietas finas	Grietas finas	Baja	3	38%	3%
K0+460	Grietas severas	Grietas severas	Baja	3	38%	30%
K0+480	Fisuras	Fisuras	Baja	4	50%	20%
K0+560	Bache pequeño	Bache pequeño	Media	5	63%	13%
K0+620	Grietas severas	Grietas severas	Baja	5	63%	44%
K0+700	Fisuras	Fisuras	Media	6	75%	34%
K0+740	Bache grande	Bache grande	Baja	2	25%	9%
K0+780	Fisuras	Fisuras	Baja	6	75%	23%
K0+940	Grietas finas	Grietas finas	Baja	5	63%	4%
K0+960	Concreto Agrietado	Concreto agrietado	Baja	7	88%	23%
K1+020	Concreto Agrietado	Concreto agrietado	Media	2	25%	24%
K1+160	Concreto Agrietado	Concreto agrietado	Alta	2	25%	45%
K1+240	Fisuras	Fisuras	Baja	1	13%	7%
K1+280	Fisuras	Fisuras	Baja	3	38%	17%
K1+320	Bache grande	Bache grande	Baja	2	25%	8%
K1+380	Bache grande	Bache grande	Alta	2	25%	35%
K1+440	Grietas finas	Grietas finas	Baja	3	38%	3%

Nota. Datos obtenidos del “Pavimenta2”.

Una vez realizado los análisis en campo se procedió a obtener el valor deductivo mediante la Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 y la Figura 37 según corresponda.

Figura 32

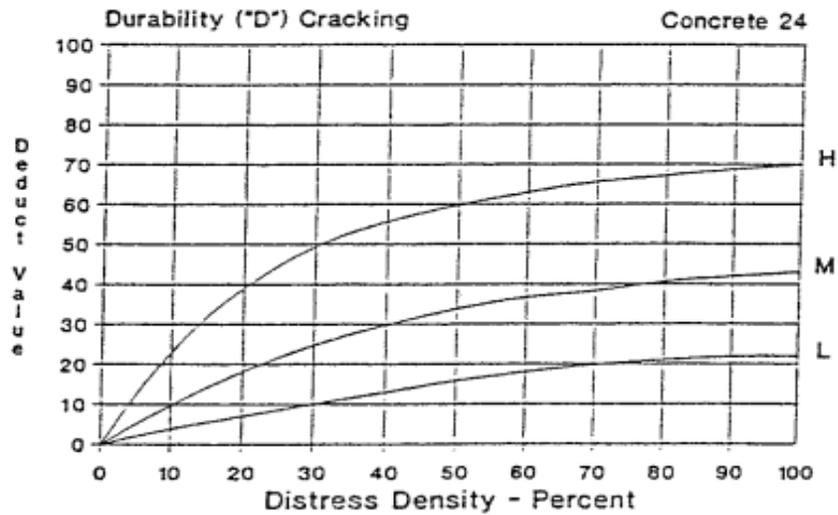
Grietas severas.



Nota. La figura indica los valores deductivos para grietas severas. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 33

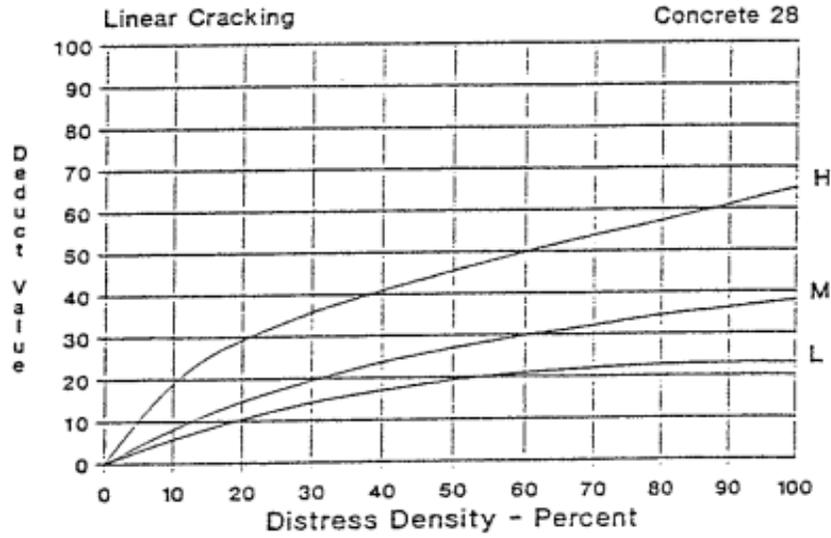
Concreto agrietado.



Nota. La figura indica los valores deductivos para concreto agrietado. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 34

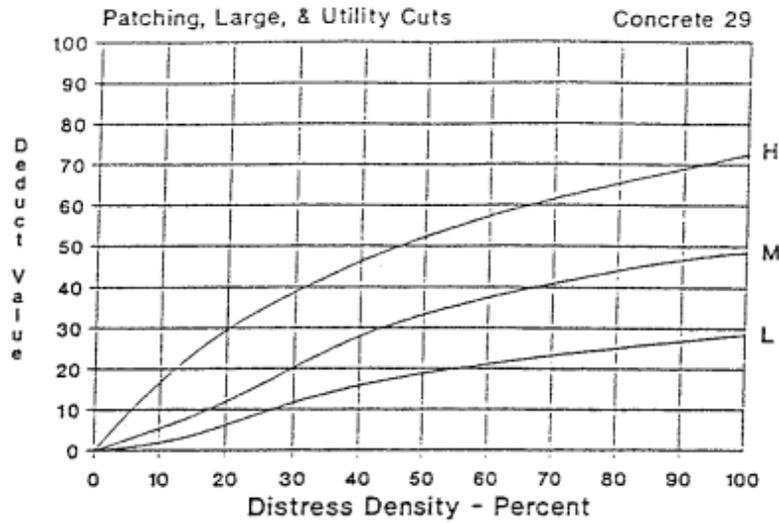
Fisuras



Nota. La figura indica los valores deductivos para fisuras. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 35

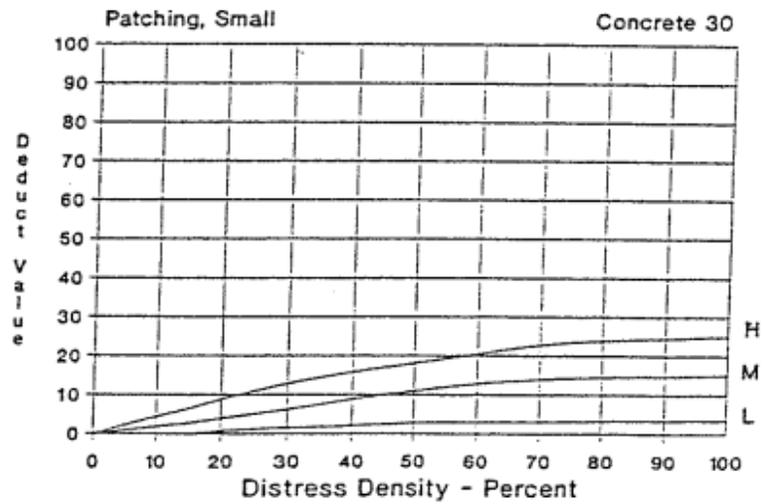
Bache grande



Nota. La figura indica los valores deductivos analizados para bache grande. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 36

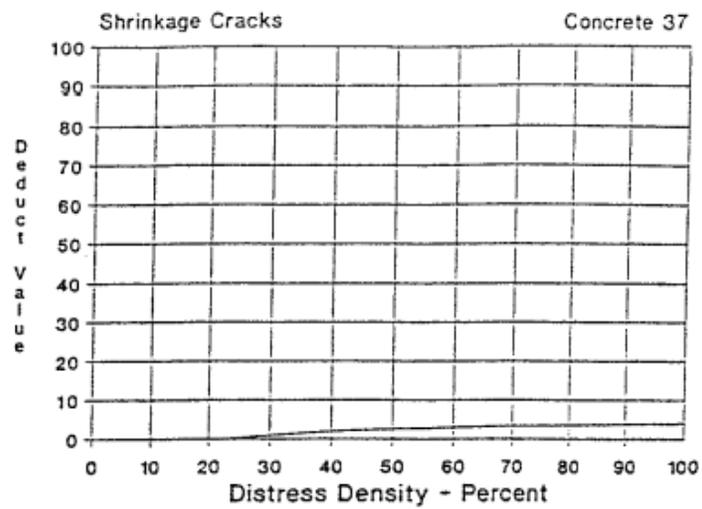
Bache pequeño.



Nota. La figura indica los valores deductivos para identificar la falla bache pequeño. Fuente: (Vasquez, 2002).

Figura 37

Grietas finas.



Nota. La figura representa los valores deductivos para grietas finas. Fuente: (Vasquez, 2002).

4.7.3. Análisis de señalización vial

Para finalizar el análisis de la señalización vial se procedió de la misma manera con los anteriores procedimientos mencionados, pero solo se analizará la coincidencia de este, ya no serán identificadas por el nivel de serviciabilidad, tampoco se obtendrá el nivel de PCI, única y exclusivamente el nivel de coincidencia del programa con lo realmente identificado en la imagen para poder obtener conclusiones acerca del nivel de seguridad del programa y sus limitaciones.

5. Capítulo 5

Para el presente trabajo se analizó un estudio previo en el que se aplicó la normativa ASTM D6433 para la determinación del Índice de Condición del Pavimento (PCI). A través de esta metodología, desarrollada por (Aguilar & Guaman, 2025) se obtuvo un diagnóstico detallado del estado del pavimento. Los resultados se presentan en la Tabla 8

Tabla 8

Resultados de índice de condición del pavimento. (PCI).

Pavement Condition Index (PCI)				
Abscisa		PCI	Servicio Tramos	PCI Promedio
Inicial	Final			
0+000	0+250	47	MUY POBRE	39
0+250	0+500			
0+500	0+750	36	MUY POBRE	
0+750	1+000	28	MUY POBRE	
1+000	1+250			
1+250	1+500			
1+500	1+750			
1+750	2+000	34	MUY POBRE	
2+000	2+250	51	POBRE	
2+250	2+500	13	MUY POBRE	
2+500	2+750			79
2+750	3+000	54	POBRE	
3+000	3+250			
3+250	3+500	48	MUY POBRE	
3+500	3+750			
3+750	4+000	53	POBRE	
4+000	4+250	50	POBRE	
4+250	4+500			
4+500	4+750	92	EXCELENTE	
4+750	5+000	84	BUENO	
5+000	5+250			42
5+250	5+500	49	MUY POBRE	
5+500	5+750	35	MUY POBRE	
5+750	6+000			
6+000	6+250	87	BUENO	
6+250	6+500	96	EXCELENTE	
6+500	6+750	90	EXCELENTE	

Nota. Datos obtenidos de “Pavimenta2”.

5.1.Resultados de pavimento flexible evaluado en base al PCI.

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos tras aplicar tanto la inspección visual como el análisis mediante el programa “Pavimenta2” sobre el tramo de pavimento flexible. Para la obtención de los valores por inspección visual, se realizó un trabajo de campo en los 17 tramos definidos como se puede observar en entre el Anexo 1 al Anexo 17, con el objetivo de identificar los tipos de fallas presentes y calcular el Índice de Condición del Pavimento (PCI). Esta inspección se basó en las hojas de registro establecidas por la ASTM D6433-11 correspondiente al pavimento flexible, adaptadas para este análisis como se observa los resultados entre el Anexo 18 al Anexo 34.

Las muestras fueron tomadas de acuerdo con el intervalo previamente definido, asegurando que las abscisas analizadas coincidieran tanto para la detección visual como para la detección de la IA. Cabe recalcar que los nombres de fallas que se muestran en la tabla corresponden a los que nos da directamente el programa, y no necesariamente a los términos exactos usados por la normativa técnica.

Tabla 9

PCI de pavimento flexible

PAVIMENTO FLEXIBLE				
ABSCISAS	DETECCION VISUAL	DETECCION PROGRAMA	PCI	CLASIFICACIÓN
	TIPO DE FALLA	TIPO DE FALLA		
K0+025	Bache pequeño	Bache pequeño	52	MALO
K0+425	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	95	EXCELENTE
K0+825	Deformaciones	Deformaciones	59	REGULAR
K1+250	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	90	EXCELENTE
K1+900	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	97	EXCELENTE
K2+125	Bache pequeño	Bache pequeño	77	MUY BUENO
K2+725	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	95	EXCELENTE
K3+025	Bache pequeño	Bache pequeño	84	MUY BUENO
K3+375	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	95	EXCELENTE
K3+725	Grietas finas	Grietas finas	100	EXCELENTE
K4+275	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	96	EXCELENTE
K4+475	Deformaciones	Deformaciones	25	MUY MALO
K5+150	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	95	EXCELENTE
K5+475	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	96	EXCELENTE
K5+725	Bache pequeño	Bache pequeño	87	EXCELENTE
K5+875	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	96	EXCELENTE

K6+050	Asfalto deteriorado	Asfalto deteriorado	97	EXCELENTE
PCI PROMEDIO PARA PAVIMENTO FLEXIBLE			84	MUY BUENO

Nota. Datos obtenidos de “Pavimenta2”.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla, se observa que la mayoría de los valores PCI se encuentran en el rango “Excelente”, lo cual indica, según la norma, que el pavimento se encuentra en buen estado general. Sin embargo, en algunos tramos específicos, como K4+475, se identificaron valores bajos, en este caso un PCI de 25, clasificado como “Muy malo”, lo que evidencia la necesidad de una intervención puntual.

El valor promedio del PCI para el tramo evaluado fue de 84, correspondiente a la clasificación “Muy bueno”, lo cual refleja que, en términos generales, el pavimento se encuentra en condiciones estructurales y funcionales adecuadas. No obstante, es importante destacar que durante la inspección visual se identificaron fallas de mayor impacto distribuidas en varios tramos, una observación a mencionar es que el sistema identificó concreto agrietado, probablemente por la presencia de bordes de concreto como se puede observar en la Figura 38.

Figura 38

Falla detectada del programa.



Nota. La figura representa las fallas encontradas en el programa. Fuente: Elaboración propia.

A pesar de ello, debido a la metodología de muestreo aplicada de coincidencias y a la ubicación de los puntos evaluados, coincidió que la mayoría de las fallas registradas correspondían a asfalto deteriorado, mientras que los tramos con baches o fallas severas no estuvieron suficientemente representados en la muestra. Esta situación influyó en que el resultado final arrojara un promedio alto de PCI, a pesar de que visualmente se perciben tramos en peor estado.

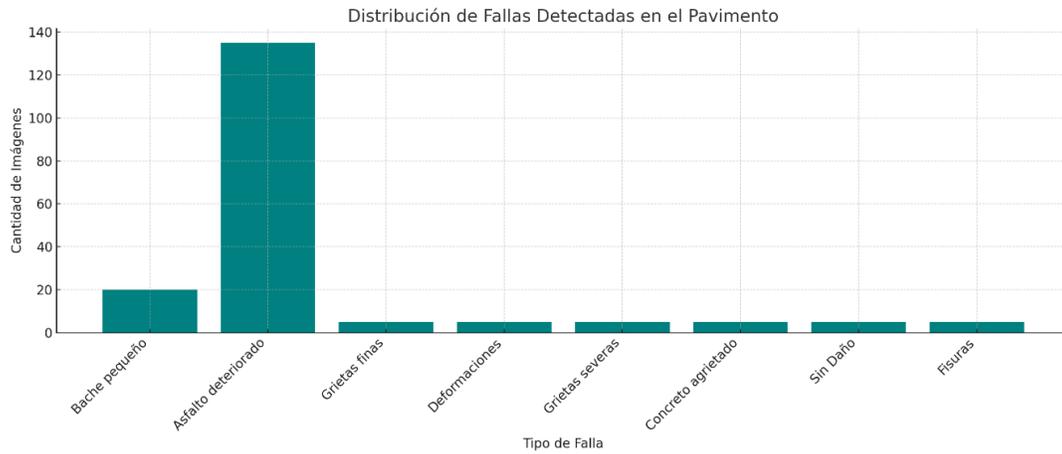
5.2.Resultados de las coincidencias de la IA para pavimento flexible.

A partir del análisis, el programa generó los tipos de fallas presentes, estas respuestas incluían la clasificación de la falla, su severidad y su ubicación como ya se mencionó. Con esta información, se realizó un proceso de verificación visual comparando cada una de las fallas indicadas por el mismo con las fotografías capturadas en el trabajo de campo, para así confirmar si las fallas reportadas coincidían realmente con las evidencias visuales, obteniendo un valor del 69 % de coincidencia para el pavimento flexible. Este proceso fue fundamental para validar la precisión del programa y detectar posibles errores de interpretación automática.

Además, el software también generó gráficos representativos que mostraban la distribución de las fallas detectadas, indicando cuántos baches, fisuras u otros tipos de deterioro fueron registrados, esto genera una comprensión más clara del comportamiento general del pavimento, se lo puede visualizar en la siguiente Figura 39.

Figura 39

Grafica obtenida de “Pavimenta2” para flexible



Nota. La figura representa en tabla estadística donde el asfalto deteriorado tiene un mayor margen de incidencia en el análisis. Fuente: “Pavimenta2”.

5.3.Resultados de pavimento rígido evaluado en base al PCI.

En la Tabla 10 muestran los resultados obtenidos para el pavimento rígido, aplicando el método ya descrito previamente para la evaluación del PCI. Al igual que en el análisis anterior, se utilizó tanto la inspección visual en campo como la evaluación automática a través del programa “Pavimenta2” identificando 20 imágenes que coincidieron con el programa como se observa desde el Anexo 38 al Anexo 57, empleando los tramos establecidos y registrando los tipos de falla observados en la respectiva hoja que nos da la ASTM D6433-11 para rígidos como se observa desde el Anexo 58 al Anexo 76

Tabla 10*PCI de pavimento rígido*

PAVIMENTO RIGIDO				
Abscisas	DETECCION VISUAL	DETECCION PROGRAMA	PCI	CLASIFICACIÓN
	TIPO DE FALLA	TIPO DE FALLA		
K0+080	Concreto Agrietado	Concreto agrietado	88	EXCELENTE
K0+160	grietas severas	grietas severas	65	BUENO
K0+220	fisuras	fisuras	83	MUY BUENO
K0+300	Grietas finas	Grietas finas	97	EXCELENTE
K0+460	grietas severas	grietas severas	70	BUENO
K0+480	fisuras	fisuras	80	MUY BUENO
K0+560	bache pequeño	Bache pequeño	87	EXCELENTE
K0+620	grietas severas	grietas severas	56	BUENO
K0+700	fisuras	fisuras	66	BUENO
K0+740	bache grande	Bache grande	91	EXCELENTE
K0+780	fisuras	fisuras	77	MUY BUENO
K0+940	Grietas finas	Grietas finas	96	EXCELENTE
K0+960	Concreto Agrietado	Concreto agrietado	77	MUY BUENO
K1+020	Concreto Agrietado	Concreto agrietado	76	MUY BUENO
K1+160	Concreto Agrietado	Concreto Agrietado	55	REGULAR
K1+240	fisuras	fisuras	93	EXCELENTE
K1+280	fisuras	fisuras	83	MUY BUENO
K1+320	bache grande	Bache grande	92	EXCELENTE
K1+380	bache grande	bache grande	65	BUENO
K1+440	grietas finas	Grietas finas	97	EXCELENTE
PCI PROMEDIO PARA PAVIMENTO RIGIDO			80	MUY BUENO

Nota. Datos obtenidos de “Pavimenta2”.

En este caso, se puede demostrar que los valores de PCI obtenidos tienen una mayor coherencia con el estado real de la vía, tal como se aprecia visualmente durante el recorrido. La mayoría de los tramos presentan condiciones aceptables, cabe destacar que se evidenció que algunas fallas detectadas por el programa fueron clasificadas como grietas y fisuras, cuando en realidad correspondían a juntas existentes en el pavimento, lo que indica una confusión en el proceso de clasificación, también se refleja valores PCI altos y en su respectiva clasificación, por ejemplo, en varios sectores tenemos una clasificación “Excelente”, como los tramos K0+080, K0+300, K0+740 o K1+440, que muestran valores mayores a 90.

De igual manera, se identificaron tramos con fallas más evidentes, como el K1+160, con un PCI de 55 que nos da como resultado “Regular”, o el K0+620, con un PCI de 56 clasificado como “Bueno”.

El PCI promedio del pavimento rígido fue de 80, lo que corresponde a una calificación de “Muy bueno”, y confirma que el tramo evaluado se encuentra en condiciones generales adecuadas para su uso.

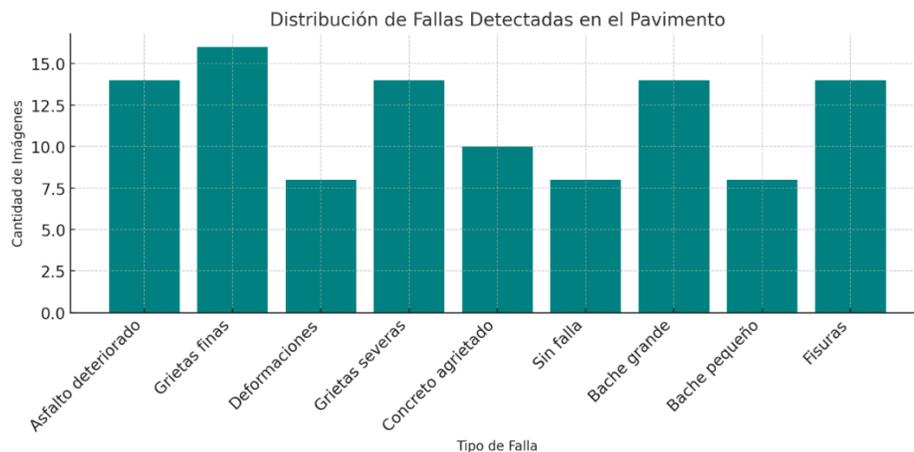
5.4.Resultados de las coincidencias de la IA de rígido.

En el pavimento rígido, se utilizó un software especializado que detectó distintas patologías presentes en la vía, incluyendo su tipo, severidad y localización específica en cada losa. Posteriormente, se llevó a cabo una revisión detallada mediante el análisis visual de las fotografías obtenidas en campo, con el objetivo de contrastar la información proporcionada por el sistema. Esta comparación permitió establecer el resultado de un nivel de coincidencia del 51 %.

Además, el programa generó representaciones gráficas que resumían la frecuencia y distribución de las distintas fallas detectadas, permitiendo así obtener una visión integral del estado funcional del pavimento rígido en el tramo analizado, se lo puede ver en la siguiente Figura 40.

Figura 40

Grafica obtenida de "Pavimenta2" para rígido



Nota. La figura representa la distribución de las fallas donde se observa una mayor uniformidad en cuanto a la detección de fallas en relación al pavimento flexible. Fuente: Resultados de "Pavimenta2".

5.5.Resultados de la señalización de la Avenida Primero de Mayo

Para la señalización se siguió los mismos procesos que utiliza el software "Pavimenta2" donde se observa en la Tabla 11 cinco columnas en las que se distribuye por la abscisa medida en 20 metros cada una, detección visual y detección de programa, las mismas que se identificaron el tipo de señal para posterior a esto obtener el nivel de coincidencia. Para el análisis no era necesario dividir por tramos como en los anteriores análisis, se ingresaron al sistema las 50 imágenes que están identificadas desde el Anexo 79 al Anexo 130.

Tabla 11

Resultados de coincidencia en señalización

Abscisas	DETECCION VISUAL	DETECCION PROGRAMA	COINCIDENCIA	#FOTO
	TIPO DE SEÑAL	TIPO DE SEÑAL		
K0+020	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1283
K0+040	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1284
K0+060	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1285
K0+080	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1286
K0+100	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1287

K0+120	TRAFFIC LIGHT	NO DETECTA	NO COINCIDE	1288
K0+140	ADVERTENCIA	NO DETECTA	NO COINCIDE	1289
K0+160	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1290
K0+180	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1291
K0+200	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1292
K0+220	STOP SIGN	STOP SIGN	COINCIDE	1293
K0+240	STOP SIGN	TRAFFIC LIGHT	NO COINCIDE	1294
K0+260	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1295
K0+280	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1296
K0+300	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1297
K0+320	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1298
K0+340	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1299
K0+360	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1300
K0+380	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1301
K0+400	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1302
K0+420	STOP SIGN	STOP SIGN	COINCIDE	1303
K0+440	INFORMATIVA	NO DETECTA	NO COINCIDE	1304
K0+460	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1305
K0+480	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1306
K0+500	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1307
K0+520	REGLAMENTARIA	NO DETECTA	NO COINCIDE	1308
K0+540	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1309
K0+560	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1310
K0+580	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1311
K0+600	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1312
K0+620	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1313
K0+640	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1314
K0+660	STOP SIGN	STOP SIGN	COINCIDE	1315
K0+680	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1316
K0+700	INFORMATIVA	NO DETECTA	NO COINCIDE	1317
K0+720	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1318
K0+740	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1319
K0+760	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1320
K0+780	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1321
K0+800	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1322
K0+820	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1323
K0+840	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1324
K0+860	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1325
K0+880	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1326
K0+900	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1327
K0+920	INFORMATIVA	NO DETECTA	NO COINCIDE	1328

K0+940	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1329
K0+960	STOP SIGN	NO DETECTA	NO COINCIDE	1330
K0+980	TRAFFIC LIGHT	TRAFFIC LIGHT	COINCIDE	1331
K1+000	NO DETECTA	NO DETECTA	COINCIDE	1332
% DE COINCIDENCIA				60%

Nota. Datos obtenidos de “Pavimenta2”.

A lo largo de la vía se identificó ciertos aspectos que el programa detecta erróneamente como se observa en la Figura 41 donde el programa no detecto algún tipo de señal al ser evidente que si existe una señal reglamentaria.

Figura 41

Ejemplo erróneo de la imagen 1283



Nota. La figura muestra un ejemplo de imagen en campo. Fuente: Elaboración propia.

Dando como resultado un nivel de coincidencia del 60% entre las fallas detectadas por el programa y lo evaluado visualmente, como se puede observar en la Figura 42 que detecta un semáforo en la imagen relacionado con el resultado obtenido en el programa.

Figura 42

Ejemplo de coincidencia exitosa

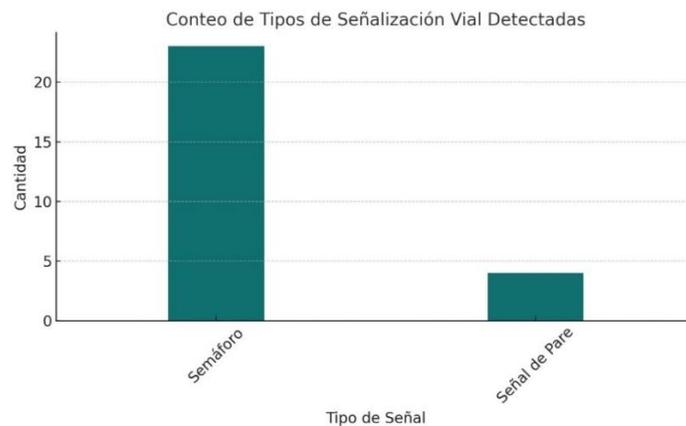


Nota. La figura muestra una imagen capturada en campo de una coincidencia exitosa. Fuente: Elaboración propia.

Por último, se obtuvo la Figura 43 donde se puede analizar que el programa tuvo algunos datos erróneos donde no fue capaz de detectar más tipos de señalización que señal de pare y semáforo, lo cual limita mucho su uso generando inconsistencias.

Figura 43

Señalización vial



Nota. La figura indica en una tabla estadística la relación en los conteos de semáforo y señal de pare identificados por el programa. Fuente: Elaboración propia.

5.6.Comparación de los resultados mediante método PCI

La evaluación del estado del pavimento flexible se llevó a cabo utilizando dos enfoques distintos: un análisis por tramos, cuyos resultados se reflejan en la Tabla 8, y una evaluación puntual mediante muestras específicas, resumida en la Tabla 9. Aunque ambas metodologías aplican el índice de condición del pavimento (PCI) como criterio de calificación, se diferencian en el nivel de detalle y en el área evaluada. El análisis por tramos abarca sectores de 250 metros y proporciona una visión general del comportamiento estructural del pavimento a lo largo de toda la vía. En cambio, la evaluación por muestras se enfoca en puntos específicos, donde se identificaron y clasificaron fallas puntuales de acuerdo al código de “Pavimenta2”.

Es importante mencionar que esta comparación no se realiza tramo por tramo, sino en términos generales, también permite evaluar la confiabilidad de los resultados generados por el software utilizando el cálculo del PCI.

En cuanto a los resultados, la Tabla 8 muestra valores extremos de PCI que van desde 13 (muy pobre) hasta 96 (excelente), con un promedio de 39, clasificando al pavimento como “muy pobre” en términos generales. La clasificación predominante en esta evaluación es “muy pobre” a “pobre”, y se observa una alta frecuencia de tramos con PCI por debajo de 40, lo cual evidencia una condición estructural deficiente en amplios sectores de la vía.

En cambio, en la Tabla 9, correspondiente a la evaluación por muestras, presenta un rango de PCI más favorable, con un mínimo de 25 (muy malo) y un máximo de 100 (excelente). El promedio obtenido fue de 84, lo que indica una condición general “muy buena”, con predominancia de clasificaciones “muy bueno” y “excelente”. Solo una muestra se encuentra en condición crítica, mientras que 12 de las 17 muestras analizadas son mayores a las demás, todas estas comparaciones se las puede observar en la Tabla 12 .

Tabla 12*Comparaciones de resultados del estado del pavimento de acuerdo al PCI*

Elemento Comparado	Evaluación de la Tabla 8	Evaluación de la Tabla 9
Valores PCI extremos	Mínimo: 13 (Muy pobre) Máximo: 96 (Excelente)	Mínimo: 25 (Muy malo) Máximo: 100 (Excelente)
Promedio PCI	39 → Clasificación: Muy pobre	84 → Clasificación: Muy bueno
Clasificación predominante	Muy pobre – Pobre	Excelente – Muy bueno
Presencia de tramos críticos (PCI < 40)	Alta: múltiples tramos < 40	Muy baja: solo una muestra con PCI crítico (25)
Presencia de tramos en buen estado	Solo 6 tramos con PCI ≥ 84	12 de 17 muestras con PCI ≥ 84

Nota. Datos obtenidos de la evaluación entre la tabla 8 y 9 del documento.

Conclusiones

La aplicación del software de inteligencia artificial “Pavimenta2” permitió evaluar su capacidad técnica, operativa y estratégica para apoyar en la identificación y análisis tanto de la señalización vial como de las fallas en pavimentos. A través de su implementación en pavimento flexible como rígido y señalización, se demostró que esta herramienta tecnológica es capaz de agilizar y digitalizar el proceso de evaluación, aunque aún presenta limitaciones importantes que deben ser abordadas para garantizar su eficacia para su uso en el campo laboral.

En cuanto, a la aplicación del software se realizó sobre un tramo de 6,2 km de pavimento flexible en la vía Bibín – Octavio Cordero, obteniendo un PCI de 84, clasificado como “muy bueno”. Este resultado se comparó con un estudio anterior que evaluó la misma vía, pero con metodología PCI, dando como resultado un PCI de 39 “muy pobre”.

Esta comparación mostró diferencias importantes: mientras “Pavimenta2” hizo un análisis por tramos con toma de imágenes, la tesis previa utilizó una evaluación por muestras puntuales. Aunque no se trató de una comparación tramo por tramo, se evidenció que el software puede ofrecer una visión general, aunque menos detallada y también que los resultados de acuerdo con su PCI no coincidieron.

Además, se aplicó en 2 km de pavimento rígido en la vía Biblián, donde se obtuvo un PCI de 80 “muy bueno”, coincidiendo con la inspección visual, lo que sugiere una mayor efectividad en superficies rígidas, sin embargo se detectó una mayor cantidad de fallas en comparación a la vía de pavimento flexible, por la uniformidad y menor deformabilidad del pavimento rígido que facilita la identificación de fallas como fisuras, losas agrietadas, lo que mejora la precisión del reconocimiento visual automatizado.

Por último, se analizó un tramo de 1 km en la Av. Primero de Mayo para evaluar la detección de señalización vial, observándose una coincidencia del 60% entre lo captado por el software y lo observado mediante imágenes, cabe recalcar que, si bien el sistema detectó señales de alto y semáforos, omitió otros tipos de señalética, lo que limita su aplicación.

Respecto a la profunda investigación bibliográfica para comprender el funcionamiento de “Pavimenta2”, evidenciando que la información y el manual brindado por el BID estaban desactualizados, dificultando un poco su uso, por lo tanto, se realizó múltiples pruebas con imágenes tomadas en campo. Finalmente, se recolectaron 248 imágenes para pavimento flexible, 100 para pavimento rígido y 50 para señalización, por último, se aplicó el método PCI mediante hojas de encuesta que se obtuvo de la normativa ASTM D6433-11.

En relación con el tiempo de evaluación, para el caso del pavimento flexible, el estudio referencial requirió aproximadamente 6 horas distribuidas durante una semana para completar el levantamiento. En cambio, en el presente trabajo de titulación, el mismo tipo de evaluación se realizó en 3 horas y media, distribuidas en dos días: el primero dedicado a la toma de fotografías y el segundo a la carga de imágenes en el sistema y a la obtención del PCI, de acuerdo con las muestras necesarias. Este cambio representa una reducción del 41,67% en el tiempo de ejecución, lo cual evidencia una mejora significativa en eficiencia operativa.

En cuanto al pavimento rígido, aunque no se dispone de un estudio referencial para una comparación directa, se aplicó un procedimiento similar al del flexible, con una duración estimada de 2 a 2,5 horas, también distribuidas en dos días, considerando que se trató de un tramo menor en extensión.

Para el caso de la señalización vial, la recolección de imágenes se completó en aproximadamente 30 minutos, lo que evidencia que la aplicación de inteligencia artificial permite reducir sustancialmente los tiempos de trabajo y la carga operativa en este tipo de evaluaciones.

Finalmente, al considerar un caso general de un estudio referencial que tomó aproximadamente 42 horas, frente a las 3,5 horas invertidas en el presente trabajo, se obtiene una reducción del 91,67% en el tiempo total requerido. Esta diferencia demuestra que la implementación de inteligencia artificial no solo optimiza el uso de recursos técnicos y humanos, sino que también disminuye considerablemente la carga operativa.

Para la inspección visual y el software, los resultados dieron un nivel de coincidencia entre el 50 y 70% aproximadamente. Se observó que la IA detecta fallas visibles de mayor tamaño, pero tuvo dificultades en identificar defectos más sutiles o en clasificar correctamente ciertos deterioros.

Finalmente, se documentó el proceso de implementación del software, se inició con el análisis del funcionamiento del programa, se realizaron pruebas preliminares con distintas imágenes, luego se procedió con la carga masiva de datos para cada vía estudiada. Posteriormente, se contrastaron los resultados obtenidos por la IA con observaciones visuales y el cálculo del PCI, validando su utilidad como herramienta. Si bien el software demostró su capacidad para optimizar la evaluación vial, también se identificaron desafíos, como la necesidad de conocimientos para su uso, errores de clasificación, y limitaciones frente a condiciones no controladas como el tráfico o iluminación.

Recomendaciones

Actualizar el manual de “Pavimenta2” y la documentación técnica del software con base en las versiones actuales, incorporando ejemplos y guías visuales para facilitar el aprendizaje de futuros usuarios, además de habilitar la página web brindada por el manual permitiendo una mayor facilidad de usar el software.

Ampliar el conjunto de datos del modelo de inteligencia artificial con imágenes representativas de diferentes tipos de señalización vial y fallas en pavimentos, especialmente aquellas que el sistema no logró identificar correctamente.

Mejorar el algoritmo de clasificación de fallas, incorporando subcategorías más específicas como severidad o dimensiones de la falla, afinando los criterios de detección para reducir los errores de reconocimiento y la confusión entre tipos de deterioro similares.

Incorporar ajustes automáticos de corrección de perspectiva en las imágenes que permitan diferenciar las fallas reales del pavimento o la señalización vial de elementos estructurales adyacentes en la vía, como veredas, alcantarillas, postes, sombras o desagües, los cuales pueden generar confusión en el sistema de reconocimiento.

Agregar una función de verificación o retroalimentación manual, donde el usuario pueda confirmar o corregir la clasificación realizada por la IA, retroalimentando así el sistema para futuras mejoras.

Desarrollar una versión móvil o aplicación ligera que permita realizar capturas y análisis preliminares directamente en campo, sin necesidad de equipos de escritorio.

Establecer métricas de precisión y sensibilidad en los reportes finales, para evaluar de manera cuantitativa el desempeño del sistema y permitir un seguimiento de su mejora continua.

Referencias Bibliográficas

- AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Officials LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS. 9th edition.*
- Aguilar, S., & Guaman, J. (2025). *Diseño de sistema de gestión de infraestructura vial para el tramo Bibin - Octavio Cordero Palacios.* Cuenca. Retrieved from <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/46726>
- ASTM INTERNATIONAL. (2011). *D 6433-11 Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys 1.* Retrieved from <https://pages.mtu.edu/~balkire/CE5403/ASTMD6433.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2024). *BID.* Retrieved from Pavimentados: <https://code.iadb.org/es/herramientas/pavimentados>
- Cedillo, L., & Pauta, W. (2023). *Diseño de un sistema de gestión de infraestructura vial para el oeste del centro.* Universidad de Cuenca, Cuenca. Retrieved from <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/59c9cd0b-ea13-4ca2-a99b-09dc3d9994cb/content>
- Division de Transporte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2021). *Manual de usuario Pavimenta2.* Manual de usuario, Banco Interamericano de Desarrollo.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial del Cañar. (s.f.). *Cantón Biblian.* Retrieved from <https://www.gobiernodelcanar.gob.ec/canton-biblian/>
- Gonzalez, Fernandez, H., Ruiz, Caballero, P., & Guerrero, Valverde, D. (2019). Propuesta de metodología para la evaluación de pavimentos mediante el Índice de Condición del Pavimento (PCI). *Ciencia en su PC, 1*, 58-72. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181358738015>
- Hadsell, R., Chopra, S., & LeCun, Y. (2005). *Learning a similarity metric discriminatively, with application to face verification.* IEEE. doi:10.1109/CVPR.2005.202
- Illinois Department of Transportation, (IDOT). (2012). *BUREAU OF LOCAL ROADS AND STREETS MANUAL.* Illinois.

- López, R. (2025). *Visión por Computadora*. Libro online de IAAR. Retrieved from <https://iaarbook.github.io/vision-por-computadora/>
- Medrano, C., & Igual, R. (2008). *Tutorial de OpenCV*. Laboratorio de visión por computadora.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras* (Segunda ed.). Bogota: Agora Editores.
- Moreno, R. M. (2018). Big data, ¿pero qué es? Big data; But what is it? *70*, 191-194. doi:<https://doi.org/10.1016/j.angio.2018.05.001>
- Ortega, I. (2020). *Implementación de la red neuronal YOLOv3 para la detección de matrículas de vehículos*. E.T.S.I. Telecomunicación (UPM), Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones.
- Pfeifer, M., & Esteves, A. (2022, Septiembre 19). *Pavimenta2: Acelerando la transformación digital del sector Transporte en América Latina y El Caribe*. Retrieved from Moviliblog: <https://blogs.iadb.org/transporte/es/pavimentados-acelerando-la-transformacion-digital-del-sector-transporte-en-america-latina-y-el-caribe/>
- Ponce Gallegos, J. C., Torres Soto, A., Quezada Aguilera, F. S., Silva Sprock, A., Martínez Flor, E. U., Casali, A., . . . Pedreño, O. (2014). *Inteligencia Artificial* (Primera ed.). Iniciativa Latinoamericana de Libros de Texto Abiertos (LATIn).
- Ríos, N., Bacca, B., Caicedo, E., & Orobio, A. (2020). Revisión de métodos para la clasificación de fallas superficiales en pavimentos flexibles. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 109-107. doi:<https://doi.org/10.18359/rcin.4385>
- Rivas, A., & Sierra, C. (2016). *Aplicación y comparación de las diferentes metodologías de diagnóstico para la conservación y mantenimiento del tramo PR 00+000 – PR 01+020 de la vía al llano (dg 78 bis sur – calle 84 sur) en la UPZ Yomasa*. Bogota. Retrieved from <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/321b9569-f0af-4aa3-b650-d6209ecab32b/content>

- Salas, R. (2004). *Redes Neuronales Artificiales*. Universidad de Valparaíso, Departamento de computación.
- Tello, L., Aguirre, M., Díaz, J., & Hernández, F. (2021). *Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales*. Retrieved from TecnoLogicas: <https://doi.org/10.22430/22565337.1686>
- Turing, A. (1950). Computing Machinery and Intelligence. 433-460.
- Ultralytics. (2020). *YOLOv5: Real-time object detection*. Retrieved from <https://github.com/ultralytics/yolov5>
- Valle, A. (2017-2018). <https://www.tensorflow.org/?hl=es>. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos.
- Vasquez, L. (2002). *PAVEMENT CONDITION INDEX (PCI) PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Y DE CONCRETO EN CARRETERAS*. Manizales. Retrieved from <https://sjnavarro.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/08/manual-pci1.pdf>

Anexos

Anexo 1 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 836.



Anexo 2 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 852.



Anexo 3 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 868.



Anexo 4 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 885.



Anexo 5 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 911.



Anexo 6 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 920.



Anexo 7 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 944.



Anexo 8 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 956.



Anexo 9 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 970.



Anexo 10 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 984.



Anexo 11 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1006.



Anexo 12 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1014.



Anexo 13 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1041.



Anexo 14 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1054.



Anexo 15 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1064.



Anexo 16 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1070.



Anexo 17 tramo vial estudiado en vía de pavimento flexible #foto 1077.



Anexo 18 Hoja de encuesta para metodología #foto 836

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT				SKETCH:		
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		#Foto: 836		
SURVEYED BY _____		SAMPLE AREA _____				
1. Alligator Cracking 2. Bleeding 3. Block Cracking 4. Bumps and Sags 5. Corrugation		6. Depression 7. Edge Cracking 8. Jt. Reflection Cracking 9. Lane/Shoulder Drop Off 10. Long & Trans Cracking		11. Patching & Util Cut Patching 12. Polished Aggregate 13. Potholes 14. Railroad Crossing 15. Rutting		16. Shoving 17. Slippage Cracking 18. Swell 19. Weathering/Raveling
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Radio		TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE
Bache Pequeño	Alta	45cm				
Bache Pequeño	Alta	50cm				

Anexo 19 Hoja de encuesta para metodología #foto 852

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____		# Foto: 852		
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Asfalto Deteriorado	Baja	30 metros	6,80 metros	// //				

Anexo 20 Hoja de encuesta para metodología #foto 868

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____		# Foto: 868		
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Deformacion	Alta	3 metros	1,9 metros	25 cm.				

Anexo 21 Hoja de encuesta para metodología #foto 885

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____		# Foto: 885		
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Asfalto Deteriorado	Media	10 metros	6,8 metros	// //				

Anexo 22 Hoja de encuesta para metodología #foto 911

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____				
SURVEYED BY _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____			#Foto: 911	
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Asfalto Deteriorado	Media	5 metros	3,40 metros	// //				

Anexo 23 Hoja de encuesta para metodología #foto 920

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____				
SURVEYED BY _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____			#Foto: 920	
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Radio			TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Dache Pequeño	Media	50cm						
Dache Pequeño	Media	335cm						

Anexo 24 Hoja de encuesta para metodología #foto 944

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____				
SURVEYED BY _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____			#Foto: 944	
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Asfalto Deteriorado	Baja	28,3 metros	6,80 metros	// //				

Anexo 25 Hoja de encuesta para metodología #foto 956

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:		
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04			SAMPLE AREA _____		
1. Alligator Cracking 6. Depression 11. Patching & Util Cut Patching 16. Shoving 2. Bleeding 7. Edge Cracking 12. Polished Aggregate 17. Slippage Cracking 3. Block Cracking 8. Jt. Reflection Cracking 13. Potholes 18. Swell 4. Bumps and Sags 9. Lane/Shoulder Drop Off 14. Railroad Crossing 19. Weathering/Raveling 5. Corrugation 10. Long & Trans Cracking 15. Rutting							
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Radio			TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE
Bache Pequeño	Media	0,45 cm					

Anexo 26 Hoja de encuesta para metodología #foto 970

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:		
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04			SAMPLE AREA _____		
1. Alligator Cracking 6. Depression 11. Patching & Util Cut Patching 16. Shoving 2. Bleeding 7. Edge Cracking 12. Polished Aggregate 17. Slippage Cracking 3. Block Cracking 8. Jt. Reflection Cracking 13. Potholes 18. Swell 4. Bumps and Sags 9. Lane/Shoulder Drop Off 14. Railroad Crossing 19. Weathering/Raveling 5. Corrugation 10. Long & Trans Cracking 15. Rutting							
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE
Asfalto Deteriorado	Baja	28 metros	6,80 metros	// //			

Anexo 27 Hoja de encuesta para metodología #foto 984

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:		
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04			SAMPLE AREA _____		
1. Alligator Cracking 6. Depression 11. Patching & Util Cut Patching 16. Shoving 2. Bleeding 7. Edge Cracking 12. Polished Aggregate 17. Slippage Cracking 3. Block Cracking 8. Jt. Reflection Cracking 13. Potholes 18. Swell 4. Bumps and Sags 9. Lane/Shoulder Drop Off 14. Railroad Crossing 19. Weathering/Raveling 5. Corrugation 10. Long & Trans Cracking 15. Rutting							
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE
Grindas Finas	Media	5 metros	2 cm	// //			

Anexo 28 Hoja de encuesta para metodología #foto 1006

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____				#Foto: 1006
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Asfalto Deteriorado	Baja	26 metros	6,80 metros	// //				

Anexo 29 Hoja de encuesta para metodología #foto 1014

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____				#Foto: 1014
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Deformaciones	Alta	8 metros	6,80 metros	40 cm				

Anexo 30 Hoja de encuesta para metodología #foto 1041

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:			
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____				#Foto: 1041
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving		
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking		
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell		
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling		
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting				
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
Asfalto Deteriorado	Baja	27 metros	6,8 metros	// //				

Anexo 31 Hoja de encuesta para metodología #foto 1054

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:		
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____			
					#Foto: 1054		
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving	
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking	
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell	
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling	
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting			
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE
Asfalto Deteriorado	Baja	25 metros	6,8 metros	// //			

Anexo 32 Hoja de encuesta para metodología #foto 1064

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:		
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____			
					#Foto: 1064		
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving	
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking	
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell	
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling	
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting			
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Radio			TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE
Bache Pequeno	Baja	0,25 cm					
Bache pequeño	Baja	0,2 cm					

Anexo 33 Hoja de encuesta para metodología #foto 1070

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:		
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE 23/04		SAMPLE AREA _____			
					#Foto: 1070		
1. Alligator Cracking		6. Depression		11. Patching & Util Cut Patching		16. Shoving	
2. Bleeding		7. Edge Cracking		12. Polished Aggregate		17. Slippage Cracking	
3. Block Cracking		8. Jt. Reflection Cracking		13. Potholes		18. Swell	
4. Bumps and Sags		9. Lane/Shoulder Drop Off		14. Railroad Crossing		19. Weathering/Raveling	
5. Corrugation		10. Long & Trans Cracking		15. Rutting			
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE
Asfalto Deteriorado	Baja	25 metros	6,8 metros	// //			

Anexo 34 Hoja de encuesta para metodología #foto 1077

ASPHALT SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT					SKETCH:		
BRANCH _____ SECTION _____ SAMPLE UNIT _____		DATE <u>23/04</u> SAMPLE AREA _____			#Foto: 1077		
SURVEYED BY _____							
1. Alligator Cracking 2. Bleeding 3. Block Cracking 4. Bumps and Sags 5. Corrugation		6. Depression 7. Edge Cracking 8. Jt. Reflection Cracking 9. Lane/Shoulder Drop Off 10. Long & Trans Cracking		11. Patching & Util Cut Patching 12. Polished Aggregate 13. Potholes 14. Railroad Crossing 15. Rutting		16. Shoving 17. Slippage Cracking 18. Swell 19. Weathering/Raveling	
DISTRESS SEVERITY	Severidad	Largo	Ancho	Profundidad	TOTAL	DENSITY %	DEDUCT VALUE
Asfalto Deteriorado	Baja	20 metros	6,80 metros				

Anexo 35 Medición de área de falla.



Anexo 36 Medición de ancho de vía.



Anexo 37 Toma de datos en campo.



Anexo 38 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1113



Anexo 39 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1119



Anexo 40 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1123



Anexo 41 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1130



Anexo 42 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1143



Anexo 43 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1146



Anexo 44 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1157



Anexo 45 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1162



Anexo 46 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1170



Anexo 47 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1173



Anexo 48 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1176



Anexo 49 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1187



Anexo 50 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1189



Anexo 51 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1194



Anexo 52 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1203



Anexo 53 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1210



Anexo 54 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1213



Anexo 55 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1215



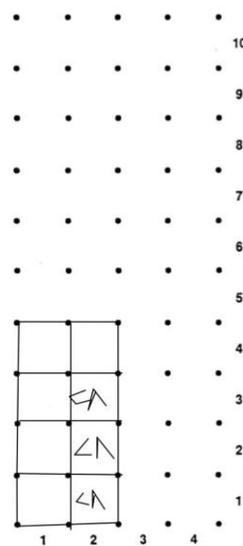
Anexo 56 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1222



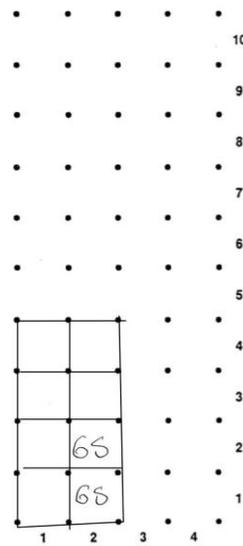
Anexo 57 tramo vial estudiado en vía de pavimento rígido # foto 1225



Anexo 58 Hoja de encuesta para metodología #foto 1113

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT				
BRANCH _____		#Foto: 1113	SAMPLE UNIT _____	
SURVEYED BY _____		DATE 24/04/2013	SAMPLE AREA _____	
Distress Types CA=concreto agrietado GS= Grieta severa F= Fisura GF= Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande			SKETCH: 	
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE
C.A.	Baja	3	38	12

Anexo 59 Hoja de encuesta para metodología #foto 1119

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT				
BRANCH _____		#Foto: 1119	SAMPLE UNIT _____	
SURVEYED BY _____		DATE 24/04/2013	SAMPLE AREA _____	
Distress Types CA=concreto agrietado GS= Grieta severa F= Fisura GF= Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande			SKETCH: 	
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE
G.S	Medio	2	25	35

Anexo 60 Hoja de encuesta para metodología #foto 1123

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT				
BRANCH _____		#Foto: 1123		SAMPLE UNIT _____
SURVEYED BY _____		DATE 29/04/2013		SAMPLE AREA _____
<p>Distress Types</p> <p>CA=Concreto agrietado GS=Grieta severa F= Fisura GF=Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande</p>				
<p>SKETCH:</p>				
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE
F.	Baja	3	38	17

Anexo 61 Hoja de encuesta para metodología #foto 1130

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT				
BRANCH _____		#Foto: 1130		SAMPLE UNIT _____
SURVEYED BY _____		DATE 29/04/2013		SAMPLE AREA _____
<p>Distress Types</p> <p>CA=Concreto agrietado GS=Grieta severa F= Fisura GF=Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande</p>				
<p>SKETCH:</p>				
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE
G.F.	Baja	3	38	30

Anexo 62 Hoja de encuesta para metodología #foto 1143

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT						
BRANCH _____		#Foto: <u>1143</u>		SAMPLE UNIT _____		
SURVEYED BY _____		DATE <u>34/04/2013</u>		SAMPLE AREA _____		
Distress Types CA=Concreto agrietado GS= Grieta severa F= Fisura GF= Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande			SKETCH: 			
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS			DENSITY %	DEDUCT VALUE
G.S.	Grande	3			38	30

Anexo 63 Hoja de encuesta para metodología #foto 1157

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT						
BRANCH _____		#Foto: <u>1157</u>		SAMPLE UNIT _____		
SURVEYED BY _____		DATE <u>34/04/2013</u>		SAMPLE AREA _____		
Distress Types CA=Concreto agrietado GS= Grieta severa F= Fisura GF= Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande			SKETCH: 			
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS			DENSITY %	DEDUCT VALUE
Bp	Medio	5			63	13

Anexo 64 Hoja de encuesta para metodología #foto 1162

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS
CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT

BRANCH _____ #foto: 1162 SAMPLE UNIT _____
 SURVEYED BY _____ DATE 24/04/2013 SAMPLE AREA _____

Distress Types					SKETCH:
CA= Concreto agrietado GS= Grieta severa F= Fisura GF= Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande					
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
G-S	Baja	5	63	44	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Anexo 65 Hoja de encuesta para metodología #foto 1170

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS
CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT

BRANCH _____ #foto: 1170 SAMPLE UNIT _____
 SURVEYED BY _____ DATE 24/04/2013 SAMPLE AREA _____

Distress Types					SKETCH:
CA= Concreto agrietado GS= Grieta severa F= Fisura GF= Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande					
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE	
F	Medio	6	75	39	10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Anexo 66 Hoja de encuesta para metodología #foto 1173

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT				
BRANCH _____		#foto: <u>1173</u>	SAMPLE UNIT _____	
SURVEYED BY _____		DATE <u>29/04/2015</u>	SAMPLE AREA _____	
Distress Types CA= Concreto agrietado GS= Grieta Severa F= Fisura GF= Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande			SKETCH: 	
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE
B. G	Bajo	2	25	9

Anexo 67 Hoja de encuesta para metodología #foto 1176

CONCRETE SURFACED ROADS AND PARKING LOTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT				
BRANCH _____		#foto: <u>1136</u>	SAMPLE UNIT _____	
SURVEYED BY _____		DATE <u>29/04/2015</u>	SAMPLE AREA _____	
Distress Types CA= Concreto agrietado GS= Grieta Severa F= Fisura GF= Grieta Fina Bp= Bache Pequeno Be= Bache grande			SKETCH: 	
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS	DENSITY %	DEDUCT VALUE
F	Medio	6	75	23

Anexo 78 Datos estudiados del programa en campo



Anexo 79 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1283



Anexo 80 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1284



Anexo 81 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1285



Anexo 82 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1286



Anexo 83 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1287



Anexo 84 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1288



Anexo 85 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1289



Anexo 86 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1290



Anexo 87 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1291



Anexo 88 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1292



Anexo 89 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1293



Anexo 90 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1294



Anexo 91 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1295



Anexo 92 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1296



Anexo 93 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1297



Anexo 94 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1298



Anexo 95 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1299



Anexo 96 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1300



Anexo 97 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1301



Anexo 98 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1302



Anexo 99 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1303



Anexo 100 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1304



Anexo 101 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1305



Anexo 102 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1306



Anexo 103 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1307



Anexo 104 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1308



Anexo 105 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1309



Anexo 106 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1310



Anexo 107 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1311



Anexo 108 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1312



Anexo 109 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1313



Anexo 110 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1314



Anexo 111 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1315



Anexo 112 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1316



Anexo 113 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1317



Anexo 114 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1318



Anexo 115 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1319



Anexo 116 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1320



Anexo 117 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1321



Anexo 118 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1322



Anexo 119 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1323



Anexo 120 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1324



Anexo 121 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1325



Anexo 122 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1326



Anexo 123 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1327



Anexo 124 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1328



Anexo 125 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1329



Anexo 126 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1330



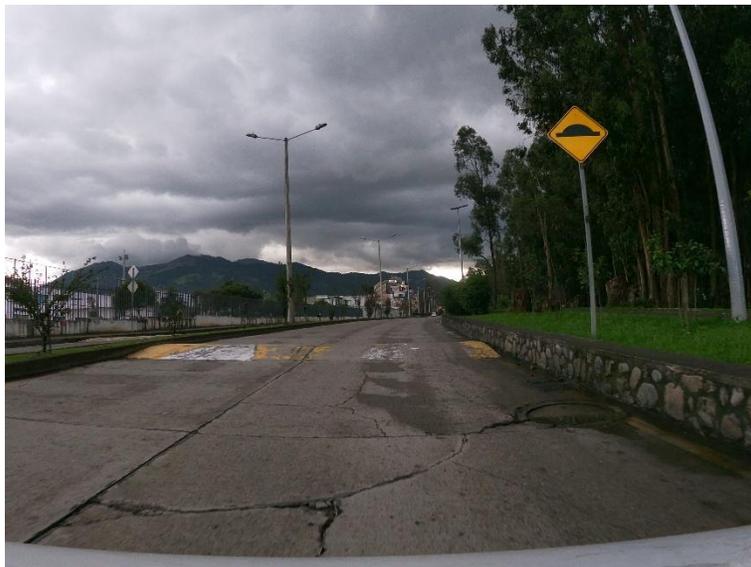
Anexo 127 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1331



Anexo 128 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1332



Anexo 129 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1333



Anexo 130 Tramo vial estudiado para señalización. #Foto 1334



Anexo 131 Código del software “Pavimenta2”

```
!pip install exifread folium opencv-python-headless seaborn ultralytics tensorflow pillow
import os
import cv2
import torch
import pandas as pd
import folium
import exifread
import matplotlib.pyplot as plt
from PIL import Image
from torchvision import transforms
from folium.plugins import MarkerCluster
import seaborn as sns
import glob
import numpy as np
from IPython.display import display, HTML, Image as ColabImage
import tensorflow as tf
import random
!pip install selenium
```

```

!apt-get install -y xvfb
!pip install pyvirtualdisplay
from selenium import webdriver
from pyvirtualdisplay import Display as PyDisplay
os.makedirs('imagenes', exist_ok=True)
os.makedirs('modelo/yolo', exist_ok=True)
os.makedirs('modelo/pavimentos', exist_ok=True)
print("Carpetas 'imagenes', 'modelo/yolo' y 'modelo/pavimentos' creadas o ya existen.")
from google.colab import files
print("Subiendo imágenes... (espera a que aparezca el botón)")
uploaded = files.upload()
image_paths = list(uploaded.keys())
print(f"{len(image_paths)} imágenes subidas")
modelo_yolo_path = 'modelo/yolo/yolov5s.pt'
if not os.path.exists(modelo_yolo_path):
    print("Descargando modelo YOLOv5s...")
    torch.hub.download_url_to_file('https://github.com/ultralytics/yolov5/releases/download/v6.0/yolov5s.pt', modelo_yolo_path)
    print("Modelo YOLOv5s descargado.")
else:
    print ("Modelo YOLOv5s ya está disponible.")
# Cargar modelo YOLOv5
modelo_yolo = torch.hub.load('ultralytics/yolov5', 'custom', path=modelo_yolo_path,
force_reload=True)
# Simular modelo de pavimentos
clases_pavimento = ['Sin Daño','Grietas Finas','Grietas Severas','Bache pequeño','Bache Grande','Fisuras','Deformaciones','Asfalto Deteriorado','Concreto Agrietado']
def modelo_pavimento_simulado(imagen_array):
    idx = random.randint(0, len(clases_pavimento) - 1)
    confianza = round (random.uniform(0.7, 1.0), 2)
    return clases_pavimento[idx], confianza

```

```

# Lista de clases de señalización (deben coincidir con las usadas al entrenar YOLO)
clases_senales = ['Señales de Advertencia', 'Señales Reglamentarias', 'Señales de Alto',
'Señales de Información', 'Paneles Informativos Viales', 'Placas Blancas con Info de Área',
'Otros']

def get_gps_data(image_path):
    with open (image_path, 'rb') as f:
        tags = exifread.process_file(f)
        gps_latitude = tags.get('GPS GPSLatitude')
        gps_longitude = tags.get('GPS GPSLongitude')
        if gps_latitude and gps_longitude:
            lat = [float(x.num) / float(x.den) for x in gps_latitude.values]
            lon = [float(x.num) / float(x.den) for x in gps_longitude.values]
            latitude = lat[0] + lat[1]/60 + lat[2]/3600
            longitude = lon[0] + lon[1]/60 + lon[2]/3600
            return latitude, longitude
        return None, None

# Clases de señales de tránsito que SÍ queremos conservar
CLASES_SENALES_YOLO = ['stop sign', 'traffic light', 'parking meter']

def detectar_senales(img_path):
    img = Image.open(img_path)
    results = modelo_yolo(img)
    df = results.pandas().xyxy[0]
    # Solo dejar las clases relacionadas con señales de tránsito
    df = df[df['name'].isin(CLASES_SENALES_YOLO)]
    df['type'] = 'Señalización'
    return df

# Simular modelo de pavimentos
clases_pavimento = [
'Sin Daño', 'Grietas Finas', 'Grietas Severas',
'Bache pequeño', 'Bache Grande', 'Fisuras',
'Deformaciones', 'Asfalto Deteriorado', 'Concreto Agrietado'

```

```

]
def modelo_pavimento_simulado(imagen_array):
    idx = random.randint(0, len(clases_pavimento) - 1)
    confianza = round (random.uniform(0.7, 1.0), 2)
    return clases_pavimento[idx], confianza
def detectar_pavimento(img_path):
    img = Image.open(img_path).resize ((224, 224))
    arr = np.array(img) / 255.0
    pav_clase, confianza = modelo_pavimento_simulado(arr)
    return pav_clase, confianza
resultados_finales = []
for path in image_paths:
    lat, lon = get_gps_data(path)
    pav_clase, pav_conf = detectar_pavimento(path)
    senales_df = detectar_senales(path)
    senales_df['image'] = path
    senales_df['gps_lat'] = lat
    senales_df['gps_lon'] = lon
    senales_df['pavimento'] = pav_clase
    senales_df['conf_pav'] = pav_conf
    if senales_df.empty:
        resultados_finales.append({
            'imagen': path,
            'pavimento': pav_clase,
            'confianza_pav': pav_conf,
            'señal': 'No detectada',
            'confianza_senal': '-',
            'gps_lat': lat,
            'gps_lon': lon
        })
    else:

```

```

for _, row in senales_df.iterrows():
    resultados_finales.append({
        'imagen': path,
        'pavimento': pav_clase,
        'confianza_pav': pav_conf,
        'señal': row['name'],
        'confianza_senal': row['confidence'],
        'gps_lat': lat,
        'gps_lon': lon
    })

df_resultados = pd.DataFrame(resultados_finales)
display(df_resultados)
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
# Asegurar que todos los valores de 'señal' están definidos
df_resultados['señal'] = df_resultados['señal'].fillna('No detectada')
# Gráfico 1: Cruce entre pavimento y señal detectada
plt.figure(figsize=(14, 6))
plot1 = sns.countplot(
    data=df_resultados,
    x='pavimento',
    hue='señal',
    palette='Set2'
)
plt.title(' Distribución de Tipos de Pavimento y Señalización Detectada')
plt.xlabel('Tipo de Pavimento o Daño')
plt.ylabel('Cantidad de Imágenes')
plt.xticks(rotation=45)
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
plt.legend(title=' Señal')
plt.tight_layout()

```

```

plt.show()
display(plot1.figure)
# Gráfico 2: Conteo solo de señales detectadas (sin cruzar con pavimento)
plt.figure(figsize=(10, 5))
plot2 = sns.countplot(
    data=df_resultados[df_resultados['señal'] != 'No detectada'],
    x='señal',
    palette='Set1'
)
plt.title('Conteo de Tipos de Señalización Vial Detectadas')
plt.xlabel('Tipo de Señal')
plt.ylabel('Cantidad')
plt.xticks(rotation=30)
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.5)
plt.tight_layout()
plt.show()
display(plot2.figure)

```