



Facultad de ingeniería
Escuela de ingeniería civil y geomática
Programa de ingeniería civil

Tesis de Grado:

Evaluación de la precisión del sistema Visualpav en la caracterización de deterioros superficiales en pavimentos asfálticos

Para optar al título de:
Ingeniero Civil

Estudiante:
Bayron Salazar Manrique
bayron.salazar@correounivalle.edu.co

Director:
Armando Orobio, Ph.D.
armando.orobio@correounivalle.edu.co

República de Colombia
Santiago de Cali
Mayo - 2022

ACTA DE APROBACIÓN DE TESIS DE GRADO



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Santiago de Cali, 11 de julio de 2022

EICG.42051.PAIC.089.2022

Estudiante

BAYRON SALAZAR MANRIQUE (Cód. 1425514)

Programa Académico de Ingeniería Civil
La Universidad.

Cordial saludo.

Su proyecto de trabajo de grado "Evaluación de la precisión del sistema visualpav en la caracterización de deterioros superficiales en pavimentos asfálticos" se encuentra aprobado para sustentación pública por parte de los evaluadores.

Para su información, adjunto copia del resultado de las evaluaciones realizadas por el Profesor Diego Duque Arango y el Ingeniero Carlos Alberto Manrique (formulario).

Cordialmente,

Prof. Carlos Alberto Madera Sierra
Director
Programa Académico de Ingeniería Civil

Estamos en **renovación** de la
Acreditación Institucional en Alta Calidad

*¡Vamos a
lograrla!*

Universidad del Valle
Ciudad Universitaria de Meléndez
Tel.: 3212100 Ext. 2467 -3396938
Apartado Aéreo 25360
Cali - Colombia

Resumen

El proyecto VisualPAV tiene como finalidad el desarrollo de un dispositivo de adquisición de datos sobre la condición superficial de pavimentos asfálticos. En este trabajo, se determinó, mediante una revisión bibliográfica, el método más idóneo para ser implementado en el sistema VisualPAV y se concluyó que el método Vizir es el más adecuado por su fácil aplicación, por la experiencia que se ha tenido con este método a nivel nacional y por ser un indicador confiable de la condición del pavimento para determinar tareas de mantenimiento y rehabilitación.

Se planteó como problema de investigación la determinación de la precisión del sistema en la caracterización de los deterioros superficiales en pavimentos asfálticos. Para lograr esto, se construyó una base de datos de deterioros con la cual se entrenó una red neuronal, obteniendo resultados favorables de acuerdo con las fuentes bibliográficas consultadas.

Adicionalmente, se determinaron las funcionalidades del software del sistema VisualPAV y se diseñó una prueba de campo para evaluar el desempeño del sistema. Para esto, se propuso una metodología estadística de comparación de datos entre una inspección manual, que se toma como Ground Truth, y la inspección automatizada que debe ser validada.

Palabras clave: Pavimento asfáltico, inspección visual de pavimentos, redes neuronales, método Vizir, método t-student.

Agradecimientos

A mi familia por haberme apoyado durante todos estos años.

A mis profesores de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática y en especial al profesor Armando Orobio por haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto.

Al profesor Bladimir Bacca y a todo el equipo de trabajo del proyecto VisualPAV.

Tabla de Contenido

	Página
1. Introducción	1
2. Problema de investigación	3
3. Objetivos	4
4. Justificación	5
5. Revisión de literatura	7
5.1. Pavimento asfáltico (<i>Asphalt Pavement</i>)	7
5.2. Inspección visual de pavimentos	8
5.3. Metodología VIZIR	8
5.3.1. Deterioros superficiales del pavimento en el método VIZIR	8
5.3.2. Procedimiento para calcular el índice de deterioro superficial . . .	15
5.4. Rehabilitación de pavimentos	24
5.5. Sistemas de gestión de pavimentos (<i>Pavement Management System</i>) . . .	25
5.6. Deep Learning y Redes Neuronales	25
5.6.1. Validación de las Redes Neuronales	27
5.7. Inspección automatizada de pavimentos	29
6. Metodología	32
6.1. Base de datos de deterioros en pavimentos asfálticos	32
6.1.1. Consecución de los datos	32
6.1.2. Proceso de etiquetado usando labeling	32
6.1.3. Proceso de etiquetado usando VIA	33
6.2. Funcionalidades del software VisualPAV	35
6.3. Pruebas en campo	35
7. Resultados	37
7.1. Bases de datos de deterioros en pavimentos asfálticos	37
7.2. Determinación de las funcionalidades del software del sistema VisualPAV	39
7.2.1. Revisión bibliográfica de la información que requieren los sistemas de gestión de pavimentos en cuanto a condición superficial y deterioros del pavimento	39
7.2.2. Sistema HDM-4	40
7.2.3. Relación entre la metodología de daños en el pavimento y el Sistema de Gestión de Pavimentos	41
7.2.4. Normas técnicas vigentes en Colombia sobre rehabilitación de pavimentos	42
7.2.5. Evaluación de la condición global del pavimento	44
7.2.6. Selección de técnicas de rehabilitación	45
7.2.7. Funcionalidades del sistema VisualPAV	47
7.2.8. Visualización de la información	50
7.3. Inspección manual y metodología estadística	52
7.3.1. Inspección manual	52

7.3.2. Metodología estadística de análisis de datos	55
8. Análisis de resultados y conclusiones	61
9. ANEXOS	62

Índice de figuras

1. Dispositivos de adquisición de datos del sistema VisualPAV.	3
2. Aspectos generales de los sistemas de gestión de pavimentos.	5
3. Estructura de un pavimento asfáltico.	7
4. Convención para la numeración de carriles.	16
5. Formato B1 de inventario de deterioros.	18
6. Convención para diligenciar la parte 2 del formato B1.	19
7. Símbolos para diligenciar la parte 3 del formato B1	20
8. Fisura de medialuna	21
9. Movimiento de tierra rotacional	21
10. Inteligencia artificial, Machine Learning y Deep Learning.	26
11. Neurona artificial.	26
12. Programación convencional vs Machine Learning.	27
13. Diagrama de Mokhtari para control de las iteraciones de entrenamiento de la red neuronal.	27
14. Etiquetado de deterioros con Labelimg	33
15. Archivo .xml creado por el software LabelImg.	33
16. Interfaz de inicio del software VIA	34
17. Definir atributos en VIA	34
18. Crear una región poligonal en VIA	35
19. Flujo de datos en la gestión de pavimentos. Tomado de AASHTO Pavement Management Guide 2012	40
20. Requerimientos del HDM-4 sobre la condición superficial del pavimento. Fuente: Matos (2018)	41
21. Condición superficial del pavimento en PAVER	42
22. Regla empírica para sellado de fisuras. Tomado de Invías 2008.	45
23. Tamaño de la malla en FPC.	49
24. Red vial visualizada con ArcGIS.	53
25. Atributos de un tramo evaluado en el software ArcGIS.	54
26. Procedimiento de inspección manual en campo.	55
27. Ejemplo de formato B1 diligenciado en campo.	55
28. Tramo de 500 metros inspeccionado en la carrera 116 entre calles 16 y 13.	56
29. Deterioros encontrados en el tramo de la cra 116.	56
30. Tramo de 1 km entre carrera 115 y 109, barrio Cañasgordas.	57
31. Baches encontrados en el tramo de la figura anterior.	57
32. Comparación entre la distribución normal y la distribución t-student. Tomada de «Statistics for Research» de Dowdy, Weardon, Chilko. 3ed - 2004.	58
33. Distribución t-student para diferentes grados de libertad. Tomado de Dowdy, 2004	59
34. Formato B2. Resumen de deterioros tipo A por sección de 100 m.	62

35.	Formato B3. Resumen de deterioros tipo B por sección de 100 m.	63
36.	Formato B4 para cálculo del índice de deterioro superficial.	64

Índice de tablas

1.	Datos nacionales de inspecciones por Invías.	1
2.	Estado de la red vial primaria a cargo del Invías. Semestre I de 2021. . . .	1
3.	Algunas metodologías de inspección visual de pavimentos asfálticos. . . .	8
4.	Deterioros superficiales del pavimento en el método VIZIR.	9
5.	Deterioros tipo A en el método VIZIR.	15
6.	Deterioros tipo B en el método VIZIR.	17
7.	Unidades de medida de los deterioros tipo A.	19
8.	Unidades de medida de los deterioros tipo B.	19
9.	Cálculo del índice de fisuración I_f y deformación I_d	22
10.	Determinación del índice de deterioro superficial preliminar.	23
11.	Corrección por reparaciones.	23
12.	Calificación final del estado de la superficie del pavimento.	23
13.	Resultados de entrenamiento entre diferentes métodos.	28
14.	Base de datos de entrenamiento de Li (2018).	28
15.	Resultados del entrenamiento de Red Neuronal obtenidos por Li.	28
16.	Comparación de los resultados obtenidos por Li con los de otros autores. .	29
17.	Ragnoli, 2018. Relación entre dispositivo electrónico y tipo de deterioro. .	31
18.	Base de datos creada con labeling	37
19.	Etiquetas generadas con VIA	38
20.	Exactitud (ACC) de modelos pre-entrenados.	39
21.	Causas de los deterioros en pavimentos asfálticos	43
22.	Deterioros tipo B en la guía de rehabilitación de 2008	44
23.	Áreas de valoración de la condición global del pavimento y sus correspon- dientes fuentes de información. Tomado de Invías 2008.	45
24.	Guía para la selección del método de reciclado de pavimentos asfálticos. Tomada de Invías 2008.	46
25.	Niveles de gravedad de los deterioros tipo A en el sistema VisualPAV . .	48
26.	Información base del Ahuellamiento en la sección de 10 metros en el formato B1.	48
27.	Información base de las fisuras longitudinales por fatiga en el formato B1.	48
28.	Niveles de gravedad de fisuras en VisualPAV.	50
29.	Niveles de gravedad para diferentes tipos de desprendimientos en el sistema VisualPAV.	50
30.	Otros deterioros superficiales en VisualPAV.	51
31.	Afloramientos en VisualPav.	52
32.	Uso de los dispositivos para controlar parámetros de nivel de gravedad. .	52
33.	Índices de deterioro superficial en el tramo de la cra 116.	56
34.	Índices de deterioro superficial en el tramo de la cra 115.	58
35.	Datos de ejemplo de inspección manual y automatizada.	59
36.	Posibles técnicas de rehabilitación de acuerdo al tipo de deterioro. Tomado de Invías 2008.	65

1. Introducción

El estado y nivel de desarrollo de la red vial de un país es un factor importante que influye en el bienestar social, las perspectivas de desarrollo de sus diferentes regiones y su competitividad en el ámbito económico. Por estos motivos, en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 se establecieron como objetivos: «fortalecer el transporte de carga y pasajeros, mejorar la seguridad de los usuarios y de la carga, y la calidad de la información para la toma de decisiones (...) más de 1400 kilómetros de carreteras 4G rehabilitadas y 15 000 km de vías rurales intervenidas»[1]. Para poder cumplir estos objetivos es necesario realizar estudios de rehabilitación de pavimentos e implementar sistemas de gestión de pavimentos, lo cual implica realizar las actividades de inspección visual de pavimentos para determinar la condición de los mismos.

En Colombia, el responsable de la administración de la red vial nacional es el Instituto Nacional de Vías INVÍAS. Los departamentos son los responsables de la red vial departamental y los municipios de la red vial municipal. la tabla 1 muestra el consolidado nacional por semestres de los pavimentos inspeccionados, donde se evidencia que hace falta un conjunto importante de información sobre la condición de las vías del país [2], mientras que la tabla 2 muestra el estado de la red vial primaria en el año 2021.

Tabla 1: Datos nacionales de inspecciones por Invías.

Semestre	Red total inspeccionada
2019 I	88.73 %
2019 II	79.25 %
2020 I	80.98 %
2020 II	80.63 %
2021 I	80.92 %

Tabla 2: Estado de la red vial primaria a cargo del Invías. Semestre I de 2021.

Condición	km	%
Muy bueno	1833.62	16.54
Bueno	3863.47	34.85
Regular	3272.59	29.52
Malo	2018.76	18.21
Muy malo	95.34	0.89
Total	11 086 km	

El proceso de recolección de información sobre el estado de las vías se realiza de forma manual de acuerdo con lo establecido en la norma técnica INV E-813-13 de Invías [3]. Por consiguiente, la evaluación de los deterioros del pavimento depende de la experiencia y criterios de los inspectores, y por este motivo podrían obtenerse resultados diferentes para un mismo proyecto. Además, el proceso de inspección visual se ve entorpecido por falta de personal capacitado y de recursos económicos. Por estas razones, algunos países están implementando sistemas de inspección visual automatizada, los cuales permiten inspeccionar la superficie del pavimento en poco tiempo, a menor costo y con mayor confiabilidad [4][5].

El proyecto de investigación VisualPAV «Sistema de integración multisensorial para la clasificación de fallas superficiales en pavimentos flexibles», es un proyecto conjunto de desarrollo tecnológico entre el Grupo de Investigación Aplicada en Construcción (GRÚA) y el Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes (PSI), financiado por la Universidad del Valle, el cual tiene como objetivo crear un dispositivo para la inspección automatizada de pavimentos flexibles.

2. Problema de investigación

En la norma técnica INV E-813-13 se establece el método VIZIR de origen francés, como el mecanismo para determinar la condición superficial de los pavimentos asfálticos. El objetivo del método es determinar el *índice de deterioro superficial* I_s , el cual es un indicador numérico del estado de la superficie del pavimento. Para calcularlo es necesario recolectar información sobre:

- El tipo de deterioro
- Extensión del deterioro
- Nivel de gravedad

En este orden de ideas, cualquier dispositivo de inspección automatizada para determinar la condición superficial de un pavimento asfáltico debe ser capaz de determinar estas tres características fundamentales.

El sistema VisualPAV consta de una cámara de escaneo de línea *Allied Vision gt 1290C* «figura 1a», un escáner láser *Hokuyo UTM-30LX* «figura 1b», un sistema de georreferenciación y un computador portátil donde se almacena y procesa la información. Todo el sistema esta armado sobre un tráiler articulado a un automóvil, el cual recorre la calzada a cierta velocidad mientras extrae los datos de la superficie del pavimento [6][7].



Figura 1: Dispositivos de adquisición de datos del sistema VisualPAV.

Para clasificar los diferentes tipos de deterioros el sistema utiliza una herramienta del Machine Learning conocida como *Red Neuronal*, la cual fue entrenada con una base de datos de imágenes digitales de deterioros en pavimentos flexibles. La cámara de escaneo de línea capta la información sobre fisuras y otros deterioros de la superficie del pavimento. Los deterioros que implican deformaciones de la superficie necesitan datos de profundidad, los cuales son adquiridos con el escáner láser. En este contexto se plantea el siguiente problema de investigación: «¿Cuál es la precisión del sistema VisualPAV en la caracterización de los deterioros superficiales de pavimentos asfálticos?».

3. Objetivos

Para dar solución al problema de investigación se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo general

Determinar la precisión del sistema VisualPAV en la caracterización de los deterioros superficiales en pavimentos asfálticos.

Objetivos específicos

1. Construir una base de datos de deterioros de pavimentos flexibles para el entrenamiento y validación de la red neuronal.
2. Definir las funcionalidades del software del dispositivo multisensorial.
3. Diseñar e implementar las inspecciones manuales de un tramo de pavimento y proponer una metodología estadística de análisis de datos para identificar diferencias significativas entre la inspección manual y una eventual inspección automatizada.

4. Justificación

El Invías ha señalado que la metodología Vizir, junto con las evaluaciones estructurales, funcionales y del drenaje, constituyen una base confiable para proyectar las obras de rehabilitación de pavimentos [3]. Por esta razón, es importante la correcta caracterización de los deterioros superficiales, pues le permitirá al sistema VisualPAV construir los mapas de deterioros y realizar valoraciones de los diferentes tramos del proyecto inspeccionado de acuerdo a los requerimientos del diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos.

Por otra parte, los sistemas de gestión de pavimentos requieren información periódicamente actualizada sobre el estado de los pavimentos, la cual sólo puede ser proporcionada mediante inspecciones visuales de la superficie del mismo [8]. El almacenamiento de la información de los deterioros en bases de datos les permitirá a los sistemas de gestión de pavimentos contar con una herramienta confiable para hacer seguimiento a los proyectos y para generar modelos de análisis del rendimiento económico, los tramos críticos, y la evolución del proyecto en el largo plazo [9]. En los sistemas de gestión de pavimentos la recolección de información es el proceso más costoso, y la calidad de los datos es el factor más crítico para la toma de decisiones. En la figura 2 «tomada de [5]» se puede ver el papel de la inspección automatizada en los sistemas de gestión de pavimentos.

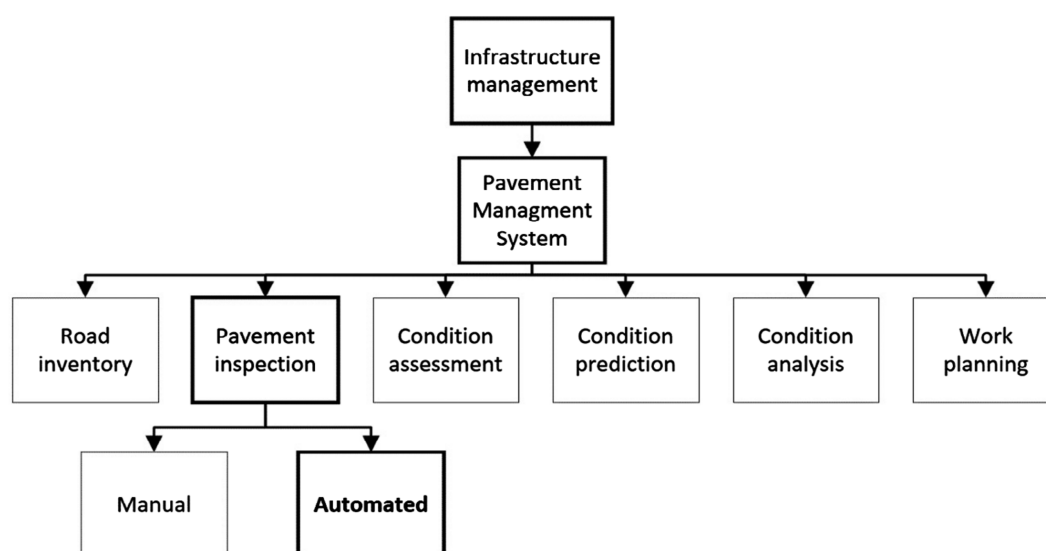


Figura 2: Aspectos generales de los sistemas de gestión de pavimentos.

Los equipos de inspección automatizada disponibles en el mercado prestan un servicio con altos estándares de calidad, sin embargo, su costo es elevado [10], y según la opinión del Invías la inspección visual de pavimentos seguirá realizándose principalmente de forma manual durante los próximos años [3]. El desarrollo del sistema VisualPAV dará la posibilidad a países en vías de desarrollo de contar con una herramienta para inspección visual automatizada a bajo costo. También servirá de apoyo para aquellos que cuenten con sistemas de gestión de pavimentos, tanto en la administración pública, como en las administraciones de las concesiones, pues tendrán la posibilidad de hacer inspecciones de pavimentos con mayor frecuencia y mayor cobertura a bajo costo.

De esta manera, el Invías podrá contar con un instrumento de soporte en la toma de decisiones para actualizar el inventario de la red vial de competencia de la nación, y la

ciudad de Santiago de Cali en particular podrá implementarlo en el marco del Plan Integral de Movilidad Urbana PIMU – Visión 2028, el cual tiene como objetivo la construcción de infraestructura vial y el mejoramiento de la existente [11].

5. Revisión de literatura

En primer lugar se revisó la literatura correspondiente a los pavimentos asfálticos, sistemas de gestión de pavimentos y las normas técnicas que se aplican en Colombia en materia de inspección visual y rehabilitación de pavimentos. Posteriormente se revisó la literatura correspondiente a Machine Learning, redes neuronales y equipos de inspección automatizada de pavimentos.

5.1. Pavimento asfáltico (*Asphalt Pavement*)

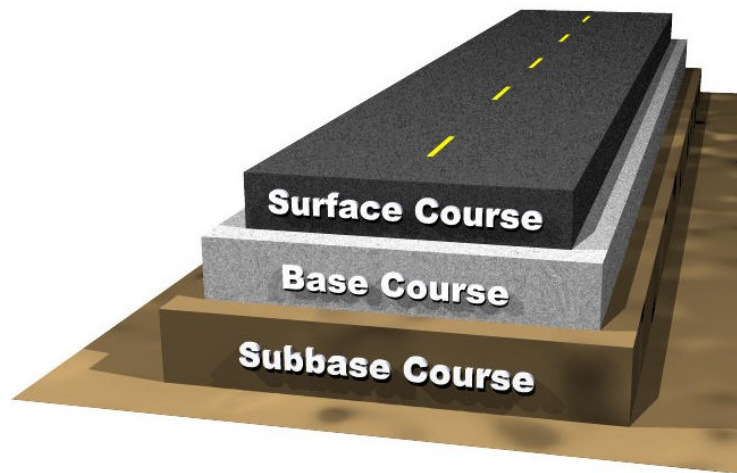


Figura 3: Estructura de un pavimento asfáltico.

Es una estructura compuesta de varias capas de materiales cada una de las cuales recibe esfuerzos de aquella que está encima y transmite una fracción de estos esfuerzos a la capa que está debajo [12]. De esta manera, el suelo de la subrasante sobre el que se apoya toda la estructura es el que menos esfuerzos recibe. En la figura 3 «tomada de [12]» se muestra una estructura típica de un pavimento asfáltico.

Las capas están ordenadas de modo que la capacidad de carga disminuye a medida que se va descendiendo. De esta forma, la capa de rodadura «surface course» es la que tiene la mayor capacidad de carga, y por tanto es la más costosa. Esta capa es la que está en contacto con el tránsito y debe proporcionar características como fricción, control del ruido, regularidad, resistencia a la deflexión, impermeabilidad y cierta pendiente para drenar el agua y evitar que llegue a la base o la subbase. Por lo general está hecha de una mezcla asfáltica en caliente «HMA». La capa de rodadura puede dividirse a su vez en tres capas; una base asfáltica, una capa intermedia y la capa de rodadura, siempre y cuando se cumpla que la capacidad de carga (módulo de elasticidad) de la capa de rodadura sea superior al de la capa intermedia y así sucesivamente [13]. La base está compuesta por material granular o material estabilizado con cemento. La subbase funciona como soporte estructural y protege a la base de los finos provenientes del suelo de la subrasante. Los materiales de la subbase son de menor calidad que los de la base, pero de mejor calidad que los de la subrasante.

5.2. Inspección visual de pavimentos

Procedimiento no invasivo que consiste en recorrer la calzada y levantar un inventario de los deterioros en la superficie del pavimento con el fin de determinar su condición. Se puede realizar de forma manual, automática o semiautomática. En Colombia se ha adoptado el método Vizir [3], aunque también se ha usado la metodología PCI desarrollada por la *American Society for Testing and Materials ASTM* [14]. La tabla 3 muestra algunas metodologías desarrolladas por otros países, las cuales incluyen diferentes formas de esquematizar la información obtenida mediante gráficos y software [15].

Tabla 3: Algunas metodologías de inspección visual de pavimentos asfálticos.

PAÍS Y/O ESTADO	DOCUMENTO GUÍA	FORMATO DE DATOS	FORMATO GRÁFICO
España [ref. B.8]	Guía para la realización de la inspección visual de firmes	•	•
Canada, British Columbia Ministry of Transportation[ref. B.9]	Pavement surface condition rating manual	•	•
USA. SHRP [ref. B.5] [ref. B.6]	Distress identification manual	•	•
Brasil, Ministerio dos Transportes [ref. B.10]	Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos- Procedimento	•	•
Malaysia [ref. B.11]	A guide to visual assessment of flexible pavement surface conditions	•	No se reporta
Chile, Dirección de la Vialidad MOP [ref. B.12]	Método de Gestión Vial	•	
WSDOT, Washington State Department of Transportation [ref. B.7]	Pavement surface condition rating manual	•	
VDOT, Virginia State Department of transportation [ref. B.13]	Pavement condition rating form	•	

5.3. Metodología VIZIR

El método VIZIR fue desarrollado en Francia en 1991 por el *Laboratorio de Puentes y Carreteras LCPC*. Es importante tener en cuenta que el índice de deterioro superficial que se obtiene mediante este método es un indicador numérico de la condición superficial del pavimento, mas no de su capacidad estructural, ni de la resistencia al deslizamiento, ni de la rugosidad de la rodadura. Este método aplica solamente para carreteras y no para parqueaderos [3].

5.3.1. Deterioros superficiales del pavimento en el método VIZIR

El método VIZIR incluye una guía para ayudar a los técnicos en campo a identificar los deterioros del pavimento. Adicionalmente, el Invías desarrolló en el año 2006 su propio manual [16], el cual incluye las causas y posible evolución de cada uno de los deterioros del pavimento, las cuales se citan en la tabla 4. Las imágenes fueron tomadas del anexo B de [17] y de la base de datos que se construyó para el objetivo específico 1.

Tabla 4: Deterioros superficiales del pavimento en el método VIZIR.

Ahuellamiento (AH)	
 Ahuellamiento	Causas: Deformación plástica del concreto asfáltico, deformación de la subrasante por fatiga de la estructura ante repetición de cargas, compactación inadecuada durante el proceso constructivo, agregados demasiado redondeados. Posible evolución: Piel de Cocodrilo, Desprendimientos.
Depresiones longitudinales o transversales (DL),(DT)	
 Depresión o Hundimiento Longitudinal	Causas: Asentamiento en la subrasante, mala compactación de terraplenes, deficiencias en el drenaje, inestabilidad de la banca, tránsito muy pesado. Posible evolución: Fisuración, desprendimientos, movimientos en masa.
Fisura longitudinal por fatiga (FLF)	
	Causas: Esfuerzos de tensión excesivos que sobrepasan la capacidad estructural de la calzada. Se manifiesta en la huella del tránsito. Otra de sus causas puede ser un espesor insuficiente de la capa de rodadura. Posible evolución: Piel de cocodrilo, descascaramiento.
Fisuras piel de cocodrilo (FPC)	
	Causas: Esfuerzos de tensión excesivos que sobrepasan la capacidad estructural de la calzada. Repeticiones de carga en un mismo sitio superiores a las admisibles. Se manifiestan principalmente en la huella del tránsito. Posible evolución: descascaramiento, baches.

Bacheos y parcheos (B)	
	Causas: En el método Vizir los bacheos y parcheos, así estén en buen estado cuentan como deterioro, pues indica que hubo un deterioro en el pasado. Se conoce como parcheo a las intervenciones de la capa asfáltica, mientras que el bacheo involucra la base y la subbase. En el método VIZIR se contabilizan ambos mediante un solo código. Dentro de las causas están las deficiencias en el drenaje y reparaciones anteriores mal realizadas. Posible evolución: Si la reparación no se realizó adecuadamente pueden volver a aparecer por reflexión las fisuras y la piel de cocodrilo, así como deformaciones por mal proceso constructivo.
Fisura longitudinal (FLJ) o transversal por junta de construcción (FTJ)	
 Fisura Transversal de Junta de construcción	Causas: Proceso constructivo deficiente de las juntas de construcción. Reflejo de juntas de pavimento rígido ubicado en la capa inferior. Posible evolución: Descascaramientos y baches.
Fisuras de contracción térmica (FCT)	
	Causas: Contracción y dilatación del pavimento por cambios de temperatura. Posible evolución: Descascaramientos, piel de cocodrilo.

Fisuras parabólicas (FP)	
	Causas: Mezcla asfáltica de mala calidad. Mala adherencia entre la carpeta asfáltica y la base. Se presenta en zonas de frenado y aceleración de los vehículos. Posible evolución: Baches, descascaramientos, hundimientos.
Fisuras de borde (FB)	
	Causas: Ausencia de berma. Mala compactación en los bordes de la calzada. Se localizan entre 30 y 60 cm del borde de la calzada y suelen ser longitudinales. Posible evolución: desprendimiento del borde o descascaramiento.
Ojos de pescado (O)	
	Causas: Retención de agua en zonas fisuradas. Se presentan también por la evolución de la piel de cocodrilo. Posible evolución: Pérdida de las capas de base y subbase, falla total del pavimento.

Desplazamiento de la mezcla (DM)	
 Desplazamiento de Mezcla	Causas: Agregados redondeados, exceso de asfalto en la mezcla, asfalto muy blando. Possible evolución: Piel de cocodrilo, ahuellamiento, descascaramiento.
Pérdida de ligante (PL)	
 Pérdida de Ligante	Causas: La acción del tránsito y los agentes climáticos ocasionan que el ligante que envuelve a los agregados se vaya perdiendo y queden los agregados expuestos, incrementando la rugosidad del pavimento y haciendo el tránsito incómodo y ruidoso.
Pérdida de agregados (PA)	
 Pérdida de Agregados	Causas: Deficiencia en el proceso constructivo de tratamientos superficiales de mantenimiento. Falta de adherencia entre agregado y asfalto. Uso de agregados contaminados con finos. deficiencia de compactación de la carpeta asfáltica. Contaminación de la superficie con aceite o gasolina.

Descascaramiento (D)	
	Causas: Bajo espesor de la rodadura. Riego de liga deficiente. Alta permeabilidad de la mezcla asfáltica. Mala limpieza durante tratamiento superficial. Posible evolución: Piel de cocodrilo, baches.
Pulimiento de agregados (PU)	
	Causas: Utilización de agregados calizos y susceptibilidad de algunos agregados al pulimiento.
Exudación (EX)	
	Causas: Cantidad excesiva de asfalto, el cual asciende a la superficie por diferencia de densidad.
Afloramiento de mortero (AM)	
	Causas: Ausencia de drenaje interno. Posible evolución: Piel de cocodrilo, descascaramiento, baches.

Afloramiento de agua (AA)	
	Causas: Ausencia de drenaje interno, filtración de aguas que salen a la superficie a través de las fisuras. Posible evolución: Piel de codrilo, descascaramiento, baches.
Desintegración de los bordes del pavimento (DB)	
	Causas: Bermas no revestidas, tránsito cerca a los bordes de la calzada.
Escalonamiento entre calzada y berma (ECB)	
	Causas: Consolidación de las capas de la estructura de la berma, circulación sobre bermas no revestidas, inestabilidad de taludes.

Erosión de las bermas (EB)	
	Causas: Inadecuado sistema de drenaje superficial.

5.3.2. Procedimiento para calcular el índice de deterioro superficial

Para determinar el índice de deterioro superficial sólo se tienen en cuenta los deterioros superficiales debidos a deficiencias en la capacidad estructural de la calzada, bien sea en las diversas capas y el suelo de subrasante o solo en las capas asfálticas, es decir, contempla las deformaciones y agrietamientos debidos a la fatiga del pavimento. A estos deterioros se les denomina de categoría A y sus niveles de gravedad se describen en la tabla 5.

Tabla 5: Deterioros tipo A en el método VIZIR.

DETERIORO	NIVEL DE GRAVEDAD		
	①	②	③
Ahuellamiento y otras deformaciones estructurales	Sensible al usuario, pero poco importante Prof. < 20 mm	Deformaciones importantes. Hundimientos localizados o ahuellamientos. 20 mm ≤ Prof. ≤ 40 ≤ mm	Deformaciones que afectan de manera importante la comodidad y la seguridad de los usuarios. Prof. > 40 mm
Grietas longitudinales por fatiga	Grietas finas en la huella de rodamiento. <6 mm	Grietas abiertas y a menudo ramificadas.	Grietas muy ramificadas, y/o muy abiertas. Bordes de grietas ocasionalmente degradados.
Piel de cocodrilo	Piel de cocodrilo formada por mallas (> 500 mm) con grietas finas, sin pérdida de materiales.	Mallas más densas (< 500mm), con pérdidas ocasionales de materiales, desprendimientos y ojos de pescado en formación.	Mallas con grietas muy abiertas y con fragmentos separados. Las mallas son muy densas (<200 mm), con pérdida ocasional o generalizada de materiales.
Bacheos y parcheos	Intervención de superficie ligada a deterioros tipo B.	Intervenciones ligadas a deterioros tipo A	
		Comportamiento satisfactorio de la reparación.	Ocurrencia de fallas en las zonas reparadas.

Los deterioros de tipo funcional «categoría B» no se tienen en cuenta para el cálculo del índice, pues surgen por deficiencias en el proceso constructivo y por condiciones locales particulares que se hacen visibles con el tránsito, además, quedan resueltas cuando se reparan los deterioros tipo A. Sin embargo, se debe determinar su extensión y nivel de gravedad con la ayuda de la tabla 6, y deben quedar registrados en el formato de inspección.

■ Convención para la numeración de carriles

Los carriles se numeran de izquierda a derecha en el sentido de avance del abscisado (PR). Por ejemplo, si tiene dos carriles el número 1 corresponde al carril izquierdo y el 2 al carril derecho. Si se tiene una doble calzada se empieza la numeración en la calzada izquierda teniendo en cuenta el sentido de avance del abscisado, como se ve en la figura 4.

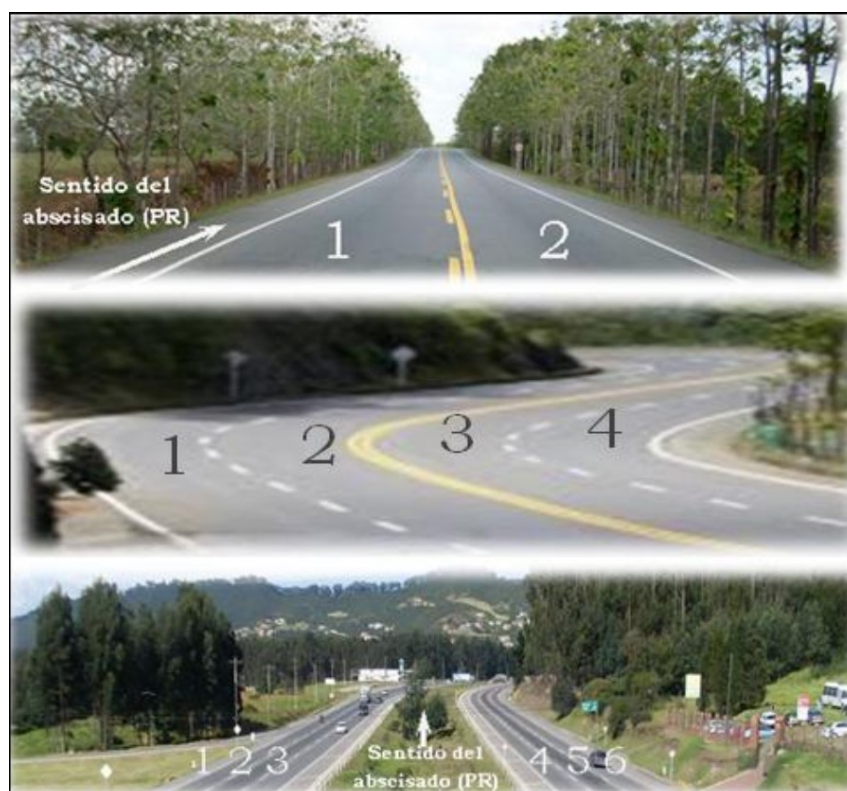


Figura 4: Convención para la numeración de carriles.

■ Equipos

- Formato B1 de registro de información.
- Rueda odométrica manual con aproximación de 10 mm.
- Flexómetro con marcas de 1 mm.
- Regla de 3 metros.
- Regla para medir la profundidad del ahuellamiento.
- Cámara fotográfica o de video.
- Elementos de seguridad: cascos, chalecos, conos reflectivos.

Tabla 6: Deterioros tipo B en el método VIZIR.

DETERIORO		NIVEL DE GRAVEDAD				
		①		②		③
Grietas longitudinales de junta de construcción		Fina y única (< 10 mm)	– Ancha (≥ 10 mm) sin desprendimiento o – Fina ramificada		Ancha con desprendimientos o ramificada	
Grietas de contracción térmica.		Grietas finas	Anchas sin desprendimiento, o finas con desprendimientos o fisuras ramificadas		Anchas con desprendimientos	
Grietas parabólicas.		Grietas finas	Anchas sin desprendimientos		Anchas con desprendimientos	
Grietas de borde		Grietas finas	Anchas sin desprendimientos		Anchas con desprendimientos	
Abultamientos		h< 20 mm	20 mm ≤ h ≤ 40 mm		h > 40 mm.	
Ojos de pescado*(por cada 100 m)	Cantidad.	< 5	5 a 10	< 5	> 10	5 a 10
	Diámetro (mm)	≤ 300	≤ 300	≤ 1000	≤ 300	≤ 1000
Desprendimientos: – Pérdida de película de ligante. – Pérdida de agregado		Pérdidas aisladas	Pérdidas continuas		Pérdidas generalizadas y muy marcadas	
Descascaramiento	Prof.(mm)	≤ 25	≤ 25	> 25	> 25	
	Área(m²)	≤ 0.8	> 0.8	≤ 0.8	> 0.8	
Pulimento agregados		No se definen niveles de gravedad				
Exudación		Puntual, área específica	Continúa sobre las trayectorias por donde circulan las ruedas del vehículo.		Continua y muy marcada, en diversas aéreas.	
Afloramientos: – De mortero – De agua		Localizados y apenas perceptibles	Intensos		Muy intensos	
Desintegración de los bordes del pavimento		Inicio de la desintegración, sectores localizados	La calzada ha sido afectada en un ancho de 500 mm o más.		Erosión extrema que conduce a la desintegración del revestimiento asfáltico	
Escalonamiento entre calzada y berma		Desnivel entre 10 y 50 mm	Desnivel entre 50 y 100 mm		Desnivel superior a 100 mm	
Erosión de las bermas		Erosión incipiente	Erosión pronunciada		La erosión pone en peligro la estabilidad de la calzada y la seguridad de los usuarios.	
Segregación**		No se definen niveles de gravedad				

* Cuando el número de ojos de pescado supere el número y el tamaño descritos en la tabla, se deberán enfrentar como deterioros tipo A

** la segregación no está incluida como deterioro por el método VIZIR. Sin embargo, para los efectos de la aplicación de la presente norma, se sugiere considerarla

■ Inventario de deterioros

El inventario se hace de manera independiente para cada calzada, la cual se divide en secciones de 100 metros, empezando a partir de un PR del proyecto que coincida con un múltiplo de 100. De no ser posible esto, por ejemplo, si la primera sección empieza en el PR 1+015, entonces la primera sección a evaluar será de 85 metros desde PR 1+015 hasta PR 1+100, y a partir de allí se continúa con las secciones de 100 metros que coinciden con el abscisado de la calzada. Se empieza la inspección de la calzada en el sentido de avance del abscisado y se va diligenciando el formato B1 que se muestra en la figura 5.

FORMATO B1. REGISTRO DE CAMPO. INVENTARIO DE DETERIOROS EN PAVIMENTOS ASFALTICOS DE CARRETERAS

Nombre de la carretera: _____ Proyecto: _____ Fecha de inspección: _____ Levantado por: _____

Código de la carretera: PR: al PR: Tipo de vía: Tipo de Sección: Borma: ☐ SI ☐ NO ☐ Existencia de Árboles: ☐ SI ☐ NO ☐

Nivel de gravedad: _____ Ancho de calzada (m): _____ Número de Carriles: _____ Carril Auscultado: _____

Longitud (m), Área (m²) y/o profundidad (mm) [Descascaramiento] **Ahuellamiento

Hoja: _____ de: _____

PR	Abscisa (m)										
Deterioro Tipo A Construcción	Ahuellamiento. AH										
	Depresiones o hundimientos longitudinales. DL										
	Depresiones o hundimientos transversal. DT										
	Fisuras longitudinales. FL										
	Fisuras piel de cocodrilo. FPC										
	Bacheos y parcheos. B										
Deterioro Tipo B Conservación	Fisura longitudinal junta de construcción. FLJ										
	Fisura transversal junta de construcción. FTJ										
	Fisura de contracción térmica. FCT										
	Fisuras parabólicas. FP										
	Fisuras de Borda. FB										
	Ojo de pescado. O										
	Desplazamiento o abultamiento o ahuellamiento de mezcla. DM										
	Pérdida de la película de ligante. PL										
	Pérdida de agregado. PA										
	Descascaramiento. D										
	Pulimento de agregados. PU										
	Exudación. EX										
	Afloramiento de mortero. AM										
	Afloramiento de agua. AA										
	Desintegración de bordes de pavimento. DB										
	Escalonamiento entre calzada y borma. ECB										
	Erosión de las bermas. EB										
	Segregación. S										

Observaciones: _____

Parte 1 **Parte 2** **Parte 3** **Parte 4**

FORM B1 - FEB 05

Figura 5: Formato B1 de inventario de deterioros.

Parte 1: Se registra la información general de la carretera que se está inspeccionando. Se debe especificar si la calzada cuenta o no con borma, pues, como se vio en la tabla 4, hay algunos deterioros asociados a la condición de estas. Se debe escribir el PR de inicio y el PR final para la sección de 100 metros. El campo “tipo de vía” se refiere a las vías primarias, secundarias o terciarias. El campo “tipo de sección” se refiere a las secciones de corte, terraplén o sección mixta.

Parte 2: Cada sección de 100 metros se divide en unidades de 10 metros, es decir, por cada página del formato se tiene una sección de 100 metros. Las unidades de medida de la extensión de los deterioros vienen dadas por las tablas 7 y 8 para tipo

A y B respectivamente. Las cuadrículas correspondientes a cada tipo de deterioro se diligencian de acuerdo a las convenciones de la figura 6.

Tabla 7: Unidades de medida de los deterioros tipo A.

NOMBRE DEL DETERIORO	CÓDIGO	UNIDAD DE MEDIDA
Ahuellamiento	AH	m
Depresiones o hundimientos longitudinales	DL	m
Depresiones o hundimientos transversales	DT	m
Fisuras longitudinales por fatiga	FLF	m
Fisuras piel de cocodrilo	FPC	m
Bacheos y parcheos	B	m

Tabla 8: Unidades de medida de los deterioros tipo B.

NOMBRE DEL DETERIORO	CÓDIGO	UNIDAD DE MEDIDA
Fisura longitudinal de junta de construcción	FLJ	m
Fisura transversal de junta de construcción	FTJ	m
Fisuras de contracción térmica	FCT	m
Fisuras parabólicas	FP	m
Fisura de borde	FB	m
Ojos de pescado	O	un
Desplazamiento o abultamiento o ahuellamiento de la mezcla	DM	m
Pérdida de la película de ligante	PL	m
Pérdida de agregados	PA	m
Descascaramiento	D	m ²
Pulimento de agregados	PU	m
Exudación	EX	m
Afloramiento de mortero	AM	m
Afloramiento de agua	AA	m
Desintegración de los bordes del pavimento	DB	m
Escalonamiento entre calzada y berma	ECB	m
Erosión de las bermas	EB	m
Segregación	S	m

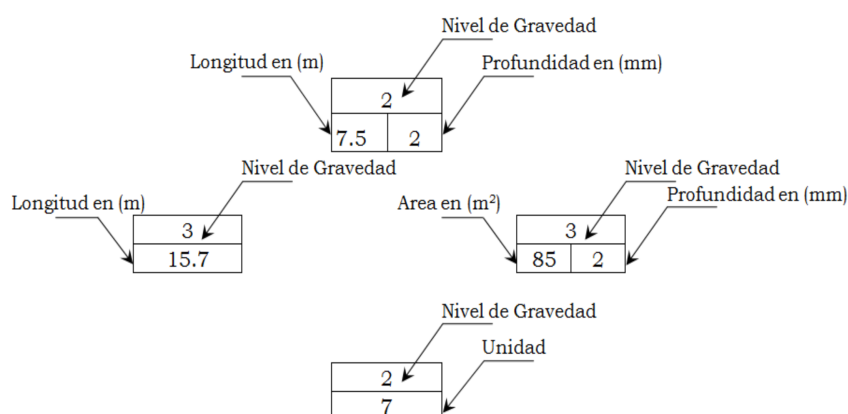


Figura 6: Convención para diligenciar la parte 2 del formato B1.

Parte 3: Es un croquis de la sección evaluada de 100 metros en la cual se introducen los símbolos correspondientes a los deterioros presentes en la figura 7. Algunos deterioros tipo B como el pulimento de agregados pueden estar presentes a lo largo de toda la sección, en cuyo caso no es necesario consignarlo en el croquis, sino que se deja como observación en la parte 4.

Ahuellamiento		Pérdida de película de ligante	PL
Depresiones o hundimiento longitudinal		Pérdida de agregado	
Depresiones o hundimiento transversal		Descascaramiento	
Fisuras piel de cocodrilo		Pulimento de agregados	
Bacheos y parcheos		Exudación	
Fisuras longitudinales de junta de construcción		Afloramiento de mortero	AM
Fisuras transversal de junta de construcción		Afloramiento de agua	AA
Fisura de contracción térmica		Desintegración de los bordes del pavimento	DB
Fisuras parabólicas		Escalonamiento entre calzada y berma	
Fisuras de borde		Erosión de bermas	EB
Ojos de pescado	O	Segregación	S
Abultamiento o desplazamiento de la mezcla			

Figura 7: Símbolos para diligenciar la parte 3 del formato B1

Parte 4: Observaciones. Son las anotaciones de interés que el inspector considere necesario dejar por escrito para tener un panorama más claro sobre la sección evaluada.

■ Otras consideraciones sobre el levantamiento del inventario

- Para las fisuras longitudinales por fatiga no existe un parámetro numérico para determinar los niveles de gravedad 2 y 3.
- El ahuellamiento se debe medir para cada carril cada 5 metros. Para las unidades de 10 metros se tomará como representativo el mayor valor medido. Igualmente, para las secciones de 100 metros se tomará como representativo el mayor valor entre los valores de las unidades de 10 metros.
- Para determinar el nivel de gravedad de los bacheos y parcheos es necesario saber de antemano si la intervención está ligada a deterioros tipo A o tipo B.

- Las fisuras de contracción térmica, las fisuras parabólicas, las fisuras de borde, la pérdida de ligante, la pérdida de agregados, la exudación, los afloramientos de mortero y de agua, y la erosión de las bermas no definen sus niveles de gravedad de acuerdo a un parámetro numérico.
- Para el pulimiento de agregados y la segregación no existen niveles de gravedad.
- Según el método, el único deterioro cuya extensión se mide en metros cuadrados es el descascaramiento, el cual es un deterioro tipo B.
- Los “ojos de pescado”, se miden por unidades. La nota al pie de la tabla 3 dice que si el número de ojos de pescado excede el número y tamaño descritos se deben enfrentar como deterioros tipo A. Sin embargo, no se especifica si los ojos de pescado se contabilizan en el índice de fisuramiento I_f o en el índice de deformación I_d .
- Los agrietamientos en media luna debidos a la pérdida de la banca «figura 8», los levantamientos de la calzada por la influencia de un movimiento de tierra rotacional «figura 9», los deterioros por consolidación de material de terraplén o por terraplenes de baja capacidad portante y las deformaciones por contracto-expansión del suelo no son tenidas en cuenta por el método VIZIR.



Figura 8: Fisura de medialuna



Figura 9: Movimiento de tierra rotacional

- En el marco de los estudios de rehabilitación de pavimentos es útil calcular el índice de deterioro superficial para tramos de 500 y 1000 metros de longitud.

- La “Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras” del Invías, exige para el procesamiento y presentación de la información los formatos Excel B2, B3 y B4, figuras 34, 35 y 36 respectivamente [17].
- El formato B2 es un resumen de los deterioros tipo A con su respectivo absicado. En cada fila se toman secciones de 100 metros. En el campo “nivel de gravedad representativo G_R ” se establece un promedio ponderado entre los diferentes tipos de deterioros con sus diferentes niveles de gravedad de la siguiente forma:

$$G_R = \frac{L_1 + 2L_2 + 3L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad (1)$$

Donde L_i es la longitud que tiene el deterioro con gravedad i dentro de la sección. La gravedad del deterioro debe ser número entero, así que se redondea de acuerdo al siguiente criterio: si $G_R < 1,5$ se toma 1. Si $1,5 \leq G_R < 2,5$ se toma 2. Si $G_R \geq 2,5$ se toma 3.

■ Cálculo del índice de fisuración I_f

Con la información consignada en el formato B1 se procede a calcular el índice de deterioro superficial para cada sección de 100 metros. El formato B4 exigido en [17] es una herramienta muy útil para el cómputo del índice de deterioro superficial. En primer lugar, debe calcularse el índice de fisuración y el índice de deformación, y su combinación será el índice de deterioro superficial.

El índice de fisuración es un indicador numérico entre 1 y 5. Se calcula separadamente para las fisuras longitudinales por fatiga (FLF) y las fisuras piel de cocodrilo (FPC) y se escoge el mayor entre estos. La extensión se calcula como porcentaje con base en las secciones de 100 metros de calzada. En el caso de carreteras doble calzada se considera cada calzada por separado. Si hay varios niveles de gravedad en la sección de 100 metros, entonces se usa la ecuación 1 para calcular la gravedad representativa. I_f será la intersección entre la extensión y la gravedad representativa, tal como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9: Cálculo del índice de fisuración I_f y deformación I_d .

Gravedad \ Extensión	0 a 10 %	10 a 50 %	>50 %
1	1	2	3
2	2	3	4
3	3	4	5

■ Cálculo del índice de deformación I_d

También es un indicador numérico entre 1 y 5. Se calcula separadamente para el ahuellamiento (AH), las depresiones o hundimientos longitudinales (DL), y las depresiones o hundimientos transversales (DT). La extensión y el nivel de gravedad se determinan de forma igual que en el caso del índice de fisuración. El I_d será el resultado de la intersección entre la extensión y el nivel de gravedad representativo de acuerdo con la tabla 9.

■ Índice de deterioro superficial preliminar

Una vez calculados I_f e I_d se usa la tabla 10 para calcular el primer valor aproximado de I_s . Si en la zona de estudio no había ninguna fisura ni deformación, entonces el valor preliminar de I_s es cero, y se pasa a calcular la corrección por reparación. Si la primera calificación de I_s da como resultado 7, entonces no se hace la corrección por reparación y se determina directamente I_s .

Tabla 10: Determinación del índice de deterioro superficial preliminar.

$I_f \backslash I_d$	0	1-2	3	4-5
0	1	2	3	4
1-2	3	3	4	5
3	4	5	5	6
4-5	5	6	7	7

■ Corrección por reparaciones

Si en los 100 metros de la sección estudiada se han realizado bacheos y parcheos, entonces se debe hacer una corrección en función de la calidad y extensión de estos trabajos. Para determinar el nivel de gravedad de los bacheos y parcheos se usa la tabla 5. Para determinar la corrección por reparaciones se usa la tabla 11 aplicando los criterios ya descritos para determinar su extensión y gravedad.

Tabla 11: Corrección por reparaciones.

Gravedad \ Extensión	0 a 10 %	10 a 50 %	>50 %
1	0	0	0
2	0	0	+1
3	0	+1	+1

■ Índice de deterioro superficial I_s

Una vez hecha la corrección por reparaciones el resultado obtenido es el **índice de deterioro superficial** de la sección de 100 metros que se ha estudiado.

■ Evaluación del resultado

El índice de deterioro superficial es un valor numérico entre 1 y 7, y se usa para calificar la superficie del pavimento de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 12: Calificación final del estado de la superficie del pavimento.

I_s	Estado de la superficie
1-2	Bueno
3-4	Regular
5-7	Malo

- **Bueno:** Pavimentos con buen aspecto general que solo requieren mantenimientos de rutina.

- **Regular:** Presentan fisuramientos de origen estructural y pocas o ninguna deformación, o bien, pavimentos con deformaciones de alguna importancia, pero sin fisuramientos. Se requieren tratamientos de rehabilitación de mediana intensidad.
- **Malo:** Pavimentos con graves deformaciones y fisuramientos de origen estructural que requieren trabajos importantes de rehabilitación.

5.4. Rehabilitación de pavimentos

Una vez terminada la inspección visual del pavimento se deben realizar otros estudios para establecer los niveles de tránsito, y la condición del drenaje y de la subrasante. Con esta información se puede iniciar el diseño de la rehabilitación del pavimento, la cual se realiza cuando existen una o más de las siguientes condiciones: incomodidad para la circulación vehicular, exceso de defectos superficiales, reducción de adherencia entre la calzada y los neumáticos de los vehículos, necesidad excesiva de servicios de mantenimiento rutinario, costos de operación elevados para los usuarios, capacidad inadecuada para las solicitudes del tránsito previsto. La rehabilitación de pavimentos es un mejoramiento funcional o estructural del pavimento para prolongar la vida de servicio y mejorar la comodidad y seguridad de los usuarios. La rehabilitación se compone del conjunto denominado como 4R:

- **Restauración:** Mejoramiento de la condición superficial del pavimento sin aumentar la capacidad estructural.
- **Refuerzo:** Colocación de capas adicionales de pavimento bien sea para mejorar la capacidad estructural o para mejorar el nivel de servicio.
- **Reciclado:** las capas de la estructura existente son reutilizadas agregando nuevos materiales que mejoran la resistencia y comportamiento del pavimento.
- **Reconstrucción:** Reemplazo total o parcial de la estructura del pavimento para que pueda funcionar de acuerdo a nuevas demandas de tránsito.

Las actividades de mantenimiento rutinario no hacen parte de la rehabilitación de pavimentos. Para la rehabilitación de pavimentos en Colombia el Invías propone un proceso que consta de seis etapas. En la primera etapa se recolecta la información del proyecto y se hacen ensayos de laboratorio, muestreo de materiales, pruebas de deflexión y otros. En la etapa 2 se hace la “evaluación de la condición global del pavimento” donde se tienen en cuenta los deterioros superficiales, la condición del drenaje, la evaluación estructural y funcional. En la etapa 3 se selecciona la técnica de rehabilitación de acuerdo a la información recolectada en los pasos anteriores. En la etapa 4 se combinan las técnicas seleccionadas en la etapa 3, se diseña la rehabilitación y se seleccionan los materiales para las obras. En la etapa 5 se comparan económicamente las estrategias preseleccionadas. En la etapa 6 se consideran los factores no monetarios y se selecciona la estrategia final a implementar.

5.5. Sistemas de gestión de pavimentos (*Pavement Management System*)

La AASHTO define los PMS como un "proceso estratégico y sistemático de operación, mantenimiento, mejoramiento y expansión efectiva de los activos físicos a lo largo de todo su ciclo de vida. Se enfoca en las prácticas de negocios y de ingeniería para asignar y utilizar los recursos con el objetivo de tomar mejores decisiones con base en información de calidad y objetivos bien definidos." [18].

Según la norma técnica ASTM-E-1166 [19], sus principales componentes a nivel de red son:

- Localización (geo-referenciación).
- Inventario de pavimentos: geometría, estructura del pavimento, historia constructiva, condición funcional y de drenaje.
- Condición de los pavimentos: deterioros, rugosidad, calidad de la rodadura, resistencia al deslizamiento.
- Características del tránsito: tipos de vehículos, volúmenes, cargas, accidentalidad.
- Medio ambiente: climatología y rango de variaciones de la temperatura del pavimento.
- Costos: costo de construcción de acuerdo al tipo de pavimento, mantenimiento y rehabilitación, costos de operación.
- Bases de datos: integración de toda la información a nivel de red. El análisis de los datos debe transformarse en información útil para la toma de decisiones.
- Retroalimentación: los datos sobre rendimiento y costos sirven para estimar necesidades, priorizar proyectos, evaluar las tareas de mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción.

En la actualidad funcionan con base en programas de software como HDM-4, Micro-paver y Viasoft.

5.6. Deep Learning y Redes Neuronales

La inteligencia artificial computacional es la rama de la informática que se encarga del desarrollo de sistemas que puedan automatizar las tareas intelectuales que normalmente realizan los humanos. Una de sus principales ramas es el Machine Learning el cual permite a las computadoras aprender por sí mismas, es decir, sin haber sido explícitamente programadas. Es especialmente útil para solucionar problemas que son difíciles de formular con la programación convencional. Dentro del Machine Learning, existe a su vez una rama que se conoce como Deep Learning cuyo eje central son las Redes Neuronales. En la figura 10 tomada de [20] se aprecia la relación entre estas.

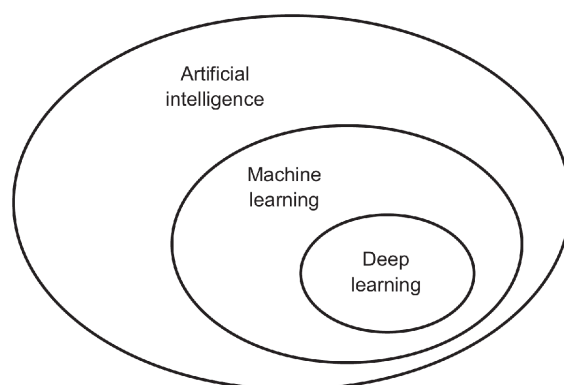


Figura 10: Inteligencia artificial, Machine Learning y Deep Learning.

Los problemas de percepción, como la clasificación de imágenes, pueden ser solucionados mediante diferentes herramientas de Machine Learning. En particular, las Redes Neuronales han resultado ser las más pertinentes para tareas de clasificación de imágenes de deterioros de pavimentos asfálticos [21].

Las Redes Neuronales «Artificial Neural Network ANN» son una forma de procesamiento de información inspirada vagamente en el funcionamiento de las neuronas del cerebro humano. La unidad básica es la neurona, la cual se compone de unos datos de entrada o Input, como se ve en la figura 11, donde cada uno de estos datos tiene un peso relativo «Weights».

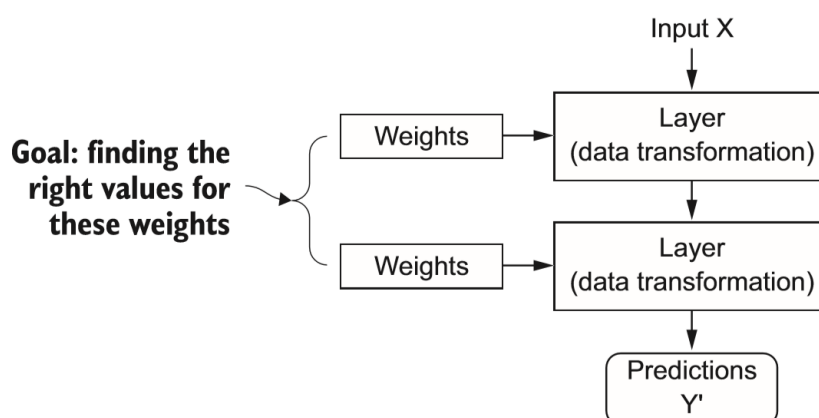


Figura 11: Neurona artificial.

La predicción o salida de la neurona es la función de activación:

$$a = f\left(\sum_{i=0}^n x_i w_i\right) \quad (2)$$

Las neuronas están unidas entre sí, estableciendo, incrementando o disminuyendo la activación de las neuronas adyacentes. En el campo del reconocimiento de imágenes digitales, el Deep Learning es capaz de aprender por sí mismo a identificar ciertos tipos de objetos si se le proporciona una base de datos que los describa por completo. Por ejemplo, si se le proporciona un conjunto de imágenes «Input» de fisuras de pavimentos y se les asignan sus respectivas salidas o etiquetas «por ejemplo “fisura”», entonces se podrán determinar las funciones de peso de cada entrada. La red entrenada de esta manera podrá

determinar si un elemento de entrada es o no una fisura. La programación convencional requiere que el programador defina y escriba las líneas de código correspondiente a las funciones de clasificación, mientras que las redes neuronales crean estas funciones por sí solas, a partir de la base de datos de entrenamiento, como lo expone Chollet en la figura 12 [20].

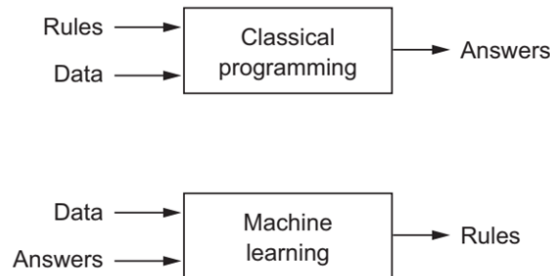


Figura 12: Programación convencional vs Machine Learning.

5.6.1. Validación de las Redes Neuronales

El estado actual de desarrollo de las computadoras y el acceso a grandes bases de datos de imágenes digitales permiten a los investigadores enfocarse en cómo estructurar estas bases de datos para que la red neuronal pueda clasificar los diferentes elementos. Al conjunto con el que se entrena la red se le llama “base de datos de entrenamiento”, y al conjunto con el que se hace la validación de este entrenamiento, cuyos elementos deben ser diferentes del anterior se le llama “base de datos de validación”.

Mokhtari recomienda tener una base de datos “balanceada”, es decir, que haya aproximadamente el mismo número de elementos de diferentes clases. Esto ayuda a evitar que se presente el fenómeno de “sobre ajuste” en el cual se obtiene un porcentaje de error muy bajo para el entrenamiento, pero pobres resultados en la fase de prueba. El autor propone tomar el 60 % de los datos para realizar la fase de entrenamiento, y hacer la validación con el 20 %. El 20 % restante se usa aleatoriamente en los conjuntos anteriores a medida que transcurren las iteraciones. La figura 13 ilustra el modelo propuesto, en el cual se aprecia que si después de cierto número de iteraciones de entrenamiento el error de validación no decrece lo mejor es detener las iteraciones [22].

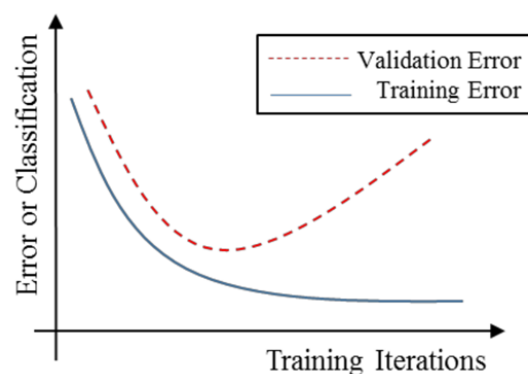


Figura 13: Diagrama de Mokhtari para control de las iteraciones de entrenamiento de la red neuronal.

El autor también comparó la técnica de clasificación de fallas por medio de redes neuronales con otros métodos, y obtuvo una clasificación exitosa del 92.3 %:

Tabla 13: Resultados de entrenamiento entre diferentes métodos.

Classification Method	Data Class	False Alarms (%)	Missed Cracks (%)	Successful Classification (%)
Artificial Neural Networks	Class 1	11.18	14.68	85.32
	Class 2	16.18	9.92	90.08
	Class 3	1.99	5.30	94.70
	Class 4	1.26	0.71	99.29
	Overall	7.6525	7.6525	92.3475
k-Nearest Neighbors	Class 1	21.73	7.91	92.09
	Class 2	6.53	19.18	80.82
	Class 3	2.40	4.30	95.70
	Class 4	1.74	1.01	98.99
	Overall	8.10	8.10	91.90
Decision Tree	Class 1	16.38	13.90	86.10
	Class 2	12.29	13.66	86.34
	Class 3	3.31	3.48	96.52
	Class 4	0.74	1.67	98.33
	Overall	8.18	8.18	91.82
Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System	Class 1	12.99	13.37	86.63
	Class 2	17.54	13.55	86.45
	Class 3	2.02	6.73	93.27
	Class 4	1.12	0.0	99.98
	Overall	8.41	8.41	91.58

Zakeri utilizó una base de datos de 216 imágenes de diferentes tipos de fisuras para entrenar la red neuronal, y 108 para validar, de esta forma obtuvieron una correlación del 99 % en la clasificación de deterioros tipo fisura [10].

Li Utilizó 1000 imágenes de una inspección de pavimentos realizada con el sistema PaveVision 3D Ultra, cada una de 4096 X 2048 píxeles, y dividió cada imagen en trozos de 512 X 512 [23]. De esta manera pudo crear la base de datos que se observa en la tabla 14.

Tabla 14: Base de datos de entrenamiento de Li (2018).

Type of crack	Non-crack	Transverse crack	Longitudinal crack	Block crack	Alligator crack
Number of training data	5552	5184	5419	5362	5445
Number of testing data	300	300	300	300	300

Tras realizar el entrenamiento de la red neuronal con esta base de datos se obtuvo el resultado de la tabla 15:

Tabla 15: Resultados del entrenamiento de Red Neuronal obtenidos por Li.

Conf	Non crack (%)	Longitudinal crack (%)	Transversal crack (%)	Block crack (%)	Alligator crack (%)	Overall accuracy (%)
CNN-1	98.00	96.33	97.67	91.67	88.67	92.47
CNN-2	93.00	97.67	97.33	94.00	89.33	94.23
CNN-3	98.67	97.67	98.00	96.00	91.33	96.33
CNN-4	95.00	98.67	96.00	92.67	90.67	94.60

Donde la primera columna corresponde a diferentes configuraciones de la red neuronal convolucional utilizada «CNN por sus siglas en inglés». Finalmente comparó sus resultados con los de otros autores:

Tabla 16: Comparación de los resultados obtenidos por Li con los de otros autores.

References	Overall accuracy (%)	Input image size	The number of image class
Zhang et al. (2016)	86.96	99 x 99 x 3	2: Crack, Non-crack
Cha et al. (2016)	97	256 x 256 x 3	2: Crack, Non-crack
Park et al. (2016)	98	32 x 32	12
Our proposed method	94	256 x 256	5: Non-crack, Longitudinal crack, Transverse crack, Block crack, Alligator crack

Hoang trabajó con una base de datos de 160 imágenes para entrenamiento y 40 para validación de una red neuronal para identificar baches. Se obtuvo una precisión del 85.3 % [24].

Fan usó una red neuronal convolucional (Convolutional Neural Network, CNN) para clasificar fisuras en pavimentos, con una base de datos de 118 imágenes RGB tomadas con un iPhone5. Utilizó 72 imágenes para entrenar la red y 46 para validar. También trabajó con una base de datos de 38 imágenes en escala de grises, de las cuales utilizó 24 para entrenamiento y 14 para validación. Para ambas bases de datos obtuvo una precisión del 91 % [21].

Shatnawi utilizó un dron para conformar una base de datos de fisuras de 640 imágenes para el entrenamiento de la red neuronal, otras 80 imágenes fueron usadas para medir el desempeño de la red y 80 más para incrementar la robustez del modelo en la fase de prueba. Se alcanzó una precisión del 82.3 %. El autor señala que la precisión se ve afectada por interferencias en el proceso de adquisición de datos, como por ejemplo sombras, árboles, la señalización de la vía y otros [25].

Dung utilizó una base de datos de 40.000 imágenes de fisuras para entrenar una red neuronal y una base de datos de 500 para validar, obteniendo una precisión del 90 % [26].

Esta revisión permite concluir que las redes neuronales son una herramienta ampliamente usada en la actualidad para solucionar problemas de clasificación de deterioros en pavimentos flexibles. Gran parte de la bibliografía está enfocada a los diferentes tipos de fisuras y ahuellamiento, y no se encuentra bibliografía sobre deterioros como afloramiento de agua, afloramiento de mortero y segregación.

5.7. Inspección automatizada de pavimentos

La inspección automatizada de pavimentos consiste en la utilización de diferentes sistemas electrónicos de adquisición de datos, como cámaras digitales y sensores láser, para ser procesados mediante algoritmos y Machine Learning. Estos sistemas están adaptados a vehículos que recorren la carretera a cierta velocidad mientras se recogen los datos de la superficie del pavimento, lo cual aumenta la eficiencia de trabajo y disminuye los riesgos para los inspectores, pues ya no necesitan recorrer las carreteras a pie, con los riesgos que ello implica.

En el año 2004 Tim y McQueen realizaron un estudio de la transición de las inspecciones manuales a las automatizadas a nivel de los Departamentos de Transporte «DOT

por sus siglas en inglés» de EEUU. Concluyeron que la inspección automatizada permitía recolectar información de la condición de la superficie del pavimento con precisión y eficiencia. Sin embargo, a los sistemas disponibles se les dificultaba la diferenciación de diferentes tipos de fisuras. En opinión de los autores este problema se resolvería con el avance de la tecnología de adquisición de datos, como las cámaras digitales, y el desarrollo de nuevos algoritmos de clasificación del tipo de fisura. Los autores encontraron que en algunos DOT's la transición implicaba la adopción de nuevos manuales para la inspección visual, redefinir niveles de deterioro, métodos de medición y clasificación de los deterioros. También implicaba pérdida de continuidad en sus bases de datos de deterioros para los proyectos viales, usadas en los diferentes sistemas de gestión de pavimentos.

Finalmente, encontraron que no había diferencias significativas en la determinación de los índices de deterioro entre el método manual y el automatizado. La única dificultad para los equipos de inspección automática era la determinación de las longitudes de las unidades de análisis, la cual variaba significativamente respecto a la manual. Para solucionarlo, los autores proponían el uso de sistemas GPS que permitieran determinar el abscisado del proyecto con mayor precisión [27].

Sivaneswaran realizó un estudio similar para Washington DC también en el año 2004. Encontró que el tiempo total requerido anualmente para recolectar toda la información necesaria de la condición de los pavimentos de Washington DC era de 4500 horas-persona, con un costo de \$USD 268000, Mientras que usando inspección automatizada el tiempo necesario eran 3220 horas-persona con un costo de \$USD 240000.

También encontró que hacer un control de calidad de forma manual de las inspecciones manuales, para Washington DC implicaba tomar una longitud de 500 km de pavimento y dividirla en secciones aleatorias por todo el Estado para hacer el control de los datos tomados. Esto tomaría un total de 150 horas-persona. Concluye que utilizando sistemas de inspección automatizada de pavimentos los sistemas de gestión de pavimentos tendrían una herramienta eficaz para el control de calidad de las inspecciones y de los índices de deterioro obtenidos. [28].

Ragnoli evaluó la precisión de las cámaras digitales y los sensores láser para clasificar diferentes tipos de deterioros. En la tabla 17 el cuadro gris significa que el deterioro con ese nivel de gravedad no es relevante, pues no influye en la comodidad o seguridad en el tránsito. El signo “+” significa que el dispositivo electrónico es adecuado para inspeccionar el deterioro, y el signo “++” significa que es totalmente adecuado [29]. Se concluye que los deterioros tipo fisura son fácilmente identificados por las diferentes tecnologías, mientras que los deterioros que implican deformaciones y necesitan datos de profundidad solo son identificables con el escáner láser. Los deterioros de la superficie del pavimento como exudación y pulimiento de agregados son fácilmente identificados con cualquier tecnología, excepto por el escáner láser.

Según la *World Road Association* (2016), la validación de los equipos de inspección automatizada se desarrolla en tres fases. La primera se denomina calificación de los equipos, y se realiza antes de que los equipos entren en funcionamiento. Consiste en hacer unas pocas pruebas en pavimentos que ya estén bien estudiados. La segunda fase es la validación detallada, en la cual se realizan pruebas inspeccionando distancias cortas y largas a diferentes velocidades y bajo diferentes condiciones de luminosidad y humedad. Una vez el equipo haya entrado en funcionamiento se debe hacer una tercera validación denominada validación periódica en pavimentos bien estudiados, para vigilar la inevitable descalibración de los equipos debido a su uso. De llegarse a encontrar algún defecto se deben suspender las inspecciones y hacer una revisión técnica de los equipos [30].

Tabla 17: Ragnoli, 2018. Relación entre dispositivo electrónico y tipo de deterioro.

	Fatigue cracking			Block cracking			Edge cracking			Longitudinal and transverse cracking			Joint reflection cracking			Slippage cracking			Bumps and sags		
Technology	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Camera		+	++		+	++			++		+	++			++			++	-	-	+
Line scan		++	++		++	++			++		++	++			++			++	-	-	+
Laser triangulation		++	++		++	++			++		++	++			++			++	-	+	++
Laser scanner		+	++		+	++			++		+	++			++			++	+	++	++

	Rutting			Corrugations			Depressions			Potholes			Swell			Lane / shoulder drop off			Shoving		
Technology	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Camera	-	-	+	-	-	-		-	+	+	++	++			+		-	+		+	++
Line scan	-	-	+	-	-	-		-	+	+	++	++			+		-	+		+	++
Laser triangulation	-	+	++	-	+	++		+	+	++	++	++			+		+	+		+	++
Laser scanner	+	++	++	+	++	++		++	++	++	++	++			++		+	++		+	++

	Bleeding			Polished aggregate			Raveling			Patching-utility cut patching			Railroad crossing *			Manhole		
Technology	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Camera	+	++	++	+	+	++	+	+	++			++	++	++	++	++	++	++
Line scan	+	++	++	+	++	++	+	++	++			++	++	++	++	++	++	++
Laser triangulation	+	++	++	+	++	++	+	++	++			++	++	++	++	++	++	++
Laser scanner	-	+	+	-	+	+	-	+	+			++	+	++	++	++	++	++

En conclusión, se constató que los sistemas de inspección automatizada de pavimentos han sido implementados exitosamente en varios países, y que al combinar cámaras digitales con escáner láser se pueden extraer los datos de la superficie del pavimento con buena precisión, lo cual permite caracterizar los deterioros estipulados en el método Vizir. Los sistemas de inspección automatizada permiten reducir el factor horas-persona y así reducir costos. Si bien su integración a los sistemas de gestión de pavimentos acostumbrados a trabajar con información proporcionada por el método manual puede llegar a causar inconvenientes, en el largo plazo se optimiza el manejo de la información y las bases de datos tendrán información de mejor calidad con muchas más posibilidades para el análisis.

6. Metodología

Para cumplir el objetivo general de establecer la precisión del sistema VisualPAV en la caracterización de los deterioros superficiales en pavimentos asfálticos, se plantearon los siguientes objetivos:

6.1. Base de datos de deterioros en pavimentos asfálticos

Con el objetivo de evaluar la precisión del sistema VisualPAV en la clasificación del tipo de deterioro, se construyó de una base de datos de deterioros en pavimentos con el software *labelImg*, el cual permite crear regiones rectangulares sobre imágenes digitales para crear etiquetas. Con estas etiquetas los ingenieros electrónicos del proyecto VisualPAV entrenaron una red neuronal y debido a los resultados obtenidos se repitió el etiquetado usando el software VGG Image Annotator – VIA, el cual permite crear regiones poligonales con lo cual hubo una mejora en los resultados.

6.1.1. Consecución de los datos

Se recopiló y organizó un conjunto de imágenes digitales en formato jpg de los tipos de deterioros de pavimentos asfálticos descritos en la metodología Vizir. Las imágenes se obtuvieron de bases de datos públicas, como las pertenecientes al estudio *Long Term Pavement Performance, LTPP* [31], o las del estudio hecho por [32] en carreteras japonesas con fotos hechas con smartphone. Otras fueron facilitadas por empresas locales de la industria y el resto se obtuvieron mediante el buscador de imágenes de Google.

6.1.2. Proceso de etiquetado usando labeling

El software *labelImg* fue cargado desde un environment de *Anaconda* y permite etiquetar los tipos de deterioro que se encuentren en una imagen digital tomada con cámara fotográfica. En la figura 14 se pueden observar los rectángulos diferenciados por colores para cada etiqueta, es decir, para cada tipo de deterioro.

El programa genera un archivo .xml por cada imagen procesada, el cual contiene la información de las etiquetas con su área y ubicación dentro de la imagen como se observa en la figura 15. El campo <source> se refiere a las dimensiones de la imagen original. En cada campo <object> quedan registradas las etiquetas con su respectiva abreviatura en el campo <name> y su ubicación en la imagen de acuerdo con los cuatro vértices del rectángulo de etiqueta. Como se observa, para las etiquetas se usaron las mismas abreviaturas del método Vizir.

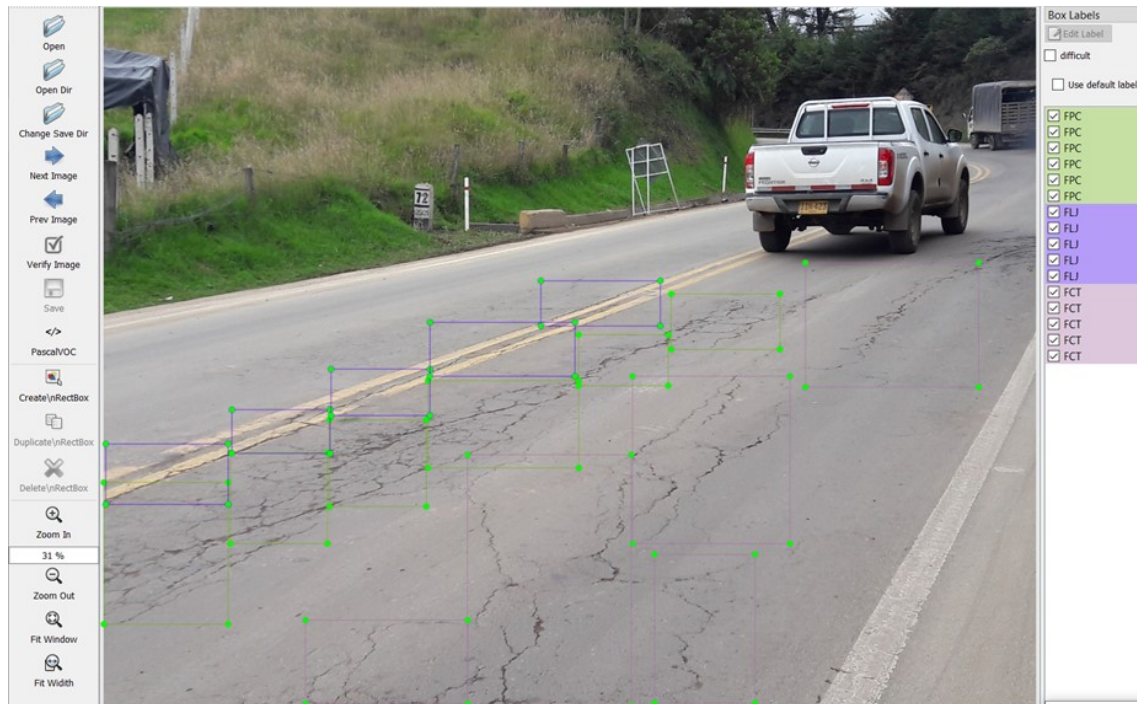


Figura 14: Etiquetado de deterioros con Labelimg

```
<annotation>
  <folder>ITINERIS_labeling</folder>
  <filename>20190502_135739.jpg</filename>
  <path>G:\BASES DE DATOS\ETIQUETAS_labeling\ITINERIS_labeling\20190502_135739.jpg</path>
  <source>
    <database>Unknown</database>
  </source>
  <size>
    <width>4128</width>
    <height>3096</height>
    <depth>3</depth>
  </size>
  <segmented>0</segmented>
  <object>
    <name>FPC</name>
    <pose>Unspecified</pose>
    <truncated>0</truncated>
    <difficult>0</difficult>
    <bndbox>
      <xmin>23</xmin>
      <ymin>1778</ymin>
      <xmax>1167</xmax>
      <ymax>2718</ymax>
    </bndbox>
  </object>
</annotation>
```

Figura 15: Archivo .xml creado por el software Labelimg.

6.1.3. Proceso de etiquetado usando VIA

El software de etiquetado VIA (VGG Image Annotator) es un proyecto de código abierto, y puede ser descargado gratuitamente desde su página web. El programa funciona en un entorno HTML, es decir que puede ser cargado desde cualquier navegador web y de forma offline [33]. En este caso se usó la versión 2.0.9.

Una vez abierto VIA en el navegador web se mostrará la siguiente interfaz:

En el panel izquierdo se hace click en el botón *Add files* para agregar las imágenes que serán etiquetadas. Luego, haciendo click en *Attributes* se crea un nuevo atributo, en este

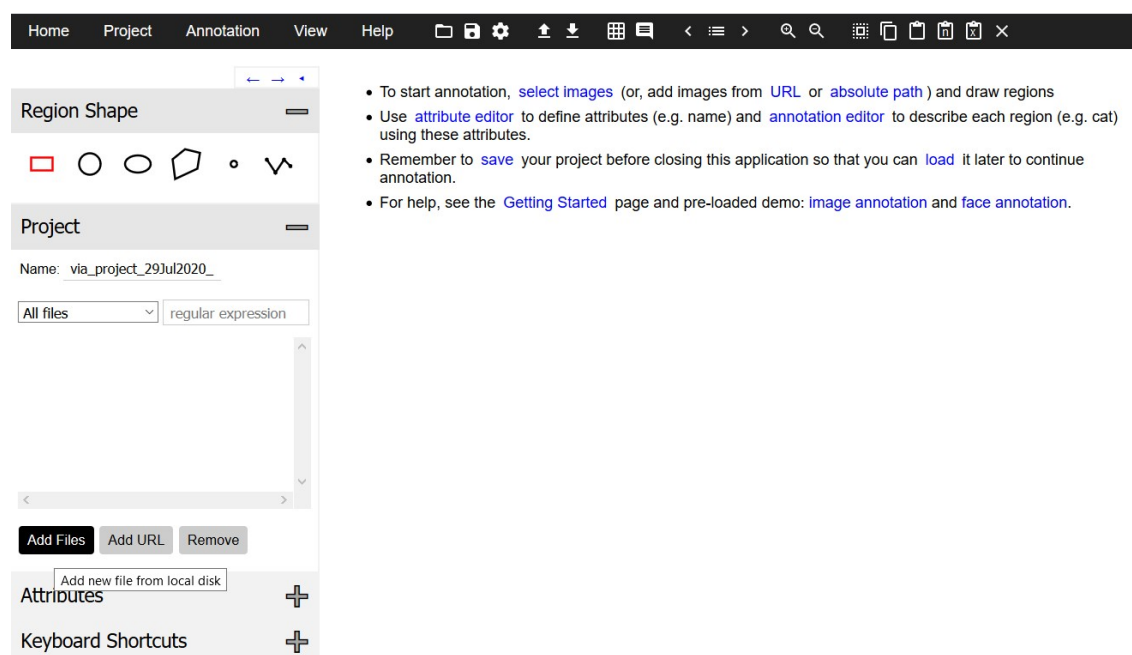


Figura 16: Interfaz de inicio del software VIA

caso se nombrará como *tipo_falla* para denotar que las etiquetas generadas dan cuenta del tipo de deterioro encontrado. El atributo debe ser de tipo *text*. Las otras casillas se dejan en blanco «figura 17».

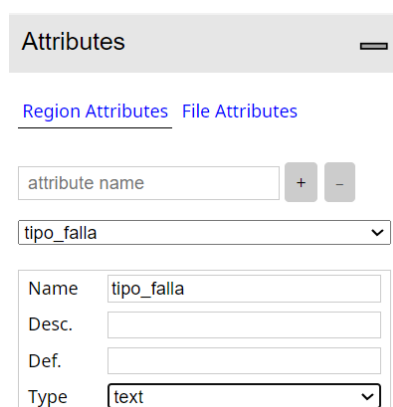


Figura 17: Definir atributos en VIA

En *Region shape* se selecciona *Polygon region shape* y se procede a formar el polígono haciendo click directamente en la imagen. Una vez completado el polígono se presiona la tecla *Enter* y el polígono quedará formado. Al hacer click sobre el polígono se abrirá un cuadro con el atributo anteriormente definido, el cual pedirá una entrada de texto para la etiqueta del polígono. En este caso la etiqueta será la abreviatura definida por la norma Invías para la falla encontrada.

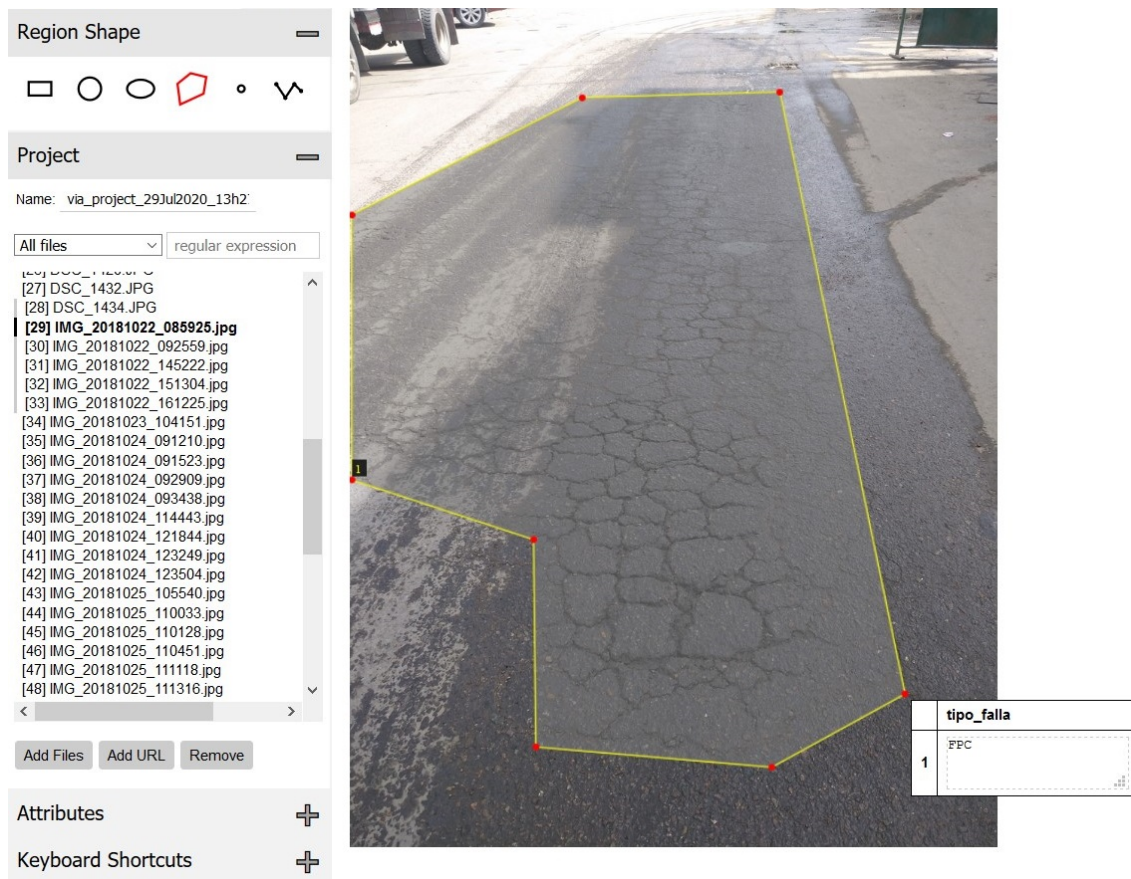


Figura 18: Crear una región poligonal en VIA

Finalmente, en el panel superior se hace click en el botón *save project* para guardar el proyecto. Esto creará un archivo de extensión .json que contiene la información sobre la ubicación de los puntos del polígono sobre la imagen y su respectiva etiqueta.

6.2. Funcionalidades del software VisualPAV

El segundo objetivo, fue determinar las funciones que debe cumplir un sistema de inspección automatizada de pavimentos dentro de la rehabilitación de pavimentos y dentro de un sistema de gestión de pavimentos. Para esto fue necesario hacer una revisión bibliográfica detallada sobre los sistemas de gestión de pavimentos y las directrices de Invías sobre rehabilitación de pavimentos. Además, fue necesario establecer las características específicas de cada tipo de deterioro, y la forma como VisualPAV obtendría la información de cada característica con los dispositivos de adquisición de datos.

6.3. Pruebas en campo

Con el objetivo de diseñar e implementar la inspección manual de un tramo de pavimento, se consultó el método Vizir y se preparó el formato B1 (ver anexo) para ser llenado en campo a medida que se tomaban las mediciones. Para mediciones de fisuras se utilizó un flexómetro corriente. Para medir el ahuellamiento y la profundidad de los baches se usó una regleta metálica de 3 metros de longitud, tal como lo aconseja el manual de Invías. En el caso del ahuellamiento se tomaron 3 mediciones a lo largo de cada tramo de 10 metros y se registró la mayor de estas como la representativa de todo el tramo. Para los baches

«ojos de pescado», se hizo el registro de todos los encontrados en el formato B1, y en el formato B3 se registraron cada 100 metros.

7. Resultados

7.1. Bases de datos de deterioros en pavimentos asfálticos

En la tabla 18 se contabilizan las etiquetas obtenidas usando *Labelimg*:

Tabla 18: Base de datos creada con labelimg

Nombre del Deterioro	Código	Cantidad de Deterioros Etiquetados
Ahuellamiento	AH	0
Depresiones o hundimientos longitudinales	DL	0
Depresiones o hundimientos transversales	DT	0
Fisuras longitudinales por fatiga	FLF	1018
Fisuras piel de cocodrilo	FPC	1121
Bacheos y parcheos	B	650
Fisura longitudinal de junta de construcción	FLJ	819
Fisura transversal de junta de construcción	FTJ	239
Fisuras Transversales	FT	590
Fisuras parabólicas	FP	27
Fisura de borde	FB	631
Ojos de pescado	O	287
Desplazamiento, abultamiento o ahuellamiento de la mezcla	DM	1
Pérdida de la película de ligante	PL	720
Pérdida de agregados	PA	400
Descascaramiento	D	248
Pulimento de agregados	PU	481
Exudación	EX	215
Afloramiento de mortero	AM	0
Afloramiento de agua	AA	126
Desintegración de los bordes del pavimento	DB	278
Escalonamiento entre calzada y berma	ECB	248
Erosión de las bermas	EB	109
Total Etiquetas		8332

En gris se observan los deterioros con mas de 200 etiquetas, lo cual los hace aptos para el entrenamiento de la red. Con este conjunto base los ingenieros electrónicos del grupo de trabajo entrenaron la red neuronal convolucional VisualPAV-Net, estableciendo la métrica de evaluación de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$acc = \frac{t_p + t_n}{t_p + f_n + f_p + t_n} \quad (3)$$

Donde acc es exactitud, t_p es el número de verdaderos positivos, t_n son verdaderos negativos, f_n falsos negativos y f_p falsos positivos. La métrica de evaluación se define como «la fracción con la que un modelo clasifica un punto de datos correctamente, es

una relación entre el número de predicciones correctas y el número total de muestras de entrada»[34].

La tabla 19 muestra el total de etiquetas obtenidas con el software VIA:

Tabla 19: Etiquetas generadas con VIA

Código	Etiquetas
AH	0
DL	0
DT	0
FLF	1813
FPC	1560
B	941
FLJ	701
FTJ	260
FT	1721
FP	17
FB	470
O	269
DM	1
PL	145
PA	637
D	366
PU	2
EX	485
AM	0
AA	113
DB	128
ECB	59
EB	15
Total Etiquetas	9729
Total Imágenes	3623

Esta base de datos contiene imágenes de pavimentos de varias partes del mundo, sin embargo, se observa que prevalecen las fisuras longitudinales, transversales, piel de cocodrilo y reparaciones o bacheos. Los deterioros que el método Vizir denomina como tipo B -afloramiento de mortero, fisuras parabólicas, desplazamiento de la mezcla- son menos comunes y no es fácil encontrar fotografías o imágenes digitales de estos. Aquellos deterioros de los cuales se obtuvieron menos de 100 etiquetas no se incluirán en el sistema VisualPAV. En el caso particular del Ahuellamiento (AH), su identificación involucra datos de deformación de la superficie del pavimento, por lo cual no es posible utilizar únicamente imágenes digitales para identificarlos, pues en estas no siempre se puede constatar a simple vista su existencia.

Con esta base de datos los ingenieros electrónicos del proyecto VisualPAV procedieron a entrenar diferentes redes neuronales, obteniendo los siguientes resultados:

- Red VisualPav-Net3, con un kernel de 3x3, cuatro capas de convolución con una profundidad de 32-64-128-128: **Acc = 94.8 %**
- Modelos pre-entrenados:

Tabla 20: Exactitud (ACC) de modelos pre-entrenados.

Modelo	Acc
Xception	0.954
VGG16	0.956
VGG19	0.953
InceptionV3	0.957
InceptionResNetV2	0.956
DenseNet121	0.952

7.2. Determinación de las funcionalidades del software del sistema VisualPAV

7.2.1. Revisión bibliográfica de la información que requieren los sistemas de gestión de pavimentos en cuanto a condición superficial y deterioros del pavimento

En el capítulo 3 de la “Pavement Management Guide” de la AASHTO [35], se encuentran los requerimientos mínimos para la integración de la información sobre la condición de un pavimento con un determinado sistema de gestión de pavimentos. La primera categoría de información es Información Básica de Inventario “Basic inventory Information” la cual debe contener:

- Abscisado de inicio y final del segmento evaluado.
- Tipo de carretera (primaria, secundaria, terciaria) y código de la misma.
- Clasificación funcional de la carretera.
- Longitud del tramo de estudio.
- Ancho promedio de la calzada.
- Tipo y ancho de berma.
- Número de carriles en cada sentido.
- Espesor de las diferentes capas que componen la estructura del pavimento.
- Propiedades de los materiales de las capas.
- Información del drenaje.
- Información climatológica y ambiental.
- Historia constructiva (fecha de construcción, tipo y alcance de la construcción original, proyectos de mantenimiento y rehabilitación que ha tenido).
- Datos de costos (costo de la construcción y obras de mantenimiento).
- Información del propietario de la vía y de su jurisdicción.

En el capítulo 4 de la misma guía, se entra en detalles sobre la condición del pavimento y cómo determinar su estado actual, pues esta es la base para cualquier metodología de análisis para apoyar la toma de decisiones en determinado sistema de gestión. Al respecto, se reconocen dos formas de hacer estos estudios: una muy detallada, como si fuera una “investigación forense” para conocer las causas y posibles soluciones a problemas específicos de desempeño. O bien, un estudio para obtener los parámetros necesarios para diseñar estrategias de rehabilitación. La primera se usa para inspecciones a nivel de proyecto y la segunda a nivel de red. Lo más común en un sistema de gestión de pavimentos, según la AASHTO es usar el segundo enfoque, como se observa en la figura 19 la información sobre la condición del pavimento se divide en tres categorías:

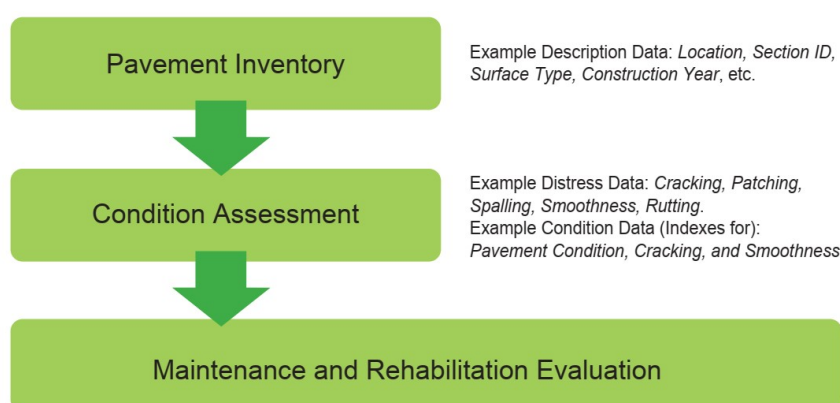


Figura 19: Flujo de datos en la gestión de pavimentos. Tomado de AASHTO Pavement Management Guide 2012

7.2.2. Sistema HDM-4

En Colombia se ha usado esporádicamente este sistema sin estandarización formal [36]. El sistema tiene la capacidad de hacer modelos predictivos del deterioro del pavimento basado en la información existente, es decir, en inventarios de deterioros obtenidos mediante la inspección visual de los pavimentos. De acuerdo con [37], otras capacidades del sistema son:

- Análisis y evaluación técnica y económica de proyectos viales a través de la comparación objetiva de alternativas.
- Planeación y presupuesto de recursos de obras de conservación de proyectos viales.
- Programación de trabajos de conservación.
- Optimización de recursos disponibles sujetos a restricciones presupuestales.
- Priorización de intervenciones en determinados corredores viales de una red, con base en políticas definidas por la agencia correspondiente.
- El seguimiento y control de la eficiencia de trabajos de conservación, y en general evaluar el deterioro de un pavimento.

Tramo: Sector 02: Km 3+200 - Km 9+400

Definición | Geometría | Pavimento | Condición | Otros | Tránsito motorizado | Valuación de activos

Condición al final del año	2015
Irregularidad (IRI - m/km)	1.60
Aqriet. estr. total (%)	0.96
Aqriet. estr. ancho (%)	0.02
Aqrietamiento térmico (%)	0.00
Área con desprendimientos (%)	1.00
Número de baches (No./km)	0.00
Área con rotura de borde (m ² /km)	0.00
Prof. media de roderas (mm)	3.10
Desv. est. prof. roderas (mm)	1.30
Profundidad de la textura (mm)	0.50
Resist. desliz. (SCRIM 50 km/h)	0.50
Drenaje	Excelente ▼

Aceptar Cancelar

Datos de condición anual

Figura 20: Requerimientos del HDM-4 sobre la condición superficial del pavimento.
Fuente: Matos (2018)

En la figura 20 se pueden observar los datos de entrada requeridos para determinar la condición del pavimento en el sistema HDM-4 [4].

El término “roderas” hace referencia al ahuellamiento. Los baches se conocen como “ojos de pescado” en la norma colombiana y se miden en unidades por kilómetro. El IRI, la profundidad de la textura, la resistencia al deslizamiento y la condición del drenaje son parámetros que escapan del alcance del sistema VisualPAV. Como se ve, es necesario calcular la profundidad media y la desviación estándar de la profundidad del ahuellamiento, esto se hace para tramos de la vía cuya longitud puede ser de varios kilómetros, tal como se aprecia en la figura 20. Se suman las longitudes o áreas de deterioros y se dividen por la longitud en kilómetros del tramo evaluado para obtener los datos de condición en unidades de m^2/km o bien en porcentaje.

7.2.3. Relación entre la metodología de daños en el pavimento y el Sistema de Gestión de Pavimentos

Es importante que la metodología usada para hacer el inventario de daños y los diferentes índices que se derivan de ésta sean compatibles con las herramientas de análisis del sistema de gestión de pavimentos. Como ejemplo se puede mencionar el Sistema PAVER “Pavement Maintenance Management System”. Este proyecto inició en 1970 para ayudar al departamento de defensa de EEUU a construir un vasto inventario de

pavimentos. Para evaluar la condición del pavimento usa la metodología PCI “Pavement Condition Index”. En la figura 21 se observan los datos necesarios que se deben ingresar para determinar la condición superficial [5].

Edit Inspection (NeilArms:08-26::A)

Summary data at time of inspection

Branch Use: **RUNWAY** Surface Type: **AC** Rank: **P**

Length: **4,000.00 Ft** Width: **100.00 Ft** True Area: **400,000.00 SqFt**

Inspection

Date: **10/10/1997** Calc. Conditions Extrpl Distress

Sample

Unit: **14** Unit Size: **5000 SqFt** PCI: **58**

No distresses found on sample Remaining samples have no distress Sum Distress

Distress selection

Distress	Description	L	M	H	N
41	ALLIGATOR CR				
42	BLEEDING				
43	BLOCK CR				
44	CORRUGATIO...				
45	DEPRESSION				
46	JET BLAST				
47	JT REF. CR				
48	L & T CR				
49	OIL SPILLAGE				
50	PATCHING				
51	POLISHED AG				
52	RAVELING				
53	RUTTING				
54	SHOVING				
55	SLIPPAGE CR				
56	SWELLING				
57	WEATHERING				

Quantity

1 2 3
4 5 6
7 8 9
C 0 .
60.02 Ft

Distresses

Distress	Description	Severity	Quantity	Units	Dens
48	L & T CR	Medium	60.02	Ft	
48	L & T CR	Low	180.05	Ft	
43	BLOCK CR	Low	3,499.97	SqFt	

Figura 21: Condición superficial del pavimento en PAVER

En la parte inferior izquierda se observan los datos de entrada requeridos por el sistema: piel de cocodrilo, exudación, fisuras en bloque, fisuras longitudinales y transversales, bacheos, ahuellamientos, desplazamiento de mezcla, hinchamiento, pérdida de agregados, meteorización. Debido a que este sistema usa la metodología PCI, hay una amplia gama de tipos de daños que el sistema VisualPAV no podría cubrir, lo cual dificultaría su integración con este sistema de gestión de pavimentos.

7.2.4. Normas técnicas vigentes en Colombia sobre rehabilitación de pavimentos

En Colombia la norma técnica para rehabilitación de pavimentos es la “Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras” del año 2008 [17]. El capítulo 4 se titula “Guías para la clasificación y cuantificación de los deterioros del pavimento”, allí se puede observar una clasificación de los deterioros de la superficie del pavimento de acuerdo con los factores que los causan, bien sean por el tránsito, el clima, la calidad de los materiales o errores en el proceso constructivo (figura 21).

Cabe resaltar que esta guía ha sido pensada para inspecciones del pavimento de forma manual: “El inventario de los deterioros del pavimento se puede adelantar visualmente o

Tabla 21: Causas de los deterioros en pavimentos asfálticos

CLASE	TIPO DE DETERIORO	CAUSADO ORIGINALMENTE POR EL TRÁNSITO	CAUSADO ORIGINALMENTE POR LOS MATERIALES, EL CLIMA O LA CONSTRUCCIÓN
Fisuramientos ¹	Fisuramiento por fatiga (grietas longitudinales en la huella y piel de cocodrilo)	X	
	Fisuramiento en bloque		X
	Fisuramiento de borde		X
	Fisuramiento longitudinal (no de fatiga)		X
	Fisuramiento transversal		X
	Fisuras parabólicas		X
	Fisuras de reflexión	X	X
Deformaciones	Ahuellamiento	X	
	Abultamientos		X
	Depresiones (baches)		X
	Desplazamientos de borde		X
	Deterioro de parches	X	X
	Expansiones		X
Desprendimientos	Separación entre calzada y berma		X
	Pulimento de agregados	X	
	Ojos de pescado	X	
	Descascaramiento		X
	Pérdida de película de ligante		X
	Pérdida de agregado		X
Afloramientos	Exudación		X
	Afloramiento de agua		X
	Afloramiento de finos	X	X
Otros deterioros	Desintegración de los bordes del pavimento	X	
	Escalonamiento entre calzada y berma		X
	Erosión de las bermas		X
	Segregación		X

de manera automatizada. Sin desconocer las ventajas de este último método en cuanto a rapidez, precisión y calidad de la información, es de prever que en los próximos años el sistema de identificación visual siga siendo el predominante en la inspección de los deterioros de los pavimentos de las carreteras colombianas y bajo tal principio se desarrollan las recomendaciones del presente capítulo” [17].

En el año 2013 el Invías publicó la norma técnica INV E 813-13 en la cual adoptó el método Vizir para determinar la condición superficial de los pavimentos asfálticos [3]. Al definir los parámetros para determinar la gravedad de los deterioros tipo B (tabla 6) se realizaron algunos cambios respecto a la guía de rehabilitación del año 2008 (tabla 22).

Además, en su página web oficial el Invías avala la utilización del “Manual de inspección visual de pavimentos flexibles” del año 2006 [16] como herramienta para inventariar los daños en el pavimento. Allí se hace una caracterización diferente de los daños en el pavimento, y cambia la forma como se determinan los criterios de gravedad. En resumen, existen tres manuales distintos avalados por el Invías para inventariar los deterioros en los pavimentos del país. Para el sistema VisualPAV se estableció el manual más reciente,

Tabla 22: Deterioros tipo B en la guía de rehabilitación de 2008

DETERIORO		NIVEL DE GRAVEDAD			
		①	②	③	
Fisura longitudinal de junta de construcción		Fina y única < 6 mm	- Ancha (≤ 6 mm) sin desprendimiento o - Fina ramificada		Ancha (≤ 6 mm) con desprendimientos o ramificada
Fisuras de contracción térmica.		Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimiento, o finas con desprendimientos o fisuras ramificadas		Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos
Fisuras parabólicas.		Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimientos		Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos
Fisuras de borde		Fisuras finas < 6 mm	Anchas (≤ 6 mm) sin desprendimientos		Anchas (≤ 6 mm) con desprendimientos
Abultamientos		$h < 20$ mm	$20 \text{ mm} \leq h \leq 40$ mm		$h > 40$ mm.
Ojos de pescado*(por cada 100m)	Cantidad.	< 5	5 a 10	< 5	> 10
	Diámetro (mm)	≤ 300	≤ 300	≤ 1000	5 a 10
Desprendimientos: - Pérdida de película de ligante. - Pérdida de agregado		Pérdidas aisladas	Pérdidas continuas		Pérdidas generalizadas y muy marcadas
Descascaramiento	Prof.(mm)	≤ 25	≤ 25	> 25	> 25
	Área(m ²)	≤ 0.8	> 0.8	≤ 0.8	> 0.8
Pulimento agregados		Long. Comprometida < 10% de la sección (100m).	Long. Comprometida $\geq 10\%$ a < 50% de la sección (100m)		Long. Comprometida > 50% de la sección (100m)
Exudación		Puntual, área específica	Continúa sobre las trayectorias por donde circulan las ruedas del vehículo		Continua y muy marcada, en diversas aéreas
Afloramientos: - De mortero - De agua		Localizados y apenas perceptibles.	Intensos		Muy intensos
Desintegración de los bordes del pavimento		Inicio de la desintegración, sectores localizados.	La calzada ha sido afectada en un ancho de 500 mm o más		Erosión extrema que conduce a la desintegración del revestimiento
Escalonamiento entre calzada y berma.		Desnivel entre 10 mm y 50 mm.	Desnivel entre 50 y 100mm		Desnivel superior a 100mm.
Erosión de las bermas		Erosión incipiente	Erosión pronunciada		La erosión pone en peligro la estabilidad de la calzada y la seguridad de los usuarios
Segregación		Long. comprometida < 10% de la sección (100m)	Long. comprometida $\geq 10\%$ a < 50% de la sección (100m)		Long. comprometida > 50% de la sección (100m)

* Cuando el número de ojos de pescado supere el número y el tamaño descritos en la tabla, se deberá enfrentar como deterioro del tipo A.

es decir, el del año 2013, el cual quedó plasmado como norma técnica INV E-813-13 metodología Vizir.

7.2.5. Evaluación de la condición global del pavimento

La condición global del pavimento es el producto del análisis conjunto de la evaluación de deterioros, estructural, funcional y de drenaje, y provee una base objetiva para determinar las alternativas de rehabilitación. «El propósito específico de la evaluación de la condición

global del pavimento es valorar, de la manera más objetiva posible, su condición actual, identificando claramente los tipos determinantes de deterioros y sus causas, así como todas las demás deficiencias que puedan ser enfrentadas mediante la rehabilitación» [17].

La inspección de deterioros es una fuente importante de información sobre la suficiencia estructural, funcional y del drenaje, mas no suficiente, pues se requieren los demás estudios que se muestran en la tabla 23.

Tabla 23: Áreas de valoración de la condición global del pavimento y sus correspondientes fuentes de información. Tomado de Invías 2008.

ÁREA DE VALORACIÓN	FUENTE DE INFORMACIÓN						
	INSPECCIÓN DE DETERIOROS	MEDIDAS DE REGULARIDAD SUPERFICIAL	MEDIDAS DE FRICCIÓN	MEDIDAS DE RUIDO	ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	ENSAYOS DESTRUCTIVOS	INSPECCIÓN DEL DRENAJE
Suficiencia estructural	X				X	X	X
Suficiencia funcional	X	X	X	X			X
Suficiencia del drenaje	X				X	X	X

7.2.6. Selección de técnicas de rehabilitación

- **Sello de fisuras:** Su proceso constructivo está detallado en el artículo 466 de las “Especificaciones generales de construcción de carreteras” del Invías, del año 2012 [38]. El sellado se aplica a fisuras longitudinales y transversales cuya abertura sea mayor a 6 milímetros. No se debe usar para sellar la “piel de cocodrilo”, ni tampoco en pavimentos semi rígidos que presenten fisuración en las capas subyacentes, pues pueden volver a grietarse fácilmente por reflexión. El Invías recomienda aplicar una regla empírica según la cual por cada 100 metros de pavimento se pueden sellar las fisuras si la longitud total de estas no supera los 300 metros. En la figura 22 se puede ver un ejemplo de esta regla:

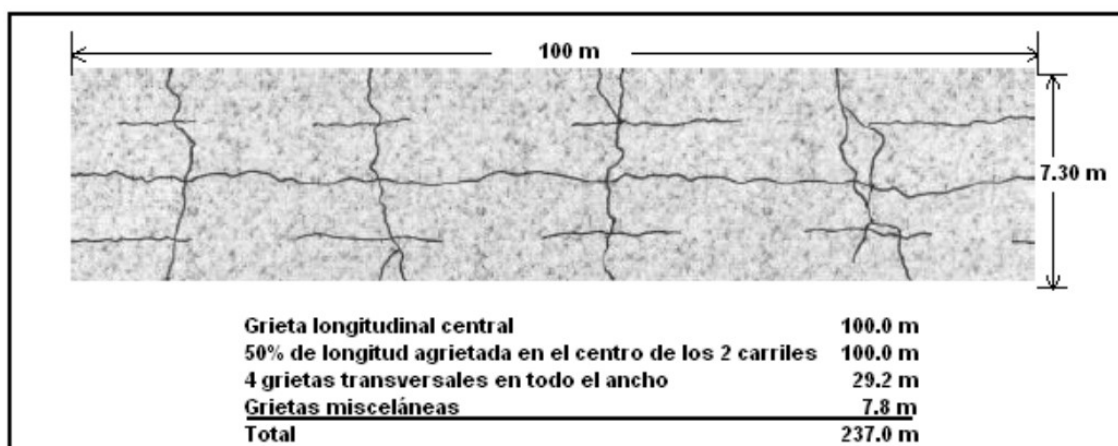


Figura 22: Regla empírica para sellado de fisuras. Tomado de Invías 2008.

- **Reciclado del pavimento:** es un proceso en el cual las capas de la estructura existente son reutilizadas agregando nuevos materiales que mejoran la resistencia y

comportamiento del pavimento. Existen varios tipos de reciclado. En el reciclado en planta en caliente el material obtenido mediante fresado es llevado a una planta donde se tritura y se clasifica por granulometría para luego elaborar una mezcla asfáltica en caliente, añadiendo agregados pétreos vírgenes, cemento asfáltico y un agente rejuvenecedor para el pavimento fresado [17]. La guía para este tipo de reciclado se encuentra en el artículo 462 de [38].

- **Reciclado superficial en caliente:** se aplica para espesores de la superficie no superiores a 40 mm. Sirve para eliminar deterioros superficiales como ahuellamiento, abultamientos, exudación, pérdida de ligante, pérdida de agregados y fisuras. El reciclado en frío en el sitio se aplica a pavimentos con deficiencias estructurales y su proceso constructivo se encuentra detallado en el artículo 461 de [38]. En la siguiente tabla se detallan los tipos de deterioros que se pueden corregir con cada tipo de reciclado.

Tabla 24: Guía para la selección del método de reciclado de pavimentos asfálticos.
Tomada de Invías 2008.

TIPO DE DETERIORO DEL PAVIMENTO	RECICLADO EN PLANTA EN CALIENTE	RECICLADO EN EL SITIO	
		RECICLADO SUPERFICIAL EN CALIENTE	RECICLADO EN FRÍO EN EL SITIO
DEFECTOS SUPERFICIALES			
Desprendimientos	X	X ¹	
Exudación	X	X ⁴	
Superficie resbaladiza	X	X ¹	
DEFORMACIONES			
Abultamientos	X	X ⁴	
Ahuellamiento poco profundo ²	X	X ⁴	
Ahuellamiento profundo ³			X ⁵
AGRIETAMIENTO ASOCIADO A LAS CARGAS DEL TRÁNSITO			
Piel de cocodrilo	X		X
Longitudinal en la banda de rodamiento	X	X ⁶	X
Parabólicas		X ⁷	
AGRIETAMIENTO NO ASOCIADO A LAS CARGAS DEL TRÁNSITO			
Grietas en bloque	X		X
Grietas longitudinales de junta	X	X ⁸	
Grietas transversales de contracción	X		X
AGRIETAMIENTO POR REFLEXIÓN	X		X
RUGOSIDAD			
Falta general de regularidad superficial	X	X	
Depresiones	X ⁹	X ⁹	
Notas: ¹ Aplicable si el espesor de la capa superficial no excede de 40 mm ² Ahuellamiento limitado a los 50 mm superiores de las capas asfálticas ³ Ahuellamiento originado por la capa de base ⁴ Constituye una corrección temporal si toda la capa afectada no es removida o mejorada en sus características mecánicas ⁵ Generalmente se requiere la adición de nuevos agregados ⁶ Aplicable si el agrietamiento está restringido a la capa superficial ⁷ Aplicable si el tratamiento se realiza a una profundidad por debajo de la capa donde se presenta el agrietamiento ⁸ Aplicable si el agrietamiento está limitado a la capa superficial ⁹ Es sólo una corrección temporal si el deterioro está ligado a un problema de la subrasante			

El Invías sugiere algunos tipos de trabajos en la superficie del pavimento dependiendo de los tipos de deterioros presentes de acuerdo con la tabla 36 «ver anexos». Aunque advierte que estas alternativas no deben tomarse como definitivas y que siempre se debe tener en cuenta el criterio de la “condición global del pavimento” explicado anteriormente.

7.2.7. Funcionalidades del sistema VisualPAV

En esta sección se plantean los pasos que debe seguir el dispositivo multisensorial para calcular el índice de deterioro superficial y cómo mostrará los reportes. Como se describió en la revisión bibliográfica, el método Vizir necesita información sobre el tipo de deterioro, su extensión y su nivel de gravedad. Se construye entonces una jerarquía en este orden para poder caracterizar el deterioro. Para procurar un mayor entendimiento por parte de los profesionales y técnicos del sector, los reportes del software serán iguales a los formatos B1, B2, B3 y B4 establecidos por Invías. El mapa de deterioros se construirá con base en un Sistema de Información Geográfica.

El método Vizir define los niveles de gravedad de algunos deterioros de forma no numérica, es decir, apelando a la valoración de quien hace la inspección. Por esta razón fue necesario adoptar un criterio numérico para algunos de estos deterioros, tomando como base el manual de Invías de 2006, teniendo en cuenta que es un estudio bastante completo sobre estos tipos de deterioros, de tal forma que en adelante el nivel de gravedad de los deterioros tipo A se determinará de acuerdo con la siguiente tabla:

Se obtiene la imagen digital por medio de la cámara de alta velocidad y los datos de profundidad por medio del escáner láser y se procesa mediante la red neuronal, la cual identificará el tipo de deterioro. Los deterioros tipo A pasan a formar parte del conjunto base para trabajar en adelante, pues con ellos se calcula el índice de deterioro superficial en el método Vizir.

El análisis de la imagen digital permitirá medir la extensión del deterioro teniendo en cuenta los parámetros definidos por el método Vizir para cada uno de ellos. En la siguiente tabla se describen los parámetros para cada deterioro tipo A y tipo B, aunque los deterioros tipo B no se tienen en cuenta para calcular el índice de deterioro superficial.

Ahuellamiento: El nivel de gravedad es función únicamente de la profundidad (P). En este caso la profundidad la determinará el escáner láser en milímetros. De acuerdo a lo indicado en la tabla 25 se tiene:

- Nivel de gravedad 1: $P < 20 \text{ mm}$
- Nivel de gravedad 2: $20 \text{ mm} \leq P \leq 40 \text{ mm}$
- Nivel de gravedad 3: $P > 40 \text{ mm}$

Para el ahuellamiento se deberá llenar el siguiente cuadro y ubicarlo en la parte superior del formato B1, para secciones de 10 metros.

La misma metodología y la misma tabla 25 se usan para obtener la información base en la sección de 10 metros para las depresiones longitudinales y transversales.

Fisura longitudinal por fatiga: El nivel de gravedad es función de la abertura de la grieta (A) en mm. El dispositivo que controla es la cámara de alta velocidad.

- Nivel de gravedad 1: $A < 1 \text{ mm}$
- Nivel de gravedad 2: $1 \leq A \leq 3 \text{ mm}$
- Nivel de gravedad 3: $A > 3 \text{ mm}$

Fisuras piel de cocodrilo: El nivel de gravedad es función del tamaño de la malla, como se explica por medio de la figura 23.

Tabla 25: Niveles de gravedad de los deterioros tipo A en el sistema VisualPAV

Deterioro	Nivel de gravedad			Unidad de medición
	1	2	3	
Ahuellamiento (AH) , Depresiones o hundimientos longitudinales (DL) y transversales (DT)	Profundidad menor a 20 mm.	Profundidad entre 20 y 40 mm	Profundidad mayor de 40 mm.	Metros lineales [m]
Fisuras longitudinales por fatiga (FLF)	Abertura de la fisura menor que 1 mm, cerrada o con sello en buen estado.	Abertura de la fisura entre 1 y 3 mm. Pueden existir algunas fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos y pueden presentar desportillamientos leves; existe una alta probabilidad de infiltración de agua a través de ellas.	Abertura de la fisura mayor de 3 mm. Pueden presentar desportillamientos considerables y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos. Puede causar movimientos bruscos a los vehículos.	Metros lineales [m]. Para fines del análisis del área total afectada [m ²] se multiplican los metros lineales por 0,6 m.
Fisuras Piel de Cocodrilo (FPC)	Piel de cocodrilo formada por mallas (> 500 mm) con grietas finas, sin pérdida de materiales.	Mallas más densas (< 500 mm), con pérdidas ocasionales de materiales, desprendimientos y ojos de pescado en formación.	Mallas con grietas muy abiertas y con fragmentos separados. Las mallas son muy densas (< 200 mm), con pérdida ocasional o generalizada de materiales.	Metros lineales [m] para calcular el índice de deterioro superficial. Metros cuadrados [m ²] para el área total afectada.
Bacheos y parcheos (B)	Intervención de superficie debidas a deterioros tipo B.	Intervenciones debidas a deterioros tipo A		Metros lineales [m] para calcular el índice de deterioro superficial. Metros cuadrados [m ²] para el área total afectada.
		Comportamiento satisfactorio de la reparación.	Ocurrencia de fallas en las zonas reparadas.	

Tabla 26: Información base del Ahuellamiento en la sección de 10 metros en el formato B1.

Nivel de gravedad	
Longitud (m)	Profundidad (mm)

Tabla 27: Información base de las fisuras longitudinales por fatiga en el formato B1.

Nivel de gravedad
Longitud (m)

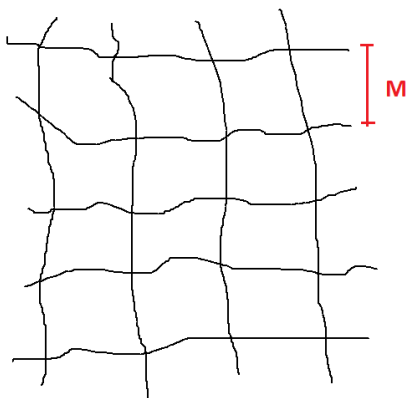


Figura 23: Tamaño de la malla en FPC.

- Nivel de gravedad 1: $M > 500 \text{ mm}$
- Nivel de gravedad 2: $200\text{mm} \leq M \leq 500 \text{ mm}$
- Nivel de gravedad 3: $M < 200 \text{ mm}$

La información base se ingresa con la misma tabla 27.

Bacheos y parcheos: Para este caso en especial el nivel de gravedad es controlado por información previa del proyecto, pues se debe conocer si el bacheo o parcheo se realizó para corregir un deterioro tipo A o tipo B y ni la cámara ni el escáner láser pueden determinar esto por sí mismos. Si no se tiene información previa entonces se puede asumir un criterio conservador y asignarle el nivel de gravedad 2 si la reparación está en buen estado y el nivel de gravedad 3 si presenta fisuras, en cuyo caso el dispositivo que controla es la cámara de alta velocidad. El esquema de información básica es igual al de la tabla 27.

De acuerdo con el criterio expuesto en el objetivo específico 1, el sistema VisualPAV trabajará solo con los siguientes deterioros tipo B: fisuras longitudinales y transversales por junta de construcción, fisuras transversales, fisuras de borde, ojos de pescado, pérdida de ligante, pérdida de agregados, descascaramiento, exudación, afloramiento de agua y desintegración del borde del pavimento.

Cabe señalar que las fisuras de contracción térmica (FCT) no se considerarán en este proyecto, pues su causa obedece a periodos de hielo y deshielo que no se presentan en nuestro país. En su lugar se usará la categoría “Fisura Transversal (FT)” y se acoge el criterio del estudio del Invías de 2006 según el cual las FT se generan por: “Rigidización de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de filler, o al envejecimiento del asfalto. Bajas temperaturas o gradientes térmicos altos superiores a 30 grados. Reflexión de grietas en las capas inferiores generadas en materiales estabilizados. Zonas de contacto entre corte y terraplén por la diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante. Riego de liga insuficiente o ausencia total. Espesor insuficiente de la capa de rodadura” [16]. Al igual que con los deterioros tipo A, a los deterioros tipo B que no tenían un criterio numérico para su nivel de gravedad también se les asignó criterios numéricos de acuerdo con [16], aunque no en todos los casos fue posible, tal como se consigna en la siguiente tabla:

Tabla 28: Niveles de gravedad de fisuras en VisualPAV.

Deterioro	Nivel de gravedad			Unidad de medición
	1	2	3	
Fisuras longitudinales (FLJ) y transversales de junta de construcción (FTJ) , Fisuras Transversales (FT) y Fisuras de borde (FB)	Abertura de la fisura menor que 1 mm, cerrada o con sello en buen estado.	Abertura de la fisura entre 1 y 3 mm. Pueden existir algunas fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos y pueden presentar desportillamientos leves; existe una alta probabilidad de infiltración de agua a través de ellas.	Abertura de la fisura mayor de 3 mm. Pueden presentar desportillamientos considerables y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos. Puede causar movimientos bruscos a los vehículos.	Metros lineales [m]. Para fines del análisis del área total afectada [m ²] se multiplican los metros lineales por 0,6 m.

Tabla 29: Niveles de gravedad para diferentes tipos de desprendimientos en el sistema VisualPAV.

Deterioro		Nivel de gravedad					Unidad de medición
		1	2		3		
Ojos de pescado (O) por cada 100 m	Cantidad	< 5	5 a 10	< 5	>10	5 a 10	Unidades
	Diámetro (mm)	≤ 300	≤ 300	≤ 1000	≤ 300	≤ 1000	
Descascaramiento (D)	Prof (mm)	≤ 25	≤ 25	>25	>25		Metros cuadrados (m²)
	Área (m²)	≤ 0.8	>0.8	≤ 0.8	>0.8		

A continuación, se detalla para cada uno de los deterioros tipo B cuáles son los parámetros que controlan el nivel de gravedad y el dispositivo encargado de adquirir dichos datos.

7.2.8. Visualización de la información

Finalmente se propone una integración entre el software del dispositivo multisensorial y un sistema de información geográfica (SIG) como ArcGis para visualizar y administrar la información del estado de la red vial evaluada. En [39], [40] [41] se analiza el papel de los SIG y su integración con los sistemas de gestión de pavimentos llegando a importantes conclusiones como las siguientes:

- El manejo de la información de las inspecciones de pavimentos mediante SIG permite una evaluación del pavimento de manera histórica y zonificada [41].
- Permite una fácil definición del tramo del proyecto a intervenir. [41].

Tabla 30: Otros deterioros superficiales en VisualPAV.

Deterioro	Niveles de gravedad			Unidad de medida
	1	2	3	
Pérdida de la película de ligante (PL)	Cuando la superficie ha perdido su textura uniforme y se muestra ligeramente áspera o rugosa, con irregularidades de hasta 3 mm aproximadamente.	Cuando la profundidad de las irregularidades es mayor de 3 mm y llega a 10 mm. Se observan las partículas de agregado grueso, y se siente la vibración y una diferencia de sonido de las llantas al transitar sobre el pavimento	Si en la superficie ha comenzado a producirse la desintegración superficial de la capa de rodadura y se presentan desprendimientos evidentes y partículas sueltas sobre la calzada.	m ²
Pérdida de agregados (PA)	Los agregados gruesos han comenzado a desprenderse y se observan pequeños huecos cuya separación es mayor a 0,15 m.	Existe un mayor desprendimiento de agregados con separaciones entre 0,05 m y 0,15 m.	Existe desprendimiento extensivo de agregados finos y gruesos con separaciones menores a 0,05 m, haciendo la superficie muy rugosa y se observan agregados sueltos.	m ²
Exudación (EX)	La exudación se hace visible en la superficie, aunque en franjas aisladas y de espesor delgado que no cubre los agregados gruesos.	Apariencia característica, con exceso de asfalto libre que conforma una película que cubre parcialmente los agregados, con frecuencia localizada en las huellas del tránsito; se torna pegajoso en los climas cálidos.	Alta presencia de una cantidad significativa de asfalto en la superficie cubriendo casi la totalidad de los agregados, lo que le da un aspecto húmedo de intensa coloración negra y se torna pegajoso en los climas cálidos.	m ²

- La condición superficial del pavimento puede evaluarse en conjunto con otros datos de interés, como el volumen de tráfico, densidad poblacional, condiciones climáticas y características socio-económicas [40].
- Los sistemas de gestión de pavimentos se pueden integrar armónicamente con los SIG para garantizar una gestión más eficiente de los recursos disponibles para mantenimiento y reparaciones [39],[40],[41].

Tabla 31: Afloramientos en VisualPav.

Deterioro	Niveles de gravedad 1, 2, 3			Unidad de medida
Afloramiento de agua (AA)	Localizados y apenas perceptibles	Intensos	Muy intensos	Metros lineales [m]
Desintegración de los bordes del pavimento (DB)	Inicio de la desintegración, sectores localizados	La calzada ha sido afectada en un ancho de 500 mm o más.	Erosión extrema que conduce a la desintegración del revestimiento asfáltico.	Metros lineales [m]

Tabla 32: Uso de los dispositivos para controlar parámetros de nivel de gravedad.

Tipo de deterioro	Parámetro que controla el nivel de gravedad	Dispositivo encargado
Fisuras longitudinales y transversales por junta de construcción, Fisuras transversales y Fisuras de borde	Abertura de la fisura	Cámara y escáner láser
Ojos de pescado	Cantidad de ojos de pescado y diámetro de cada uno	Red neuronal
Pérdida de ligante	Textura e irregularidades de la superficie	Escáner láser
Pérdida de agregados	Profundidad de los desprendimientos	Escáner láser
Descascaramiento	Profundidad de los desprendimientos y área	Escáner láser
Exudación	El espesor y el área del exceso de asfalto	Cámara y escáner láser
Afloramiento de agua	Cantidad de agua que aflora	Cámara
Desintegración de los bordes del pavimento	ancho de calzada afectado	Cámara y escáner láser

7.3. Inspección manual y metodología estadística

7.3.1. Inspección manual

Se seleccionaron los tramos de pavimento en la ciudad de Santiago de Cali, con la condición de que fueran tramos con cierto nivel de deterioro. En total se inspeccionaron 6.1 km de pavimento. Las jornadas de trabajo se planificaron para realizar primero el abscisado del tramo a inspeccionar, con marcas cada 10 metros, para lo cual se utilizó pintura de aceite. Posteriormente se realizó la inspección de un carril y luego el otro, atendiendo el orden de izquierda a derecha en el sentido del abscisado, como sugiere el método Vizir.

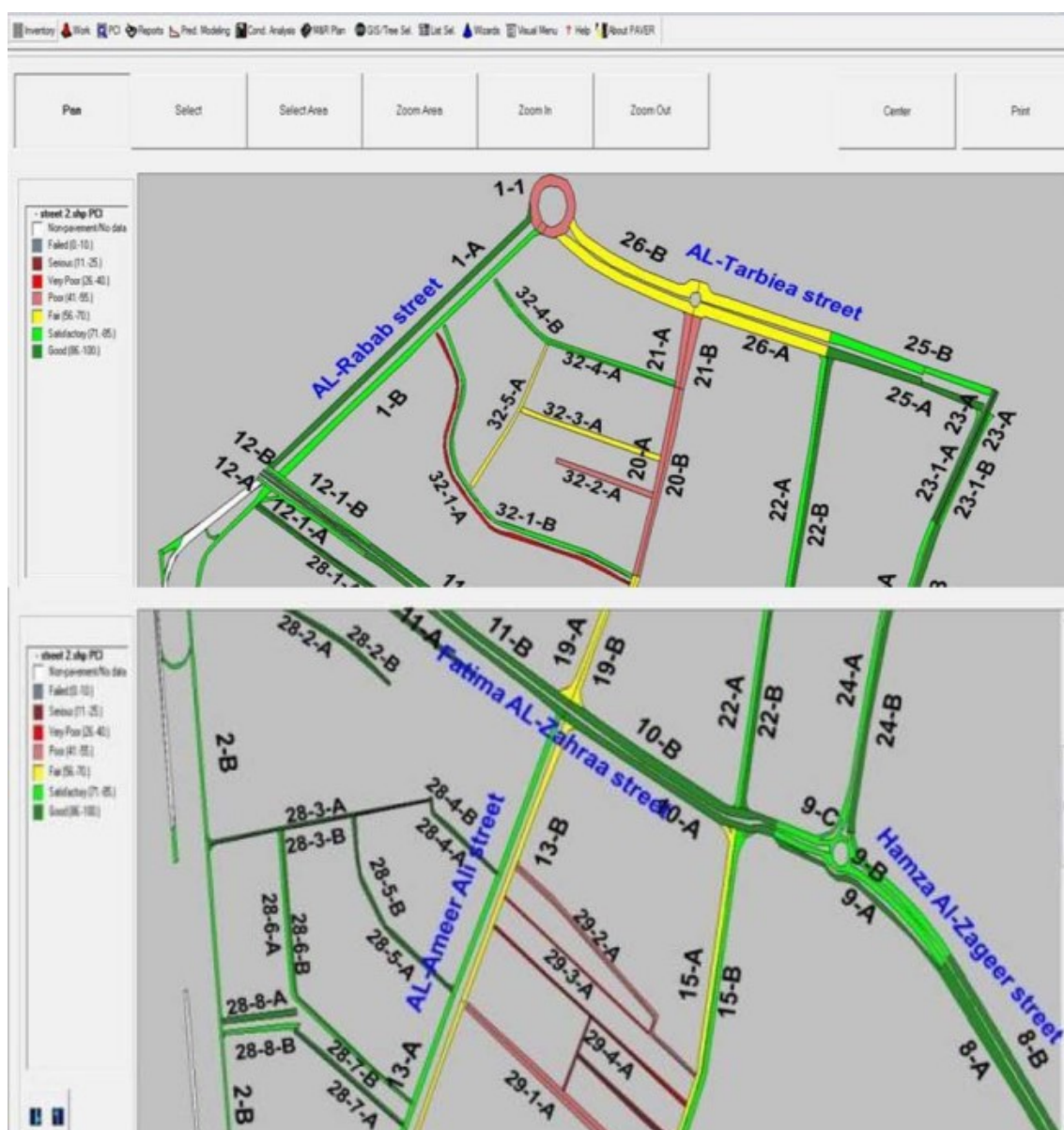


Figura 24: Red vial visualizada con ArcGIS.

El procedimiento fue llevado a cabo bajo condiciones normales de visibilidad, siempre en horas de la mañana. Se evitó hacer inspecciones durante la lluvia para no dejar de registrar algunos deterioros, como las fisuras, que se hacen difíciles de detectar cuando la superficie del pavimento está húmeda. Los deterioros tipo B que se repetían en todos los tramos fueron registrados en el campo de «observaciones» del formato B1, así como otros deterioros que fueron producto de reparaciones hechas con concreto por la instalación de redes de alcantarillado. No siempre la calzada tenía la señalización adecuada, por lo tanto, se tomaba como centro de la calzada la mitad de su ancho y a partir de allí se determinaba el ancho de cada carril.

A partir de esta información fue posible calcular el índice de deterioro superficial, siguiendo el procedimiento descrito en la revisión bibliográfica donde se explicó en detalle los fundamentos de este método. Los cálculos se realizaron en una hoja de Excel, luego de digitalizar los formatos B1 que se rellenaron en campo, y se generaron los formatos B2 y B3 y B4. Mediante el formato B4 se calculó el índice de deterioro superficial para

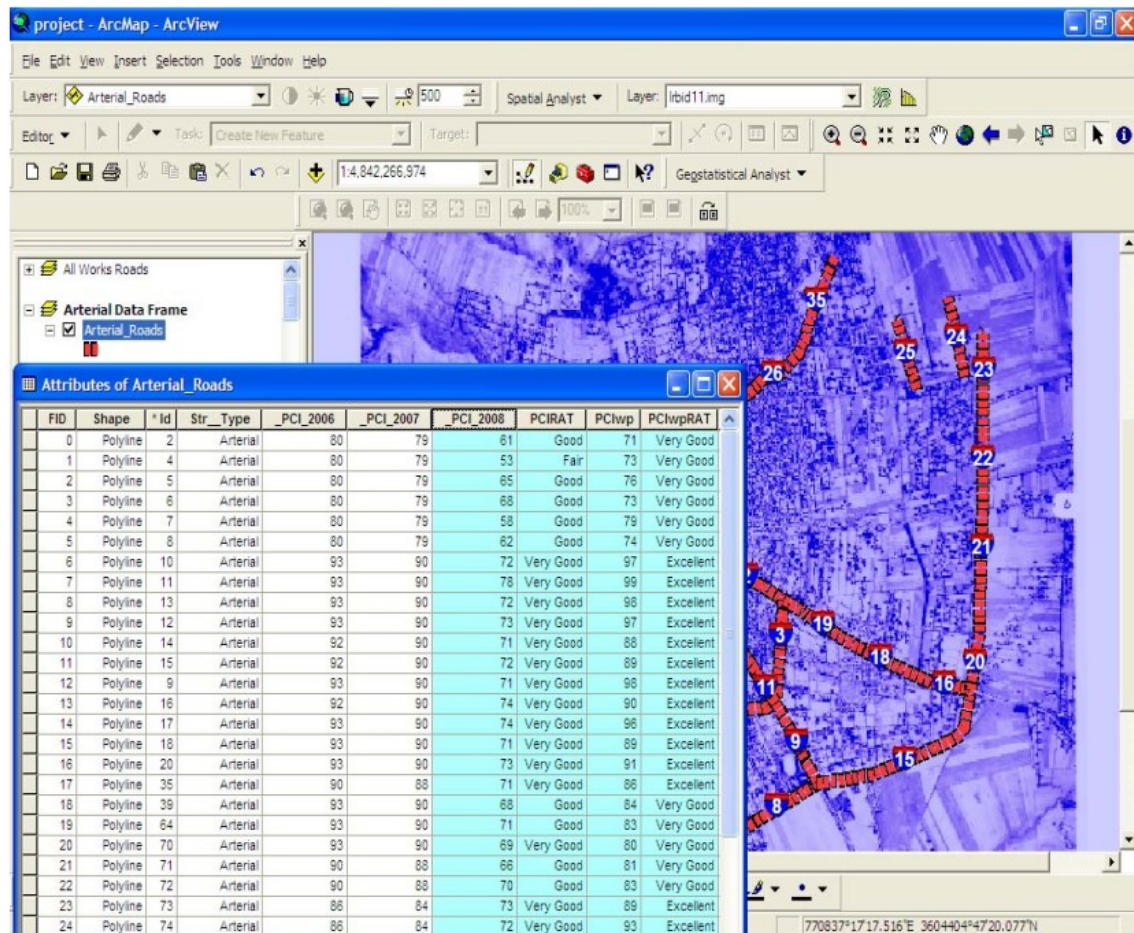


Figura 25: Atributos de un tramo evaluado en el software ArcGIS.

cada tramo de 100 metros de longitud por carril. A continuación, se muestran algunos tramos de pavimento inspeccionados en el sur de Santiago de Cali, así como algunos de los deterioros encontrados.



Figura 26: Procedimiento de inspección manual en campo.

FORMATO B1. REGISTRO DE CAMPO. INVENTARIO DE DETERIOROS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS DE CARRETERAS											
Nombre de la carretera:		Calle 16A con Gta 164				Proyecto:					
Código de la carretera:		Levantado por: Byron Salazar									
Tipo de vía:		Tipo de sección:		PR: K0+000		HOJA: 1		Ejemplo:			
Ancho de calzada (m):		Bermas:		al PR: K0+100		DE: 6		Nivel de gravedad			
Número de carriles:		Arboles:						Longitud (m)		Profundidad (mm)	
Carril auscultado:		Fecha:						Ejemplo:			
PR Abscisa (m)		0+00		0+10		0+20		0+30		0+40	
Deterioro Tipo A Condición Estructural	Ahuellamiento AH										
	Depresiones o hundimientos longitudinales DL										
	Depresiones o hundimientos transversales DT										
	Fisuras Longitudinales por Fatiga FLF										
	Fisuras piel de cocodrilo FPC	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Bacheos y parcheos B	5	10	10	10	10	10	4,1			4,5
	Fisura Longitudinal Junta de Construcción FLJ	3		6,4	1,5	1,3					
	Fisura Transversal Junta de Construcción FTJ										
	Fisura de Contracción Térmica FCT									2,7	2,7
	Fisuras Parabólicas FP										
Deterioro Tipo B Condición Funcional	Fisuras de Borde FB										
	Ojo de Pescado O										

Figura 27: Ejemplo de formato B1 diligenciado en campo.

7.3.2. Metodología estadística de análisis de datos

Para determinar la varianza de una población, se puede tomar una muestra de tamaño $n \geq 30$ y hacer inferencia por medio de la distribución normal estándar. Si el tamaño de la muestra es $n < 30$, este procedimiento no producirá probabilidades confiables. Las condiciones propias del caso de estudio, así como el tiempo y recursos económicos

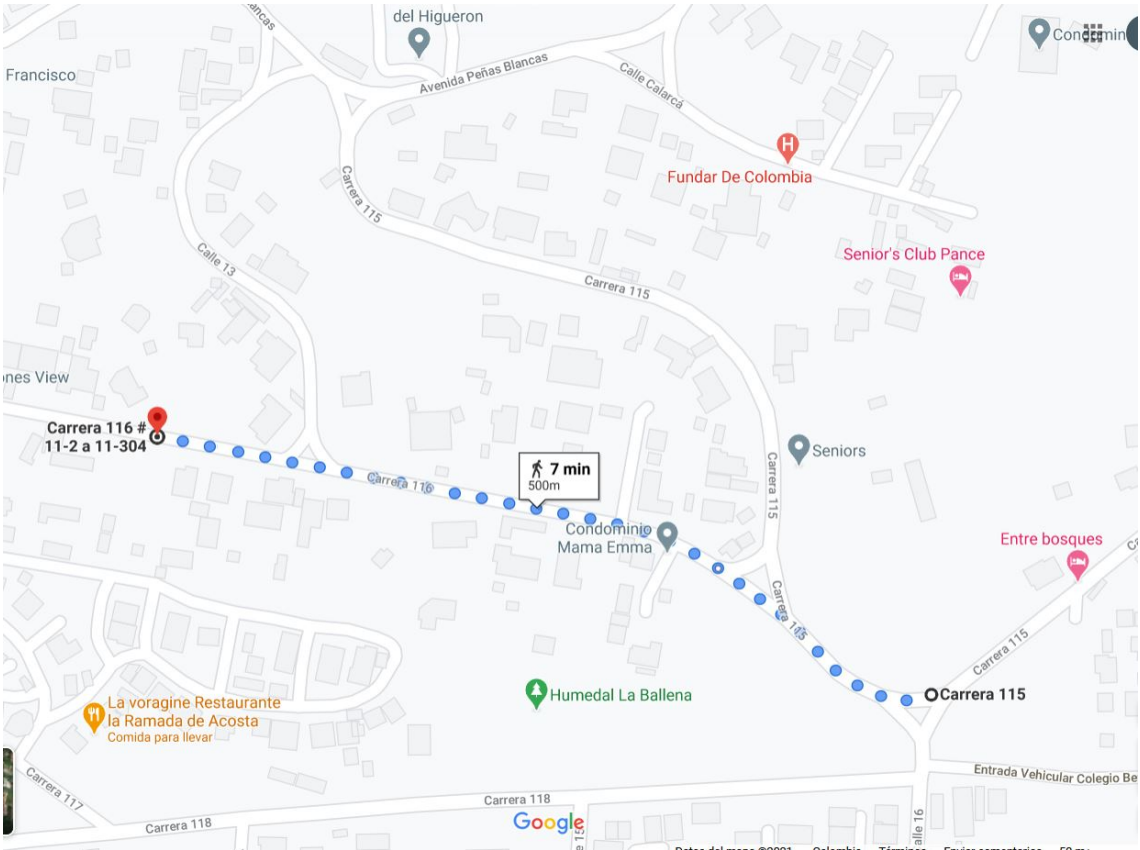


Figura 28: Tramo de 500 metros inspeccionado en la carrera 116 entre calles 16 y 13.



Figura 29: Deterioros encontrados en el tramo de la cra 116.

Tabla 33: Índices de deterioro superficial en el tramo de la cra 116.

PR		Índice de fisuración		Índice de deformación		Índice de deterioro superficial		Calificación	
DE	HASTA	carril 1	carril 2	carril 1	carril 2	carril 1	carril 2	carril 1	carril 2
0+0000	0+0100	4	4	0	0	4	4	regular	regular
0+0100	0+0200	5	5	0	0	4	4	regular	regular
0+0200	0+0300	5	4	4	4	7	7	malo	malo
0+0300	0+0400	4	2	1	3	5	5	malo	malo
0+0400	0+0500	3	3	2	0	4	3	regular	regular

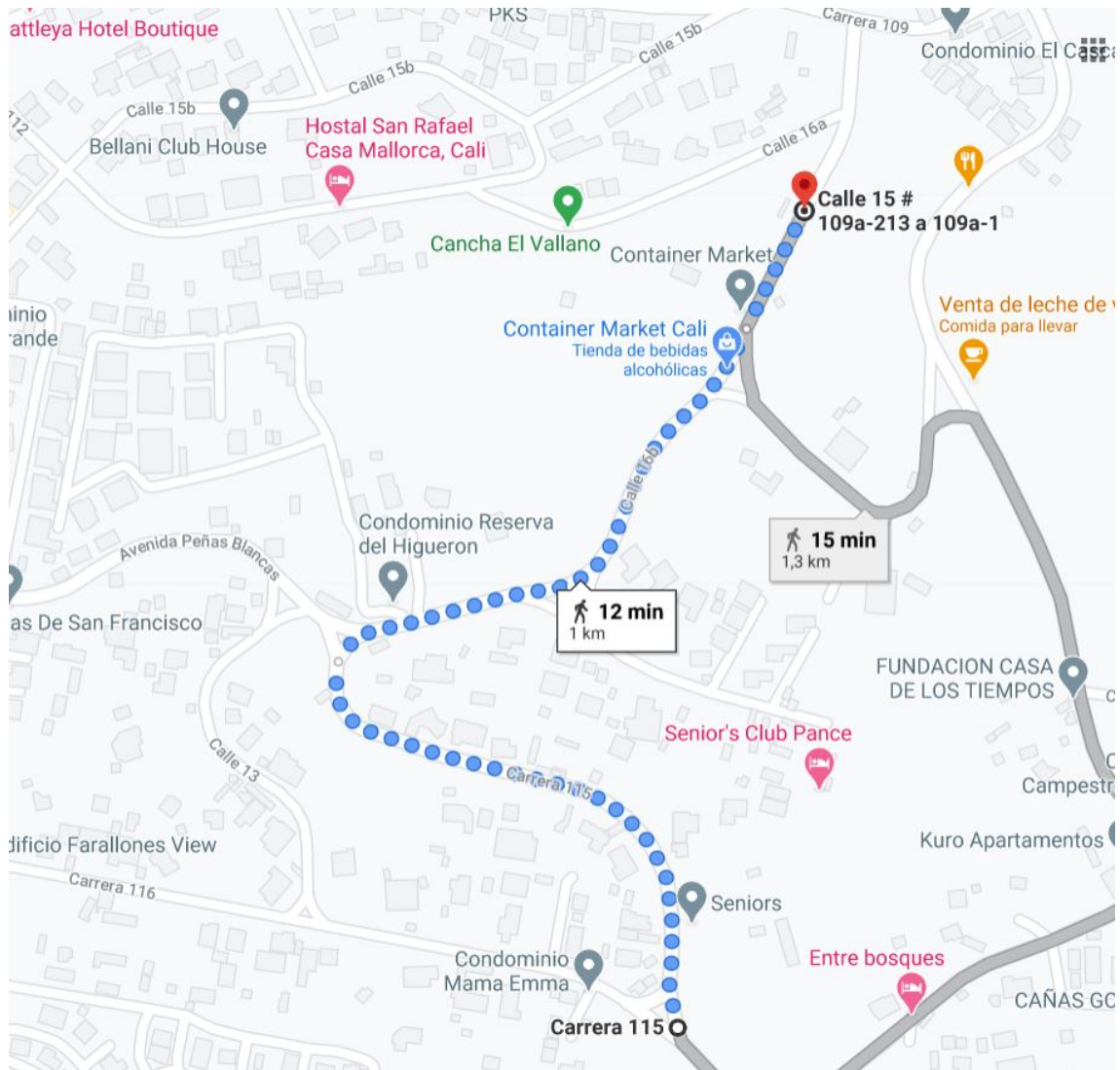


Figura 30: Tramo de 1 km entre carrera 115 y 109, barrio Cañasgordas.



Figura 31: Baches encontrados en el tramo de la figura anterior.

requeridos, son determinantes para definir el tamaño de la muestra. En este caso, hacer 30 inspecciones automatizadas por tramo de pavimento podría no ser viable. Por esta razón,

PR		Índice de fisuración		Índice de deformación		Índice de deterioro superficial		Calificación	
DE	HASTA	carril 1	carril 2	carril 1	carril 2	carril 1	carril 2	carril 1	carril 2
K0+000	K0+100	3	3	0	0	3	3	REGULAR	REGULAR
K0+100	K0+200	0	2	2	2	2	3	BUENO	REGULAR
K0+200	K0+300	4	3	0	0	4	3	REGULAR	REGULAR
K0+300	K0+400	4	5	2	0	5	4	MALO	REGULAR
K0+400	K0+500	5	5	1	0	5	4	MALO	REGULAR
K0+500	K0+600	5	5	0	0	4	4	REGULAR	REGULAR
K0+600	K0+700	2	4	1	1	3	5	REGULAR	MALO
K0+700	K0+800	2	5	0	2	2	5	BUENO	MALO
K0+800	K0+900	2	3	0	0	2	3	BUENO	REGULAR
K0+900	K1+000	4	3	0	0	4	3	REGULAR	REGULAR

Tabla 34: Índices de deterioro superficial en el tramo de la cra 115.

se propone la metodología de análisis estadístico usando la distribución t-student, la cual permite trabajar con muestras de tamaño $n < 30$ [42].

La distribución t-student, fue planteada por William Sealy Gosset (1896-1937) en un artículo publicado en 1908, en el cual demostró que, cuando el tamaño de una muestra es menor que 30, las probabilidades en los extremos de la distribución son un poco mayores comparadas con la distribución normal, como se observa en la siguiente figura:

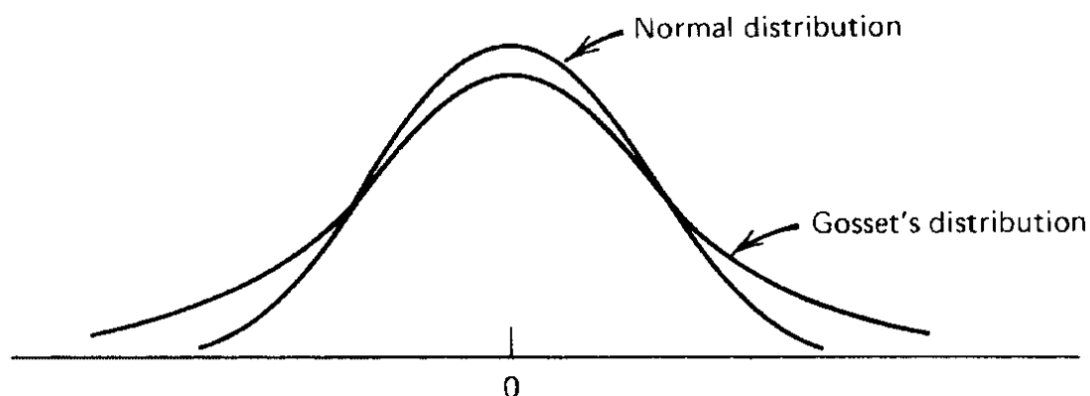


Figura 32: Comparación entre la distribución normal y la distribución t-student. Tomada de «Statistics for Research» de Dowdy, Weardon, Chilko. 3ed - 2004.

La distribución t-student se expresa como:

$$t = \frac{\bar{y} - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad (4)$$

Donde:

$\bar{y}$: media de la muestra

μ : valor teórico cierto «Ground Truth»

$$s^2 = \frac{\sum y^2 - (\sum y)^2/n}{n - 1}$$

s : desviación estándar

n : tamaño de la muestra.

En su artículo, Gosset mostró que a medida que aumenta n , la distribución t-student se aproxima a la distribución normal, y que depende de los grados de libertad $v = n - 1$, como se observa en la figura:

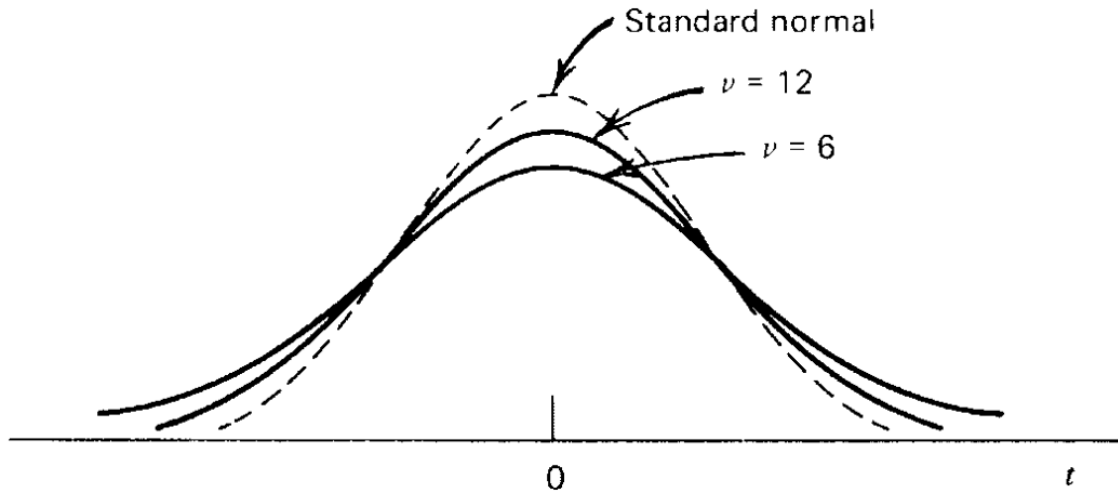


Figura 33: Distribución t-student para diferentes grados de libertad. Tomado de Dowdy, 2004

Para realizar una inferencia con un factor de confianza del 95 % se debe usar $\alpha = 0,05$ y usar las tablas de la distribución (ver anexo). Como la distribución t-student es simétrica, entonces se cumple que:

$$t_{1-\alpha,v} = -t_{\alpha,v}$$

El índice de deterioro superficial obtenido de la inspección manual será μ y se tomará como Ground Truth. La media de las inspecciones automatizadas será $\bar{y}$. El procedimiento consiste en probar una hipótesis sobre μ . El análisis se hace para cada sección de 100 metros. Se parte del supuesto de que los datos correspondientes a la inspección automatizada siguen una distribución simétrica, unimodal y con una varianza no significativa.

Ejemplo: Se realizaron 15 inspecciones de una sección de 100 metros de pavimento asfáltico usando un sistema automatizado. De cada una se obtuvo el índice de deterioro superficial automatizado I_{sa} . Para corroborar la veracidad de estas inspecciones se realizó una inspección manual y se obtuvo el índice I_s que se tomará como Ground Truth.

Sección (100 m)	Inspección Manual I_s	Inspección automatizada I_{sa}				
		5	5	5	4	5
1	5	5	4	5	4	6
		5	5	6	5	5

Tabla 35: Datos de ejemplo de inspección manual y automatizada.

$$H_0 : \mu = I_s = 5$$

$$H_a : \mu \neq I_s$$

En este caso se tiene $n = 15$, $v = n - 1 = 14$. Con $\alpha = 0.05$, la hipótesis nula debe ser rechazada si $|t| \geq t_{0.05,14} = 1.761$. El valor 1.761 se obtiene al consultar la tabla de la distribución t-student.

$$\bar{y} = 4,93$$

$$s^2 = 0,35$$

$$s = 0,59$$

$$t = \frac{\bar{y} - \mu}{s/\sqrt{n}} = \frac{4,93 - 5}{0,59/\sqrt{15}} = -0,46$$

Como $|t| < 1,761$, se valida la hipótesis nula, es decir, los datos de la inspección automatizada son congruentes con la Ground Truth con un factor de confianza del 95 %.

El intervalo de confianza para μ viene dado por la expresión:

$$CI_{1-\alpha} : \bar{y} - t_{\alpha/2, v} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{y} + t_{\alpha/2, v} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

En este caso se busca un factor de confianza del 95 %, entonces la expresión anterior se escribe así:

$$CI_{0,95} : \bar{y} \pm t_{0,025,14} \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$CI_{0,95} : 4,93 \pm 2,145 * 0,152$$

$$CI_{0,95} : 4,93 \pm 0,33$$

$$4,60 \leq \mu \leq 5,26$$

8. Análisis de resultados y conclusiones

- Las redes neuronales entrenadas con la base de datos proporcionada alcanzan una exactitud del 95 %, lo cual significa un desempeño altamente satisfactorio en la clasificación de 15 tipos de fallas. Los modelos pre-entrenados también alcanzaron un desempeño satisfactorio del 95 %. Estos porcentajes, de acuerdo con la literatura consultada, indican que el sistema VisualPAV tendrá un buen desempeño en la clasificación del tipo de deterioro.
- El resultado anterior permitiría al sistema VisualPAV ser una fuente de información importante para apoyar la toma de decisiones sobre las labores de mantenimiento y rehabilitación de acuerdo con la normativa vigente de Invías.
- La metodología Vizir proporciona información útil y veraz sobre la condición superficial del pavimento y su implementación por medio de sistemas de inspección automatizada permite tener una fuente de información confiable para nutrir los sistemas de gestión de pavimentos.
- La base de datos de deterioros en pavimentos asfálticos y la definición de las funcionalidades del software permitió a los ingenieros electrónicos desarrollar el sistema VisualPAV como dispositivo para adquisición de datos de la superficie del pavimento. Sin embargo, las dificultades presentadas por la pandemia de Covid-19 y la situación de orden público en Santiago de Cali, impidieron la culminación total del proyecto, por lo que no se pudo analizar la información recolectada en campo por el sistema.
- La metodología estadística propuesta permite evaluar el rango aceptable para variaciones significativas en el índice de deterioro superficial de una sección de pavimento, comparando la inspección manual con la automatizada. En caso de que se encontraran diferencias significativas se podría proceder a una revisión hacia atrás de las características de los deterioros, como extensión y nivel de gravedad, y aplicar el mismo método a estos parámetros.

9. ANEXOS

FORMATO B.2 RESUMEN DETERIOROS DEL TIPO "A" EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA CARRETERAS POR SECCIÓN 100 m																		
Nombre de la carretera: _____										Proyecto: _____								
Código de la carretera: _____										Elaboró: _____ Fecha(dd/mm/aa): 								
PR: _____ al PR _____										Aprobó: _____ Fecha(dd/mm/aa): Hoja: _____ de: _____								



PR		Longitud de Muestreo (m)	Ancho de calzada (m)	Ahuellamiento y otras deformaciones estructurales						Fisuras longitudinales por fatiga			Fisuras piel de cocodrilo			Bacheos y parcheos			Nivel de Gravedad Representativo G _R
				AH	DL	DT	Long (m)	Deterioro %	Gravedad	FLF	Deterioro %	Gravedad	FPC	Deterioro %	Gravedad	B	Deterioro %	Gravedad	
DE	HASTA			Long (m)	Long (m)	Long (m)	Long (m)			Long (m)			Long (m)			Long (m)			
0+0000	0+0100	100									0.00			0.00			0.00		
0+0100	0+0200	100	9.25	24.34	15.00	50.00				78.45	78.45			0.00			0.00		
0+0200	0+0300	100									0.00			0.00			0.00		
0+0300	0+0400	100									0.00			0.00			0.00		
0+0400	0+0500	100									0.00			0.00			0.00		
0+0500	0+0600	100									0.00			0.00			0.00		
0+0600	0+0700	100									0.00			0.00			0.00		
0+0700	0+0800	100									0.00		64.00	64.00			0.00		
0+0800	0+0900	100									0.00			0.00			0.00		
0+0900	0+1000	100									0.00			0.00			0.00		
0+1000	1+0055	55								45.00	81.82			0.00			0.00		
1+0055	1+0155	100									0.00			0.00			0.00		

Figura 34: Formato B2. Resumen de deterioros tipo A por sección de 100 m.

FORMATO B.3 RESUMEN DETERIOROS DEL TIPO "B" EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA CARRETERAS POR SECCIÓN 100 m																																			
Nombre de la carretera: _____												Proyecto: _____												Elaboró: _____				Fecha(dd/mm/aa):							
Código de la carretera: _____												PR: _____ al PR: _____												Aprobó: _____				Fecha(dd/mm/aa):				Hoja: ____ de: ____			
PR		Longitud de Muestreo (m)	Ancho de calzada (m)	Fisuras								Deformación		Desprendimientos					Afloramientos					Otros Deterioros											
				FLJ		FTJ		FCT		FP		FB		DM		O	PL	PA	D	PU	EX	AM	AA	DB	ECB	EB	S								
DE	HASTA			Long (m)	G	Long (m)	G	Long (m)	G	Long (m)	G	Long (m)	G	Long (m)	G	Unidad	G	Long (m)	G	Long (m)	G	Área (m²)	G	Long (m)	G	Long (m)	G	Long (m)	G	Long (m)	G	Long (m)	G		
0+0000	0+0100	100	7.00																																
0+0100	0+0200	100																																	
0+0200	0+0300	100																																	
0+0300	0+0400	100																																	
0+0400	0+0500	100																																	
0+0500	0+0600	100																																	
0+0600	0+0700	100																																	
0+0700	0+0800	100																																	
0+0800	0+0900	100																																	
0+0900	0+1000	100																																	
0+1000	1+0055	55																																	
1+0055	1+0155	100																																	

Figura 35: Formato B3. Resumen de deterioros tipo B por sección de 100 m.

FORMATO B.4 RESUMEN CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DETERIORO SUPERFICIAL Is
POR SECCIÓN 100 m



Nombre de la carretera: _____ Proyecto: _____

Código de la carretera: _____ Elaboró: _____ Fecha(dd/mm/aa): _____

PR: _____ al PR _____ Aprobó: _____ Fecha(dd/mm/aa): _____ Hoja: _____ de: _____

Examen Visual

(1) Índice de Fisuración If		Extension	0 a 10 %	10 a 50 %	> 50 %
	Gravedad				
	1	1	2	3	
	2	2	3	4	
	3	3	4	5	

Índice de Deformación Id		Extension	0 a 10 %	10 a 50 %	> 50 %
	Gravedad				
	1	1	2	3	
	2	2	3	4	
	3	3	4	5	

(2) Cálculo efectuado separadamente de la fisuración longitudinal y la fatiga. Se adoptan el mayor de los dos valores calculados.

Primer Calificación del Índice de Deterioro, Is

If	0	1 - 2	3	4 - 5
Id				
0	1	2	3	4
1 - 2	3	3	4	5
3	4	5	5	6
4 - 5	5	6	7	7

Índice de Deterioro Superficial Is. 1 a 7

	Extension	0 a 10 %	10 a 50 %	> 50 %
Gravedad				
1	0	0	0	
2	0	0	+1	
3	0	+1	+1	

Corrección por reparación

PR		Cálculo del Índice de Fisuración (If)							Cálculo del Índice de Deformación (Id)			Índice de Deterioro Superficial Inicial Is	Corrección y Cálculo Índice de Deterioro Superficial			Categoria	
		Fisuras longitudinales por fatiga (FLF)			Fisuras piel de cocodrilo (FPC)		Índice de Fisuración If	Ahuellamiento y otras deformaciones estructurales (AH, DL, DT)			Bacheos y parcheos		Índice de Deterioro Superficial Final Is				
		Extensión % de longitud	Gravedad	If(1)	Extensión % de longitud	Gravedad		If(2)	Extensión % de longitud	Gravedad	Id			Extensión % de longitud	Gravedad		Corrección
DE	HASTA																
0+0000	0+0100	45.0	2						35.0	3							
0+0100	0+0200																
0+0200	0+0300																
0+0300	0+0400																
0+0400	0+0500																

Figura 36: Formato B4 para cálculo del índice de deterioro superficial.

Tabla 36: Posibles técnicas de rehabilitación de acuerdo al tipo de deterioro. Tomado de Invías 2008.

CATEGORÍA DEL DETERIORO	TIPO DE DETERIORO	R1						R2		R3			R4		TRATAMIENTOS PREVIOS											
		RESTAURACIÓN						REFUERZO		RECICLADO			RECONSTRUCCIÓN													
		TRATAMIENTO SUPERFICIAL	RIEGO EN NEGRO	LECHADA ASFÁLTICA	MICROAGLOMERADO (EN FRÍO O CALIENTE)	SELLO ARENA-ASFALTO	MEZCLA DRENANTE	SOBRECAPA DELGADA	SOBRECAPA ESTRUCTURAL	FRESADO Y SOBRECAPA	RECICLADO SUPERFICIAL EN CALIENTE	RECICLADO EN FRÍO EN EL SITIO	RECICLADO EN PLANTA EN CALIENTE	REMOCIÓN Y REEMPLAZO DE CAPAS	WHITETOPPING	PARCHEO	BACHEO	MEJORAMIENTO DEL DRENAJE	GEOTEXTILES*	GEOMALLAS*	SAMI	SELLO DE GRIETAS	RUTEO Y SELLO	MICROFRESADO	FRESADO RELLENO DE ZONAS AHUELLADAS	CAPA DE NIVELACIÓN
FISURAS	Longitudinal	x		o	o	o	x		•	o	x	x	x	x	x	x	x	x	•	•	x	o	x			
	Piel cocodrilo						x		•	x	x	•	•	•	•	x	•	o	o	•	x	o			o	
	Transversal	x		o	o				•	•	•	o	•	o	o	o	o		•	•	•	•	•	o	o	
	Reflexión	x		o	o				•	•	•	o	•	o	o	o	o		•	•	•	•	•	o	o	
	Bloque	x		o	o				o	•	•	o	•	o	o				•	•	•	•	o	o	o	
	Borde	o		o	o				o	•	o	o	o				•	o	o		o					
DEFORMACIÓN	Ahuellamiento				x				•	•	•	o	•	•	•	•	•	o						o	•	•
	Ondulaciones							•	o	•	•	o	o	o	o	•	o							•	•	o
	Levantamientos							o	•	•	o	•	•	•	•	•	•							•	•	•
	Depresiones							o	o	o		o	o	•	•	o	•	o						•	o	•
	Resaltos en sobrecapas			o	•				o			o	o	o	o	o	•		•		o		o	•	•	
DESPRENDIMIENTOS	Descascaramiento								•			o	•	o	o		•			o						
	Ojos pescado								•	o		o	•	o	o	o	•		o	•						
	Pérdida de agregados	•	o	•	•	o	•	•	o	•	•	o	•	o	o	•	•	o	•	•				o	•	
	Pérdida de ligante								•			•	•	o	o		•		o	o						
	Pulimento de agregados	•		•	•	o	•	o	o	•	•		o	o	o	•	•							•	•	
	Bombeo								o			•	•	•	•		•		o	o						
OTROS	Segregación							o	o	o	o	•	•	o	o	o	•		o	o						
	Cuarteado							•	o	o	•	o	•	o	o	•	•							•	•	
	Exudación			o	o		•		o	o	o	o	•	o	o	o	•			o				o	•	

• Tratamiento más adecuado o Tratamiento marginal * Requiere sobrecapa y otro tratamiento superficial apropiado
x Se requieren técnicas o productos especiales **Ocasionalmente se puede requerir una capa de nivelación

Referencias

- [1] Departamento Nacional de Planeación. «Plan nacional de desarrollo 2018-2022.» (2019), dirección: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Resumen-PND2018-2022-final.pdf> (visitado 01-10-2019).
- [2] Instituto Nacional de Vías. «Estado de la red vial criterio técnico primer semestre de 2021.» (2021), dirección: <https://www.invias.gov.co/index.php/component/content/article/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial> (visitado 02-08-2021).
- [3] Invías, «INV E-813-13, Determinación del índice de deterioro superficial de un pavimento asfáltico mediante el método VIZIR,» en *Normas de ensayo de materiales para carreteras*. 2013.
- [4] H. Porras Díaz y col., «Sistemas automáticos para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles,» *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 2014. dirección: <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v24n1/v24n1a05.pdf>.
- [5] T. Coenen y A. Golroo, «A review on automated pavement distress detection methods,» *Cogent engineering*, 2017. DOI: [/10.1080/23311916.2017.1374822](https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1374822).
- [6] Allied Vision. «Prosilica gt1290c.» (2019), dirección: <https://www.alliedvision.com/en/support/technical-documentation/prosilica-gt-documentation.html> (visitado 01-10-2019).
- [7] Hokuyo. «Distance Data Output/UTM-30LX.» (2019), dirección: <https://www.hokuyo-aut.jp/search/single.php?serial=169> (visitado 01-10-2019).
- [8] L. F. Macea Mercado y col., «Un sistema de gestión de pavimentos basado en nuevas tecnologías para países en vías de desarrollo,» *Ingeniería investigación y tecnología*, 2016. DOI: [/10.1016/j.riit.2016.06.007](https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.06.007).
- [9] Solminihaç, *Gestión de infraestructura vial*. 2001.
- [10] Zakeri y col., «Image based techniques for crack detection, classification and quantification in asphalt pavement: a review,» *Archives of computational methods in engineering*, 2016. DOI: [/10.1007/s11831-016-9194-z](https://doi.org/10.1007/s11831-016-9194-z).
- [11] Departamento Administrativo de Planeación Municipal, *Plan Integral de Movilidad Urbana, Santiago de Cali*, 2017.
- [12] Pavement Interactive. «Asphalt pavement.» (2019), dirección: <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/pavement-structure/>. (visitado 01-10-2019).
- [13] National Asphalt Pavement Association, *HMA Pavement mix type selection guide*, 2001.
- [14] American Society for Testing and Materials, *6433-18. Standard practice for roads and parking lots pavement condition index surveys*, 2018.
- [15] Instituto Nacional de Vías INVÍAS, «Instructivo para la inspección visual y la evaluación de los deterioros de los pavimentos asfálticos de carreteras,» en 2008, cap. Anexo B.
- [16] Invías. «Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.» (2006), dirección: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file> (visitado 10-10-2019).

-
- [17] Instituto Nacional de Vías INVÍAS, *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. 2008.
- [18] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Pavement Management Guide*, 2.^a ed. AASHTO, 2012.
- [19] American Society for Testing and Materials, *E 1166. Standard guide for network level pavement management*, 2000.
- [20] Chollet, *Deep learning with python*. Manning publications, 2017.
- [21] Z. Fan y col., *Automatic pavement crack detection based on structured prediction with the convolutional neural network*, 2018. dirección: <https://arxiv.org/pdf/1802.02208.pdf>.
- [22] S. Mokhtari, «Analytical study of computer vision-based pavement crack quantification using machine learning techniques,» Tesis doct., University of Central Florida, 2015. dirección: http://etd.fcla.edu/CF/CFE0005671/Soroush-Mokhtari-PhD-Dissertaion-Final_Version.pdf.
- [23] B. Li y col., «Automatic classification of pavement crack using deep convolutional neural network,» *International Journal of Pavement Engineering*, 2019. DOI: [/10.1080/10298436.2018.1485917](https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1485917).
- [24] N.-D. Hoang, «An artificial intelligence method for asphalt pavement pothole detection using least squares support vector machine and neural network with steerable filter-based feature extraction,» *Advances in Civil Engineering*, 2018. DOI: [/10.1155/2018/7419058](https://doi.org/10.1155/2018/7419058).
- [25] N. Shatnawi, «Automatic pavement cracks detection using image processing techniques and neural network,» *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018. dirección: https://thesai.org/Downloads/Volume9No9/Paper_50-Automatic_Pavement_Cracks_Detection.pdf.
- [26] C. V. Dung y L. D. Anh, «Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network,» *Automation in Construction*, 2018. DOI: [/10.1016/j.autcon.2018.11.028](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.028).
- [27] Timm y McQueen, *A study of manual vs automated pavement condition surveys*. 2004.
- [28] Sivanewaran y col., *Transition from manual to automated pavement condition surveys: Washington State's experience*, 2004.
- [29] Ragnoli y col., «Pavement distress detection methods: a review,» *Infrastructures*, 2018. DOI: [/10.3390/infrastructures3040058](https://doi.org/10.3390/infrastructures3040058).
- [30] World Road Association, *State of the art in monitoring road condition and road-vehicle interaction*, 2016.
- [31] U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration. «LTPP Infopave.» (2019), dirección: <https://infopave.fhwa.dot.gov/Media/DistressMapsImages/> (visitado 01-07-2019).
- [32] H. Maeda, Y. Sekimoto, T. Seto, T. Kashiyama y H. Omata, «Road Damage Detection and Classification Using Deep Neural Networks with Smartphone Images,» *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*,
-

- [33] A. Dutta, A. Gupta y A. Zisserman. «VGG Image Annotator (VIA).» (2019), dirección: <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/software/via/> (visitado 01-01-2019).
- [34] B. B. X. Ríos y col., «Pavement Distress Detection and Classification Using a Convolutional Neural Network,» 2021.
- [35] American Association of State Highway and Transportation Officials, *Pavement Management Guide*. AASHTO, 2012.
- [36] Gesinfra Consultores, *Contexto, uso y aplicación del HDM-4 en latinoamérica*, Abu Dhabi, 2019.
- [37] G. Consultores. «Qué es el HDM-4 y cuál es su campo de aplicación.» (2020), dirección: <http://www.gesinfraconsultores.com/que-es-el-hdm-4-y-cual-es-su-campo-de-aplicacion/> (visitado 31-07-2020).
- [38] Invías, *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. 2012.
- [39] M. Obaidat y col., «Integration of Geographic Information System (GIS) and PAVER System Toward Efficient Pavement Maintenance Management System (PMMS),» *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 12, n.º 3, 2018.
- [40] A. Silva y col., «Gestión de pavimentos basado en sistemas de información geográfica (sig): una revisión,» *Ingeniería solidaria*, vol. 14, n.º 26, 2018.
- [41] H. Maeda y col., «Road Damage Detection and Classification Using Deep Neural Networks with Smartphone Images,» *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018.
- [42] Dowdy, Weardon, Chilko, *Statistics for Research*. 2004.